FAO中文出版计划项目丛书

粮农组织渔业及
水产养殖技术文件第702号

联合国粮食及农业组织　编著
隋丽英　译

卤虫生产与使用手册

Manual on *Artemia* Production and Use



中国农业出版社

联合国
粮食及
农业组织

FAO中文出版计划项目丛书

粮农组织渔业及
水产养殖技术文件第702号

卤虫生产与使用手册

联合国粮食及农业组织　编著
隋丽英　译

中国农业出版社
联合国粮食及农业组织
2026 · 北京

引用格式要求：
粮农组织。2026。《卤虫生产与使用手册》。粮农组织渔业及水产养殖技术文件第702号。中国北京，中国农业出版社。https://doi.org/10.4060/cd0313zh

本信息产品中使用的名称和介绍的材料，并不意味着联合国粮食及农业组织（粮农组织）对任何国家、领地、城市、地区或其当局的法律或发展状况，或对其国界或边界的划分表示任何意见。提及具体的公司或厂商产品，无论是否含有专利，并不意味着这些公司或产品得到粮农组织的认可或推荐，优于未提及的其他类似公司或产品。

ISBN 978-92-5-140539-0（粮农组织）
ISBN 978-7-109-35032-8（中国农业出版社）

© 粮农组织，2026年



保留部分权利。本作品根据知识共享署名4.0国际公共许可（CC BY 4.0：https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.zh-hans）公开。

根据该许可条款，本作品可被复制、再次传播和改编，但必须恰当引用。使用本作品时不应暗示粮农组织认可任何具体的组织、产品或服务。不允许使用粮农组织标识。如翻译或改编本作品，必须包含所要求的引用和下述免责声明：“本译文［或改编］并非由联合国粮食及农业组织（粮农组织）完成。粮农组织不对本译文［或改编］的内容或准确性负责。原英文版本应为权威版本。”

涉及本许可产生的任何争端如未能友好解决，应根据联合国国际贸易法委员会（贸法委）的仲裁规定提请仲裁。仲裁裁决为此类争议的最终裁决，对各方具有约束力。

第三方材料。知识共享署名4.0国际公共许可协议（CC BY 4.0）不适用于本出版物中所含非粮农组织版权材料。如需再利用本作品中属于第三方的材料（如表格、图形或图片），用户需自行判断再利用是否需要许可，并自行向版权持有者申请许可。对任何第三方所有的材料侵权而导致的索赔风险完全由用户承担。

粮农组织照片。本作品中可能包含的粮农组织照片不属于上文知识共享许可范围。任何照片的使用征询应递交至：photo-library@fao.org。

销售、权利和授权。粮农组织信息产品可在粮农组织网站（https://www.fao.org/publications/zh）获得，印刷版本可通过网站公布的经销商购买。关于粮农组织出版物的一般问询应递交至：publications@fao.org。关于权利和出版物授权的征询应递交至：copyright@fao.org。

FAO中文出版计划项目丛书

指导委员会

主　任　韦正林

副主任　顾卫兵　郭娜英　郭　辉

委　员　徐　明　王　静　董茉莉　宋雨星

傅永东

FAO中文出版计划项目丛书

译 审 委 员 会

主　任　顾卫兵

副主任　郭　辉　徐　明　王　静

编　委　宋雨星　刘海涛　张夕珺　宋　莉
余　扬　闫保荣　赵　文　赵　颖
郑　君　穆　洁　孔双阳　曾子心
周天蕙　王宏磊　王梦晗

本 书 译 审 名 单

翻　译　隋丽英[1]

审　校　隋丽英　王梦晗

注：1 隋丽英，天津科技大学海洋与环境学院教授。

ABSTRACT 摘　要

本手册深入阐述了卤虫（*Artemia*）作为海水甲壳类和鱼类幼苗关键生物饵料的重要性。随着全球水产养殖产业的持续发展，水产育苗对卤虫卵和卤虫的需求不断增加。据统计，卤虫为超过9 000亿尾甲壳类和鱼类幼苗提供了生物饵料，从而为产值达数十亿美元的水产养殖业做出了贡献。

本手册是对粮农组织1996年出版的《生物饵料卤虫生产与使用手册》的全面更新。第一章概述了卤虫的形态特征和生活史的各个阶段，并介绍了其生态学作用和全球范围的资源分布；描述了卤虫分类学信息，以及不同卤虫品系的特征和卤虫卵生物学。第二章详细阐述了在池塘和罐体系统中生产卤虫的基本原则和操作过程，以及卤虫成虫和卤虫卵采收和加工技术。第三章描述了在育苗场使用卤虫卵产品的适宜条件和设施要求，详细介绍了评估卤虫卵产品质量的方法。附录部分配有带插图的实用工作表，以帮助读者更好地理解如何进行有效地操作。

本手册强调了优化卤虫使用的成本效益和营养质量的重要性，反映了卤虫生物学和全球卤虫使用实践的最新发现，提供了对卤虫生物学、生产和使用的宝贵见解，以及其在水产养殖中正确使用的指南和方法，是从事卤虫相关工作人员的重要参考书籍。

缩略语 ACRONYMS

AAC	中国卤虫联盟（中国）
ALA	α-亚麻酸
ARA	花生四烯酸
ARARC	亚洲区域卤虫参考中心（中国）
ATP	三磷酸腺苷
BFT	生物絮团技术
BY	大亚罗沃耶湖
CFU	菌落形成单位
C:N	碳氮比
DAG	二酰基甘油
DHA	二十二碳六烯酸
DNA	脱氧核糖核酸
DO	溶解氧
DW	干重
EDTA	乙二胺四乙酸
EFA	必需脂肪酸
EPA	二十碳五烯酸
FAA	游离氨基酸
FAO	联合国粮食及农业组织
FBD	流化床干燥机
FFA	游离脂肪酸
FID	火焰离子化检测器
GART	悉生卤虫培养系统
GC	气相色谱
GSL	大盐湖
GSLBSC	大盐湖卤虫联盟（美国）
H%	孵化率
HEff	孵化效率

HPLC	高效液相色谱
HPTLC	高效薄层色谱
HUFA	高不饱和脂肪酸
IAAC	国际卤虫水产养殖联盟
ICP – MS	电感耦合等离子质谱
INVE	英伟水产公司（比利时）
KBG	卡拉博加兹戈尔湾
LA	亚油酸
LAARC	水产养殖实验室与卤虫参考中心（比利时）
LED	发光二极管
LPC	溶血磷脂酰胆碱
LPE	溶血磷脂酰乙醇胺
MAC	马考市（巴西）
MEG	梅加隆恩博隆
NACA	亚太水产养殖中心网络
NATO	北大西洋公约组织
N:P	氮磷比
ω3	欧米伽-3
ω6	欧米伽-6
O_2	氧气
OTU	操作分类单元
PC	磷脂酰胆碱
PCR	聚合酶链式反应
PE	磷脂酰乙醇胺
PG	磷脂酰甘油
PI	磷脂酰肌醇
PS	磷脂酰丝氨酸
PVC	聚氯乙烯
rRNA	核糖体核糖核酸
RAS	循环水养殖系统
SCP	单细胞蛋白
SEC	斯宾塞昆虫标本馆藏（加拿大）
SFB	旧金山湾
SOP	标准操作规程
SWA	斯瓦科普蒙德（纳米比亚）

TAA	总氨基酸
TAG	三酰甘油
TCBS	硫代硫酸盐-柠檬酸盐-胆盐-蔗糖培养基
TL	总脂质
UDWR	犹他州野生动物资源局
UNESCO	联合国教科文组织
USD	美元
UV	紫外线
VC	永州（越南）
WW	湿重
XARI	新疆水产研究所（中国）

化学元素与分子式

Br	溴
$Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$	一水合磷酸二氢钙
$Ca(ClO)_2$	次氯酸钙
$Ca(OH)_2$	氢氧化钙
$CaCO_3$	碳酸钙
$CaHPO_4 \cdot 2H_2O$	二水合磷酸氢钙
CaO	氧化钙
$CaSO_4$	硫酸钙
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	二水合硫酸钙
CO_2	二氧化碳
H_2O_2	过氧化氢
H_2S	硫化氢
KCl	氯化钾
$KMnO_4$	高锰酸钾
$MgCl_2$	氯化镁
$MgSO_4$	硫酸镁
N	氮
$Na_2S_2O_3$	硫代硫酸钠
$(NH_4)_2SO_4$	硫酸铵
NaCl	氯化钠
$NaHCO_3$	碳酸氢钠

NaClO	次氯酸钠
NaOH	氢氧化钠
NH_3	氨
NO_2^-	亚硝酸盐
NO_3^-	硝酸盐
P_2O_5	五氧化二磷

计量单位

min	分钟
h	小时
mg	毫克
g	克
kg	千克
ppm	百万分之一
pmol	皮摩尔
mol	摩尔
μm	微米
cm	厘米
m	米
m^2	平方米
m^3	立方米
km	千米
°Bé	波美度
℃	摄氏度
ha	公顷
L	升
mL	毫升
μL	微升
mV	毫伏
>	大于
<	小于
⩾	大于或等于
⩽	小于或等于

作者名单 AUTHORS

Agh, Naser
伊朗乌尔米亚大学卤虫与水产养殖研究所
Bossier, Peter
比利时根特大学水产养殖实验室与卤虫参考中心
Bosteels, Thomas
美国大盐湖卤虫联盟
Boyko, Elena Grigoryevna
俄罗斯秋明北乌拉尔国立农业大学
Brown, Phil
美国大盐湖卤虫联盟
Camara, Marcos Rogerio
巴西北里奥格兰德联邦大学
De Schryver, Peter
比利时英伟水产公司
Gopi, Krishnnappriyaa
马来西亚登嘉楼大学气候适应与海洋生物技术研究所
Hoa, Van Nguyen
越南芹苴大学水产养殖与渔业学院
Khor, Waiho
马来西亚登嘉楼大学热带水产养殖与渔业研究所
Léger, Philippe
比利时英伟水产公司
Litvinenko, Alexander Ivanovich
俄罗斯秋明北乌拉尔国立农业大学
Litvinenko, Liudmila Illnichna
俄罗斯秋明北乌拉尔国立农业大学
Marden, Brad
美国大盐湖卤虫联盟

Mohamad, Asmidar
马来西亚登嘉楼大学气候适应与海洋生物技术研究所
Naessens, Eddy
比利时英伟水产公司
Rombaut, Geert
比利时英伟水产公司
Segaran, Thirukanthan Chandra
马来西亚登嘉楼大学气候适应与海洋生物技术研究所
Sorgeloos, Patrick
比利时根特大学水产养殖实验室与卤虫参考中心
隋丽英
天津科技大学亚洲区域卤虫参考中心
Tan, Min Pau
马来西亚登嘉楼大学气候适应与海洋生物技术研究所
Teruel, Hector
联合国工业发展组织
Van Stappen, Gilbert
比利时根特大学水产养殖实验室与卤虫参考中心
Yeong, Yik Sung
马来西亚登嘉楼大学气候适应与海洋生物技术研究所

前　言 FOREWORD

卤虫（*Artemia* sp.）无节幼体可通过“干卵”（即处于原肠胚晚期的静息胚胎）便捷孵化获得，近几十年来被广泛用作天然活体浮游动物的优质替代饵料，用于投喂海水和淡水甲壳类的幼体和鱼类苗种。卤虫的商业化应用始于20世纪60年代，最初在日本应用于真鲷（*Pagrus major*）和日本对虾（*Marsupenaeus japonicus*）的育苗，随后迅速推广至全球更多水产养殖种类。随着全球水产苗种生产规模的扩大，卤虫卵需求量持续增长，目前年消耗量达3 500吨，价值约1.5亿美元，支撑着年产量逾9 000亿尾甲壳类幼体和鱼苗生产，并间接贡献于年产值超20亿美元、产量逾1 000万吨的全球水产养殖产业。此外，每年还有超10万吨的卤虫成虫被直接用作饵料，产值超5 000万美元。

尽管20世纪80和90年代已有诸多科学论文、操作手册和指南阐述了卤虫生物学特性及其在水产育苗中的优化应用，但其中部分内容难以适用于当前育苗产业的发展需求，某些极具价值的技术要点却未得到足够重视，甚至被完全忽视；同时，目前广泛应用的许多技术和操作流程并未遵循联合国粮食及农业组织（简称粮农组织）1996年出版的《水产养殖活饵料生产与使用手册》（*Manual on the Production and Use of Live Food for Aquaculture*）所推荐的相关规范。此外，近年来卤虫生物学研究不断取得新进展，新技术和新产品不断涌现，这些成果有望推动卤虫在水产育苗实践中的进一步应用，使其更加精准可控。

2021年9月2日，亚太水产养殖中心网络（Network of Aquaculture Centers in Asia-Pacific）主办了“全球鱼类与甲壳类育苗场卤虫卵使用现状”网络研讨会。来自全球水产养殖主要国家的专家就卤虫应用所作的专题报告，以及针对359名参会者开展的问卷调查结果表明，育苗场在卤虫卵使用方面存在很大提升空间。优化操作规范不仅能提高使用效益，更能为鱼苗和甲壳类幼体提供营养丰富且生物安全的生物饵料。与会专家一致建议，应通过修订手册、技术文档或示范材料，及时更新相关操作规范。2021年6月15日，由WorldFish在孟加拉国举办的“卤虫池塘和罐体养殖生产”线上国际研讨会也支持这一观点，与会专家在评估亚洲和非洲各国卤虫池塘和罐体生产技术后，也强调了制定新

版综合指南的必要性。

近期成立的“国际卤虫水产养殖联盟”（International *Artemia* Aquaculture Consortium）倡议并积极推动了新版卤虫手册的编撰工作。该联盟最初由多个卤虫领域专业研究机构自发组建，联盟成员一致认为，有关合理使用卤虫的信息更新可从多维度保障卤虫资源的可持续供应，包括生物多样性保护、气候变化影响、卤虫生物学特性深度研究，以及卤虫生产与其他水产养殖生产模式的整合等。

作为粮农组织出版的实用手册，本手册是为所有使用或关注者编写，全面覆盖卤虫作为水产育苗活饵料、科学研究的模式生物及其他相关信息。本手册既面向渴望更新卤虫生物学、生产及应用知识的研究者，也适合初次接触该领域的读者。基于掌握卤虫生物学及生态学基础知识对正确理解卤虫生产与使用规范操作的重要性，手册沿用了1996年版手册的基本框架。其余内容在编排结构与版式设计上均进行了全面更新，既反映了当前的知识体系、学术见解以及行业共识的最新进展，也顺应了当代读者群体对信息呈现方式更加多元化的需求，而不仅限于传统的叙事性手册。

与1996年版手册显著的不同在于，本版手册凝聚了全球科研、教育及产业界等众多领域专家的集体智慧，其他参与者在协调统筹、内容整合与框架构建方面也发挥了关键作用。编者特别感谢比利时根特大学水产养殖实验室与卤虫参考中心（Laboratory of Aquaculture and *Artemia* Reference Center）的Christ Mahieu和Geert Van de Wiele提供的专业支持。所有贡献者的学术投入以及专家团队思想碰撞产生的智慧结晶，共同赋予本手册独特的价值。我们期待本手册能成为未来相当长时间内具有权威性的参考著作。

编　者

Gilbert Van Stappen

Patrick Sorgeloos

Geert Rombaut

目　录 CONTENTS

摘要……v
缩略语…… vi
作者名单……x
前言…… xii

1　卤虫生物学与生态学（编者：隋丽英）…… 1

1.1　形态学与生活史…… 1
1.2　生态与自然分布…… 5
1.3　分类 …… 7
1.4　品系特性 ……10
1.4.1　卤虫卵和幼体的大小及能量……10
1.4.2　卤虫卵的孵化质量 ……11
1.4.3　无节幼体生长速率 ……12
1.4.4　温度与盐度耐受性 ……12
1.4.5　生活史特征与繁殖能力 ……12
1.4.6　营养价值 ……13
1.5　卤虫卵的生物学特征 ……14
1.5.1　卤虫卵形态 ……14
1.5.2　孵化过程的生理学特征 ……16
1.5.3　环境条件对卤虫卵代谢的影响 ……18
1.5.4　滞育 ……18
参考文献……21

2 盐湖与日晒盐场中的卤虫生产 …… 25

2.1 不同卤虫栖息地的描述 …… 25

2.1.1 天然盐湖 …… 25

2.1.2 永久性日晒盐场作业（作者：Hector Teruel） …… 43

2.1.3 季节性日晒盐场作业（作者：Nguyen Van Hoa和Gilbert Van Stappen） …… 50

2.2 池塘养殖（作者：Nguyen Van Hoa和Gilbert Van Stappen） …… 51

2.2.1 地点选择 …… 52

2.2.2 卤虫生产模式 …… 53

2.2.3 池塘改造与准备 …… 58

2.2.4 饵料管理 …… 65

2.2.5 养殖系统的监测与管理 …… 77

2.3 卤虫罐体养殖生产与卤虫的应用（作者：Yeong Yik Sung、Thirukanthan Chandra Segaran、Khor Waiho、Tan Min Pau、Asmidar Mohamad、Krishnnappriyaa Gopi和Patrick Sorgeloos） …… 86

2.3.1 卤虫的罐体养殖生产 …… 86

2.3.2 卤虫的采收技术 …… 99

2.3.3 卤虫罐体养殖生产的微生物学特性 …… 100

2.3.4 卤虫罐体养殖生产数据与成本核算 …… 102

2.4 采收与加工技术（作者：Nguyen Van Hoa和Gilbert Van Stappen） …… 102

2.4.1 采收管理 …… 102

2.4.2 卤虫卵的采收与加工 …… 103

2.4.3 卤虫采收与加工 …… 111

参考文献 …… 116

3 卤虫卵、无节幼体及后无节幼体的应用（作者：Gilbert Van Stappen、Geert Rombaut和Patrick Sorgeloos） …… 128

3.1 育苗场中卤虫卵产品的正确使用条件与设备优化 …… 128

3.1.1 生物安全 …… 128

3.1.2 卤虫卵贮存 …… 136
3.1.3 卤虫卵的消毒 …… 137
3.1.4 卤虫卵的脱壳 …… 138
3.1.5 卤虫孵化 …… 140
3.1.6 卤虫无节幼体的分离与收集 …… 143
3.1.7 无节幼体的营养强化 …… 146
3.1.8 无节幼体的冷藏保存 …… 149
3.2 卤虫卵产品质量评估 …… 152
3.2.1 生物学测量特征 …… 152
3.2.2 孵化质量 …… 154
3.2.3 （后）无节幼体的营养质量 …… 157
3.2.4 孵化过程的微生物学特性（作者：Peter De Schryver） …… 169
参考文献 …… 172

附录1 盐度换算表 …… 179
附录2 集约化卤虫养殖的投喂策略 …… 182
附录3 未脱壳卤虫卵的消毒 …… 183
附录4 卤虫卵脱壳处理流程 …… 185
附录5 次氯酸盐溶液中有效氯的滴定测定法 …… 187
附录6 孵化罐体准备与卤虫卵孵化操作流程 …… 189
附录7 卤虫Ⅰ期无节幼体采收方法 …… 191
附录8 卤虫卵径、卵壳厚度、Ⅰ期无节幼体体长与干重的测定方法 …… 193
附录9 卤虫卵含水量测定方法（%） …… 195
附录10 卤虫卵计数、孵化率、孵化效率及孵化速率的测定方法 …… 196
附录11 卤虫孵化液或孵化无节幼体细菌载量的测定 …… 199
附录12 国际卤虫水产养殖联盟 …… 204

1　卤虫生物学与生态学

（编者：隋丽英）

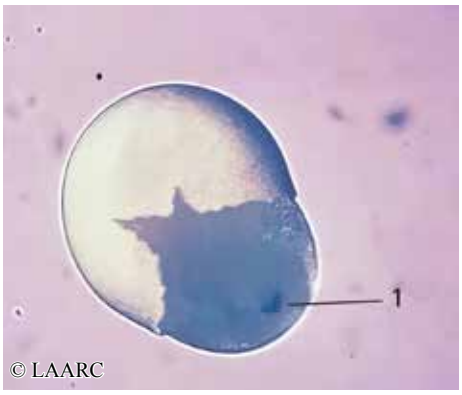
1.1　形态学与生活史

在一年中的某些时候，卤虫会产休眠卵，卵漂浮在水面并被风和浪冲到岸边（图版1）。这些卵处于代谢不活跃状态，经饱和卤水浸泡或干燥脱水后，胚胎继续发育。此时将脱水的卵浸泡在海水中，凹形的卤虫卵会水合呈球形，壳内的胚胎则重新启动代谢活动。根据卤虫品系和温度不同，10 ～ 20小时后卵壳的外层角质膜破裂，此时可以看到被孵化膜包围的胚胎（图版2）。当胚胎悬挂在空壳下时，表明无节幼体的发育已完成，此时称为“伞状”幼体阶段。此后，孵化膜在短时间内破裂孵化，释放出自由游动的无节幼体（图版3）。

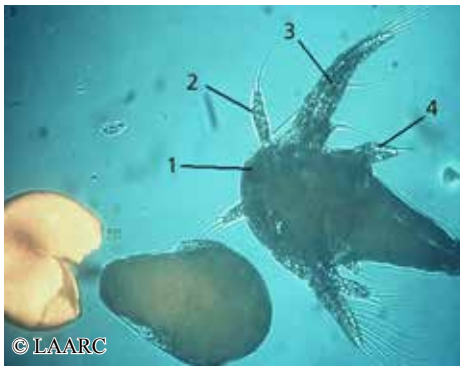
Ⅰ期无节幼体体长400 ～ 500微米，呈棕黄色，头部具一只红色眼点，有三对附肢，如具有感知功能的第一触角、具有运动和滤食功能的第二触角和具有食物摄取功能的大颚。腹部被一个大的唇状结构所覆盖，其功能是将滤毛捕获的食物颗粒转运到口器。Ⅰ期无节幼体因消化系统尚不健全而不能进食，完全依靠储备的卵黄物质生存。



图版1　盐田卤虫卵采收（a、b、c）和盐湖（d）卤虫卵采收



图版2　卤虫卵破壳阶段：
1. 无节幼体眼



图版3　伞状幼体期胚胎（左）与Ⅰ期无节幼体（右）：1. 无节幼体眼；2. 第一触角；3. 第二触角；4. 大颚

因卤虫品系和温度而异，6 ～ 8小时后，Ⅰ期无节幼体蜕皮成为Ⅱ期无节幼体。此时卤虫用第二触角滤食包括单胞藻、细菌/古菌、原生动物在内的微小食物颗粒，并通过口器摄取至已具有功能的消化道。早期发育阶段的卤虫摄食颗粒偏好范围为4 ～ 8微米至6.8 ～ 27.5微米，最适粒径约16.0微米。一般认为卤虫对个体微小的细菌摄取效率较低，与投喂粒径12微米的单胞藻相比，卤虫幼体对0.5微米细菌的滤食率仅为投喂12微米微藻颗粒时的1/69（Seixas等，2009）。而卤虫成虫可摄食所有小于50微米的颗粒，但更倾向小于30微米的颗粒（Gelabert-Fernandez和Solis，1994；Makridis和Vadstein，1999；Gelabert和Pacheco，2011）。

在显微镜下可区分Ⅰ期、Ⅱ期与Ⅲ期卤虫无节幼体的形态和大小。除幼体长度与整体形态外，下颌基节和刚毛结构（图1–1）尤其可作为明确区分处于连续发育阶段卤虫的鉴别特征。

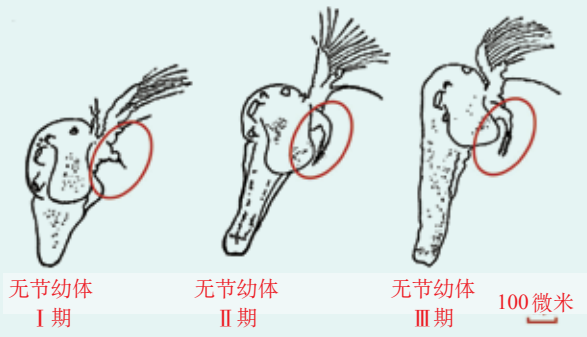
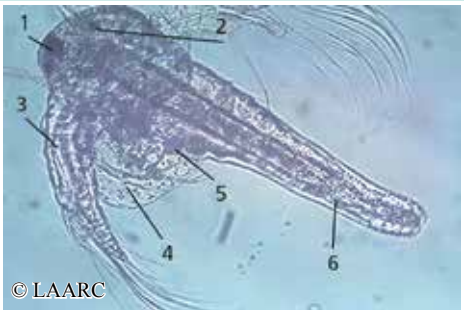


图1–1　Ⅰ期、Ⅱ期和Ⅲ期无节幼体的形态特征与大小：红色圆圈标示颚基及其刚毛结构

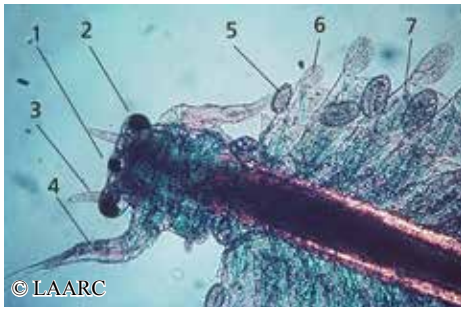
资料来源：Hentschel，E.。1968。《不同温度下卤虫的胚后发育阶段（无甲目，甲壳纲）》。动物学通报，180：372–384。（改编自Hentschel，E.，1968）。

卤虫幼体通过蜕皮完成生长繁育，其整个生命周期共经历17个发育阶段（Criel和MacRae，2002）。幼体阶段结束后，卤虫躯干部位出现成对的叶状附肢并分化为胸肢（图版4），头部两侧出现侧位复眼（图版5和图版6）。卤虫在第10龄期后发生重要的形态和功能变化，触角丧失运动功能并进行性别分化。雄性个体的触角特化为钩状抱握器（图版7和图版8），而雌性个体的触角退化为感觉附肢（图版9）。此时，胸肢分化为三部分（图版10），即具有滤食和运动功能的端肢和内肢，以及具有鳃功能的外肢。

成虫期卤虫体长约1厘米，躯体细长，头部有两对带柄复眼，消化道呈线形，具1对感觉触角（亦称“第一触角”）及11对功能性胸肢（图版8和图版9）。雄性卤虫（图版8）在躯干后部具有成对的阴茎（图版11），而雌性卤虫可通过第11对胸肢后方特有的育仔囊或子宫识别（图版9）。在交配前行为期间，可观察到雌雄卤虫呈“骑乘姿态”（图版11）。交配行为表现为雄性弯曲腹部，将单阴茎插入雌性育仔囊。而后受精卵在雌性腹部的两根管状卵巢



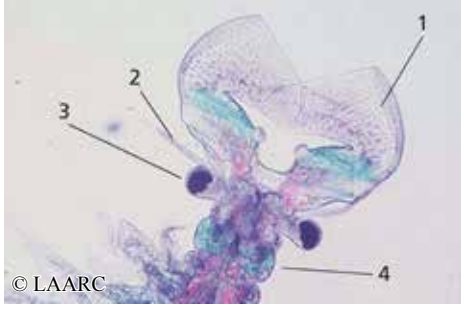
图版4　Ⅴ期幼体：1. 无节幼体眼；2. 侧位复眼；3. 触角；4. 上唇；5. 胸肢原基；6. 消化道



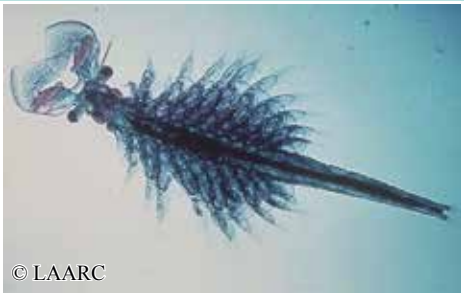
图版5　XII期卤虫头部及前胸区：1. 无节幼体眼；2. 侧位复眼；3. 第一触角；4. 第二触角；5. 外肢；6. 端肢；7. 内肢



图版6　雄性青年期卤虫头胸部区域：1. 第一触角；2. 端肢；3. 外肢



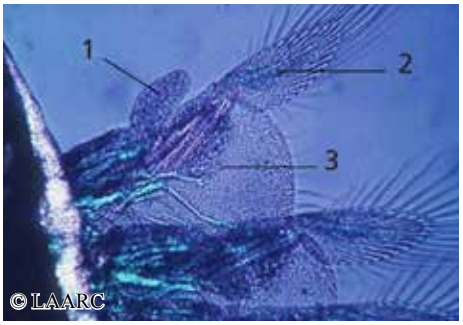
图版7　雄性成虫头部：1. 第二触角；2. 第一触角；3. 侧位复眼；4. 上颚



图版8　雄性成虫



图版9　雌性成虫



图版10　卤虫成虫前部胸肢细节：1. 外肢；2. 端肢；3. 内肢



图版11　卤虫雌雄个体交配前姿态（骑乘位）：1. 雌性子宫（育仔囊）；2. 雄性交配器

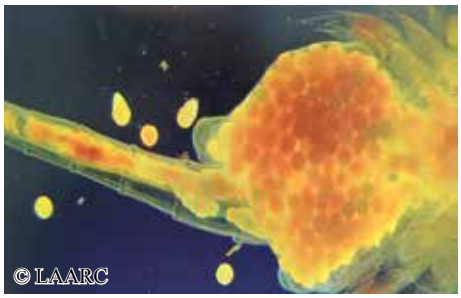
中发育（图版12）。成熟的卵呈球形，通过两条输卵管迁移至育仔囊。

通常情况下，受精卵发育为自由游动的无节幼体由雌虫产出，即卵胎生繁殖（图版13）。在高盐度、低氧、食物匮乏等极端条件下，胚胎仅发育至原肠胚期，并被位于子宫的棕色泌壳腺分泌的物质所包裹，此时胚胎进入代谢停滞或滞育状态（图版14），随后被雌虫排出体外，即卵生繁殖。所有卤虫品系均兼具卵生和卵胎生两种繁殖模式，同一雌虫可在两种繁殖模式间转换。

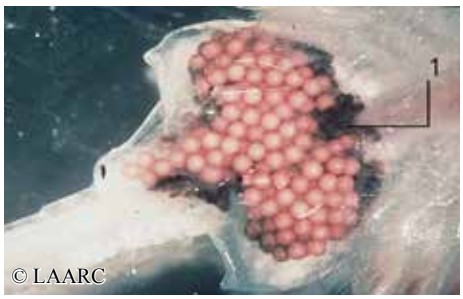


图版12　受精雌虫的后胸区、腹部及子宫（育仔囊）结构：1. 卵巢与输卵管内的成熟卵

休眠卵通常漂浮在高盐度水体表面，经风力作用被吹至岸边堆积并脱水。脱水使滞育停止（即去休



图版13　卵胎生卤虫输卵管中的无节幼体（正在释放的幼体）



图版14　卵生卤虫输卵管中的卤虫卵：1. 褐色泌壳腺（较深颜色）

眠），此时卵处于静息状态。在适宜孵化条件下，卵重新吸水并再次启动胚胎发育进程。

在适宜条件下，卤虫可存活数月。无节幼体从孵化至发育为成虫需10天至1个月，时长因卤虫品系、温度及饵料情况而异。成虫每4～5天产卵或产幼体一次，单次产量最高可达300个（图1-2）。

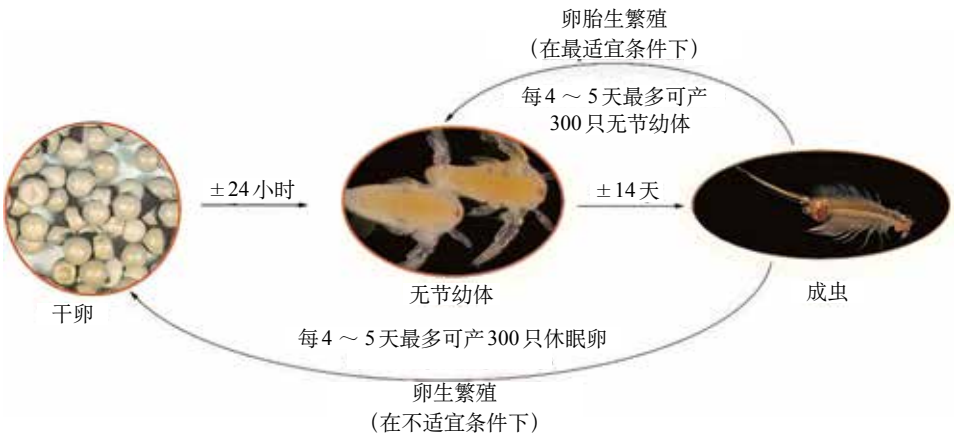


图1-2　卤虫*Aretmia franciscana*的生活史

资料来源：作者整理（ARARC）。

1.2　生态与自然分布

卤虫种群分布于热带、亚热带及温带的数百个天然盐湖与日晒盐场中，包括沿海与内陆地区。但迄今记录的分布地点（Persoone和Sorgeloos，1980；

Vanhaecke、Tackaert和Sorgeloos，1987；Triantaphyllidis等，1994；Van Stappen，2002）仍不全面，更全面的调查将在全球范围内发现更多的卤虫栖息地。另一方面，因盐度过高或过低而无法维持种群的长期存活，一些先前记录的卤虫种群已在部分区域消失。

卤虫种群呈不连续性分布，并非所有高盐环境都有卤虫栖息。尽管卤虫可在天然海水中存活生长，但由于其依赖对高盐度的生理适应来避免被捕食和与其他滤食性生物的竞争，因此卤虫不能以海水为媒介从一个高盐生境迁移到另一个高盐生境。卤虫对高盐度的生理适应是一种非常有效的抵御捕食的生态防御，具体表现为：

①卤虫具有非常有效的渗透压调节系统；

②卤虫能合成高效呼吸色素以应对高盐度下的低氧环境；

③当环境条件危及种群生存时，卤虫具有产生休眠卵的能力。

在卤虫研究文献中，亚种水平的不同自然种群通常被称为“品系”，这与粮农组织的标准术语存在差异。粮农组织将“品系”定义为具有遗传分化的养殖型，而野生群体则被称为“种群”或“群体”（粮农组织，2019）。为保持与文献的一致性，本手册沿用“品系”指代特定地理区域的自然卤虫种群。除这些自然种群外，源自美国大盐湖（Great Salt Lake，GSL）和美国旧金山湾（San Francisco Bay，SFB）的旧金山卤虫（*Artemia franciscana*）已被引入全球多个国家，通过本地化卤虫卵的生产应对原产地卤虫卵成本上升和供应受限的问题。这些原始种群已被引入巴西、中国、肯尼亚、泰国和越南，并进一步将这些卤虫接种至孟加拉国、柬埔寨、印度、缅甸、斯里兰卡和阿拉伯联合酋长国的盐场。在新环境接种卤虫形成了当地适应性群体，本手册中也称其“品系”，其中初具规模的养殖型群体当属越南永州地区（Vinh Chau）的卤虫品系。越南永州地区*A. franciscana*品系源自1986年引入的旧金山卤虫卵，具有高耐热性（＞40℃）。这种耐热性及其他性状涉及多基因作用及差异基因表达（De Vos等，2021），但针对该品系及其他引种群体仍需开展更多研究工作。

卤虫品系已适应温度（6～40℃）、盐度及离子组成等环境因子的大范围波动。海成盐水体是以氯化钠为主要成分的浓缩海水，构成了沿海卤虫栖息地的主体，其卤水由海水蒸发而形成。内陆海成盐卤水环境以美国犹他州大盐湖为代表。非海成盐高盐环境卤虫栖息地则分布于内陆，其离子组成与天然海水差异显著，包括硫酸盐型水体［如加拿大萨斯喀彻温省的查普林（Chaplin）湖、中国新疆维吾尔自治区的艾比湖、俄罗斯鄂木斯克州的埃贝特（Ebeyty）湖］、碳酸盐型水体［如美国加利福尼亚州的莫诺（Mono）湖］、富钾型水体（如分布于美国内布拉斯加州的一些湖泊）。

卤虫可非选择性滤食有机物颗粒（生物絮团）、单胞藻、小型原生动物、

细菌/古菌等。卤虫栖息地具有营养结构简单、物种多样性低的典型特征；缺乏捕食者和竞争使得卤虫人工养殖成为可能。高盐度是卤虫生存的决定因素，温度、初级食物生产等其他因素的影响仅能改变种群丰度，极端情况下可导致该物种在当地暂时性消失。

卤虫不能主动迁徙，风和水禽（尤其是火烈鸟）是其最重要的自然传播载体。漂浮的卤虫卵会附着在鸟类的脚蹼和羽毛上，即使被摄入后仍能在鸟类消化道中保持数日的完整性（Proctor、Malone和Devlaming，1967）。因此，缺乏候鸟迁徙可能是造成某些适宜卤虫生存的区域（如巴西东北海岸的日晒盐场）未出现天然卤虫种群的原因（插文5）。

除卤虫卵的自然扩散外，还可在日晒盐场进行人工卤虫接种。20世纪70年代以来，为提高盐产量或满足水产养殖的需求，人们已经在非洲、亚洲、南美洲及澳大利亚成功进行了多次卤虫接种。在南亚和东南亚的孟加拉国、柬埔寨、印度、缅甸、菲律宾、斯里兰卡、泰国和越南等国的季节性盐场接种卤虫，在干湿分明的热带季风气候区域形成了临时性卤虫种群（Van Stappen等，2019）。在这些池塘系统中，卤虫主要分布于中等盐度水体中（见第2.2节）。由于卤虫缺乏抵御捕食者的机制，其生存的最低盐度阈值实际上反映了潜在捕食者的最高耐盐极限（最低盐度70克/升，最高盐度140克/升），具体取决于当地水生无脊椎动物和鱼类的种类。当盐度接近氯化钠饱和浓度（大于250克/升）时，极端生理胁迫，加之食物匮乏，可导致卤虫大规模死亡。尽管卤虫可在盐度高于250克/升的环境中存活，但渗透压调节的增强需要更高的能量输入，对卤虫的生长和繁殖产生负面影响，导致其饥饿和死亡。卤虫卵一般在中高盐度（80～250克/升）盐池中大量产生。

在天然卤虫种群缺失的盐场中接种种群并进行适当的管理，即便其成虫与卵产量相对较低，仍可提升经济效益。卤虫的存在不仅可控制藻华，其代谢产物及残体还为结晶池中的嗜盐细菌和盐杆菌科*Halobacterium*古菌提供了适宜的生长基质。高密度的嗜盐生物使水体呈酒红色，增强了热量吸收，从而加速卤水蒸发；同时降低溶解有机物的浓度，使水体黏度下降，促进更大盐晶体的形成，从而提升盐的质量（Davis，2006）（见第2.1.2节）。

1.3 分类

卤虫的分类如下：

门：节肢动物门（Arthropoda）
纲：甲壳纲（Crustacea）

亚纲：鳃足亚纲（Branchiopoda）
目：无甲目（Anostraca）
科：卤虫科（Artemiidae）
属：卤虫属（*Artemia*）

卤虫是一个由生殖隔离标准界定的复杂物种。早期分类学者曾依据不同形态特征，对在不同温度与盐度环境条件下采集的种群进行物种命名，导致命名泛滥。随着时间推移，这种混乱的命名逐渐被摒弃，所有卤虫均被归入*Artemia salina*（Linnaeus，1758），但至今仍有学者沿用这一错误做法。目前学界已对存在生殖隔离的种群或种群集群赋予不同物种名称，并基于共识确认了以下两性生殖物种（即具有雌雄异体个体的种类）及其分布范围（Pilla和Beardmore，1994；Beardmore、Pilla和Thomas，1994；Browne和Bowen，1991）：

- *Artemia salina*（Linnaeus，1758）：分布于英国莱明顿（Lymington，现已灭绝）、地中海区域（历史上该物种曾被命名为*A. tunisiana*，Bowen和Sterling，1978）；
- *A. urmiana*（Günther，1990）：分布于伊朗乌尔米耶湖（Lake Urmia）、克里米亚盐沼；
- *A. sinica*（Cai，1989）：分布于中国中部和东部；
- *A. tibetiana*（Abatzopoulos等，1998）：分布于中国西藏拉果错；
- *A. persimilis*（Piccinelli和Prosdocimi，1968）：分布于南美洲南部；
- *A. franciscana*：分布于北美洲、中美洲及南美洲（其中美国加利福尼亚州莫诺湖种群被认定为*A. franciscana*的亚种，即*A. franciscana monica*（Verrill，1869）；
- *A. sorgeloosi*（Asem等，2023）：分布于中国青海海晏青海湖区；
- *A. amati*（Asem等，2023）：分布于哈萨克斯坦。

此外，将广泛分布于欧洲、非洲、亚洲及澳大利亚的孤雌生殖卤虫种群归入“孤雌生殖卤虫谱系”（Barigozzi，1974；Bowen和Sterling，1978）。

关于卤虫的分类学仍存在较大争议。卤虫种群在不同环境条件下表现出的较高形态可塑性，阻碍了对该属内分类单元的准确鉴定。此外，分子进化速率与形态进化速率的不匹配性，进一步增加了进化谱系特征描述的复杂性。不同研究团队采用多元方法学路径，始终致力于解析卤虫复杂生物学特性衍生的分类学难题。关于卤虫物种分类地位与系统发育的详细论述及学术争议，可参阅专业文献（Naganawa和Mura，2017；Asem等，2020；Sainz-Escudero等，2021）。

在同一高盐环境中存在两个物种共生的可能性，地中海盐场（Amat等，1995）和伊朗乌尔米耶（Urmia）湖（Agh等，2007）均报道孤雌生殖种群与两性生殖种群共存的现象。此外，水产养殖活动将进口卤虫卵释放到当地盐田，可能造成引入种群与本地种群共存。近40年来，*A. franciscana*已被引入非洲、亚洲和澳大利亚。鉴于新种群的特征不断被解析，除非已掌握足够的分子生物学、形态学和其他证据来确定具体种名，建议研究人员使用“卤虫（*Artemia* sp.）”这一命名。

此外，近期不断公布的卤虫基因组信息极大促进了针对卤虫不同物种及品系间差异的研究（插文1）。

插文1　卤虫基因组解析（作者：Peter Bossier）

近期*Aretmia franciscana*（Kellogg 1906）基因组已完成测序（De Vos等，2021），这意味着目前学界已能公开获取较为完整的卤虫基因组DNA序列信息。该基因组组装采用了高通量测序技术（Illumina与PacBio DNA测序）。为解析该基因组特征，研究者选用了一个在实验室近交多代的*A. franciscana*进行测序分析。

该卤虫基因组包含26 057个长度可观的重组片段。该组装中最长片段有855 000碱基对；N_{50}值（即50%的已获基因组序列包含在大于该数值的片段中）为112 000碱基对，此数值低于其他已知甲壳类动物基因组的中位N_{50}值，表明基因组序列的进一步“重构”仍存在优化空间。与其他甲壳类物种基因组对比发现，*A. franciscana*基因组的外显子区域占比2%，即仅有2%的DNA序列实际参与蛋白质合成，该数值与凡纳滨对虾（*Litopenaeus vannamei*）的观测值（3%）相近；而其内含子（不编码蛋白质的DNA片段）占比达29%，超过了其他节肢动物基因组的观测值。已在*A. franciscana*中鉴定出21 828个基因，数量与人类基因组所含的30 000个基因相近。该基因组基因注释的完成度较低，大量基因的功能尚未明确，注释工作仍存在改进空间。

作为“基因发现”的典型案例，De Vos等（2021）描述了卤虫无节幼体对盐度胁迫下的响应。当盐度从30克/升瞬时升高至200克/升时，卤虫体内有674个基因呈现差异表达，表明这些基因（及其编码的蛋白质或酶）以某种方式参与了卤虫应对盐度胁迫的生理过程。值得注意的是，其中已知功能的基因仅占42%，提示卤虫在剧烈盐度波动下的精确响应机制仍存在大量未知领域。

卤虫基因组信息的获取将极大推动未来研究，进一步揭示该物种如何适应极端环境条件，促进对其诸多独特生命周期过程的深入理解。基因组信息将有助于选育具有商业化应用前景的关键性状（如较小卵径、优良脂肪酸代谢特性等），对现有野生卤虫资源形成补充。然而目前关于卤虫优良性状遗传力与选育的科学研究仍十分有限，且均局限于实验室控制环境。为确保卤虫资源的可持续供应，根据联合国可持续发展目标的要求，通过品系筛选和选择性育种开发新型卤虫应用已被列为新成立的国际卤虫水产养殖联盟亟待解决的关键议题。

在全球范围内卤虫分布于多种隔离生境中，每个生境均具有独特的生态特征，由此形成了众多地理种群（即“品系”）或同一物种内具有遗传差异的群体。特别是孤雌生殖卤虫，其二倍体、三倍体、四倍体及五倍体种群显示出广泛的基因型变异，具有高度遗传变异性和数量性状的独特多样性。部分特征（如卤虫卵和初孵无节幼体的营养价值）属于表型性状，随年份或季节而发生变化；另一些特征（如卵径、生长速率、耐高温性）则具有品系特异性且保持相对稳定，是由于长期适应当地环境而形成的基因型特征（见第1.4节）。根据粮农组织用于区分“野生”与“养殖”水生物种的标准术语，部分种群可归类为“野生”（如美国大盐湖*A. franciscana*种群），而另一些则是人类干预或自然选择过程的结果（如越南永州*A. franciscana*种群），应被视为“养殖”物种。

1.4 品系特性

卤虫作为活体饵料的营养价值可通过“强化过程”得到提升（见1.4.6节），但其他适宜水产养殖应用的特性则需通过选择合适的品系来获得。当前通过商业渠道可获取产自中国、俄罗斯、美国、越南及中亚各国的卤虫卵。掌握特定卤虫卵产品的基因型与表型特征，可显著提高其在鱼类或甲壳类育苗场中的使用效果。

1.4.1 卤虫卵和幼体的大小及能量

饵料生物的营养效能主要取决于其可摄食性，即取决于其大小与形态（见3.2.1节）。不同品系的卤虫可通过其卵和无节幼体的生物学测量特征进行区分。尽管同一品系不同批次间可能存在由环境或加工因素引起的微小差异，但通常同一品系不同生产批次间的卵径保持相对稳定。其他生物学测量特征，

如卵体积、卵干重、Ⅰ期无节幼体体长、无节幼体个体重量、无节幼体体积及能量等，均与卵径呈高度相关性（表1-1和表1-2）。因此，生物学测量参数（尤其是卵径）是表征卤虫品系的理想指标，有助于鉴定未知乃至混合卵样本的来源。

在物种与卵径之间亦可归纳出若干普遍相关性：孤雌生殖卤虫卵径通常较大；两性生殖种中，*A. tibetiana*卵径最大，而*A. franciscana*与*A. persimilis*则具有较小或中等卵径，且卵壳较薄。

表1-1　不同来源卤虫卵及Ⅰ期无节幼体的生物学测量数据（平均值±标准差）

名称	种名	卵径（微米）	脱壳卵径（微米）	卵壳厚度（微米）	Ⅰ期无节幼体体长（微米）
美国大盐湖	*A. franciscana*	245.1 ± 13.8	219.6 ± 10.6	12.8	486.7 ± 33.2
美国旧金山湾		237.5 ± 24.7	225.9 ± 21.8	5.8	435.0 ± 16.8
越南永州		224.9 ± 11.9	207.3 ± 11.9	8.8	399.7 ± 15.4
俄罗斯梅德韦杰湖	Parthenogenetic lineage	257.5 ± 12.9	242.3 ± 13.5	7.6	469.4 ± 18.3
俄罗斯大亚罗沃耶湖		262.7 ± 18.2	244.8 ± 18.4	8.9	473.8 ± 24.1
俄罗斯埃贝特湖		259.5 ± 10.9	242.8 ± 12.6	8.3	467.8 ± 38.9
俄罗斯库丘克湖		261.4 ± 15.3	248.6 ± 13.4	6.4	446.9 ± 34.5
俄罗斯库伦达湖		251.3 ± 9.8	240.0 ± 10.7	5.7	490.8 ± 35.9
中国艾比湖		292.6 ± 16.2	270.7 ± 12.0	10.8	490.4 ± 19.6
中国渤海湾塘沽盐场		273.7 ± 14.6	256.6 ± 12.0	8.5	486.2 ± 28.2
中国拉果错	*A. tibetiana*	322.2 ± 16.1	308.7 ± 19.0	6.8	529.2 ± 35.6
中国其香错		293.9 ± 11.8	278.7 ± 13.1	7.6	509.0 ± 34.7

表1-2　不同来源卤虫卵在标准条件下（盐度35克/升，25℃）**孵化的Ⅰ期无节幼体个体干重和能量值**

名称	干重（微克）	能量值（$\times 10^{-3}$焦耳）
美国大盐湖	1.63	366
美国旧金山湾	2.42	541
中国渤海湾塘沽盐场	3.09	681

1.4.2　卤虫卵的孵化质量

不同来源卤虫卵的孵化参数存在显著差异（见第3.2.2节）。这些参数不属

于卤虫卵的品系特性，受采收、加工、储存、孵化技术以及影响亲代的生产条件等多种因素影响（Lavens和Sorgeloos，1987）。因此必须掌握各批次卤虫卵的孵化特性，以实现其在水产养殖中的高效应用。

1.4.3 无节幼体生长速率

对不同地理来源卤虫进行的标准化培养试验表明，同一物种卤虫生长速率存在显著差异，但同一品系的不同批次间无此差异。尽管在实际环境中卤虫种群生长受诸多因素影响，选择具有高生长速率的品系对提高产量产生积极影响。

1.4.4 温度与盐度耐受性

温度和盐度均显著影响卤虫的存活率与生长速率，其中温度效应更突出。在较宽的温度与盐度范围内，卤虫存活率可达90%以上。源自海成盐型高盐环境的卤虫品系具有相似的适宜温度区间（20 ～ 25℃），在此范围内死亡率低于10%。温度与盐度的交互作用有限，但在低盐度（5克/升）与高温（30 ～ 34℃）条件下，不同品系的耐受性差异显著。高温环境下，大盐湖卤虫品系*A. franciscana*的耐温性显著高于其他“野生”品系，而“养殖型”永州卤虫品系*A. franciscana*（见1.2节）的耐温上限可达40℃，甚至超过大盐湖卤虫品系。

1.4.5 生活史特征与繁殖能力

在考虑将卤虫引入新栖息地时，特别在预判其是否与本地品系形成竞争时，各品系的生活史及繁殖特性是关键考量因素。这些竞争能力与多个因子相关，包括生殖前期与生殖后期时长、总生命周期、单次产仔数量、雌虫产后代频次以及产后代间隔时间等。

由于*A. franciscana*具有每窝后代数量庞大、雌虫产仔频次高且性成熟发育周期短等特征，该物种较其他两性生殖卤虫及孤雌生殖卤虫更具优势（Browne和Halanych，1989；Browne等，1984，1993）。首次繁殖日龄是决定种群增长率及在营养资源有限的新环境中定殖速率的关键因素。因此，若环境偏好与营养因素不构成干扰，*A. franciscana*通常能竞争性取代孤雌生殖品系，而孤雌生殖品系又较其他两性生殖种更具竞争优势。

因此，野生卤虫遗传资源亟须加强监测与保护。这种遗传多样性不仅是新性状的来源，更能促进其对气候变化或人类活动等环境变化的适应性，并为后续水产养殖的选择性育种奠定基础。在自然栖息地进行的接种实验始终存在对当地自然生物多样性构成潜在风险的可能性，因此引入前必须进行风险评

估——包括对候选品系及可能存在的本地种群进行筛查，同时还需研究当地的主要环境条件。因此，引入更具生产力的外来品系可能带来的社会经济优势，必须与自然生物多样性可能遭受的损失之间进行审慎权衡。

1.4.6　营养价值

20世纪70年代末，当众多鱼虾育苗场开始商业化运营时，更换不同来源的卤虫引发了始料未及的问题。即便采用同一地理来源的不同批次卤虫，其育苗产量亦存在显著差异。卤虫的总脂肪含量与脂肪酸组成与含量以及脂肪酸代谢过程，在不同品系甚至不同批次间均存在显著差异，这主要源于成虫可利用的单细胞藻等初级生产者生化成分的波动性（Léger等，1987；表1-3）。一般而言，来自内陆盐湖的卤虫卵产品在生化成分上更为稳定，但其营养水平往往处于较低水平。为此，科研人员利用卤虫非选择性滤食的行为特性，开发出针对性技术以改善缺陷品系卤虫的脂质组成（见第3.1.7节）。

表1-3　脱壳卤虫卵与商业品系初孵无节幼体的粗蛋白、粗脂肪及脂肪酸组成分析

项目	种群							
	美国 大盐湖	越南 永州	俄罗斯大亚 罗沃耶湖	俄罗斯埃 贝特湖	中国 艾比湖	中国渤海湾 塘沽盐场	中国 拉果错	中国 其香错
脱壳卤虫卵								
粗蛋白（%，以干重计）	52.7	46.1	53.0	53.3	50.0	48.0	51.9	56.4
粗脂肪（%，以干重计）	11.7	18.7	12.1	18.6	8.1	10.7	22.7	21.3
脂肪酸（毫克/克，以干重计）								
C16：0	16.4	18.0	12.2	12.5	20.6	16.1	26.7	18.58
C16：1ω7	3.5	15.8	3.3	7.0	27.9	15.0	70.9	16.45
C18：0	7.2	4.4	7.2	6.3	6.1	5.2	9.6	5.69
C18：1ω9	26.4	19.2	19.1	23.7	33.2	24.8	50.5	44.63
C18：1ω7	8.4	13.3	7.0	13.7	14.1	10.1	25.6	20.65
C18：2ω6	9.7	4.1	5.5	10.3	6.0	9.8	7.0	17.10
C18：3ω6	1.3	1.3	0.5	0.5	0.3	1.4	8.3	17.16
C18：3ω3	42.6	3.6	26.8	35.9	10.0	10.4	4.3	9.84
C20：5ω3	1.5	17.0	1.2	3.2	14.5	14.5	53.2	30.53
C22：6ω3	—	—	—	—	—	0.7	0.8	1.25

续表

项目	种群							
	美国大盐湖	越南永州	俄罗斯大亚罗沃耶湖	俄罗斯埃贝特湖	中国艾比湖	中国渤海湾塘沽盐场	中国拉果错	中国其香错
初孵卤虫幼体								
粗蛋白（%，以干重计）	54.4	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	54.5	56.2	55.6
粗脂肪（%，以干重计）	9.3	N.D	N.D.	N.D.	N.D.	14.3	25.6	24.1
脂肪酸（毫克/克，以干重计）								
C1：0	20.1	18.3	N.D.	N.D.	14.8	15.1	23.7	16.6
C16：1ω7	4.6	16.9	N.D.	N.D.	13.9	15.5	65.1	20.7
C18：0	8.2	5.1	N.D.	N.D.	6.2	5.0	9.1	6.4
C18：1ω9	30.6	20.7	N.D.	N.D.	28.7	21.3	51.0	50.9
C18：1ω7	9.9	15.6	N.D.	N.D.	15.2	11.9	25.9	12.0
C18：2ω6	9.7	5.1	N.D.	N.D.	8.1	8.4	6.1	13.6
C18：3ω6	1.2	1.3	N.D.	N.D.	0.7	8.2	7.0	16.2
C18：3ω3	40.2	4.3	N.D.	N.D.	27.5	2.0	3.6	7.3
C20：5ω3	2.0	19.6	N.D.	N.D.	14.7	16.1	51.6	30.9
C22：6ω3	1.0	—	N.D.	N.D.	—	—	0.6	0.7

—表示低于检测限。N.D.＝无数据。

来源：作者整理（ARARC，LAARC）。

卤虫的其他多种化合物也存在显著差异，包括游离氨基酸总量、色素（角黄素）、维生素C、矿物质及微量元素等营养成分，以及农药和重金属等化学污染物。在多数情况下，这些差异并非品系特性所致，仅与不同生产条件相关，其对育苗成功率不具显著影响。

1.5 卤虫卵的生物学特征

1.5.1 卤虫卵形态

卤虫卵壳由三层结构组成（图1-3）：

①蜂窝层

由嵌合几丁质和血红素的脂蛋白构成的较硬层，血红素浓度决定卵壳颜

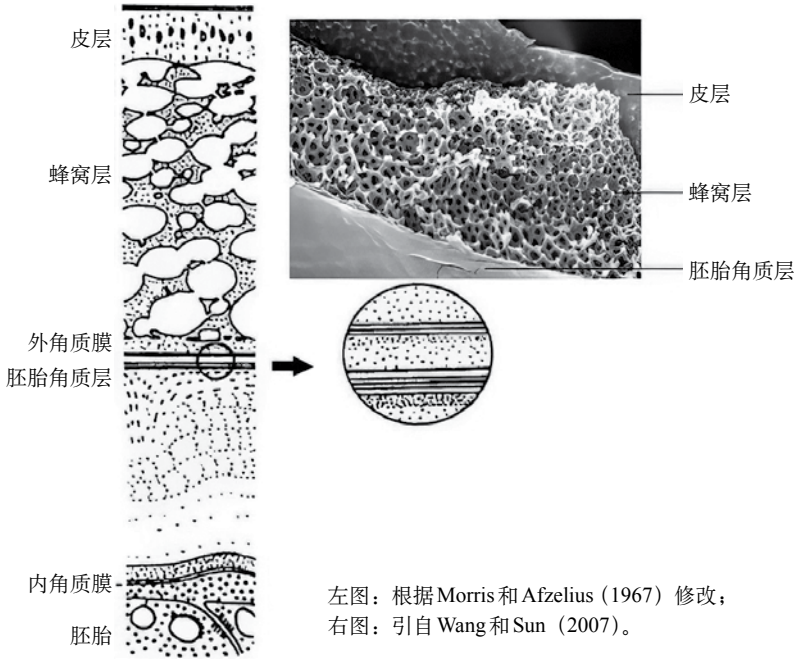
色（从浅棕至深褐）。其主要功能是保护胚胎，使其免受机械破坏和紫外线辐射的损伤。蜂窝层可通过次氯酸盐氧化处理完全去除（溶解）（即卤虫卵脱壳；见第3.1.4节）。

②外角质膜

是具有特殊过滤功能的多层膜，作为分子“筛”或渗透屏障，仅允许二氧化碳（CO_2）分子或更小的分子通过，对胚胎起到保护作用。

③胚胎角质层

由内表皮膜（在孵化过程中发育成孵化膜）与胚胎隔开的透明且具有高度弹性的一层膜。



左图：根据Morris和Afzelius（1967）修改；
右图：引自Wang和Sun（2007）。

图1-3　卤虫卵壳超微结构示意图（左）与扫描电镜图像（右）

资料来源：Morris, J.E.和Afzelius, B.A.。1967。《休眠状态和发育期间卤虫胚胎的卵壳及外膜结构》。超微结构研究杂志，20（3–4）：244–259。https://doi.org/10.1016/S0022-5320(67)90285-7；Wang, S.F. 和 Sun, S.C.。2007。《中国七个卤虫品系卵壳的比较观察》。显微研究与技术，70：663–670。https://doi.org/10.1002/jemt.20451

胚胎是未分化的原肠胚，含水量低于10%时处于非代谢状态，可以长期储存且不会丧失活力（见第3.1.2节）。当卤虫卵含水量高于10%且氧气充足时，胚胎即可启动代谢活动；但氧气会导致自由基的形成，破坏处于非代谢状态的卤虫卵特定酶系统，因此不宜长时间保存。

1.5.2 孵化过程的生理学特征

图1-4展示了卤虫卵在孵化液中孵化至无节幼体释放的发育过程。

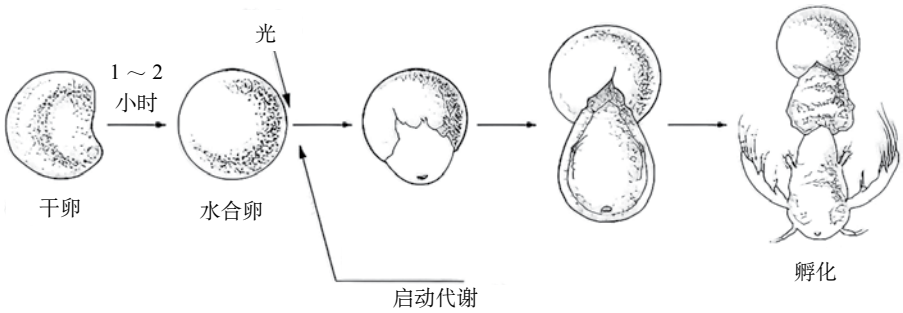


图1-4 卤虫卵在海水中孵化至无节幼体释放的发育过程

资料来源：作者整理（ARARC）。

在海水中孵化时，双凹形的卤虫卵会在1 ～ 2小时内吸水膨胀为球形。经过10 ～ 20小时水合，卵壳（连同外角质膜）破裂，即进入破膜期，此时可观察到被孵化膜包裹的胚胎。对于多数卤虫品系而言，在完全水合后的初期孵化阶段，光刺激对激活孵化代谢至关重要（Vanhaecke等，1981；Van der Linden等，1985；El-Magsodi等，2016）。

随后胚胎完全脱离卵壳，悬垂于空壳下方，孵化膜可能仍附着于卵壳上，此即“伞状幼体”期。此时通过透明的孵化膜，可以观察到前无节幼体发育到Ⅰ期无节幼体的过程，其附肢开始活动。由无节幼体头部区域分泌的孵化酶（在pH＞8.0时激活）会弱化孵化膜结构。随后孵化膜破裂，进入孵化阶段，自由游动的无节幼体从头部逐渐被释放。

干的卤虫卵具有很强的吸湿性，其吸水速率极快，其在海水中孵化的最初数小时内，水合胚胎的体积可迅速膨胀至含水量峰值140%（图1-5）。然而，胚胎的代谢活性需在含水量达到60%且环境条件适宜时（如溶氧量、温度等，见3.1.5节）才会重新启动。

卤虫卵胚胎的有氧代谢确保了碳水化合物储备海藻糖转化为糖原（作为能量来源）和甘油。甘油属于吸水性化合物，其浓度的增加促使胚胎进一步吸水，从而导致外角质层内部的渗透压持续升高，超过临界水平时，卵壳破裂，此时产生的甘油被释放在孵化液中。卤虫卵在破壳前的代谢过程是一套“海藻糖-甘油”高渗调节系统，随着孵化液盐度的增加，卤虫卵需要积累更多的甘油，以达到使卵壳破裂的渗透压阈值，因此最终无节幼体中的能量储备会减少（图1-6）。

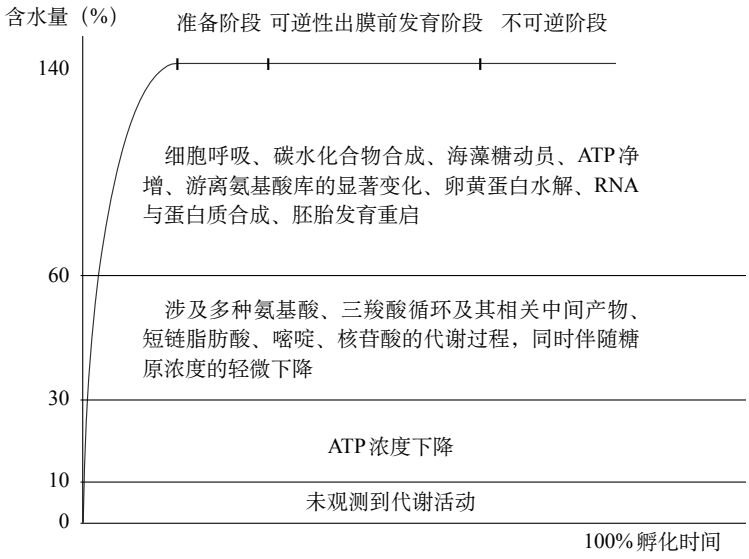


图1-5　*Artemia franciscana* 卤虫卵细胞代谢与水分含量的关系

资料来源：Lavens, P. 和 Sorgeloos, P.。1987。《卤虫卵的休眠、滞育解除与孵化：综述》。转引自：P. Sorgeloos、D.A. Bengtson、W. Decleir 和 E. Jaspers（编）。《卤虫研究及其应用》，第3卷，第27–63页。比利时韦特伦：Universa出版社。

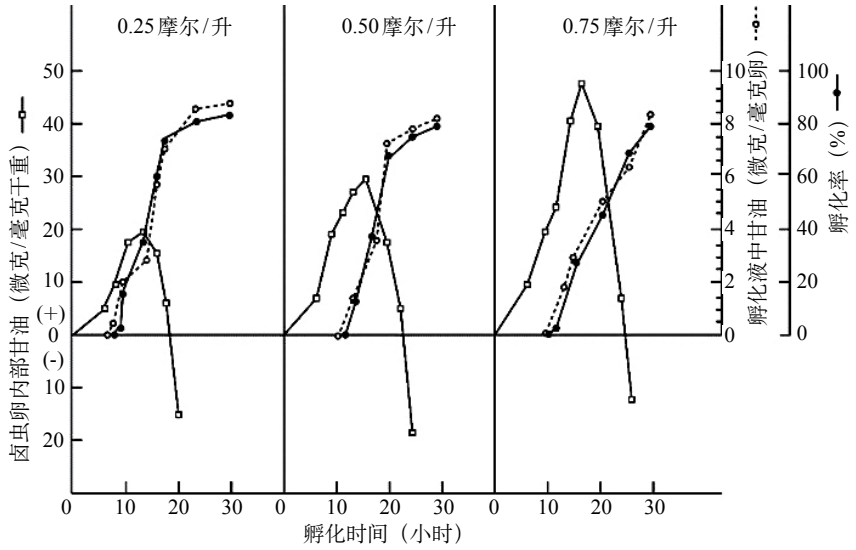


图1-6　三种不同NaCl浓度（0.25摩尔NaCl=14.6克/升盐度）下 *Artemia franciscana* 卤虫卵内部甘油浓度、孵化液中甘油水平与卵破壳（出膜）比例随孵化时间变化的关系

资料来源：Clegg, J.S.。1964。《外部渗透压对卤虫 *A. sinica* 胚胎出膜与代谢的控制以及游离甘油对其发育的作用》。实验生物学杂志，41：879–892。https://doi.org/10.1242/jeb.41.4.879

卵壳破裂后，胚胎通过孵化膜与孵化液直接接触，此时离子渗透调节系统开始起作用，以应对较大的盐度变化，并促进胚胎发育为无节幼体。无节幼体头部分泌的孵化酶促使孵化膜破裂，释放无节幼体。

1.5.3 环境条件对卤虫卵代谢的影响

干卵（含水量2% ～ 5%，水分测定方法见附录9）对极端温度具有极强的耐受性。在−273℃至约60℃的温度范围内，甚至短时暴露于90℃高温环境，仍能保持孵化能力。

水合卤虫卵对环境温度具有高度特异性耐受范围：当温度低于约−18℃或高于40℃时会出现死亡现象，其活跃代谢的温度区间为4 ～ 33℃。在此温度范围内，孵化率保持稳定，但温度越高无节幼体孵化时间越早。当温度处于−18 ～ 4℃或33 ～ 40℃时，代谢活动发生可逆性中断但不影响存活率。需注意的是，不同品系的卤虫其温度耐受范围及临界值可能存在细微差异。

在其他环境条件方面，当pH处于8.0～8.5时可获得最佳孵化效果。因此，向人工或稀释海水中，或高密度卤虫卵孵化液中添加不超过2克/升的碳酸氢钠（$NaHCO_3$）或定期添加氢氧化钠（NaOH），可显著提升孵化率。该现象可能与孵化酶的最适pH活性范围有关。研究表明，在0.6 ～ 2.0毫克/升浓度范围内，随着溶氧量升高，孵化率呈上升趋势；超过该浓度区间可获得最大孵化率。为避免孵化过程中出现氧气水平下降，需要大量充气，以使卤虫卵在孵化液中保持均匀的混合状态（见3.1章节关于最佳孵化条件的论述）。

如上所述，在较高盐度介质中孵化会消耗胚胎更多的能量储备。当盐度超过阈值（不同品系存在差异，多数品系约为90克/升）时，胚胎将无法吸收足量水分以维持代谢活动。最佳孵化盐度同样具有品系特异性，但实践中通常在15 ～ 35克/升范围内（某些品系可低至5克/升）。

尽管光照在卤虫卵孵化过程中的生理作用尚不明确，但已水合且处于有氧条件下的卤虫卵需要最低限度的光触发才能启动孵化过程，该触发机制与光照强度或光照时间相关。

1.5.4 滞育

卤虫栖息于不稳定的环境，为在极端条件（干燥、极端温度及高盐度等）下存活，卤虫会形成滞育胚胎。雌性卤虫能迅速响应环境波动，从产无节幼体（卵胎生）快速转换为产卵（卵生）模式。尽管这一转换所涉及的基本机制目前尚未完全阐明，环境因子的突然波动（如溶氧胁迫或盐度骤变）似乎会触发卵生现象。然而，滞育状态的诱导机制至今仍未明确。从生物学原理而言，卤虫胚胎以休眠卵形式释放至水体时即处于滞育状态，即使在适宜环境条件下，

其发育进程仍会持续停滞，直至经历某种解除滞育的环境激活过程。在此阶段，代谢停滞由内部机制调控，其与死亡胚胎无法区分。当滞育状态中断后，卤虫卵进入静息状态，这意味着一旦置于适宜孵化条件下，发育过程即可重启并最终孵化（图1-7）。此阶段的发育停滞仅取决于外部环境因素。因此，当有利环境条件恢复时，种群会迅速同步启动孵化代谢，从而快速建立种群。这使得其能够有效拓殖于临时性高盐环境。

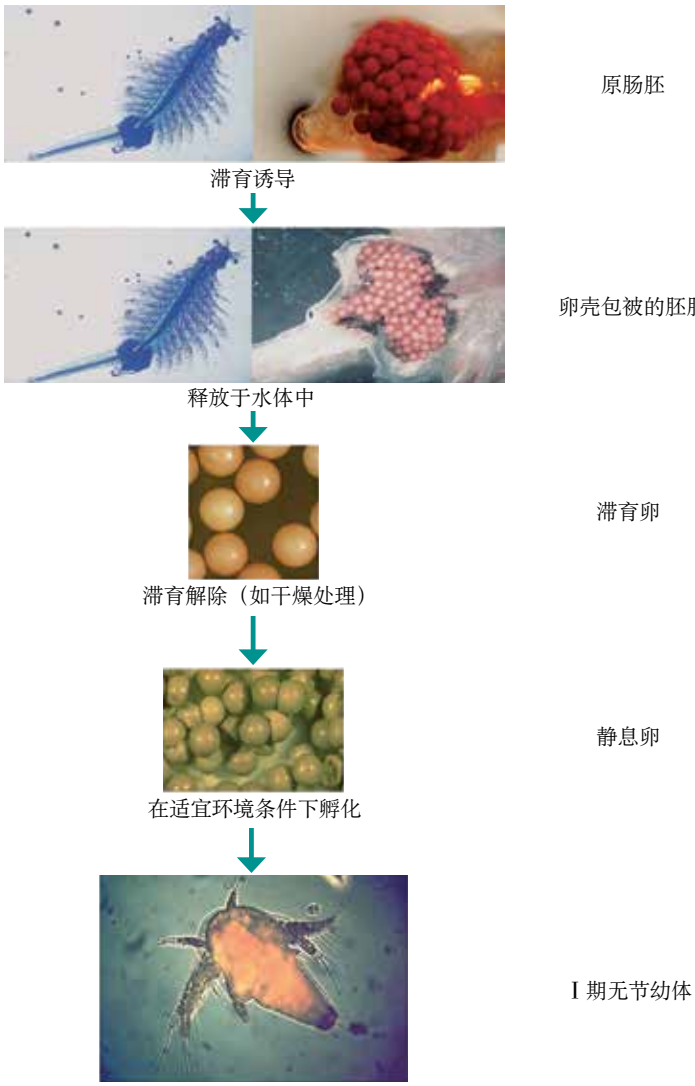


图1-7　卤虫胚胎滞育相关术语示意

资料来源：作者整理（ARARC）。

对于卤虫卵使用者而言，有多种成功终止滞育的技术方法。需特别指出的是，卤虫卵对这些技术的敏感性存在品系甚至批次的特异性，因此难以预测其对孵化效果的影响。当处理新发现或认知较少的品系时，必须通过实验验证特定方法的相对有效性。

在许多情况下，去除卤虫卵的水分是终止滞育状态的有效方法。这可通过将卤虫卵置于不超过35 ～ 40℃的温度下干燥，或将其浸泡于饱和氯化钠卤水（300克/升）中实现。由于脱水处理是多数加工或储存流程的常规环节，终止滞育无需额外特殊操作。然而，对于某些卤虫卵品系，常规的处理技术无法获得足够高的孵化质量，需要采用更具针对性的滞育解除方法。

以下操作流程对特定来源的卤虫卵具有显著效果：

- 冷冻处理：该技术通过模拟大陆性高盐环境中卤虫卵的自然越冬期（例如美国大盐湖、俄罗斯西伯利亚地区及哈萨克斯坦境内的湖泊，见表1-4），此类栖息地冬季气温极低。
- 过氧化氢（H_2O_2）溶液孵化处理：多数情况下，卤虫品系（或批次）对该试剂的敏感性难以预测，需通过预实验确定最佳剂量或作用时长及可达到的最佳效果（表1-5）。过量使用会因化学毒性导致孵化率下降甚至胚胎完全死亡。但在某些情况下，该处理未显现任何效果（Van Stappen、Lavens和Sorgeloos，1998；Robbins等，2010）。

表1-4　不同温度冷藏条件对哈萨克斯坦某盐湖卤虫卵的孵化率影响（%）

贮存时间	贮存温度		
	4℃	−25℃	−80℃
0天	7	7	7
1个月	7	16	12
2个月	27	44	50

资料来源：作者整理（LAARC）。

表1-5　哈萨克斯坦某盐湖卤虫卵经H_2O_2孵育处理的剂量－时间效应对其孵化率的影响（未处理对照组孵化率为18.6%）

孵育时间（分钟）	H_2O_2溶液浓度（%）				
	1.0	5.0	10.0	20.0	27.0
1	31.4	50.8	62.4	53.8	42.2
5	36.6	64.6	69.2	58.2	47.9

续表

孵育时间（分钟）	H_2O_2溶液浓度（%）				
	1.0	5.0	10.0	20.0	27.0
10	46.4	36.7	39.7	68.5	45.0
15	48.8	74.7	76.1	48.6	28.2
20	47.1	76.2	74.2	66.5	17.6
30	49.1	47.7	45.3	25.6	9.5

资料来源：Van Stappen，G.、Lavens，P.和Sorgeloos，P.。1998。《过氧化氢处理对不同地理来源卤虫卵的影响》。水生生物学档案特刊：湖沼学进展，52：281–296。

总体而言，其他滞育终止技术（循环脱水或复水、脱壳处理、γ 射线辐射、化学药剂处理等）的效果往往不稳定，或操作便利性不足。需注意的是，任何处理手段所导致的孵化率提升，可能（至少部分）源于孵化速率的改变（即提前孵化），而非实际孵化率的增加。

参考文献

Agh, N., Abatzopoulos, T.J., Kappas, I., Van Stappen, G., Razavi Rouhani, S.M. & Sorgeloos, P. 2007. Coexistence of sexual and parthenogenetic *Artemia* populations in Lake Urmia and neighbouring lagoons. *International Review of Hydrobiology*, 92(1): 48–60. https://doi.org/10.1002/iroh.200610909.

Amat, F., Barata, C., Hontoria, F., Navarro, J.C. & Varó, I. 1995. Biogeography of the genus *Artemia* (Crustacea, Branchiopoda, Anostraca) in Spain. *International Journal of Salt Lake Research*, 3: 175–190. https://doi.org/10.1007/BF01990493.

Asem, A., Eimanifar, A., Rastegar-Pouyani, N., Hontoria, F., De Vos, S., Van Stappen, G. & Sun, S.C. 2020. An overview on the nomenclatural and phylogenetic problems of native Asian brine shrimps of the genus *Artemia* Leach, 1819 (Crustacea, Anostraca). *Zookeys*, 902: 1–15. https://doi.org/10.3897/zookeys.902.34593.

Asem, A., Yang, C., Eimanifar, A., Hontoria, F., Varo, I., Mahmoudi, F., Fu, C.Z., Shen, C.Y., Rastegar-Pouyani, N., Wang, P.Z., Li, W., Yoa, L, Meng, X., Dan, Y.T., Rogers, D.D. & Gajardo, G. 2023. Phylogenetic analysis of problematic Asian species of *Artemia* Leach, 1819 (Crustacea, Anostraca), with the descriptions of two new species. *Journal of Crustacean Biology*, 43: 1–25. https://doi.org/10.1093/jcbiol/ruad002.

Beardmore, J.A., Pilla, E.J. & Thomas, K.M. 1994. Genetic variation in *Artemia*: speciation, reproductive mode and potential for exploitation. In: G. Gajardo & P. Coutteau, eds. *Book of Abstracts of Contributions*, presented at the International Conference “Improvement of the

commercial production of marine aquaculture species". Puerto Montt, Chile, 5–9 December 1994.

Browne, R.A., Sallee, S.E., Grosch, D.S., Segreti, W.O. & Purser, S.M. 1984. Partitioning genetic and environmental components of reproduction and lifespan in *Artemia*. *Ecology*, 65(3): 949960. https://doi.org/10.2307/1938067.

Browne, R.A. & Halanych, K.M. 1989. Competition between sexual and parthenogenetic *Artemia*: A re-evaluation (Branchiopoda, Anostraca). *Crustaceana*, 57(1): 57–71. https:// doi.org/10.1163/156854089X00356.

Browne, R.A. & Bowen, S.T. 1991. Taxonomy and population genetics of *Artemia*. In: Browne, R.A., P. Sorgeloos & C.N.A. Trotman, eds. *Artemia Biology*, pp. 221–235. Boca Raton, Ann Arbor, Boston, USA, CRC Press.

Browne, R.A., Li, M., Wanigasekera, G., Simonek, S., Brownlee, D., Eiband, G. & Cowan, J. 1993. Ecological, physiological and genetic divergence of sexual and asexual (diploid and polyploid) brine shrimp (*Artemia*). *Trends in Ecology*, 1–114.

Clegg, J.S. 1964. The control of emergency and metabolism by external osmotic pressure and the role of free glycerol in developing cysts of *Artemia salina*. *Journal of Experimental Biology*, 41: 879-892. https://doi.org/10.1242/jeb.41.4.879.

Criel, G.R.J. & Macrae, T.H. 2002. Chapter II. Reproductive biology of *Artemia*. In: T.J. Abatzopoulos, J.A. Beardmore, J.S. Clegg & P. Sorgeloos, eds. *Artemia*. *Basic and applied biology*, pp. 39-128. Dordrecht, the Netherlands. Kluwer Academic Publishers.

Davis, J. 2006. *Biological and physical management information for commercial solar saltworks*. Proceeding of the 1st International Conference on the Ecological Importance of Solar Saltworks, Santorini Islands, Greece: Global NEST: 1–4.

De Vos, S., Rombauts, S., Coussement, L., Dermauw, W., Vuylsteke, M., Sorgeloos, P., Clegg, J.S., Nambu, Z., Van Nieuwerburg, F., Norouzitallab, P., Van Leeuwen, T., De Meyer, T., Van Stappen, G., Van de Peer, Y. & Bossier, P. 2021. The genome of the extremophile *Artemia* provides insight into strategies to cope with extreme environments. *BMC Genomics*, 22: 635. https://doi.org/10.1186/s12864-021-07937-z.

El-Magsodi, M.O., Bossier, P., Sorgeloos, P. & Van Stappen, G. 2016. Effect of light colour, timing and duration of light exposure on the hatchability of *Artemia* spp. (Branchiopoda: Anostraca) eggs. *Journal of Crustacean Biology*, 36(4): 515–524. https:// doi.org/10.1163/1937240X-00002454.

FAO. 2019. *The State of the World's Aquatic Genetic Resources for Food and Agriculture*. FAO Commission on Genetic Resources for Food and Agriculture Assessments. Rome.

Gelabert Fernandez, R. & Solis, L. 1994. The selection of food particle size by *Artemia* from Guantanamo, Cuba. *Revista de Investigaciones Marinas*, 15: 141–145.

Gelabert, R. & Pacheco, A. 2011. Selectivity of particle size by the shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) larvae. *Aquaculture Nutrition*, 17: 244–247. https://doi. org/10.1111/j.1365-2095.2009.00736.x.

Hentschel, E. 1968. Die postembryonalen Entwicklungsstadien von *Artemia salina* LEACH bei verscheidenen Temperaturen (Anostraca, Crustaceae). *Zool. Anz*., 180: 372–384.

Lavens, P. & Sorgeloos, P. 1987. The cryptobiotic state of *Artemia* cysts, its diapause deactivation and hatching, a review. In: P. Sorgeloos, D.A. Bengtson, W. Decleir & E. Jaspers, eds. *Artemia Research and Its Applications*, pp. 27–63, Vol. 3. Wetteren, Belgium, Universa Press.

Léger, P., Bengtson, D.A., Sorgeloos, P., Simpson, K.L. & Beck, A.D. 1987. The nutritional value of *Artemia*: A review. In: P. Sorgeloos, D.A. Bengtson, W. Decleir & E. Jaspers, eds. *Artemia Research and Its Applications*, pp. 357–372, Vol. 3. Wetteren, Belgium, Universa Press.

Makridis, P. & Vadstein, O. 1999. Food size selectivity of *Artemia franciscana* at three developmental stages. *Journal of Plankton Research*, 21: 2191–2201. https://doi. org/10.1093/ plankt/21.11.2191.

Morris, J.E. & Afzelius, B.A. 1967. The structure of the shell and outer membranes in encysted *Artemia salina* embryos during cryptobiosis and development. *Journal of Ultrastructure Research*, 20(3-4): 244–259. https://doi.org/10.1016/S0022-5320(67)90285-7.

Naganawa, H. & Mura, G. 2017. Two new cryptic species of *Artemia* (Brachiopoda, Anostraca) from Mongolia and the possibility of invasion and disturbance by the aquaculture industry in East Asia. *Crustaceana*, 90(14): 1679–1698. https://doi.org/10.1163/15685403-00003744.

Persoone, G. & Sorgeloos, P. 1980. General aspects of the ecology and biogeography of *Artemia*. In: G. Persoone, P. Sorgeloos, O. Roels & E. Jaspers, eds. The brine shrimp *Artemia*, pp. 3–24, *Vol. 3. Ecology*, *culturing*, *use in aquaculture*. Universa Press, Wetteren, Belgium.

Pilla, E.J.S. & Beardmore, J.A. 1994. Genetic and morphometric differentiation in Old World bisexual species of the brine shrimp (*Artemia*). *Heredity*, 72: 47–56. https://doi. org/10.1038/ hdy.1994.97.

Proctor, V.W., Malone, C.R. & Devlaming, V.L. 1967. Dispersal of aquatic organisms: viability of disseminates recovered from the intestinal tract of captive killdeer. *Ecology*, 46: 656–676.

Robbins, H.M., Van Stappen, G., Sorgeloos, P., Sung, Y.Y., MacRae, T.H. & Bossier, P. 2010. Diapause termination and development of encysted *Artemia* embryos: Roles for nitric oxide and hydrogen peroxide. *Journal of Experimental Biology*, 213(9): 1464–1470. https://doi. org/10.1242/jeb.041772

Sainz-Escudero, L., López-Estrada, E.K., Rodríguez-Flores, P.C. & García-París, M. 2021. Settling taxonomic and nomenclatural problems in brine shrimps, *Artemia* (Crustacea: Branchiopoda: Anostraca), by integrating mitogenomics, marker discordances and nomenclature rules. *Peer J*., 9: e10865. https://doi.org/10.7717/peerj.10865.

Seixas, P., Coutinho, P., Ferreira, M. & Otero, A. 2009. Nutritional value of the cryptophyte *Rhodomonas lens* for *Artemia* sp. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 381: 1-9. https://doi.org/10.1016/j.jembe.2009.09.007.

Triantaphyllidis, G.V., Zhang, B., Zhu, L. & Sorgeloos, P. 1994. International Study on *Artemia*. L. Review of the literature on *Artemia* from salt lakes in the People's Republic of China. *International Journal of Salt Lake Research*, 3: 1–12. https://doi.org/10.1007/ BF01990645.

Van der Linden, A., Blust, R. & Decleir, W. 1985. The influence of light on the hatching of *Artemia* cysts (Anostraca: Branchiopoda: Crustacea). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 92: 207-214. https://doi.org/10.1016/0022-0981(85)90095-4.

Vanhaecke, P., Cooreman, A. & Sorgeloos, P. 1981. International Study on *Artemia*. XV. Effects of light intensity on hatching rate of *Artemia* cysts from different geographical origin. *Marine Ecology Progress Series*, 5(1): 111–114.

Vanhaecke, P., Tackaert, W. & Sorgeloos, P. 1987. The biogeography of *Artemia*: an updated review. In: P. Sorgeloos, D.A. Bengtson, W. Decleir & E. Jaspers, eds. *Artemia research and Its applications. Vol. 1. Morphology*, *genetics*, *strain characterisation*, *toxicology.* Wetteren, Belgium, Universa Press.

Van Stappen, G., Lavens, P. & Sorgeloos, P. 1998. Effects of hydrogen peroxide treatment in *Artemia* cysts of different geographical origin. *Arch. Hydrobiol. Spec. Issues Advanc. Limnol.*, 52: 281–296.

Van Stappen, G. 2002. Chapter IV. Zoogeography. In: T.J. Abatzopoulos, J.A. Beardmore, J.S. Clegg & P. Sorgeloos P., eds. *Artemia*: *Basic and applied biology*. Dordrecht, the Netherlands, Kluwer Academic Publishers. 286 pp.

Van Stappen, G., Sui, L.Y., Hoa, N.V., Tamtin, M., Nyonje, B., Renato de Medeiros, R., Sorgeloos, P. & Gajardo, G. 2019. Review on integrated production of the brine shrimp *Artemia* in solar salt ponds. *Review in Aquaculture*, 12: 1054–1071. https://doi. org/10.1111/raq.12371.

Wang, S.F. & Sun, S.C. 2007. Comparative observation on the cyst shells of seven *Artemia* strains from China. *Microscopy Research and Techniques*, 70: 663–670. https://doi. org/10.1002/jemt.20451.

2　盐湖与日晒盐场中的卤虫生产

2.1　不同卤虫栖息地的描述

2.1.1　天然盐湖

2.1.1.1　引言（作者：Gilbert Van Stappen）

如第1.2节所述，卤虫分布于众多盐湖中，这些湖泊在规模、地形、生物及非生物条件方面差异显著（Triantaphyllidis、Abatzopoulos和Sorgeloos，1998；Van Stappen，2002）。此类湖泊通常是位于内流排泄盆地的“终端湖”，即接收支流河水但无外泄至河流或海洋等外部水体的封闭盆地。这些湖泊的水位与盐度平衡主要依赖于河流入水量，同时受降水、周边区域直接径流与蒸发作用的共同调节，而受地下渗流的影响较小。湖泊中的卤虫种群密度通常较低，且主要随当地环境条件波动，其中食物、温度和盐度是关键影响因素。无论湖泊的规模大小，实现卤虫资源开发最大化的高效管理极为困难，甚至几乎不可能。因此，从天然盐湖中采收卤虫卵，本质上是对湖内现存部分资源的粗放式采收。

20世纪60年代，两家美国公司开始销售从美国加利福尼亚州旧金山湾盐田和犹他州大盐湖（Great Salt Lake，GSL）采收的卤虫卵。直至90年代，大盐湖始终是卤虫卵的主要来源地。然而水产养殖需求的扩大，加之大盐湖产量的波动，使市场面临卤虫卵短缺的威胁，促使企业及相关利益方开发其他盐湖资源，以实现卤虫卵供应的多元化与可持续供给。20世纪90年代末期以来，包括中国、哈萨克斯坦、俄罗斯西伯利亚、土库曼斯坦和乌兹别克斯坦的亚洲大陆新卤虫资源陆续得到开发，研究者针对卤虫生产潜力及其种群特性开展了系统考察（Lavens和Sorgeloos，2000；Dhont和Sorgeloos，2002）。

目前全球市场上流通的盐湖卤虫卵的地理来源较为多元，分别来自大盐湖、中亚及中国内陆的盐湖，其相对占比每年呈现波动（图2-1）。卤虫卵资源的多样化至关重要，因为无论规模大小，内陆盐湖极易受气候变化所导致的荒漠化、过量降水或冰川融化导致的盐度降低，以及大尺度温度变化的影响。这些盐湖多分布于半干旱和干旱地区，且淡水资源有限，其脆弱的生态系统平衡还可能受到流域内人类活动的威胁，特别是因农业、工业及城市用水分流导致入湖水量减少，在极端条件下湖泊完全干涸，进而影响盐湖生态。此外，终端盐湖还可能蓄积来自流域内水体的污染物。上述因素可能对当地卤虫种群和可采收卵量产生影响（Gajardo和Beardmore，2012）。由于卤虫种群是这些盐湖中唯一或占优势的后生动物，其在生态系统中占有重要地位，例如卤虫是迁徙水禽的重要食物来源。因此，卤虫的大规模开发需结合野外种群监测，以确定最大采收量，制定可持续采收计划。

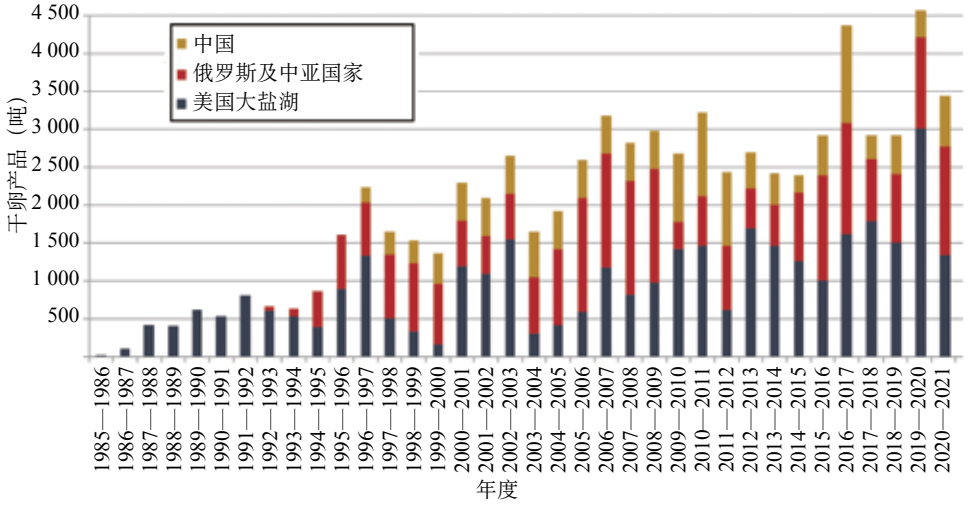


图2-1　中国、俄罗斯及中亚国家盐湖、美国大盐湖的卤虫卵产量波动（以商品干卵吨数计）

资料来源：比利时英伟水产公司。

本手册后续章节将分别描述大盐湖、中国盐湖及俄罗斯盐湖的卤虫生产情况，旨在反映市场上流通产品的多样性及其原产地环境的多样性。本章还精选了关于特定盐湖的文献资料，如伊朗的乌尔米耶湖（Urmia Lake）、哈萨克斯坦和乌兹别克斯坦境内的咸海（Aral Sea）以及土库曼斯坦的卡拉博加兹戈尔湾（Lake Kara-Bogaz-Gol），展示了现存卤虫种群与采收的长期时序性的极端案例，并阐释了气候变化与人为因素的潜在干扰。

2.1.1.2　大盐湖：卤虫种群可持续管理的案例研究（作者：Phil Brown、Brad Marden和Thomas Bosteels）

（1）大盐湖的地形与生态

美国犹他州大盐湖是面积达3 600平方公里的高盐度终端湖，位于北美大盆地东缘，占据56 000平方公里流域的最低洼处。该湖呈现环境多样性与野生动物栖息地共存的格局，其范围涵盖淡水湿地、半咸水海湾及高盐度开阔水域。三条源自周边山脉的河流注入盐湖，在汇入开阔湖湾前滋养着湖东岸广袤的湿地系统。湿地与盐湖维系着种类繁多的迁徙性及居留型水禽和涉禽。季节性半咸水海湾可支持河口附近的浮游动物群落及部分鱼类生存。

大盐湖的主体被1959年横跨湖心建造的实体堤道所分隔。该堤道限制了水体交换，改变了盐度的空间分布，从而影响了各湖湾的生态特征（图版15）。堤道最初修建时设有小型涵洞，2017年涵洞扩大至60米宽，新开口位于更深



图版15　大盐湖流域示意图：标注河流汇入、堤道及堤道缺口位置

资料来源：由美国国家航空航天局约翰逊航天中心地球科学与遥感部门提供的2021年4月卫星图像。https://eol.jsc.nasa.gov。有关本地图中使用的名称和边界，请参阅版权页的免责声明。

的位置，并配有可调节的控制堰。尽管如此，堤道两侧的水体交换仍然受限，海湾之间仍保持水文隔离状态。位于堤道北侧的甘尼森湾仅通过直接降水和地下水补给获得淡水，大多数年份蒸发作用使该湾盐度维持或接近饱和。南部的吉尔伯特湾（Gilbert Bay）全长约65千米，汇聚了三条主要河流的径流入湖，过去十年间其盐度维持在100 ～ 150克/升。该区域在大多数年份承载着该湖本地卤虫物种*A. franciscana*种群的绝对优势群体。

大盐湖卤虫种群在区域及半球尺度上发挥着重要的生态系统功能与价值。吉尔伯特湾是一个具有高生产力的水生态系统，卤虫能够快速将丰富的浮游植物生物量转化为可供野生动物和人类利用的形式。在区域尺度上，卤虫通过控制富营养化维持水体透明度。在无卤虫种群的月份，吉尔伯特湾浮游植物叶绿素a平均浓度超过40 ～ 50微克/升，呈富营养化状态，在低盐度水域引发有害蓝藻水华、缺氧及鱼类死亡等生态问题。然而在高盐度的吉尔伯特湾，富营养化无需担忧，因为卤虫能迅速消耗浮游植物，将叶绿素a降至1微克/升以下，并提升水体透明度，既有利于人类休闲活动，也促进了工业产盐。从半球尺度看，卤虫是连接丰富的浮游植物生物量与迁徙鸟类能量需求的关键纽带。吉尔伯特湾是每年多达450万只黑颈鹱鹬（*Podiceps nigricollis*）的中途停歇地，这些鸟类主要以摄食卤虫来增加体重和储备能量，为继续向南迁徙至越冬地做准备；同时该海湾也是多种鸭类在严冬季节摄取卤虫成虫与卤虫卵的重要场所。此外，吉尔伯特湾还是全球水产养殖业规模最大的卤虫卵产地。

（2）大盐湖的卤虫种群动态

大盐湖卤虫的种群周期受湖泊周边气候和盐湖季节性环境条件影响。该区域属大陆性气候，冬季的严寒导致卤虫死亡，种群以休眠卵的形式越冬。卤虫的生命周期在次年3月重新开始，随着气温回升以及融雪带来的淡水注入增加，卤虫卵开始孵化。最初几周卤虫的生长和成熟较为缓慢，随着气温持续升高，发育进程显著加快。无节幼体于4月发育为青年期卤虫和成虫（图2-1）。首次产幼（卵胎生）繁殖发生于4月下旬至5月，此时育仔囊拥有全年最大的抱卵量。第二代无节幼体的集中出现与藻类的充足供应，使种群数量呈指数级增长，第一代和第二代卤虫的种群规模在5月或6月初同步达到峰值。由于该湖泊终年不封冻，冬季浮游植物的限制因素仅为营养盐缺乏与自遮光，因此每年第一、第二代卤虫都能获得丰富的浮游植物饵料。卤虫作为高效的摄食者，其种群的快速增长会迅速耗尽浮游植物，水体透明度也随之从冬季不足0.5米提高至6米。此时食物和氧成为卤虫的限制因子，种群数量因饥饿与缺氧胁迫而急剧下降。

初夏饥饿期对卤虫种群的胁迫影响会持续波及夏末至秋季。此后卤虫种群数据呈现显著差异。当卤虫数量下降时，浮游植物从摄食压力中释放出来并开始恢复，此时卤虫幼体产量提升；但随着浮游植物的枯竭，卤虫的繁殖模式

普遍从卵胎生转向了卵生（图2–2）。浮游植物与卤虫数量持续呈现此消彼长的波动关系，即浮游植物的微弱增长很快被卤虫种群的小幅增加所消耗。相较于初夏时节，这种增减循环的波动幅度已趋于平缓。初级生产者与捕食者的相互作用稳定性持续至9—10月。总体而言，卤虫种群密度在这几个月中保持相对稳定，但抱卵雌虫数量及其抱卵量均有所增加。吉尔伯特湾内的卤虫卵密度在8—9月持续上升，通常于10月达到峰值。随着11月水温下降，卤虫密度开始降低，少量卤虫持续存活至12月。当温度低于7℃时，自由游动的种群即宣告消亡。大盐湖的卤虫种群通常每年有3 ～ 4代，且世代间常存在重叠现象。

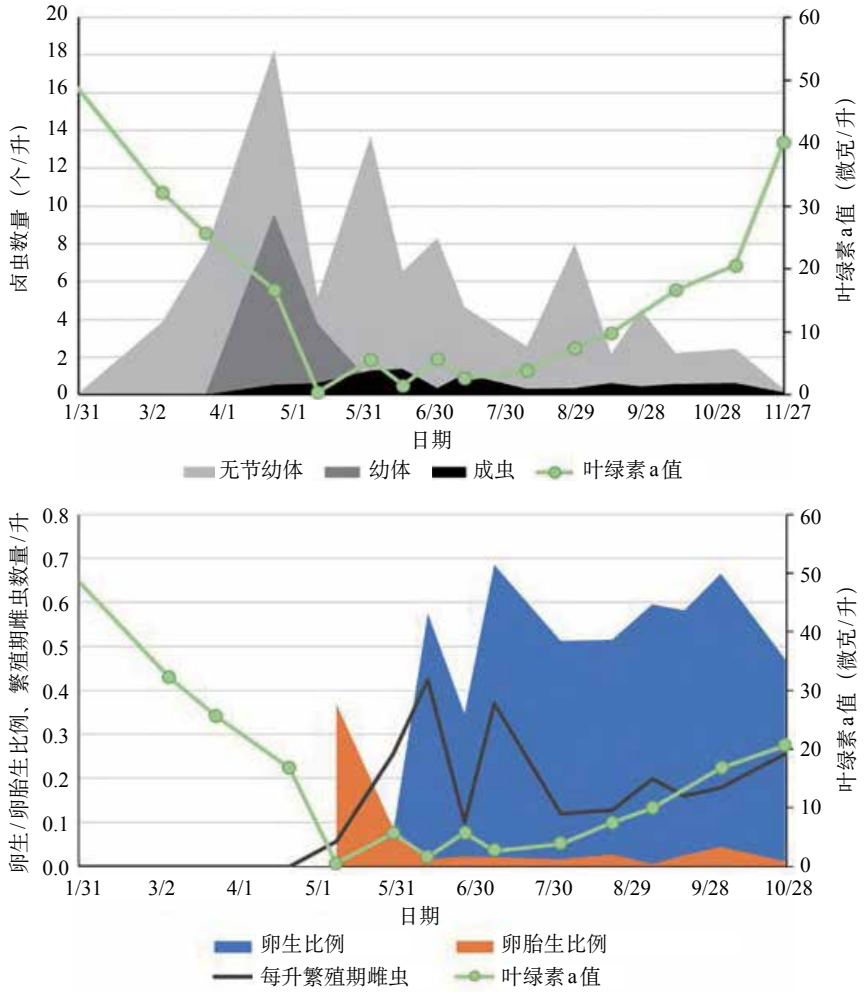


图2–2　2018年各龄期卤虫密度（个/升）与叶绿素a值变化（上图）；卤虫繁殖方式由卵胎生向卵生转变过程，以及每升水体中繁殖期雌虫总密度（下图）

资料来源：GSLBSC，美国。



图版16　直纹毛划蝽背面图像

上述种群动态模式是对过去25年监测数据中典型年份的呈现，当环境条件（尤其是盐度）偏离最佳范围时可能出现差异。卤虫具有强大的渗透调节能力，其生理耐受范围可从半咸水跨越至高盐、乃至近饱和盐度，但在自然环境中，卤虫主要受捕食作用和竞争关系调控，这种调控在较低盐度区间尤为显著。1985—1987年，异常丰沛的径流导致吉尔伯特湾盐度降至＜60克/升（Wurtsbaugh和Berry，1990），水生昆虫直纹毛划蝽（*Trichocorixa verticalis*）（图版16）的捕食行为致使大盐湖卤虫种群数量锐减。而在盐度100克/升的卤虫栖息地，可观测到其近缘种网纹毛划蝽（*Trichocorixa reticulata*）种群（Herbst，2006）。20世纪90年代末期，大盐湖盐度从120克/升下降至76克/升，这与卤虫繁殖率低及可能产生不利影响的浮游植物群落演替相关（Stephens和Birdsey，2002；Belovsky和Perschon，2019）。因此，当盐度低于120克/升时，卤虫种群将同时面临自上而下的捕食压力以及自下而上的浮游植物调控风险。

关于盐度耐受上限，实验室与野外观测数据表明，当盐度超过160克/升时，大盐湖卤虫的丰度与存活率显著下降（Marden、Brown和Bosteels，2020），该结论与对其他卤虫种群的研究结果基本一致（Dana和Lenz，1986；Triantaphyllidis等，1995；Abatzopoulos等，2003）。现有文献证据与野外观测表明，大盐湖卤虫种群的最适盐度范围为120～160克/升。尽管降水与水源补给存在显著年际波动，吉尔伯特湾在过去26年中有22年的盐度波动在最适盐度范围的20克/升以内。长期卤虫种群监测证实，一旦盐度回归最适范围，种群能实现快速恢复。

由于上层水体与下层高饱和度、高密度水层之间的混合作用有限，下层水体作为营养盐转化和沉积的汇区，不断积累来自上层高生产力卤虫栖息环境的有机质。这些限制性营养盐在深层水体中的隔离凸显了维持河流向表层水体输入营养盐的必要性。虽然大盐湖营养盐动态变化主要由营养盐库的内循环驱动，但在多年累积过程中，大盐湖高生产力上层水体的年度营养盐盈亏仍可能达到显著水平。河流输入的氮每年约占吉尔伯特湾氮负荷总量的10%（Naftz，2017），但有必要持续向湖泊补充营养盐。

大盐湖卤虫卵的耐久性与休眠特性对其维持活性至关重要。制约卤虫生存的关键环境因素是栖息地的季节性变化。在日晒盐场和较浅的盐湖中，季节性变化表现为因蒸发导致的栖息地消失或盐度不适；但在永久性的大盐湖中，冬季的低温环境是主要因素。一系列保护性适应机制（见1.5节）并不能完全抵御环境胁迫，卤虫卵在自然环境中会随时间推移逐渐丧失活性。在大盐湖严酷的自然环境中，卤虫卵的活性可保持一个冬季（Marden、Brown和Bosteels，2020），但若多年暴露于岸边的高温、紫外线辐射及降水引发的水合发生时，其活性将显著降低，继而影响卤虫卵的贮存品质（见3.1.2节）。

（3）大盐湖的卤虫采收管理

大盐湖卤虫的商业化开发始于20世纪50年代，但初期仅限于采收成虫供应观赏鱼市场（Sturm、Sanders和Allen，1980）。随着卤虫卵在水产养殖中的应用潜力逐渐被认知，采收重点转向了卤虫卵。在最初的数十年间，卤虫的捕捞压力始终维持在较低水平，这与监管机构犹他州野生动物资源局（Utah Division of Wildlife Resources, UDWR）实施的捕捞管理措施有关，管理仅限于简单的许可制度和征收小额特许权使用费。然而，20世纪80年代末至90年代初，大盐湖商业需求增加与捕捞技术的提升（Kuehn，2002）迫使管理策略必须调整。UDWR在此期间提高了捕捞许可费并缩短了捕捞季。但90年代中期持续加剧的捕捞压力仍然引发了行业担忧，从业者呼吁UDWR对卤虫资源实施更积极的管理措施。

随着资源保护问题日益凸显，一项协同适应性管理方案逐渐成形。UDWR组建了多学科技术咨询小组，负责评估现有生态学数据并指导后续研究，于1996年将捕捞许可证数量上限设定为79份，并将采收期进一步缩短至4个月（Stephens和Birdsey，2002），以维持大盐湖中最低卤虫卵存量，确保来年春季种群恢复。最初几年因野外数据有限，最低存量的估算较为粗略，需基于谨慎的假设。但基于持续的数据收集UDWR很快建立了一个将采收后的卵密度与次年卤虫卵产量峰值相关联的管理模型。此模型大致基于里克种群补充曲线（Ricker stock recruitment curve）（Ricker，1954），预测当春季以前湖中卵存量达到21只/升时，可实现秋季最佳卤虫卵产量（Belovsky和Perschon，2019）。该管理模式可整合逐年数据进行适应性调整，但模型历年的调整幅度很小，至今依然维持21只/升的采收终止阈值。这种管理模式已有效运行20年，但仅适用于大盐湖特定场景。该阈值并不适用于其他湖泊或池塘系统中不同的卤虫种群及物种，每个系统都需要通过针对性研究来制定适宜的管理策略。

这种由卤虫产业与资源管理者共同实施的、基于科学的协同适应性管理策略，使得大盐湖卤虫卵捕捞规模在经历20世纪80—90年代的波动期后趋于

稳定（图2-3）。通过协同管理，当地生态需求、区域经济发展与全球水产养殖业需求已实现逾20年的协调共存。这种将湖泊系统视为整体并统筹兼顾各方利益相关者诉求的管理模式，实现了多重共赢的局面。



图2-3　大盐湖卤虫卵年产量波动（以最终干重计）

资料来源：GSLBSC，美国。

（4）应对大盐湖现代生态系统面临的挑战

大盐湖所提供的生态功能和价值，正面临来自本地与全球的双重生态挑战。近250万人口聚居在毗邻都市区，加之流域内大规模农业活动，持续影响入湖水体量和水质。若这种水资源消耗性利用仍不节制，大盐湖将重蹈全球众多终端湖系统的生态覆辙。迄今为止，人类累计用水已使大盐湖水量显著减少（Null和Wurtsbaugh等，2020），尽管全球气候变化预计将增加犹他州的降水量，但降水形式从降雪向降雨的转变，需要改造水利基础设施，以维持河流对湖泊的补给。若不加以控制，河流补给量的持续下降造成盐度升高和栖息地容积缩减，对大盐湖卤虫种群产生影响。值得庆幸的是，近期立法机构与利益相关方的共同努力已确保大盐湖获得更多水源补给，同时正在实施额外的基础设施建设预算方案以进一步缓解这些问题。

大盐湖裸露湖床产生的粉尘可能将水量减少的影响从水生生态系统进一步扩展到人类健康与经济领域。盐湖粉尘会沉降在城区和山地积雪中（Goodman等，2019），不仅危害人类呼吸系统健康，还会加速大盐湖流域内的积雪消融（Skiles等，2018），其他干涸的内陆盐湖也已有此类现象发生（插文2、插文3）。根据联邦和州政府要求减少污染物排放的法律规定，自1950年以来大盐湖沉积物中的重金属含量总体呈下降趋势。近期的系统性持续研究对该生态系统中重金属等污染物的动态进行跟踪，数据显示生物区系中的

污染物水平保持相对稳定且处于较低浓度。仍需持续关注入湖水量，以避免产生过量粉尘。

犹他州各政府机构及委员会正审慎评估河流入水量减少对大盐湖开放水域造成的负面生态影响，并研究相应缓解措施。落实多方协作管理策略的另一关键举措是2017年在分隔吉尔伯特湾与甘尼森湾的铁路堤道上修建的控制堰。两湾间盐度交换部分受控于堰体高程，未来可根据物质平衡模型（Loving、Waddell和Miller，2000）进行调整，以补偿湖泊水位变化，其中120 ～ 160克/升的盐度最优值为此类堰体改造提供了生态学可论证的管理目标。多年来对吉尔伯特湾的研究表明，这一独特的高盐食物链对氮、磷等营养盐具有较高的同化能力，导致夏季湖水极易出现营养盐限制状态。尽管大盐湖中绝大部分营养物质在不同营养级间循环并保留在生态系统内，但维持营养物质的输入对长期保护湖中卤虫种群至关重要。目前，犹他州水务部门正通过协调研究与利益相关方参与来应对这些问题。营养管理与盐度调控作为生态系统的两大关键驱动因子，其协同作用有效缓解了当前干旱周期导致的湖泊水位变化对卤虫种群的影响。

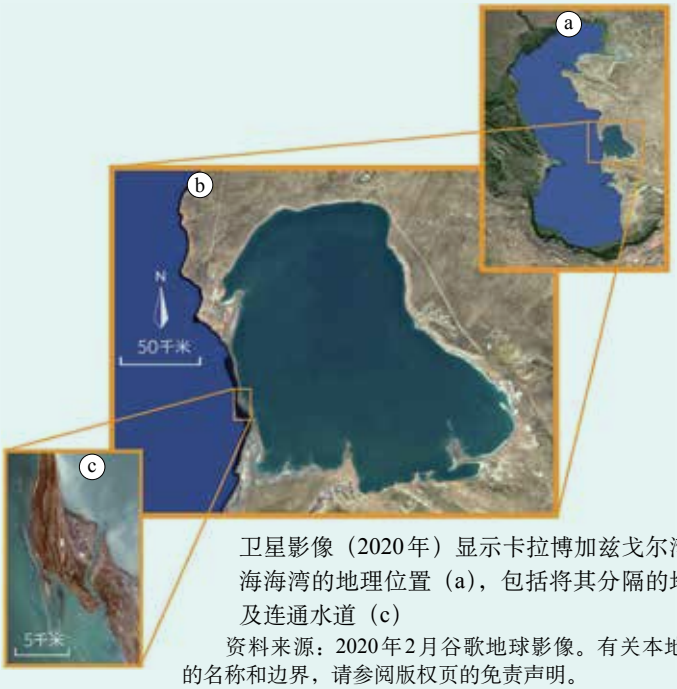
（5）结论

大盐湖卤虫种群是当地生态系统功能及全球水产养殖产业的关键组成部分。通过长期监测计划，该种群已得到详尽分析研究。尽管大盐湖与其他盐湖面临相同的风险与威胁，但关注大盐湖生态系统长期健康的公共与私营利益相关方已构建协作网络，出台协同管理方案，有效缓解了上述各类风险。

插文2　内陆盐湖生态变化如何为卤虫资源开发创造机遇（作者：Philippe Léger和Eddy Naessens）

20世纪80年代至90年代中期，新兴虾类与鱼类育苗市场所需的卤虫卵几乎全部由美国犹他州大盐湖供应（Lavens和Sorgeloos，2000）。1994/1995年冬季，大盐湖卤虫捕捞量持续下降至不足1991/1992年度产量的一半，这一态势危及了日益增长的市场需求。该局面促使比利时英伟水产公司（INVE Aquaculture）开始探寻新的卤虫资源。英伟水产公司成立了专门的卤虫工作组，任务是确定天然卤虫生产场地、鉴定产品特性、评估商业潜力、研究资源生态学、评估可持续采收参数，并建立当地采收与加工基础设施及团队。

1995年1月，英伟水产公司卤虫工作组在土库曼斯坦发现一处名为卡拉博加兹戈尔湾（Kara-Bogaz Gol）的巨大卤水水域（面积18 000千米^2），



卫星影像（2020年）显示卡拉博加兹戈尔湾作为里海海湾的地理位置（a），包括将其分隔的地峡（b）及连通水道（c）

资料来源：2020年2月谷歌地球影像。有关本地图中使用的名称和边界，请参阅版权页的免责声明。



1987年干涸的卡拉博加兹戈尔湾的卫星影像

资料来源：1987年6月谷歌地球影像。有关本地图中使用的名称和边界，请参阅版权页的免责声明。

确认其作为新型卤虫资源的开发潜力。该海湾的土库曼语意为“黑暗咽喉”，通过分隔水体的地峡天然水道与里海（Caspian Sea）相连。由于里海水平面高于海湾，该通道被认为是自20世纪30年代以来里海持续水位下

降的原因。作为补救措施，1980年建设了一座水坝对通道进行了拦截，导致位于极端干旱气候区的海湾完全干涸，同时盐尘暴给周边地区带来环境与健康问题。1992年，随着里海水位再次上涨，大坝开启，海水涌入海湾导致大量盐壳溶解。1995年1月，当该区域进入卤虫研究视野时，其表层硬壳已逐渐溶解。勘探期间，大坝两侧水位接近持平，海湾盐度约为180克/升。这一环境使卤虫种群得以繁衍，数年间英伟水产公司卤虫工作组每年采收并加工数百吨卤虫卵原料。然而机遇窗口极为短暂，随着里海海水流入减缓和底层盐壳溶解，湾区盐度再次上升至卤虫种群难以繁殖的水平，卤虫的采收在世纪之交前后便告终止。

该工作组在土库曼斯坦考察期间，还对里海沿岸的其他区域进行了勘探，最终将勘察范围扩展至卡拉博加兹戈尔湾东北约500千米的咸海（Aral Sea）。20世纪中叶，咸海曾作为苏联时期最大的内陆咸水湖及渔业基地，但因农业灌溉导致入流河道改向，经历了灾难性演变（Mirabdullayev等，2004；Aladin等，2018）。数十年来，该水域逐渐干涸，盐度持续攀升。1997年，针对卤虫的勘探工作正式启动，并于1998年首次在咸海观察到卤虫种群的存在（Arashkevich等，2009）。英伟水产公司与乌兹别克斯坦科学院卡拉卡尔帕克生物生态研究所、比利时根特大学合作开展生态学研究，后续又实施了由北约（NATO）资助的咸海卤虫资源可持续开发计划（Marden等，2012）。目前该地区仍保持每年100吨以上的原料卵采收量。

从“仅使用大盐湖卤虫”转向采用卡拉博加兹戈尔湾、咸海及其他来源的卤虫资源，从单一卤虫种*A. franciscana*转为多种孤雌生殖品系的利用，其中一些品系具有显著品质差异。这一转变客观上要求针对不同品系制定差异化的加工处理与应用方案。不可否认，自2010年代初以来，大盐湖以外卤虫资源的开发与利用显著增加，丰富并稳定了全球卤虫卵的供应体系。

插文3　伊朗乌尔米耶湖卤虫的过去、现状与未来（作者：Naser Agh）

乌尔米耶湖（Urmia lake）位于伊朗西北部，面积约5 500千米^2，是乌尔米耶卤虫（*A. urmiana*）与当地孤雌生殖卤虫种群共存的栖息地（Agh等，2007）。该区域作为数千种迁徙鸟类与土著鸟类的重要湿地，被列入国际重要水禽栖息地湿地公约《拉姆萨尔公约》，同时被联合国教科文组织（UNESCO）认定为生物圈保护区。根据20世纪90年代中期开展的种



1989年（a）与2020年（b）乌尔米耶湖卫星影像对比

资料来源：1989年12月（左图）与2020年12月（右图）的谷歌地球影像。有关本地图中使用的名称和边界，请参阅版权页的免责声明。

群评估研究，该湖卤虫卵年产量曾达数千吨原料卵，因此被视为重要的天然卤虫资源。乌尔米耶湖卤虫对伊朗及本地区的水产养殖业具有重要意义（Van Stappen、Fayazi和Sorgeloos，2001）。

20世纪90年代末，气候变化与人为干预的影响开始显现，给湖泊及其生态系统造成了严重破坏。入湖淡水流量逐年递减，而蒸发量持续攀升，致使湖泊萎缩至原有水量的10%。21世纪初开展的资源再评估显示，与20世纪90年代相比，卤虫年产量已下降至三十分之一。湖水盐度达到过饱和，卤虫种群随之完全消失，这一状况持续约十年。最终随着湖体主要盐分由氯化钠（NaCl）转变为氯化镁（$MgCl_2$），湖水总溶解固体含量达到500克/升以上。数十亿吨盐类在湖床沉积，不仅改变了湖泊的地貌特征，更使其演化为浅层干盐湖。

自2019年起，随着降水增多、湖泊淡水入流量增加，沉积于盐层中的卤虫卵开始重新孵化，再次出现了相对密集的卤虫种群。然而由于夏季水分快速蒸发，水体盐度仍维持较高水平，这些卤虫的生命周期已缩短至3～4个月。2019—2020年，乌尔米耶湖原料卤虫卵年产量估计约为200吨，但未获准进行商业捕捞。该湖的生态系统极为敏感脆弱，卤虫卵产量高度依赖每年充足的淡水注入，以暂时降低水体盐度，使卤虫能够完成其生命周期。

全球变暖、农业活动无序扩张及地下水的过度开采等，正导致伊朗面临严峻水资源危机，生态环境及乌尔米耶湖等多处湿地均深受其害。该湖泊生态系统及其卤虫种群的未来充满高度不确定性，极大程度上取决于政府采取的政策及具体干预措施。2006年，在乌尔米耶大学举办的国际会议上，科学家小组提出了一项适应性管理与湖泊修复策略，类似于哈萨克斯坦咸海区域已实现的方案，将湖泊划分为南、北两翼分别治理，恢复约2 800千米^{2}的湖泊面积。若该计划得以实施，南翼水体盐度将维持在约120克/升，支持卤虫种群的恢复与可持续利用，预计年产约1 000吨卤虫卵原料；而北翼则保持卤水饱和状态，可作为氯化钠及多种矿物质提取的巨型资源库。

2.1.1.3　中国卤虫资源（作者：隋丽英）

在中国，卤虫分布于100多个包括盐湖和沿海日晒盐场在内的自然栖息地。中国拥有三种本土卤虫种，即中华卤虫（*Artemia sinica*）、西藏卤虫（*A. tibetiana*）和索氏卤虫（*A. sorgeloosi*），以及多个孤雌生殖种群（Triantaphyllidis等，1994；Xin等，1994；Van Stappen，2002；Zheng和Sun，2013；Asem等，2023）。*A. sinica*主要分布于内蒙古自治区、山西省及河北省北部的盐湖，西藏大部分盐湖分布有*A. tibetiana*和*A. sorgeloosi*，其余区域盐湖则以孤雌生殖卤虫种群为主。商业化卤虫卵的采收主要在艾比湖（Aibi lake）、巴里坤湖（Balikun lake）、其香错（Qixiang Co或Kyebxang Co）等内陆盐湖和渤海湾沿岸盐田进行（图2-4）。



图2-4　中国主要卤虫卵产地原料采收量

资料来源：AAC，中国。

艾比湖曾经是中国最大的卤虫卵产地。该湖的商业化采卵始于1999年，2012年和2016年原料卵年产量达到2 200吨的峰值，而2015年采收量仅为142吨（图2-5）。自2017年起，政府已禁止在艾比湖进行卤虫卵捕捞作业。艾比湖极浅（最浅处0.7 ～ 0.8米，最深处3米），水体盐度随季节和年份呈现显著波动（最低45克/升，最高240 ～ 250克/升），导致湖面面积与卤虫种群发生相应变化（图2-5）。在盐度＜85克/升或＞180克/升条件下采收的艾比湖卤虫卵，其孵化质量存在显著差异；在盐度120 ～ 150克/升采收卤虫卵，通常可获得更好的孵化质量（图版17）。

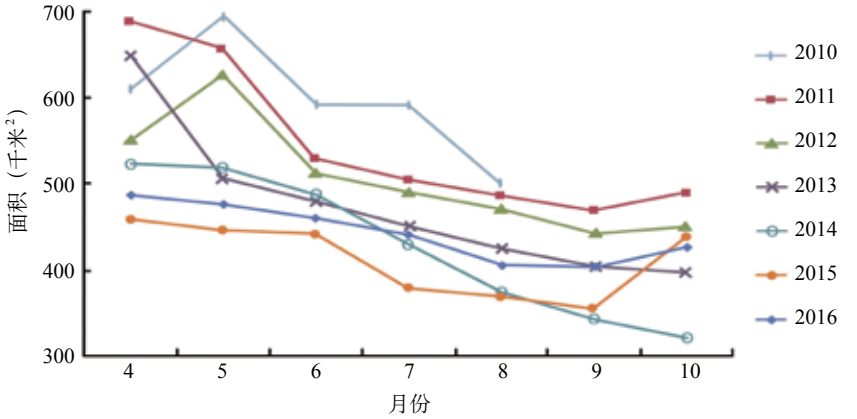


图2-5　2010—2016年艾比湖水域面积变化

资料来源：中国新疆维吾尔自治区水产科学研究所郭炎提供信息。



图版17　中国艾比湖卤虫卵采收作业

青藏高原的一些盐湖中也拥有卤虫资源，该地区的主要气候特征为低氧、低降水及强紫外线照射。西藏的盐湖多为碳酸盐型或硫酸盐型水体，主要分布于那曲市和阿里地区，平均海拔4 000 ～ 4 500米（Zheng，1997）（图

版18）。2020年西藏盐湖的卤虫卵原料总产量超过800吨，主要产自其香错和拉果错（Lagkor Co）。拉果错卤虫种群于20世纪90年代被鉴定为西藏卤虫（*Artemia tibetiana*）（Abatzopoulos、Zhang和Sorgeloos，1998），而源自海晏湖（Haiyan lake）的种群则在2023年被鉴定为索氏卤虫（*Artemia sorgeloosi*）（Asem等，2023）。通过分子标记与线粒体基因组测序分析发现，西藏不同盐湖的卤虫种群已呈现一定程度的遗传分化（Wang等，2008）。其香错和拉果错盐湖的卤虫卵资源具备商业开发价值。





图版18　中国其香错卤虫卵采收作业

自20世纪90年代以来，人们开始采收和加工西藏盐湖卤虫卵。西藏卤虫卵卵径大、呈深棕红色且富含花生四烯酸（ARA）、二十碳五烯酸（EPA）和二十二碳六烯酸（DHA）等高不饱和脂肪酸（HUFAs）（见1.4.6节），其EPA含量显著高于其他卤虫种和品系，且孵化时空卵壳与无节幼体分离效果好。基于这些特性，西藏卤虫品系能更好地满足海水鱼类和甲壳类育苗的营养与生产需求（Xing等，2022；Liu等，2022）。

中国是全球卤虫卵需求量最大的市场，中国水产养殖业每年消耗1 000 ～ 1 500吨干卵，占全球卤虫卵消耗量的40% ～ 50%，主要用于对虾、罗氏沼虾、中华绒螯蟹及石斑鱼和半滑舌鳎等的育苗生产。近年来，螺类［如淡水福寿螺（*Pomacea canaliculata*）］和大口黑鲈（*Micropterus salmoides*）的育苗也开始使用卤虫卵。中国卤虫卵最大的加工生产国，年加工量1 000 ～ 1 500吨（图2-4）。中国也是全球最大的卤虫卵进口国，每年从哈萨克斯坦、俄罗斯及乌兹别克斯坦进口2 000 ～ 3 000吨原料卤虫卵。此外，中国每年出口400 ～ 600吨干制卤虫卵产品（数据由中国水产流通与加工协会卤虫分会提供）。

2.1.1.4 俄罗斯盐湖的卤虫（作者：Liudmila Ilinichna Litvinenko、Alexander Ivanovich Litvinenko和Elena Grigoryevna Boyko）

（1）俄罗斯卤虫资源开发历史

俄罗斯境内已知存在卤虫种群的高盐湖泊主要分布于南部边境的森林草原带、草原带及半荒漠地区，以乌拉尔山脉至阿尔泰山脉沿线，亦有零星分布于此区域之外的盐湖。尽管已记录的卤虫栖息湖泊超过100个，总面积约达1 600平方千米（Van Stappen等，2009；Litvinenko等，2015；Litvinenko、Litvinenko和Boiko，2016），但持续开发的盐湖仅有少数。究其原因，这些多为浅水型的盐湖生态系统具有高度波动性，仅在某些年份才能达到可商业化采收的生产力水平。主要商业性开发卤虫的盐湖分布于西伯利亚西部阿尔泰、库尔干、鄂木斯克、新西伯利亚和秋明等地区，自20世纪70年代起开始采收卤虫卵。根据开发历史可将其盐湖卤虫资源开发划分为如下三个不同阶段（图2-6）。需特别指出的是，与将卤虫卵产量表述为原料卵（即从盐湖直接采收）或干制卵（即经卤水腌制、淡水冲洗和干燥处理）的其他卤虫卵采收区域不同，俄罗斯的卤虫卵产量统计采用“湿的腌制卵”形式，即采收的原料经卤水冲洗后，持续浸泡于卤水中以终止滞育。因此本文所有产量数据均以“腌制卵”形式呈现。

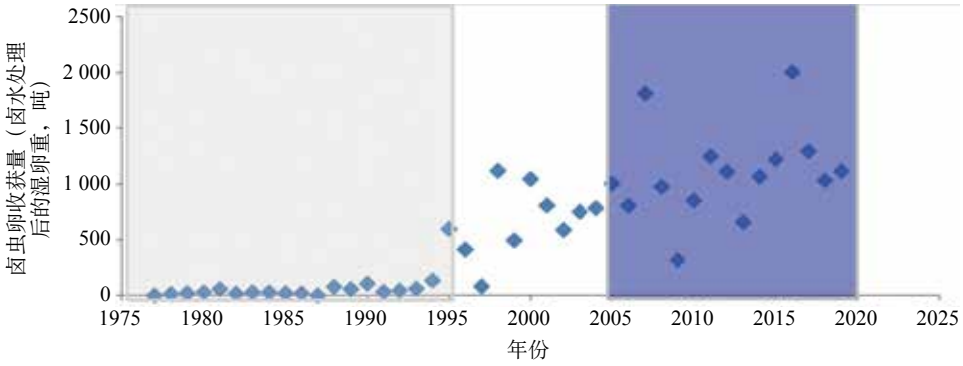


图2-6 俄罗斯卤虫卵捕捞量变化（卤水处理后的湿卵重量）

资料来源：Litvinenko, L.I.、Litvinenko, A.I.、Boiko, E.G. 和 Kutsanov, K.。2015。《俄罗斯卤虫卵生产》。中国海洋湖沼学报，33 (6)：1436–1450。https://doi.org/10.1007/s00343-015-4381-6

Litvinenko, L.I.、Litvinenko, A.I. 和 Boiko, E.G.。2016。《西西伯利亚湖泊中的卤虫》。俄罗斯新西伯利亚：Nauka。295页。（俄文）

Litvinenko, L.I.、Bizikov, V.A.、Kovacheva, N.P.、Saenko, E.M.、Vesnina, L.V.、Kutsanov, K.V.、Semik, A.M.和Parshin-Chudin, A.V.。2019。《卤虫资源评估及建议生产（捕捞）量预测的方法建议》。俄罗斯莫斯科：VNIRO出版社。50页。www.vniro.ru/files/publish/bizikov_artemii.pdf

俄罗斯联邦渔业署互联网资源。https://fish.gov.ru/otraslevaya-deyatelnost/ekonomika-otrasli/statistika-i-analitika

1977—1994年：开发之初主要服务于苏联时期国内鱼类养殖的需求。部分卤虫卵产品也用于观赏鱼类养殖，另有相当数量应用于家禽饲养。阿尔泰地区卤虫资源勘探始于20世纪80年代，主要资源来自面积67千米^{2}的大亚罗沃耶湖（Bolshoe Yarovoe lake），偶尔在小亚罗沃耶湖（Maloe Yarovoe lake）和秋明地区的西尔加湖（Siverga lake）进行采收。卤虫卵年产量介于1～270吨，平均为65吨，产量在该阶段末期呈现缓慢增长趋势。

1995—2004年：这一时期的特点是全球面临卤虫卵短缺的威胁，这与美国大盐湖卤虫卵产量的暂时下降有关。因此，包括俄罗斯在内的全球范围内对卤虫卵商业采收的关注度日益增长。大盐湖产量的下降推动了俄罗斯卤虫资源的商业开发，从大亚罗沃耶湖、库伦达湖（Kulundinskoe lake）等高产大型盐湖，到西伯利亚西部星罗棋布的众多小型盐湖。在此期间，多家从事卤虫卵捕捞与加工的企业相继成立，在总面积达1 130平方千米的西伯利亚西部的五大区域（阿尔泰、库尔干、鄂木斯克、新西伯利亚和秋明）分布的26个湖泊中，开展了常规卤虫卵采收作业。随着商业化开发湖泊数量的增加，卤虫卵年采收量达84～1 119吨腌制卵，平均达643吨。在此大规模扩张时期，俄罗斯卤虫卵也开始进入全球市场，大部分出口至中国。

2005年至今：卤虫卵采收作业已扩展至70个湖泊，覆盖上述五大区域及车里雅宾斯克地区，总水域面积达1 460平方千米，其中40～50个湖泊为常规采收区。卤虫卵采收量持续增长，年均产量达1 207吨腌制卵。近几年，年采收量稳定在1 500吨腌制卵左右，2016年达到2 000吨腌制卵的历史最高纪录。参与卤虫卵采收的企业多达20家，主要活跃于最具商业价值的大亚罗沃耶湖、小亚罗沃耶湖、库楚克湖（Kuchukshoe lake）、埃别伊特湖（Ebeyty lake）、乌利扎伊湖（Ulzhay lake）、梅德韦杰湖（熊湖，Medvezhye lake）及库伦达湖。俄罗斯国内消耗的卤虫卵不足采收量的10%，主要用于鲟鱼（*Acipenser*属）、白鲑（*Coregonus*属）及鲶鱼（*Clarias*属）的育苗生产。大部分卤虫卵以腌制卵形式出口中国，其余则以干制卵形形式销往印度尼西亚、泰国和越南等东南亚国家、欧洲及拉丁美洲市场。部分卤虫卵还用于观赏鱼养殖、化妆品与制药工业。

（2）俄罗斯卤虫种群的特征及开发现状

在已知存在卤虫种群的约100个湖泊中，仅20～30个具有持续商业化开发价值。其余湖泊或因生产力不稳定，或因位于自然保护区及其他受保护区域，仅进行间歇性捕捞或完全未予开发。

目前，俄罗斯83%的商业卤虫卵产自大亚罗沃耶湖、梅德韦杰湖、小亚罗沃耶湖、埃别伊特湖、库伦达湖和库楚克湖）。其中面积最大的是面积约720平方千米的库伦达湖，而生产力最高的则是深水型的大亚罗沃耶湖，其腌

制卤虫卵年均产量达54千克/公顷；梅德韦杰湖次之，达26千克/公顷；小亚罗沃耶湖与埃别伊特湖分列其后，分别为16千克/公顷和14千克/公顷。库伦达湖与库楚克湖生产力最低，仅约3千克/公顷。

年际盐度波动最显著的高盐环境出现在库伦达湖和埃别伊特湖，其盐度在不同年份可相差4 ～ 5倍；其余湖泊的变异幅度较小，为1.5 ～ 3倍。由于这些湖泊主要分布于纵向延伸的地理区域，其温度变化模式等季节性动态存在显著差异，决定了不同卤虫种群的生命周期和发育时段：在西西伯利亚湖泊中，可观测到活跃卤虫种群的时间约为180天，即从4月下旬持续至10月上旬。此外，其他环境参数也存在显著差异，如平均水深（0.3 ～ 4.5米）、年均盐度（70 ～ 250克/升）、水域面积（0.3 ～ 1 300平方公里）、盐类成分等。多数盐湖以氯化物为主，埃别伊特湖和库楚克湖以硫酸盐为主，塔纳塔尔湖（Tanatar lake）和佩图霍夫斯科耶湖（Petukhovskoe lake）则以碳酸盐为主。由于气候条件及年际温度变化，这些湖泊中卤虫的年世代数可为1 ～ 4代，雌性个体在整个生命周期中的繁殖力也可能呈现显著差异。

俄罗斯盐湖卤虫以孤雌生殖种群为主，但也发现少量两性生殖种群，其中部分属于中华卤虫（*A. sinica*）和阿氏卤虫（*A. amati*）物种，而其余两性种群的物种分类地位尚未完全明确（Van Stappen等，2009；Shadrin和Anufriieva，2012；Litvinenko等，2015，2018；Asem等，2023）。

（3）卤虫采收/加工流程与资源开发政策

自2002年起，俄罗斯开始对卤虫采收实施规范化管理。每年对卤虫卵资源量进行监测，并据此预测下一年度的采收量。在浅水型湖泊中，卤虫卵的采收主要沿岸线进行人工捕捞，深水型大亚罗沃耶湖（图版19）采用船只与泵吸设备从水面采收卤虫卵。采收后立即用湖水在岸边对虫卵进行初级清洗，随后装袋存入−20 ～ 0℃的冷库，待后续加工。贮存时长取决于后续处理工序的时间安排，但通常虫卵在冷库中保存约6个月以确保终止滞育。在此期间，需定期监测孵化质量，并据此决定后续处理工序，包括淡水冲洗、次氯酸盐消毒处理及干燥（图版19）。除少量干制卵出口外，大部分卤虫卵会以腌制卵形式销往国际市场。

俄罗斯的卤虫捕捞与贸易由联邦渔业署（Federal Agency for Fishery, Rosrybolovstvo）统一监管。该机构于2009年正式将本国卤虫资源列为重要生物资源类型。联邦渔业署负责卤虫等渔业资源的监测工作，并颁发捕捞许可证和出口许可证。其下属科研机构俄罗斯渔业与海洋学研究所（Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, VNIRO）具体执行卤虫卵资源量监测、提出资源评估建议，并确定推荐捕捞量（Litvinenko等，2019）。本评估方法的核心在于测定整个湖泊生态系统中的卤虫卵总储量，包括湖底沉积



图版19　卤虫卵采收作业：岸基采集（a，b）或船载作业（c）；采用湖水进行苦卤分离过筛（d，e）；卤水处理后的卵低温贮存（f）；淡水清洗净化（g）；离心脱水（h）、干燥（i）及包装（j）

层、水体悬浮层、沿岸堆积区以及雌虫育仔囊内的卵量，并根据监测期间观察到的早期发育阶段卤虫进行推算。总储量与可捕捞量的计算公式综合考虑了当年预期繁殖代数及盐度、水深等环境参数。建议捕捞量于次年发布，其数值定义为预估总储量与下一年度卤虫繁殖所需最低卵量之差。

俄罗斯农业部对采收期进行严格监管。在西西伯利亚地区，12月至次年5—6月期间禁止采收卤虫卵，8—10月期间则严禁捕捞卤虫成体。尽管明令禁止未经许可的捕捞行为，但由于该区域盐湖分布范围约1 400公里，且人口稀少，卤虫卵偷捕现象严重。但鉴于政府已将卤虫卵列入国家战略生物资源名录，近年来执法力度显著加强，偷捕现象已有所减少。

2.1.2　永久性日晒盐场作业（作者：Hector Teruel）

日晒盐场是通过泵送或利用潮汐水位差产生的重力作用，将海水或其他高盐度水体（如含盐地下水）引入一系列相互连通的池塘中，并借助太阳能蒸发作用逐步提高水体盐度的生产设施。根据系统中各单元所维持的盐度梯度，可划分为蒸发池、浓缩池、预结晶池与结晶池（图2-7）。

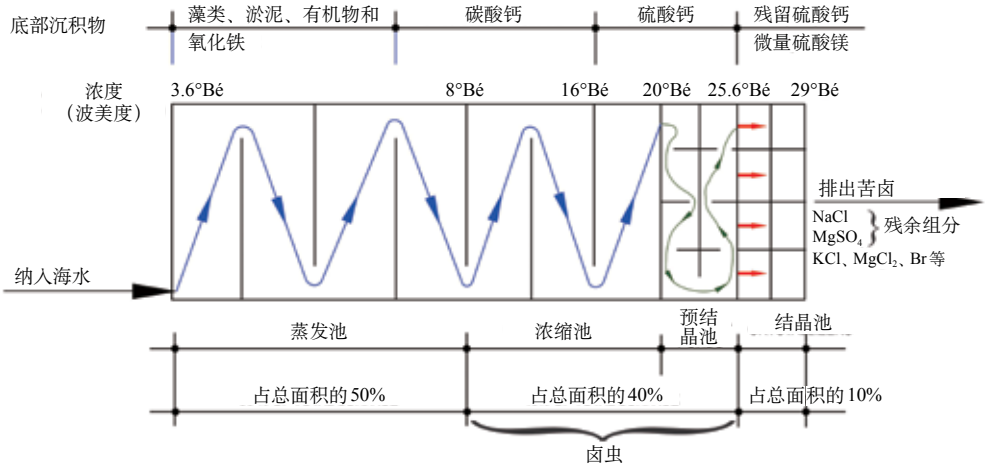


图2-7　日晒盐场总体布局

资料来源：Bradley, H.L. 和 Venkatesh Mannar, M.G.。1984。《利用海水、地下卤水和盐湖建设日晒盐场设施指南》。UNIDO/IS.330/REV.1。https://downloads.unido.org/ot/47/93/4793176/10001-15000_12271.pdf

溶解盐类依据其特定溶解度开始析出（结晶），这一过程称为分步结晶（图2-8）。随着盐度升高，碳酸盐和硫酸盐等低溶解度盐类首先析出。当海水蒸发至原体积约十分之一并达到“析盐点”时，将“苦卤母液”泵入结晶池，此时氯化钠开始结晶析出。氯化钠约占每升海水总盐量的79%，其余重要盐类还包括氯化镁（$MgCl_2$）、硫酸镁（$MgSO_4$）、氯化钾（KCl）、氯化钙（$CaCl_2$）、碳酸钙（$CaCO_3$）及溴化物等（Bradley和Venkatesh Mannar，1984）。

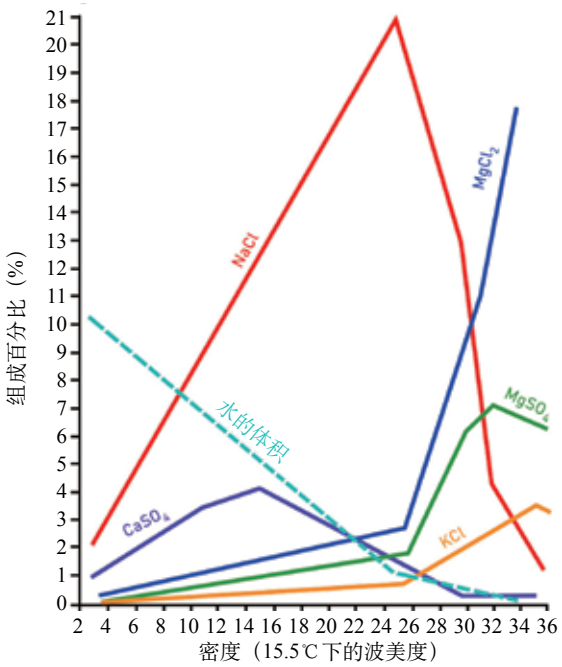


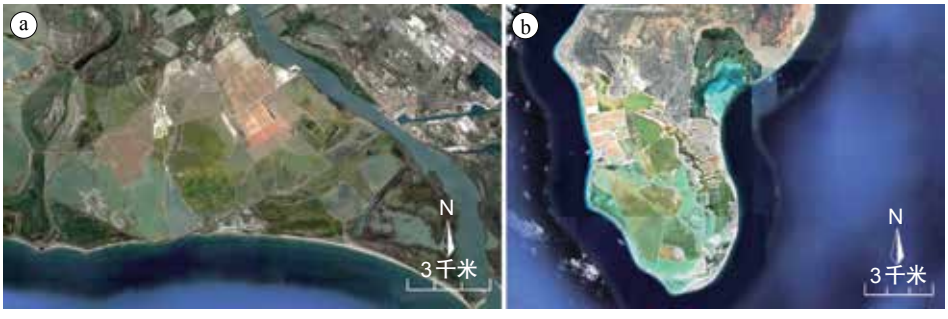
图2-8　盐类的分级结晶

资料来源：Bradley, H.L. 和 Venkatesh Mannar, M.G.。1984。《利用海水、地下卤水和盐湖建设日晒盐场设施指南》。UNIDO/IS.330/REV.1。https://downloads.unido.org/ot/47/93/4793176/10001-15000_12271.pdf

2.1.2.1　永久性日晒盐场的运行管理

永久性日晒盐场分布于气候条件允许全年作业的地理区域，其主要有利因素包括年降水量低、风力强、土壤渗漏低、进入初级蒸发池水体盐度适宜（Bradley和Venkatesh Mannar，1984）。永久性盐场通常高度机械化，可根据生产规模划分为小型（年产盐1万～5万吨）、中型（年产盐5万～10万吨）以及澳大利亚、巴西和法国的大型盐场，其年产量超过100万吨高品质盐。盐田面积从数公顷至数百公顷不等，水深介于0.5～1.5米。

这些盐田在几何布局上虽各有差异，但总体遵循优化蒸发效率原则，以实现最高效率。蒸发池盐度最低，通常在系统中面积最大；因低盐度水体表面张力较小，其蒸发速率高于高盐度水体。盐田的尺寸与空间布局（图版20）通常经过专门设计，旨在使水体在单位表面积内沿最长路径流动，确保系统中每个池体的出水保持特定盐度与稳定溢流，这种连续性水流是永久性盐田区别于季节性盐田的关键特征。当海水流经蒸发区与浓缩区后，高盐度卤水中的氯化钠浓度已接近饱和。在水流路径中，碳酸盐、氧化铁及石膏（$CaSO_4 \cdot 2H_2O$）等盐类已逐步析出，此时卤水总盐度达到270～285克/升（对应波美度为22～23°Bé，见附录1）。将卤水泵入较深的预结晶池，静置数日使石膏充分过饱和并尽可能沉淀。当卤水达到最大饱和点（25.6°Bé或314克/升）且氯化钠开始析出时，通过重力排入结晶池，形成可采收的“盐板”。结晶区面积通常占盐田总面积的10%以上，具体比例取决于进入初级蒸发池的海水盐度。结晶池形状规整，池底坚固，便于采收作业及重型机械操作和运输。当结晶池底部盐层达到特定厚度且卤水密度升至29°Bé（总盐度375克/升）时，则将其引流至卤水池或大海。盐层经机械采收后运至工厂进行洗涤加工，此时最终氯化钠纯度可达99.5%，产品中仅残留微量钙离子（Ca^{2+}）、镁离子（Mg^{2+}）和硫酸根离子（SO_4^{2-}）。



图版20　法国萨兰–德吉罗盐场（a）与荷属安的列斯群岛博奈尔岛盐场（b）：低盐度池呈绿色；结晶池呈红棕色

资料来源：2022年3月谷歌地球影像。有关本地图中使用的名称和边界，请参阅版权页的免责声明。

2.1.2.2 日晒盐场的生物学特性及卤虫的作用

盐场不仅仅是制盐的场所，更是一个需要精心维护以维持长期健康状态的生态系统（Davis，2000，2009）。通过科学管理，可确保每个盐度相近的区域形成独特且相互作用的动植物群落，从而避免因水生生物失衡导致盐产量或品质下降。

在高效运作的日晒盐场中，底栖藻垫由单细胞藻类聚集形成，具有多重生态功能：维持水体溶解氧水平，调控pH以防止生物环境酸化同时有助于密封池底、减少卤水渗漏。水体中通常形成单一或少数几种浮游植物的优势种群，其具体组成取决于盐度等盐池条件，这些优势种通过营养竞争抑制其他物种生长，使盐田系统中不同盐池呈现显著色差。高密度藻细胞能增强卤水着色，通过提升热量吸收与减少太阳光反射来提高蒸发速率。

卤虫是平衡盐田系统的另一关键因子，是永久性盐场中最常见且往往是唯一的浮游动物物种，自然分布于12 ～ 21°Bé（120 ～ 240克/升）盐度区间。在盐业生产中，卤虫不应仅被视为高附加值副产品，其种群的存续直接影响盐产品的品质与产量。即使卤虫与卵产量较低时，通过科学调控卤虫种群来维持盐田生态系统平衡，仍可提升盐业的经济效益（Davis，2000，2009）。

首先，卤虫的非选择性滤食特性可有效调控微藻种群。盐场中因蒸发作用导致营养盐浓缩，易暴发藻华。低盐度池塘中适量藻类有益于促进蒸发，但在高盐环境中，藻类过量，特别是其释放的溶解性有机物与分解产物将会增加水体黏度，从而延迟石膏析出。如果石膏最终与氯化钠共沉淀于结晶池，将污染盐产品导致品质下降。此外，氧化变黑的衰亡藻体堆积不仅污染盐品，还会使盐晶粒径减小。极端情况下，过高黏度甚至可能完全抑制盐的结晶，致使盐片漂浮于水面。

此外，卤虫的粪便颗粒沉降至池底，可促进底栖藻垫的生长。当卤虫因食物短缺或随水流进入预结晶池与结晶池（22 ～ 25°Bé或总盐度260 ～ 310克/升）时遭遇渗透压胁迫而死亡，其代谢产物及分解的卤虫成为嗜盐古菌和细菌种群增殖的基质。这些微生物因细胞膜含有菌红素等高浓度类胡萝卜素，而使池水呈现粉橙色。这种水色能增强热量吸收，通常使水温升高7 ～ 8℃，有时甚至达15℃。尽管液体表面张力较高，仍能促进蒸发作用。否则蒸发速率将减缓，进而降低结晶区的产量。嗜盐微生物的增殖还会降低卤水中的溶解有机物浓度，从而降低水体黏度，有利于形成更大的盐晶体，从而提升盐品质量（Davis，2000，2009）。

卤虫种群密度通常取决于当地的环境条件，如食物供给、温度和盐度（见插文4）。抽水设施和引水渠可调控营养盐摄入和盐度，施肥亦能提高产量。然而鉴于此类盐场规模，这类调控措施往往具有时空局限性，且单位体积

或面积的卤虫数量通常较低。此外，盐池中普遍存在的相对稳定的环境条件，往往导致卤虫种群以卵胎生繁殖模式为主，造成卤虫卵产量下降，具体如巴西东北部盐场案例所示（见插文5）。卤虫养殖亦可利用非常规水资源，如伊朗采用的地下卤水养殖模式（见插文6）。

插文4　阿联酋阿布扎比Al Aryam地区Sama盐业公司的生物盐田管理体系（作者：Hector Teruel）

波斯湾沿海滩涂水体呈现典型的寡营养特性，结晶池的卤水几乎完全透明。这种高表面张力及白色盐板对太阳辐射的高反射作用，阻碍了最佳蒸发与结晶效果。

通过施用尿素和重过磷酸钙（氮磷比为5：1），微藻在初级蒸发池中生长。当藻类浓度足够高时，水体通过溢流进入盐度达110克/升（10°Bé）以上的次级蒸发池。次级蒸发池中多次接种了来自越南永州*A. franciscana*品系卤虫无节幼体，一个月后形成高密度种群，其中包括成虫、青年期卤虫及通过卵胎生方式繁殖的第二代无节幼体。该种群持续扩散至其他蒸发池，直至盐度达到23～24°Bé（280～290克/升）的致死阈值，此时因渗透压失衡和饵料匮乏导致种群消亡。在这些盐池中，卤虫残体的分解使水体中古菌大量增殖并呈现明显的粉红色。

与透明卤水温度34℃相比，结晶池显著着色后温度提升7～8℃。生物干预后的监测数据显示，蒸发速率提升100%，盐层厚度日均增长达1.6毫米。



阿拉伯联合酋长国阿布扎比萨马盐业公司盐池：生物治理前（a）与治理后（b）对比

插文5　巴西卤虫应用历史与现状（作者：Marcos Rogerio Camara）

永久性盐场是巴西东北部半干旱地区滨海湿地系统的重要组成部分。巴西最大的盐田集中分布于北里奥格兰德州，面积在775～3 000公顷，该地区具备制盐的理想条件：长达8个月的旱季（6月至次年1月）、强风、高日照强度及高蒸发率。北里奥格兰德州与海盐产业相关的总面积为41 718公顷，其中30 642公顷用于盐业生产。超过＞95%的巴西海盐产量来自该州，2017年产量达600万吨。

1977年，北里奥格兰德州马考（Macau）盐场通过接种来自美国加利福尼亚州旧金山湾品系的卤虫卵，成功建立了*A. franciscana*种群。随后数年，引入的卤虫通过基于水产养殖和辅助制盐目的的人为接种、风力作用以及水鸟迁徙等途径扩散至邻近日晒盐场（Camara，2001）。

目前巴西市场上流通的卤虫卵产品有相当部分产自北里奥格兰德州的日晒盐场，系海盐工业的副产品。巴西水产养殖业每年消耗的20吨卤虫卵中，约20%来自这里。卤虫卵的采收主要由当地个体经营者及其家庭成员完成，没有正规的捕捞管理。偶尔会通过投放无节幼体或将高盐度盐池中捕捞的卤虫投入到低盐度盐池的粗放方式，进行种群补充。

卤虫卵产量低且波动频繁，是这种基本无监管的、人工提取式水产养殖方式的固有特征。卤虫卵漂浮于蒸发池的特定区域并形成聚集。一旦发现卵的聚集，捕捞者便使用网具和桶在该区域密集作业，从水中舀取虫卵，或在岸边收集卵。收获的卤虫卵被运送至当地加工厂，供当地凡纳滨对虾（*Litopenaeus vannamei*）育苗场使用（Wainberg等，2011）。卤虫亦会被采收，经冷冻、冻干或制成薄片饲料，用于仔虾/幼虾培育。



巴西东北部盐场卤虫（*Artemia franciscana*）卵与卤虫生产：
a. 池边卤虫卵采收；b. 卤水冲洗采收的卵

巴西盐场进行了四十余年的卤虫卵采收，以满足当地水产养殖需求。持续的采收对*A. franciscana*造成了定向选择压力，可能通过种群规模、表型特征、适合度参数及遗传变异等多种途径影响其卤虫种群动态。总体而言，当地卤虫种群已呈现出向直接产生无节幼体的卵胎生繁殖策略转变的趋势（Camara，2020）。巴西盐场卤虫卵的可持续采收，不仅对维持卤虫种群的长期存续至关重要，更具有显著的社会经济价值。对这一关键资源的管理必须基于科学证据，在粗放式开发对这一新兴提取式水产养殖模式造成不可逆损害前，充分预判其潜在影响。

插文6　利用非常规水资源进行卤虫培养（作者：Naser Agh）

在东南亚，利用蒸发海水进行卤虫养殖可追溯至20世纪80年代。此类生产模式迅速扩展至亚洲其他国家以及非洲和拉丁美洲地区。20世纪末伊朗开始在波斯湾沿岸的日晒盐场开展卤虫养殖。随后，卤虫养殖拓展至远离海岸线的其他地区。可用于卤虫养殖的水源包括高盐度地下水、海水淡化尾水、水处理排放水以及与含盐地下水或地表水混合的农业排水。部分水源的营养物质含量可能低于海水，其离子组成也可能与海水不同。因此，利用此类水源开展卤虫养殖时，需针对投喂和池塘施肥采取适应性管理措施。在启动大规模生产前，应使用不同水源的水体或与当地可用盐水混合后的水体进行实验室培养测试，以检测水体离子组成是否适宜、是否存在有毒化合物，从而判定该水体是否适合卤虫养殖。

伊朗中部克尔曼省的一个典型案例，是在农业排水系统筑坝建成了一个25公顷的卤虫养殖池，该设施每年有数月时间通过抽取微咸地下水，将盐度维持在80～150克/升，用于生产卤虫和卤虫卵。此外还配套建设了2公顷的绿水（藻类）培育池，通过添加发酵小麦和米糠作为卤虫饵料，并按适宜比例投喂甜菜糖蜜作为碳源以促进生物絮团形成，为卤虫提供补充饵料。该基地每年可生产2吨卤虫卵原料和约20吨卤虫，供当地对虾育苗场使用。

应特别关注海水淡化厂的排放废水，每年有数十亿立方米盐度介于50～70克/升的浓缩卤水排入海洋，不仅造成局部海岸带生态系统污染，还可能对珊瑚、海草、无脊椎动物及鱼类的生命周期、生长繁殖产生生物学影响。多数海水淡化厂集中分布于波斯湾地区，其浓海水的排放导致海域盐度升高，对海洋生物构成威胁。若将此类废水导入人工湿地用于卤虫





伊朗克尔曼省农业排水系统旁建造的25公顷卤虫养殖池

养殖，既可实现资源化利用，又能保障该区域水产养殖业发展所需的卤虫卵本地化生产，同时创造就业机会并提高农村社区生活水平。对于伊朗等干旱国家，此类人工湿地计划可代替因干旱而逐渐消失的内陆湿地，为当地及迁徙水禽提供觅食、繁殖与越冬场所。

2.1.3 季节性日晒盐场作业（作者：Nguyen Van Hoa和Gilbert Van Stappen）

本节探讨热带–亚热带区域仅在旱季运营的小型盐场，亦称盐田。此类手工盐场的盐池面积通常仅数百平方米，水深0.1 ～ 0.6米。图2–9展示了典型手工盐场越南永进（Vinh Tien）盐业合作社的布局结构。多数盐场每年仅运营数月，期间蒸发量须大于降水量。雨季时盐场停产，蒸发池常被改作鱼虾养殖池。尽管季节性盐场与大型永久性盐场的产盐原理具有相同的化学和生物学基础，其生产方式仍存在细微差异。季节性卤虫池塘养殖的技术体系详见第2.2节，以下简要概述生产流程要点。

在生产季节初期，所有池子均注入海水。水源供给主要通过潮汐，或使用小型便携式水泵、风车或手动汲水器，以便更精准地调控水体和盐度水平。

水分持续蒸发，通常在下一轮大潮来临前，将所有盐度高于海水的水体集中汇入一个池中，其余池子则重新注入海水；新注入的海水经再次蒸发浓缩后，转入第二级池。如此循环往复，最终形成一系列盐度梯度递增的多级盐池系统。在整个生产季中，各级池塘水体在达到预设盐度阈值后，被导入下一级更高盐度的池子。与永久性盐场不同，该池塘系统的盐度并不保持恒定。为加速蒸发，有时会延迟1 ～ 2天注水使池子干涸，此时池底的蓄热可显著提升蒸发效率。当盐度达到260克/升时，将水体泵入结晶池进行氯化钠结晶。

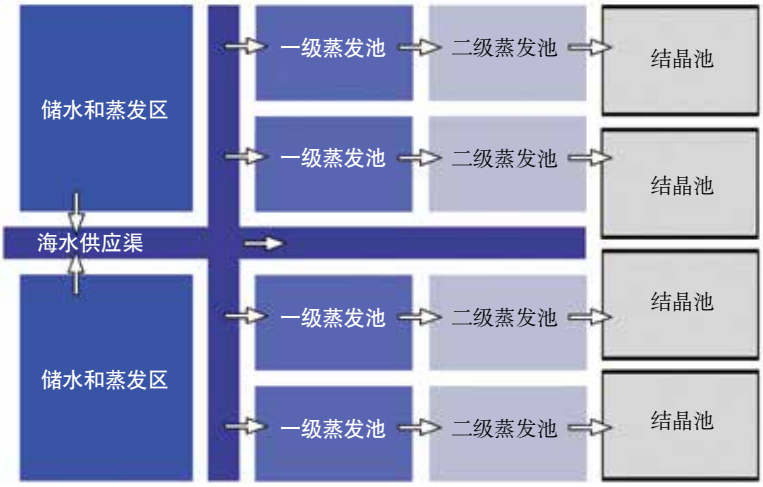


图2–9　典型传统日晒盐场布局（越南永进地区）：（1）储水和蒸发区：面积0.4 ～ 1公顷，盐度10 ～ 50克/升；（2）一级蒸发池：面积0.2 ～ 0.5公顷，盐度40 ～ 120克/升；（3）二级蒸发池：面积0.2 ～ 0.5公顷，盐度80 ～ 160克/升；（4）结晶池：面积0.2 ～ 0.5公顷，盐度≥120克/升直至水分完全蒸发

资料来源：越南芹苴大学。

卤虫在盐度达到80 ～ 90克/升以上的盐池中快速生长，该盐度阈值能有效控制捕食者。季节性养殖系统因规模较小而便于调控，可通过维持较高饵料浓度来实现卤虫种群的高密度培养。同时，该系统存在显著的环境波动特征，如浅池导致温度变化、高藻密度与施用有机肥影响溶氧水平、间歇性抽水造成盐度波动等，这些不稳定因素加之年度性生产周期中断，使卤虫倾向于卵生繁殖模式。

综合养殖系统将高盐度的卤虫培养与低盐度的鱼虾养殖相结合。集约化卤虫养殖也可独立于盐业生产单独开展。将鱼虾育苗场或养殖池排放的尾水注入卤虫养殖池，但45 ～ 60克/升的盐度通常不足以抑制捕食者，需采用过滤袋或错流筛对进水进行预处理。米糠和豆粕等农副产品可作为补充饵料。季节性卤虫池塘养殖的具体操作规范详见2.2节。

2.2　池塘养殖（作者：Nguyen Van Hoa和Gilbert Van Stappen）

尽管卤虫池塘养殖已在多个国家和地区开展，但本手册的技术方法主要基于越南湄公河三角洲朔庄（Soc Trang）与薄寮（Bac Lieu）地区的盐农与科研人员长期的经验积累，形成的一套行之有效的操作规范（Hoa和Sorgeloos，2015；Van Stappen等，2019）。虽然该技术体系的诸多环节可直接适用于其他

区域，但文中特定部分明确涉及越南当地的特殊条件（如气候特征）则可能存在差异。必须强调的是，本生产规范是针对越南永州*A. franciscana*品系制定的，该品系源自20世纪80年代引入的旧金山湾*A. franciscana*品系（Quynh和Ngoc Lam，1987；Clegg等，2000；Hoa，2002；Kappas等，2004）。因此，当采用其他卤虫品系或物种进行池塘养殖时，尤其是环境条件与湄公河三角洲差异显著时，所述的温度耐受性、成熟周期、繁殖力及产量预估等参数均需相应调整。

2.2.1 地点选择

将卤虫生产整合到现有的日晒盐场或对虾/鱼类养殖场中，其成本效益远高于从零开始新建卤虫养殖系统。养殖池可建于具有适宜盐度的蒸发池附近，亦可对盐场现有池塘进行改造。

尽管下一章节未详尽阐述池塘建设与选址的所有技术细节，但重点归纳了适用于卤虫池塘养殖的关键要素。读者可参阅专业池塘建设手册获得更多技术信息（de la Cruz，1983；Kumar，1992；粮农组织，2017；Sneyers和Ingawa，2005）。

2.2.1.1 气候条件

尽管短期养殖可用孔径小于70微米的筛网过滤除掉敌害生物，但高盐度是有效阻隔卤虫天敌侵入养殖系统的天然屏障，因此高盐度水体的充足供应至关重要。所以卤虫养殖通常在年蒸发量长期超过降水量的区域（如热带–亚热带地区有持续4个月以上的旱季）开展。蒸发速率受温度、风速及相对湿度共同影响，尤其在鱼虾养殖场配套建设卤虫培育池时，需掌握当地蒸发量数据。若区域内有日晒盐场，则表明该地至少部分时段具备开展卤虫池塘养殖的气候条件。温度作为关键气候因子直接影响种群动态，低温将导致生长繁殖迟缓，而高温则可能引发死亡。需注意的是，卤虫的最适培养温度具有品系特异性（见第1.4.4节）。

2.2.1.2 地形条件

建造池塘的地块应尽可能平坦，以便于构建形状规则的池子。轻缓的坡度可加速池塘系统中的重力自流。选择建造完全下挖式或平地式盐池（池底与周边地面基本齐平，通过堤坝蓄水）一般取决于现有盐池的类型。最好选择卤虫养殖池的位置低于其他池塘，因为在卤虫生产中，池塘的进水频率和水量远高于排水，通常仅在养殖季节结束时才会排空池塘。利用重力或潮汐注水可降低泵送成本。

2.2.1.3 土壤条件

由于生产高盐度水体需要较长的蒸发时间，土壤渗漏率应降至最低。含沙量极低的黏质土壤是最理想的基质（Hoa，2014）。鉴于渗漏是鱼虾养殖场

乃至大型盐场最常见的问题之一，在选定场地建设大规模池塘群之前，先行建造小型试验单元可避免失误。

另一潜在问题是常见于红树林或沼泽区域的酸性硫酸盐土壤，其表层有时可见黄色或锈色颗粒，这类暴露于空气中会形成硫酸（H_2SO_4），导致水体pH骤降。在低pH环境下难以进行藻类增殖，而藻类是卤虫的重要食物来源，因此池塘的产量往往偏低。酸性硫酸盐土壤的治理成本高昂。

池底大量有机质的存在亦可能引发问题，此类土壤用于堤坝建造时易收缩而导致堤高显著降低；此外，有机质分解易出现池底溶氧耗竭现象。尽管连续使用数年后有机质含量会降低，但养殖初期此类问题可能持续存在（Hoa，2014）。

2.2.1.4　供排水渠

主渠道兼具为制盐生产输送海水、在雨季用于鱼虾蓄养的双重功能。该渠道同时将海水引入主蓄水库，再通过渠系网络将水分引流至各蒸发池之间，最终输送至结晶区。

2.2.2　卤虫生产模式

2.2.2.1　卤虫生产模式概述

自20世纪80年代以来，为应对市场需求波动及养殖户投资能力差异（Son，2010；Hoa和Sorgeloos，2015；Vinh等，2019），越南湄公河三角洲朔庄与薄寮盐田区开发了多种卤虫生产模式（表2-1）（Hoa等，2011）。第2.2.2节提及的诸多原理与管理实践，将从第2.2.3节起展开阐释。

表2-1　卤虫生产模式

一般方式	投资水平	池塘管理			最终产品
单一养殖	粗放式	静水	单轮	接种无节幼体	卤虫卵
联合养殖	集约化	流水	多轮	接种生长期的卤虫	卤虫成虫

资料来源：Hoa, V.N. 和 Van, N.T.H.。2019。《盐田卤虫养殖原理》。N.V. Hoa 和 P.K.H. Lam（编）。越南胡志明市，农业出版社。ISBN 978-604-60-2946-5。219页。

2.2.2.2　单养模式与综合养殖模式对比

（1）单养模式

单养模式专为卤虫养殖设计，包含卤虫生产池塘系统、施肥池（通常占系统总面积的15% ～ 20%）以及给排水渠道系统。该模式下整个盐田区域均改造为卤虫养殖区。对于小规模养殖户而言，通常建议与同区域其他养殖户的场地相连，以便共享供水系统。此外，盐结晶区也可改造为卤虫养殖池，或利

用卤虫池排放的尾水进行盐业生产（图2-10）。

（2）综合养殖模式

综合养殖模式是指将卤虫养殖与其他生产活动相结合的同步生产体系，具体形式如下：

①卤虫-制盐模式：利用盐田卤水调节卤虫养殖池盐度，而卤虫池的排放水可用于制盐。由于卤虫起到了降低微藻密度和有机物浓度的过滤作用，由养殖池排放的低黏度卤水生产的盐品质更优。

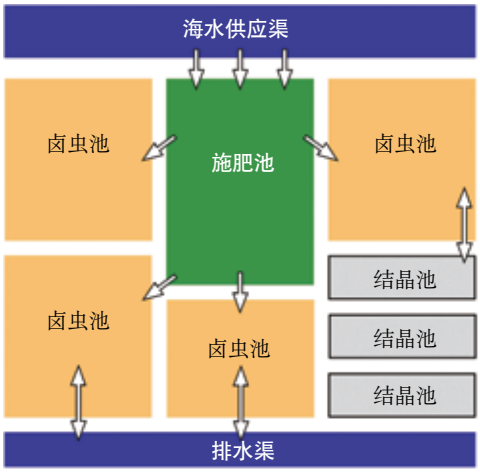


图2-10　卤虫养殖场的总体设计及功能分区池塘布局

资料来源：Hoa, V.N. 和 Van, N.T.H.。2019。《盐田卤虫养殖原理》。N.V. Hoa 和 P.K.H. Lam（编）。越南胡志明市：农业出版社。ISBN 978-604-60-2946-5。219页。

②卤虫-虾/鱼-制盐模式：卤虫与制盐环节的相互作用如上所述，同时在同一养殖系统中以较低盐度养殖虾/鱼类（图2-11）。例如在肥水池中养殖罗非鱼，投喂颗粒饲料养殖鱼虾，及施用肥料促进初级生产力。一方面，虾/鱼养殖池的富营养化水体可促进藻类生长，进而成为卤虫的饵料来源。另一方面，将新鲜卤虫按需分选规格，用于鱼虾类不同生长阶段的育苗和养殖（Bengtson、Léger 和 Sorgeloos，1991）。将卤虫与鱼虾类混养，可借助卤虫的滤食特性发挥其“生物过滤器”作用，实现水体的净化（Kongkeo 和 Wilkinson，2005）。

③卤虫-家畜/家禽-制盐模式：类似上述“卤虫-盐业模式”，家畜/家禽可通过笼养或构筑物直接养殖于卤虫池或施肥池上方。笼舍残余饲料与排泄

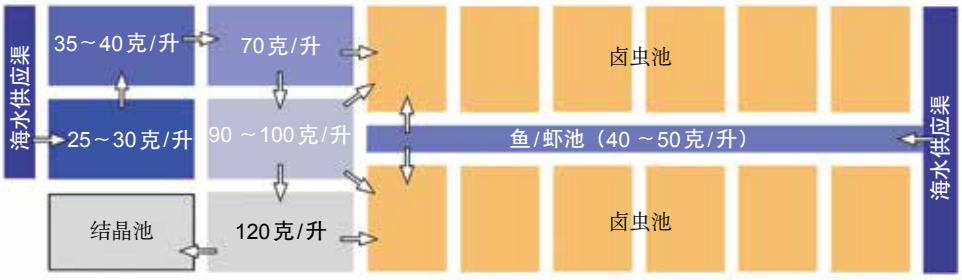


图2-11　卤虫-虾/鱼-制盐综合养殖模式示例

资料来源：Hoa, V.N. 和 Van, N.T.H.。2019。《盐田卤虫养殖原理》。N.V. Hoa 和 P.K.H. Lam（编）。越南胡志明市：农业出版社。ISBN 978-604-60-2946-5。219页。

物落入池中，收获的卤虫可作为蛋白质来源掺入家畜/家禽饲料。但需特别注意，任何用于家畜或家禽的预防性或治疗性药物都可能通过粪便进入水体，最终进入水生食物链。

2.2.2.3　粗放式与集约化养殖模式对比

（1）粗放式养殖模式

与其他粗放型水产养殖模式类似，该模式对养殖系统的投入要求较低，仅利用旱季末期盐田的高盐度水体。在此条件下，系统内富含有机质或微藻，无需为卤虫养殖实施施肥或盐田改造。养殖户仅需接种卤虫，或使用新孵化的无节幼体或从其他池塘转移部分卤虫，接种后卤虫种群将自行繁殖。由于管理投入较少，该模式下池塘更易受到卤虫天敌或食物竞争者的侵扰，因此卤虫密度通常较低。低密度加之缺乏补充投喂，导致生产力相对低下且不稳定，每公顷每季湿卵产量为10 ～ 20千克，或卤虫湿重仅数百千克。

（2）集约化养殖模式

与粗放式养殖模式相比，集约化养殖模式在以下方面存在显著差异：

①基础设施规模更大，配备更完善的供排水系统，可实现全年运营，且受温度、盐度等环境波动影响较小；

②系统由具备资质和经验的技术人员管理，配备充足劳动力、水泵和增氧机等机械设备；

③生产稳定性更高，养殖池可长期运行，确保卤虫种群获得微藻或补充饲料等充足食物；

④施肥操作需确保氮磷比例与含量适宜，以促进适合卤虫的微藻生长（如硅藻门藻类）；

⑤采用生物絮团技术，通过维持最佳碳氮比，在稳定养殖环境的同时提升池塘饵料生物量。

半粗放型或半集约型生产系统在集约化程度上存在差异。鉴于集约化系统的规模及对管理的需求，其运营成本一般高于粗放模式1.5 ～ 2倍。但集约化养殖模式的生产力通常至少高出2 ～ 3倍，半集约化系统4个月生产季的湿卵产量为50 ～ 70千克/公顷，而集约化系统可达200千克/公顷。

2.2.2.4　静水式与流水式养殖模式

（1）静水式养殖模式

各池塘独立管理，在单个池塘进行卤虫接种不会对其他池塘产生影响。即便共用一套供排水系统（图2-12），当某养殖池出现存活率低、入侵性敌害生物或底栖藻类等问题时，其余池塘的养殖仍不受干扰。此系统适用于近期由日晒盐场改造而来的卤虫养殖池，且所在区域无意愿转型为集约化卤虫养殖。由于所有池塘均用于生产，养殖面积得以最大化扩展；但实践经验证明，

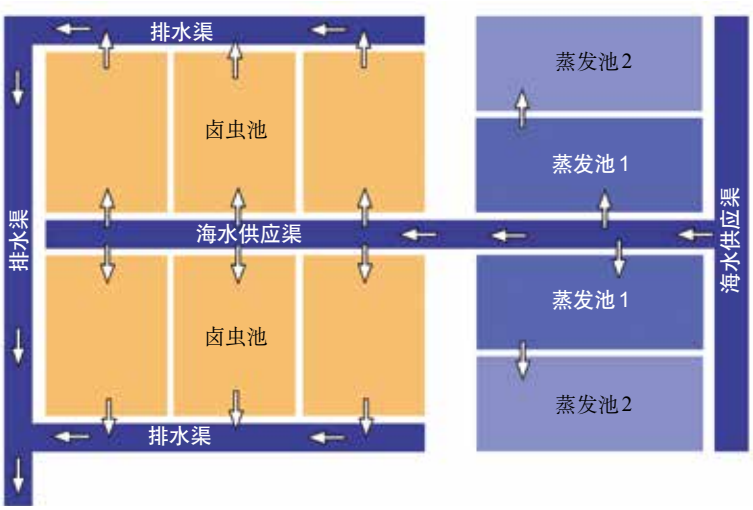


图2-12　卤虫静水单养模式示例（用于提升盐度的蒸发池与卤虫养殖池相连）

资料来源：Hoa, V.N. 和 Van, N.T.H.。2019。《盐田卤虫养殖原理》。N.V. Hoa 和 P.K.H. Lam（编）。越南胡志明市：农业出版社。ISBN 978-604-60-2946-5。219页。

仅50% ～ 60%的卤虫养殖区域具有经济效益。静水养殖体系的特点在于各池塘的空间隔离性，每个池塘必须单独管理，因此需投入更多劳动力。

（2）流水式养殖模式

该模式与静水式养殖模式的区别在于：

①规模较大，适用于集成化生产，由多个相互连通的池塘协同运作；

②高投资成本，主要用于强化堤坝系统、优化排水设施及建设大功率泵站建设；

③整体运营需要丰富的专业知识和实践经验。

其设计原理与水流路径（图2-13）与静水式养殖模式截然不同：由泵站为整个系统供水；系统内各池塘水位与盐度呈梯度分布，首端池塘盐度最低，末端池塘接近饱和并达到结晶浓度。

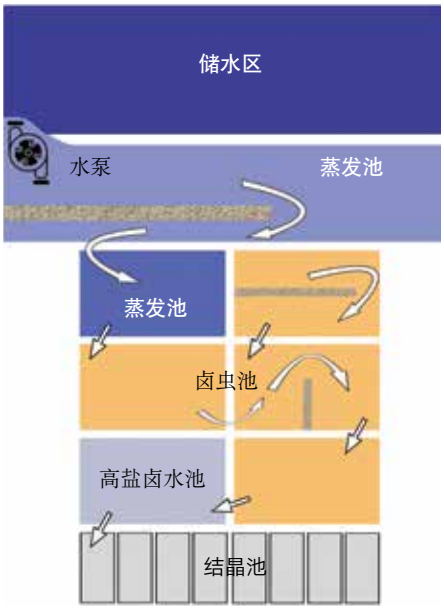


图2-13　流水式卤虫培养模型示例

资料来源：Hoa, V.N. 和 Van, N.T.H.。2019。《盐田卤虫养殖原理》。N.V. Hoa 和 P.K.H. Lam（编）。越南胡志明市：农业出版社。ISBN 978-604-60-2946-5。219页。

在该模型中，卤虫培养区占养殖场总面积的比例较低，因为卤虫培养仅能在盐度80 ～ 100克/升的区域内进行。其优势在于，由于频繁供应绿水，繁殖雌虫密度较高，单位面积的卵或卤虫产量较静水系统更高。但由于建设成本较高，不适用于未来可能需重新改造为盐田的场所。

2.2.2.5　单周期与多周期养殖模式

（1）单周期养殖模式

该模式中，“生产周期”是指从旱季开始至结束的时间，期间需完成池塘修整、高盐度水体制备、卤虫接种、池塘管理、收获及终止生产等作业。该养殖模式要求配备经验丰富的技术人员，通过维持卤虫种群的高产稳定状态，即不同生长阶段卤虫（包括无节幼体、青年期、拟成体和成体）的动态平衡，直至4 ～ 5个月后旱季末期实现生产目标。在稳定种群中，成体完成繁殖后会自然死亡，但新生代卤虫将及时补充替代。然而当环境恶化时，因饵料供应不足或不稳定导致新生代卤虫补充不及时；若此状况持续，最终将导致种群衰退与产量下降。

（2）多周期养殖模式

在适宜条件下，卤虫繁殖活力通常在接种后2 ～ 3周内逐渐增强，持续产出大量卤虫卵或卤虫，随后逐渐衰退。当收获量下降影响经济效益时，养殖户可终止养殖、实施池塘修整，然后重新投放卤虫并开始第二茬卤虫生产。当绝大多数雌虫转为卵胎生繁殖（产卵），且养殖户以获取卤虫卵为主要生产目标时，也可启动第二茬养殖周期。根据旱季持续时间与气候条件，若养殖户能完全控制连续周期的卤虫种群，则整个季节的虫卵或卤虫产量将显著高于单周期养殖模式（Baert等，1997）。

2.2.2.6　接种模式

（1）投放新孵化无节幼体的养殖模式（孵化模式）

理想情况下，养殖活动的开始应在标准化条件下孵化虫卵，以获得优质Ⅰ期无节幼体。但现场孵化条件可能低于标准，导致孵化效率下降。例如1克优质越南永州卤虫卵在标准条件下可孵化出300 000 ～ 320 000只无节幼体，而实际孵化效率只达到250 000 ～ 280 000只。因此需根据水体与目标投放密度（100 ～ 150只/升）估算卤虫卵的孵化量。

（2）投放生长期卤虫的养殖模式（转移模式）

池塘条件适宜时，永州卤虫在接种后10 ～ 15天即可发育至成虫阶段并开始繁殖，首胎通常为无节幼体（卵胎生繁殖），因此种群密度激增。养殖户可选用1毫米孔径筛网将较大卤虫留在原池，通过水位差将无节幼体转入新池。

当新池中的幼体密度达到约100只/升时，即可终止转移。该操作可能因

水流造成网内卤虫的一些损失，但不应影响原种群的健康状态。若原池中卤虫密度过高，亦可转移处于任何发育阶段的卤虫。该模式的优越性不仅在于节省了池塘接种所需的卤虫卵、孵化所需的时间、人力和电力成本，投放较成熟发育阶段的个体还可缩短卤虫种群发育周期，从而更快进入繁殖阶段。

2.2.2.7　卤虫卵与卤虫生产模式

（1）卤虫卵生产模式

湄公河三角洲自20世纪80年代初开展盐田卤虫养殖，生产目标是为水产育苗场供应卤虫卵（Rothuis，1987）。理论上，刺激雌性卤虫产卵需满足三个条件，即高盐度水体（＞80克/升）、溶氧量水平波动、源自微藻叶绿素的铁元素充分供给。实践表明，雌虫的繁殖活动通常始于卵胎生繁殖，随后转为卵生繁殖（卵胎生繁殖可能持续存在），最终生命周期仍以卵胎生繁殖结束（Lavens和Sorgeloos，1984，1987a；Hoa和Hong Van，2019）。食物充足和健康的雌虫与极高繁殖力（每窝＞100枚卵或无节幼体）之间存在明确相关性。根据集约化程度差异，粗放型、半集约型及集约型养殖系统每3～4个月生产周期，湿卵产量分别可达30～50千克、70～120千克或150～200千克/公顷。

（2）卤虫生产模式

该模式下，养殖户主要按卤虫不同发育阶段或规格采收卤虫，以满足育苗、仔虾稚鱼培育或亲本养殖的需求。针对进入繁殖阶段的种群，已开发出以周期性卤虫采收为目标的管理方案（Baert等，2002），最有效的操作是每3天采收30千克新鲜卤虫/公顷（Anh，2009；Anh等，2010）。该模式中养殖户每个生产周期可额外获得约30千克湿卵/公顷。因此，根据卤虫卵与卤虫鲜品的销售价值及预期利润，养殖户可自主选择养殖模式。

2.2.3　池塘改造与准备

2.2.3.1　通用要求

选定养殖模式后（见2.2.2节），需设计如下卤虫生产单元：①蓄水池；②绿水培养池或肥水池（用于培养微藻）；③卤虫养殖区；④盐结晶区。这些单元需配套给排水系统。各单元相对面积及比例的设计旨在实现生产区域的高效利用，通常卤虫生产区水面最大占整体面积的75%～80%。依据集约或半集约养殖模式，卤虫生产系统可包括或不包括专用肥水池（表2-2）。若无专用肥水池，养殖户可在蓄水池或供水渠道施肥，再将含藻绿水泵入卤虫养殖池。集约化养殖系统中肥水池面积取决于土壤类型、肥力及天然海水的营养盐含量，通常占整个水面的20%～25%。

2.2.3.2　卤虫培养池的规格、布局与朝向

在粗放或半集约化养殖模式中，单个培养池面积以0.5～1.0公顷最为适

表2-2　不同生产模式的卤虫养殖池和施肥池占比（越南朔庄省永州Vinh Phuoc对虾-海盐产业公司）

养殖类型	半精养		精养	
	面积（公顷）	百分比（%）	面积（公顷）	百分比（%）
养殖池	3.2	100	3.70	78
施肥池	—	0	1.05	22
合计	3.2	100	4.75	100

资料来源：Hoa, V.N. 和 Van, N.T.H.。2019。《盐田卤虫养殖原理》。N.V. Hoa 和 P.K.H. Lam（编）。越南胡志明市：农业出版社。ISBN 978-604-60-2946-5。219 页。

宜，这既便于池塘管理，又能有效控制人工成本，尤其适用于静水式养殖模式。而集约化养殖池因需实施给排水、投喂、曝气等特定管理流程，单个池塘的适宜面积约为0.3公顷。集约化养殖模式常配备绿水池为卤虫培养池持续提供饵料（图2-11）。池塘通常设计为长方形，长宽比（3～4）：1。

多项生产操作受风向的影响，如接种时无节幼体的扩散、肥料与饵料的分布，最关键的是促使浮游卵聚集至角落以便采收。因此建造池塘时，应使长方形的长边与主导风向大致平行（图2-14）。

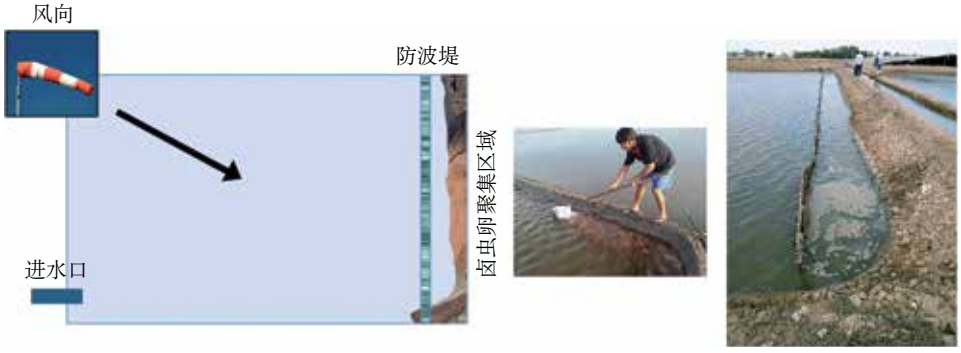


图2-14　卤虫-虾/鱼-盐一体化养殖模式示例

资料来源：Hoa, V.N. 和 Van, N.T.H.。2019。《盐田卤虫养殖原理》。N.V. Hoa 和 P.K.H. Lam（编）。越南胡志明市：农业出版社。ISBN 978-604-60-2946-5。219 页。

强风易在盐池水面近岸处产生泡沫，导致虫卵被裹挟其中。若含卵泡沫被风吹出池外，将造成卤虫卵损失。可通过在池塘短边或角落设置“卵障”来减少泡沫，卵障通常采用椰树叶或竹竿构建。此类结构还能有效降低屏障后方的波浪高度，从而有利于虫卵聚集与采收（图2-14）。

2.2.3.3 池塘深度

湄公河三角洲最炎热的天气可超过40℃。在传统盐田中，池塘水位通常仅10 ～ 20厘米，因此温度波动极为剧烈，往往超出卤虫的耐受范围。此外，浅水和水体的高透明度会促进大型底栖藻类的生长。大型底栖藻类不仅无法被卤虫摄食，其对营养的高效吸收亦会抑制微藻的正常发育。漂浮的底栖藻类还会降低蒸发速率，妨碍虫卵的收集（见第2.2.5.5节）。

为降低温度胁迫并抑制底栖藻类增殖，养殖池应保持足够深度（图2-15）。建议对现有产盐池进行挖深处理并加高池堰，使水位至少维持在50厘米。此外，浅水池塘需沿池内周开挖沟渠（宽2 ～ 3米，深不低于20 ～ 30厘米，通常为50厘米或更深），此举既能增加水体容积，又可在旱季末期表层水温升高时为卤虫种群提供避难所。无论何种情况，池塘及其周边沟渠的水深均应超过50厘米。开挖沟渠的土方可用于加高堤堰。

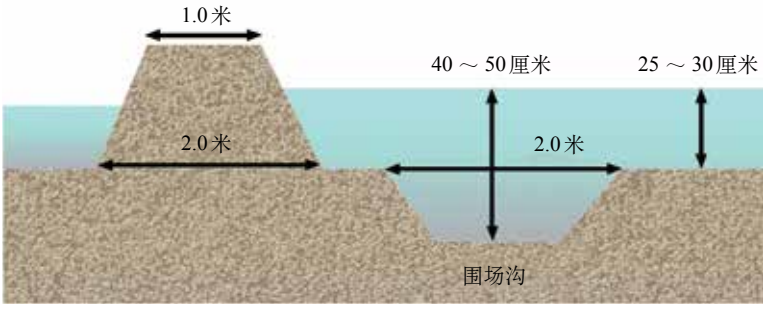


图2-15　卤虫培养池横截面示意（含标注推荐尺寸的周边沟渠及堤坝）

资料来源：越南芹苴大学。

需注意池塘不宜超过1米深，因蒸发速率取决于池表面积与水体体积之比：深水池塘因该比值降低而导致盐度上升减缓，出现底层水温低于表层的温度层化现象，且注水需求更大。在缺乏高盐度水源持续供给的地区，这些因素会延缓蒸发进程，延长卤虫接种所需高盐度水体的制备时间，以在内部周边开挖深沟的池塘为例，注水过程需额外耗费一个多月的时间完成注水，进而推迟整个生产周期。替代方案是缩减卤虫养殖区面积，相应扩大蒸发区面积。

但若卤水充足，则推荐采用深水池塘，以实现更高的卤虫产量。深水池塘更利于旱季维持高盐度环境，如泰国部分卤虫养殖场采用1.5米水深池塘养殖卤虫。

有时，对卤虫生产感兴趣的盐业生产者可能明确希望不将其盐田完全改造成功能最优的卤虫养殖系统，因而不会对上述提到的盐田布局进行彻底调整。这种做法可能基于多重考量（Vinh等，2019）：

- 随时根据市场需求、生产模型预估利润率等因素，灵活调整卤虫与盐业的生产策略。
- 节约建设成本与时间：如前述，深水卤虫养殖池需更高盐度水体，其准备周期较浅水池显著延长。以湄公河三角洲为例，浅水制盐工艺仅需约30天即可获得盐度80～100克/升的水体，而深水系统则需更久。此外，气候变化加剧导致的极端天气频发使生产准备期延长，这将压缩卤虫的生产窗口，将其推迟至旱季中后期。而适宜卤虫培养的温度多集中于旱季初期，后期极端高温将导致卤虫死亡率上升、繁殖率下降。

2.2.3.4　池底与堤坝

防渗处理是池塘建设的关键。选址需确保土壤具备黏性，施工时需对池底与堤坝进行精细夯实（图版21）。在加高堤坝的过程中，土体结构易产生裂隙形成渗漏通道。为最大限度减少渗漏，应先将旧堤表面润湿，覆新土后重新压实。可采用氧化钙（CaO）与黏土混合物填补孔洞裂隙，同时杀灭缝隙中栖息的蟹类与鱼类。此外，堤坝边坡应按1∶2的坡比（顶宽∶底宽）建造，以控制过度侵蚀。相较于人工压实，机械施工能显著提升池塘结构的密实度与强度。旱季初期注水前，建议刮除底层淤泥并曝晒池底2～3天，以激活底泥好氧细菌活性。这些细菌可分解有机质、释放底质营养盐，并消除硫化氢（H_2S）和氨（NH_3）等有毒化合物。



图版21　人工压实堤坝

2.2.3.5　石灰处理

一般情况下，卤虫养殖池无需进行石灰处理。高盐度水体因碳酸盐的存在，其硬度通常超过50毫克碳酸钙（$CaCO_3$）/升。对此类硬度的池塘施加石灰并不能进一步提高产量。但当养殖水体pH＜7.5且难以促进藻类增殖时，可考虑采用石灰处理。

所用化学物质包括钙和镁的氧化物、氢氧化物及硅酸盐。水产养殖中最常用农用碳酸钙、生石灰（CaO）以及熟石灰［$(Ca(OH)_2$］。石灰施用会迅速提升池塘pH至10左右，可杀灭池底的病原体及生物。约三周后，pH将回落

至7.5，并开始正常矿化过程。推荐施用量为每公顷500 ～ 1 000千克碳酸钙。黏土底质、酸性底质以及池水中钙镁离子浓度较低时，石灰需求量最大。

虽然干燥处理对多数土壤有益，但对于红树林酸性硫酸盐土壤则不然。此类土壤暴露于空气中时，土壤中的黄铁矿会氧化生成硫酸（Hoa，2014）。虽然可通过施用石灰改良土壤，但需消耗大量石灰。更简易的降酸方法是使土壤暴露于空气氧化后，反复冲洗池塘，但该过程耗时较长。因此，此类底质通常需保持水浸没状态，并在原始基质上覆盖氧化无酸土层。总体而言，应避免在酸性硫酸盐土壤区域进行卤虫养殖。

2.2.3.6 敌害生物防控

卤虫的天敌包括涉禽、蟹类等甲壳动物以及罗非鱼等鱼类。此外，划蝽科等水生昆虫，以及剑水蚤、轮虫及原生动物纤毛虫（如盐生法布虫，*Fabrea salina*）等各类浮游动物（图版22），亦可成为食物竞争者，或直接捕食卤虫无节幼体。

通过在池塘设置稻草人可防止鸟类捕食。因池塘往往无法彻底排干，注水前可能需进行敌害防控：残留在水洼中的掠食性鱼类和甲壳动物可使用0.05 ～ 2.0毫克/升的鱼藤酮、15毫克/升的茶籽饼、尿素与次氯酸盐组合（5毫克/升尿素施用24小时后追加5毫克/升次氯酸钙）或每150立方米1千克的鱼藤根杀灭。2毫克/升的敌百虫可杀灭剑水蚤等小型敌害，但对虾类毒性极强。鱼藤酮和氯制剂



图版22　卤虫的捕食者与食物竞争者：(1) 桡足类；(2) 轮虫（顺时针方向自上起：四角盘网轮虫[1]、弯花环轮虫[1]、四齿臂尾轮虫[2]、柠檬旋轮虫[1]）；(3) 盐生法布虫

资料来源：(1) A. Savitsky，维基共享资源。(2) [1]M. Plewka，www.plingfactory.de；[2]F. Fox，维基共享资源。(3) B.T. Larson，美国加利福尼亚大学旧金山分校。



图版23　a. 位于进水口的筛网（箭头指示水流方向）；
b. 用于拦截入水鱼类的细目渔网/布袋

的降解速度较快，24 ～ 48小时即可转为无毒形态；若使用茶籽饼或敌百虫，投放卤虫前需冲洗池塘。养殖期间，可通过在水闸进水处加装滤网，防止鱼类或甲壳动物卵及幼体进入系统（图版23）。拥有独立进出水系统的静水养殖模式池塘，每个进水口均应安装过滤筛网。在用泵站统一供排水渠的流水系统中，通常在首级泵站设置细目围网（图版23）。为防止小型食物竞争者及捕食者的进入，可使用120微米孔径不锈钢筛网制成的过滤箱对进水进行过滤。但此类过滤箱通常成本较高，且当水源含有大量悬浮物时过滤效果欠佳。因此，最有效的防治方法是，在卤虫接种前数日内将池塘盐度迅速提升至80 ～ 100克/升或更高；或使用鱼藤酮制剂，施用24小时后即可进行接种。

2.2.3.7　高盐度水体制备

（1）海水蒸发的标准化操作流程

待池塘改造/修整完成后，向整个生产系统注入海水，通过风能和太阳能作用进行蒸发，旨在获得盐度不低于80克/升的卤水。卤水制备是卤虫养殖的关键环节，此阶段被视为生产启动的限速步骤。蒸发过程持续时间取决于气象条件、水体受光面积、初始盐度及生产所需卤水体积等因素。湄公河三角洲养殖户根据经验与当地地理特征，形成了针对“浅水池”和“深水池”的操作规范。此外，频繁耙扫是加速蒸发的常规手段，通过制造水体湍流提升蒸发效率。在越南朔庄省永州盐场的气候条件下，卤水制备至少需一个月。以下因素可能对蒸发进程产生负面影响：

①雨季延迟结束。

②由于海水取水口通常位于河口附近，引入系统的水体实为咸淡水混合液。生产季初期，系统入水口的盐度仅为12 ～ 15克/升。

③湄公河流域部分区域旱季初期常伴随东北季风冷风系统，低温延缓蒸发进程。

为加速蒸发进程，推进卤虫生产，可对生产方案进行如下适应性调整。

（2）使用饱和卤水获取高盐度卤水

采用卤水缩短蒸发时间是全球多国盐业生产中广泛应用的工艺，具体操作如下：在卤虫收获季末期，将养殖池或蒸发池中的高盐度水体收集储存至深度不小于1米、无渗漏且无污染的蓄水池中供下季使用。为在雨季全程维持卤水盐度，需设置溢流口排放表层雨水，以最大限度降低淡水稀释风险。朔庄与薄寮地区的实践经验表明，当使用1 ～ 1.2米深池塘储存初始盐度100 ～ 120克/升的卤水时，经5 ～ 6个月雨季盐度将降至45 ～ 55克/升。根据蓄水池盐度与总水量，可相应调整下一季卤虫养殖面积。将该水体与天然海水或蒸发池水混合，可快速达到80 ～ 100克/升的卤虫接种目标盐度。需注意的是，若使用盐度高于120克/升的卤水配制80 ～ 100克/升盐水，部分盐类将发生沉淀从而改变水体化学组成（见第2.1.2节）。鉴于不同卤虫品系对水体离子化学失衡的耐受性缺乏充分数据，建议本工艺所用卤水盐度不宜超过120克/升。

（3）使用粗盐获取高盐度水体

养殖户亦可通过向蒸发池或卤虫养殖池直接加入粗盐提升盐度，但应仅选用廉价且市场需求低的劣质“黑盐”（图版24）。对于1 800平方米的卤虫养殖区，当向初始盐度30克/升的海水中加入约30吨粗盐时，10厘米水深池塘配制80克/升盐水的时间可从常规的3 ～ 4周缩短至1 ～ 2周。如前所述，该措施的经济效益需综合考虑额外投入成本。在粗盐价格低廉且滞销的情况下，使用粗盐获取高盐度卤水可提前卤虫接种时间，从而延长生产周期。


© 越南芹苴大学

图版24　粗盐（“黑盐”，右侧）可用于快速提升卤虫养殖池的盐度

2.2.4 饵料管理

2.2.4.1 投喂饵料类型及卤虫群体营养状态监测

卤虫是一种连续非选择性滤食生物，其滤食率、消化率和同化率受多种因素影响，包括饲料质量与投喂量、虫体发育阶段与生理状态，以及养殖环境中的非生物因素。优质卤虫饲料应满足以下标准：

①易于商业化获取或规模化生产；

②采购或生产成本低廉；

③粒径适宜：对于卤虫成虫而言，粒径应小于50微米；

④消化率高且营养组成合理，具有优良的饲料转化率；

⑤饲料可长期储存且品质稳定（新鲜微藻除外）；

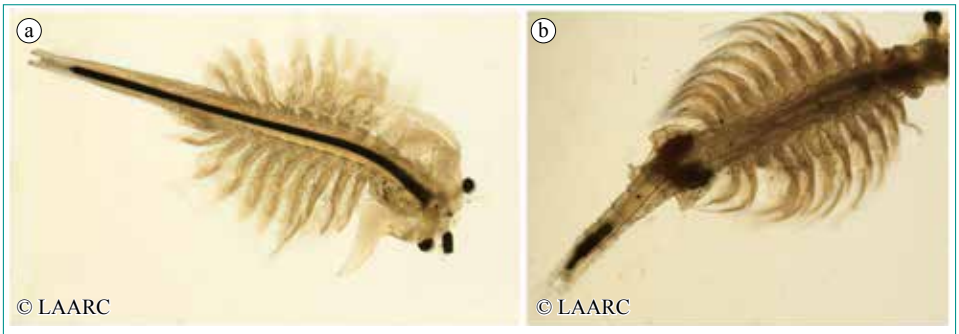
⑥饲料营养成分溶失率低（新鲜微藻除外）。

在实验室条件下培养卤虫，可采用针对微藻或其他饲料的标准化投喂方案；而池塘养殖则需每日观察摄食状况并及时调整。卤虫池塘养殖主要依靠微藻饵料，这些微藻可直接在卤虫池中生长，或通过肥水池的绿水补充（Le等，2019；Van Stappen等，2019）。但由于微藻供应量常随营养源供给及水温、盐度等非生物参数波动，因此补充投喂是保障卤虫产量的关键因素。其他饵料来源通常包括有机肥料（如猪粪或陆生动物粪便）。此外，为维持池塘稳定的饵料水平，特别是当绿水供应不足时，可将味精生产副产品或稻米、玉米、大豆、乳制品等农产品加工副产物作为补充饲料投入卤虫池（Le等，2019；Van Stappen等，2019）。

人们在持续开展卤虫补充饲料的研发（Hoa等，2013），旨在探索如何通过施用米糠发酵物等廉价农副产品或直接投喂对虾饲料与鱼粉（Anh等，2009；Hoa和Van，2019）来提高卤虫产量与经济效益。越南芹苴大学已研制出卤虫配方干饲料（见第2.2.4.4节），可在缺乏绿水时作为池塘养殖的补充饲料。此外，采用生物絮团技术，通过向施肥池添加廉价碳源使碳氮比达到10以上，或直接投入卤虫养殖池以刺激异养细菌生长（Hoa和Hong Van，2019），能将含氮废物转化为可供卤虫摄食的菌体蛋白，既稳定了水环境又可降低饲料成本。当食物与营养均充足时，卤虫可在10～15天内发育为成虫，其生物量较初孵无节幼体增长约500倍。

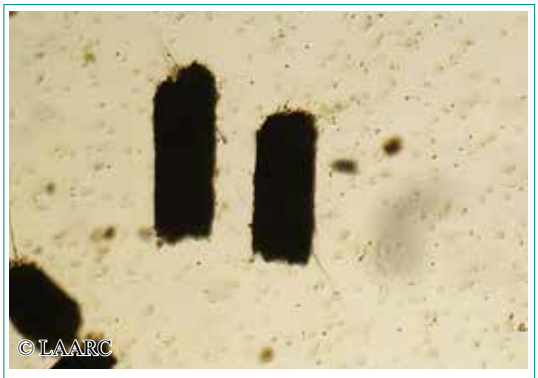
尽管满足池塘卤虫营养需求的途径多样，但关键在于监测评估饲料是否适宜其生长。评估依据个体或群体观测指标：

①粪便是否饱满？可将部分卤虫置于盛有池水的容器中，收集底部粪便并在显微镜下观察粪便呈短柱状还是拖尾长条状（图版25、图版26）。若出现拖尾粪便且伴有肠道未完全填充现象，表明投喂不足；若有拖尾粪便但消化



图版25 肠道饱满的卤虫（a）与摄食不足的卤虫（b）

道饱满，则存在食物消化不良，原因可能与过度投喂或藻类不适口有关。



图版26 短小而饱满的粪便颗粒

②卤虫群体中的个体大小是否均一？常见体色如何（鲜亮、不透明、浅淡等）？

③卤虫是否活跃游动？呈集群或单独游动？靠近水面或池底游动？缺乏饵料时，卤虫倾向于聚集池底摄食底层藻类。

④种群发育至性成熟的时间是否正常，何时可观察到雌雄配对？以永州卤虫为例，接种后10～15天应开始繁殖。

⑤通过解剖卵巢观察雌虫繁殖力表现如何？其怀卵量高或低？卵巢色泽鲜亮或暗沉？有空卵巢的雌虫比例？

⑥种群中各龄期卤虫的平衡状况，即无节幼体、青年期卤虫、拟成虫与成虫的比例如何？（见第2.2.5.4节）

⑦下风处是否有死亡卤虫堆积？

观察的准确性主要取决于养殖户的关注度与经验。完全和正确的观察有助于及时调整池塘管理措施，从而延长养殖周期并获得更高且稳定的卤虫产量。

2.2.4.2 绿水培养

（1）绿水培养的基本原则

微藻是池塘养殖卤虫的主要饵料。微藻培养一般需要有机肥与无机肥配合施用，并维持氮磷比≥3∶1（Geider和La Roche，2002；Khoi、Guong和

Merckx，2006a）。微藻主要有两个来源：①来自“间接施肥”的施肥池，是微藻绿水供给的主要来源；②通过向卤虫养殖池“直接施肥”，微藻在养殖池内自然增殖形成。两种施肥策略皆有其优劣。实际操作中，施肥池中的化肥与有机肥施用量远高于卤虫养殖池，这可能导致施肥池底沉积物及沉淀营养盐的累积。藻类密度与种类组成同等重要，施肥管理应以促进绿藻与硅藻增殖为导向（Hoa和Nhi，2020；Hoa和Le，2021）。

绿水培养方案系基于经验开发，故存在若干局限性：

①绿水的生产依赖于随海水进入系统的土著微藻物种，因此，可能难以定向促进硅藻等适宜卤虫摄食的藻类增殖。

②藻类组成受温度、盐度、光照、季节性和土壤营养等环境因素的影响。在不利条件下，会出现丝状藻类或大型藻类，这些藻类既不适于作为卤虫饲料，又会与微藻竞争有效养分。

③施肥池盐度一般维持在低于50克/升的低盐度，虽有利于微藻生长，但在此盐度条件下常存在卤虫天敌，如虾类和鱼类，罗非鱼尤其易在施肥池环境中大量繁殖。此外，轮虫、桡足类、盐生法布虫等卤虫竞争者也易在低盐度施肥池中大量滋生。

④施肥池占用了部分本可用于卤虫养殖的面积。当藻类生长不足时，需扩大施肥池面积，从而压缩卤虫养殖空间。

直接在卤虫池施肥可规避上述部分弊端，既能最大化卤虫生产面积，且卤虫池的高盐度（＞80克/升）可有效抑制天敌和竞争者的入侵。但该模式亦存在局限，高盐环境下施肥效果较差，仅少数微藻能适应高盐水体（常出现微藻产量无法满足卤虫种群需求的情况）。此外，直接向卤虫池施肥会导致有机物沉积，需投入大量人力进行频繁耙扫以使有机颗粒悬浮供卤虫摄食（图版27）。水体透明度越高，所需耙扫强度越大。



图版27　通过耙扫卤虫池实现水体混合与沉降颗粒再悬浮

有效的解决方案是：①在施肥池或进水渠施用无机肥；②直接在施肥池或卤虫养殖池施用有机肥。向卤虫池输送绿水既能补充饲料，又可弥补渗

漏和蒸发的水量。在越南永州卤虫养殖池中，通常每2天补充一次绿水，水位提升约数厘米，相当于卤虫池水量的10% ～ 15%，具体视养殖条件而定。



图版28　使用塞氏盘测定浊度

（2）藻类密度测定与组成分析

评估藻类丰度的最简便方法是测定浊度，可直接使用塞氏盘测量（图版28）。将圆盘浸入水中直至黑白色块对比消失，记录此时水深读数。将圆盘略微下移后缓慢上提，直至再次观察到对比度，记录此时水深读数；两次深度的平均值即为所测浊度值。浊度在一天中会波动变化，通常在下午达到峰值。风力导致的藻类在背风角落聚集，及黏土颗粒等悬浮固体均会影响浊度读数。卤虫养殖池的最适浊度范围为25 ～ 35厘米。当浊度过低（测得较大深度值）时，需泵入富营养水体；浊度过高（测得较小深度值）则易引发溶氧匮乏，尤以黎明时分风险最高。高浊度伴随的过量投喂可能导致无节幼体和早期青年期卤虫的存活率与生长率下降，但高效滤食的卤虫成虫受影响较小。

若条件允许，还可通过叶绿素浓度分析（Takahashi，2019；Jing-Yan、Li-Hua和Zhen-Hui，2021；Solovchenko等，2022）或Bürker血球计数板直接计数法评估藻类密度。鉴于藻类在水体中分布的不均匀性，这两种方法需配合规范采样方法（见第2.2.5.4节）。

水体颜色能有效反映养殖池中颗粒物与微藻的类型及浓度（表2-3）。若卤虫生长异常，建议对藻样进行进一步检测。绿色通常指示绿藻门藻类的存在，蓝绿色为蓝藻门藻类的特征，褐色指示硅藻门藻类的存在，而红色则是高盐水体中杜氏盐藻或盐杆菌属嗜盐古菌的典型标志（Hoa和Hong Van，2019）。藻类组成不仅影响卤虫生长发育，还会改变卤虫及卤虫卵的营养价值，如脂肪酸组成和含量。已证实，硅藻门的菱形藻属（*Nitzschia*）、角毛藻（*Chaetoceros*）、骨条藻（*Skeletonema*）、舟形藻（*Navicula*）和斜纹藻（*Pleurosigma*）对卤虫生产具有促进作用，其效果与绿藻门的衣藻（*Chlamydomonas*）、四鞭藻（*Tetraselmis*）和杜氏藻（*Dunaliella*）相当（图版29）。人们尝试在15立方米的罐体中进行较大规模的角毛藻培养，旨在实现该物种的户外培养，最终获得富含角毛藻的绿水。而拟纳绿球藻（*Nannochloropsis*）和小球藻（*Chlorella*）等



图版29　适用于卤虫培育的微藻种类

藻类因细胞壁较厚难以被卤虫消化。施肥池中的藻类组成来源于纳入水体的自然藻种，通常纳入水体中的优势藻种也会成为施肥池中的优势种群。但藻类物种丰度也会根据施肥方案和池塘环境条件的变化发生更替（Hoa和Hong Van，2019）。

表2-3　不同悬浮颗粒物类型与水色的相关性

水色	预测的颗粒物和微藻类型
清澈	几乎没有生物存在/低营养水平
灰/白	大量悬浮物存在，尤其是在降雨后出现，可能是黏土/石膏
绿	微藻，可能是绿藻。不同的绿色与绿藻种类有关
棕	微藻，可能是硅藻
红	如果是在高盐度下，则是杜氏藻或嗜盐杆菌

资料来源：作者整理（LAARC）。

（3）肥料及施肥策略

在肥水池中用于促进微藻生长的肥料可分为两类：无机肥与有机肥。

①无机肥

氮肥——氮源（N）

常用无机氮肥包括：

- 铵态氮肥：$(NH_4)_2SO_4$（含氮量20%）；
- 硝酸钙肥（含氮量15% ～ 16%）：肥水见效快；
- 尿素及酰胺态氮肥（含氮量46%）：易溶解但见效较慢。

磷肥——磷源（P）

常用磷肥包括：

- 过磷酸钙：$Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$（含P_2O_5 16% ～ 20%），溶解度高；
- 磷酸氢钙：$CaHPO_4 \cdot 2H_2O$（含P_2O_5 35% ～ 48%），溶解度低；
- 重过磷酸钙：$Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$（含P_2O_5 42% ～ 48%），溶解度良好；
- 聚磷酸钠：含P_2O_5 46%，液态；
- 磷酸：含P_2O_5 54%，液态。

大量磷酸盐在咸水中易发生沉淀，且磷元素易被池底快速吸附（Khoi、Guong和Merckx，2006a），因此应制定适宜的磷肥施用策略，以最小化沉淀或吸附造成的磷损失。建议选用粒径细小、水溶性高的磷肥，并采用少量多次的施用方式，从而最大化肥效（Hoa和Le，2021）。

磷肥与氮肥配合施用是促进藻类生长的基础，二者配比变化还会影响藻类的生化组成。无论固体还是液体，肥料应先溶于淡水，再将溶液均匀泼洒至池塘。淡水溶解可提高溶解度并利于肥料在全池均匀分布。阴天不宜施肥，因低光照会限制藻类生长。肥料在低于50克/升的低盐度水体中效果更佳，因此高盐度卤虫池塘不宜施用无机肥。应尽量保持施肥池的盐度、水位等条件稳定以促进藻类生长。施肥数日后水色将转为棕色或绿色，水体浊度升高。此时即可将绿色藻水泵入卤虫养殖池。

施肥量需根据场地自然条件及土著微藻种类组成灵活调整（Hoa和Nhi，2020；Hoa和Le，2021），因地制宜优化施肥方案。在湄公河三角洲地区，氮肥施用量通常为1毫克/升（针对富营养水体）至10毫克/升（针对寡营养水体）。例如，使1 000立方米水体的氮含量提升1毫克/升，需施用1 000克氮元素，相当于2 174克尿素（尿素含氮量46%）。若施肥两天后藻类仍未生长，则需以高于1毫克/升的剂量追肥，直至出现绿色藻水且透明度达15 ～ 20厘米。推荐10∶1的氮磷重量比来促进目标绿藻和硅藻生长（Geider和La Roche，2002）。但由于磷在咸水中溶解较慢且易被池底吸附，实际生产中采用N∶P =（3 ～ 5）∶1比例更为适宜（Khoi、Guong和Merckx，2006a，2006b）。氮磷比还会显著影响藻类的化学组成。实验室研究表明，氮磷比（N∶P）不仅影响黄色大溪地金藻（*Tisochrysis lutea*）和眼点拟纳绿球藻（*Nannochloropsis oculata*）的细胞密度，还可改变其细胞结构与生化组成，当氮磷比为20∶1和30∶1时，其脂肪酸含量显著高于氮磷比为5∶1和10∶1的组别（Rasdi和Qin，2015）。但过量施用磷肥，尤其当水温＞28℃且水体透明度直达池底时，

会促进蓝藻门底栖藻类生长。高磷和低盐的环境也会刺激鞘丝藻（*Lyngbya*）和颤藻（*Oscillatoria*）等丝状蓝藻的繁殖。卤虫易被细长的藻丝缠绕，引发“附肢粘连”现象。

藻类种群形成后，每周应至少按相同方案追肥一次。藻类生长迟缓时，建议每周施肥两次。定期注水以提高水中CO_2含量十分关键。即便严格遵循施肥方案，初级生产力仍可能受温度、光照、盐度等环境因素及进水口当地藻群种类组成与丰度的影响。

②有机肥

有机肥常用于虾、鱼类养殖，以促进天然饵料的增殖，该方法同样适用于卤虫养殖（Le等，2019）。鸡粪、鹌鹑粪、鸭粪、牛粪、猪粪及羊粪均可使用，但牛粪因易促进丝状底栖藻类滋生而不作为优选。近年来禽流感频发，加之鸡粪中可能残留相关兽用药物，故不建议使用鸡粪，尤其是农场直接收集的新鲜鸡粪。在卤虫养殖池中，通常采用有机肥与无机肥配合施用的方式，无机肥可快速促进藻类生长并加速有机肥矿化（降低碳氮比），而有机肥既能作为卤虫的直接食物来源，又能通过缓慢释放营养物质维持池中有效养分水平。有机肥料不仅含氮磷元素，还富含多种微量营养素，对藻类生长具有促进作用；同时可刺激细菌絮团形成，这些絮团亦可作为卤虫的补充饵料。小麦粉、玉米粉、米糠等农副产品也常用作卤虫补充饲料（Anh等，2009）。使用豆粕等高溶性原料时，需先加水并强力曝气1 ～ 2小时使可溶成分充分溶解（形成浑浊悬浊液），随后停止曝气使未溶解颗粒沉淀。该过程可重复数次，直至浊度降至最低，收集的微细颗粒即可投喂卤虫培养系统。米糠因成本较高、粒径大超出卤虫滤食范围、含大量难消化纤维，易导致池底沉积物累积等，因此仅建议在养殖池饵料匮乏时使用。

卤虫池施用有机肥及补充饲料时需严格控制用量，宜少量多次，且应避开高温无风天气。施用有机肥会因粪肥颗粒悬浮使池水暂时浑浊，但这些颗粒沉降迅速，不及时耙扫池底则会刺激底栖藻垫形成。有机肥高磷特性可能促进蓝藻滋生，而细菌增殖也会加剧耗氧，并可能增加池底酸度。过量施肥会破坏池底生态过程，导致溶氧耗竭，进而引发卤虫群体大规模死亡，尤见于静风夜晚过后。湄公河三角洲卤虫生产中，建议初始施肥量为0.5 ～ 1.25吨/公顷，后续按100 ～ 200千克/公顷的剂量每2 ～ 3天追肥一次。使用米糠或豆粕时，标准投喂量为10 ～ 20千克/(公顷 • 天)。但有机肥料质量与特性是否稳定，取决于畜禽批次及饲喂饲料，有机肥的处理与贮存方式也会影响品质，故实际用量较难精确把控。

浅水卤虫池最常见的问题是底栖藻类和悬浮丝状藻的存在。如前所述，这两类藻均不能被卤虫摄食，通过维持水体浊度及足够高的水位可抑制其生

长。卤虫池需每日耙底（图版27），通过人为扰动使有机颗粒再悬浮，以恢复水体的浊度，同时破坏底栖藻类的形成结构。此外，耙扫操作也可直接清除底栖藻类。若池中出现丝状藻或底栖藻类蔓延，则很快会影响卤虫卵的采收。频繁的耙扫操作需耗费大量人力，成本较高。若经上述处理仍因藻类滋生导致卤虫卵和卤虫产量下降，或卤虫种群难以恢复，则建议终止当茬生产，排干晒塘后重启养殖周期。

2.2.4.3 基于生物絮团的卤虫池塘养殖技术

（1）水产养殖中的生物絮团技术

生物絮团是由有机质与多种微生物形成的复合体，包括微藻、细菌，以及轮虫、原生动物、桡足类等小型浮游动物，普遍存在于各类水生生态系统中。生物絮团技术（biofloc technology，BFT）被广泛运用于凡纳滨对虾、罗非鱼等水产动物的养殖，其营养物质循环利用的特性被视为一种环境友好型高效养殖技术，理论上可实现零换水或最小化换水（de Schryver等，2008；Avnimelech，2009；Hargreaves，2013；Hoa等，2017）。该技术通过添加碳源提高养殖环境的碳氮比（＞10∶1），促进以异养细菌为主的微生物增殖。这些存在于生物絮团中的微生物具有多重优势，既能通过同化含氮化合物维持水质，又能原位生成细菌蛋白，进而通过提高饲料转化率、降低饲料成本来提升养殖效益。生物絮团为养殖动物提供多样化营养，并已被证实具有免疫刺激特性（de Schryver等，2012a，2012b）。实验室研究表明，在微藻供应不足时，细菌可作为卤虫的适宜补充饵料（Toi等，2013，2014）。然而，尽管已有大量关于生物絮团技术在淡水、半咸水和海水养殖中应用的研究，但在80 ～ 100克/升高盐度环境下卤虫养殖的应用探索仍较有限，尤其是针对池塘养殖的应用（Sui等，2013；Ronald等，2013；Luo等，2017；Gao等，2015）。

（2）卤虫养殖中的生物絮团技术

应用生物絮团技术时，需向施肥池或卤虫养殖池投加米糠或麦麸等廉价碳源，使碳氮比≥10∶1，计算碳氮比时需计入肥料输入的氮。高碳氮比可刺激水体中异养细菌增殖，从而促进生物絮团的形成。在卤虫池塘养殖中，施用无机肥和有机肥、人工补充投饵及卤虫的代谢产物，共同导致水体累积大量营养物质。生物絮团技术是降低营养负荷的有效手段，同时为卤虫提供额外饵料来源（Hoa等，2017；Van Stappen等，2019）。研究证实，在60 ～ 100克/升高盐度范围内，卤虫至少能依赖生物絮团存活数周，其存活率、生长速度和产卵量与纯微藻投喂组相当，但养殖效果会因生物絮团产量和卤虫养殖条件而异（Hoa和Nam，2019）。

在高盐度池塘中，研究者通过持续3周投加鸡粪（150平方米池塘每日投加1.5千克或3日投加100千克/公顷）和小麦粉（150平方米池塘每日投加0.3

千克或3日投加20千克/公顷），维持碳氮比＞10∶1，在35 ～ 100克/升盐度梯度内开展生物絮团培养实验。需特别说明，多国已警示鸡粪可能携带抗生素污染风险。实验得出以下关于盐度和培养周期对微藻及生物絮团产量影响的结论（Hoa和Nam，2019）：

①微藻物种多样性随盐度升高而降低，且在培养周期末期普遍减少。

②生物絮团粒径在任何生产条件下均呈现较大波动，且随时间推移而变化。与35 ～ 60克/升的低盐度环境相比，在80 ～ 100克/升的高盐度条件下生物絮团粒径更趋细小，其中能被卤虫成虫摄食的粒径（＜50微米）占比显著更高（表2-4）。

表2-4　不同盐度下在三周时间内池塘中生物絮团粒度变化

（平均值±标准差，微米）

天数	盐度							
	35克/升		60克/升		80克/升		100克/升	
	宽度	长度	宽度	长度	宽度	长度	宽度	长度
7	62.6 ± 30.2	93.6 ± 30.4	59.8 ± 25.9	76.7 ± 27.4	51.6 ± 28.8	81.4 ± 46.6	39.7 ± 11.4	74.5 ± 30.5
14	71.0 ± 20.4	105.3 ± 30.9	57.5 ± 22.3	102.6 ± 36.4	61.5 ± 30.5	97.9 ± 51.4	37.1 ± 26.1	61.3 ± 36.8
21	52.3 ± 18.7	98.2 ± 55.7	55.3 ± 19.4	80.6 ± 41.6	32.5 ± 19.6	66.3 ± 28.3	33.8 ± 15.8	49.7 ± 22.2

资料来源：Hoa, V.N. 和 Nam, T.N.H.。2019。《生物絮团技术在卤虫养殖中的应用》。N.V. Hoa、H.T.H. Hieu、N.A. Khoa和D.T.T. Uyen（编）。越南胡志明市：农业出版社。ISBN 978-604-60-2981-6。163页。

③生物絮团产量（以总体积计，图2-16）或总悬浮固体、挥发性悬浮固体含量均随时间变化，呈现先逐步上升后小幅下降的趋势。但环境盐度对生物絮团总产量未见显著影响。

④生物絮团营养成分在整个生产周期中或有轻微波动，但其蛋白质含量普遍较低（8% ～ 18%），灰分含量则较高（70% ～ 85%）。随着盐度升高，蛋白质含量呈下降趋势，灰分含量则相应增加（表2-5）。

采用相同方法，在80克/升和100克/升盐度的池中通过刺激生物絮团生产并养殖卤虫6周时，与仅刺激微藻生产的对照池相比，研究者观察到相似现象（Hoa和Nam，2019）：

①所有处理组的生物絮团体积均呈现先逐步上升后持续下降的趋势，直至实验结束（图2-17）；

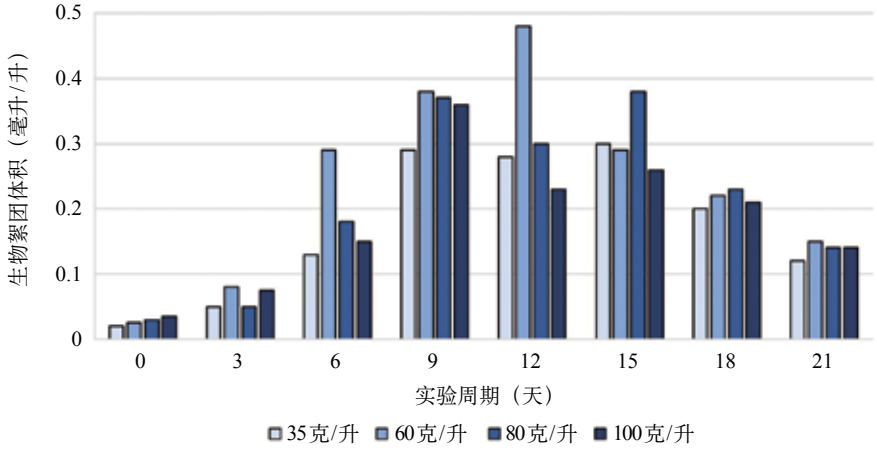


图2-16　不同盐度池塘中生物絮团体积在3周培养期内的波动情况

资料来源：Hoa, V.N. 和 Nam, T.N.H.。2019。《生物絮团技术在卤虫养殖中的应用》。N.V. Hoa、H.T.H. Hieu、N.A. Khoa和D.T.T. Uyen（编）。越南胡志明市：农业出版社。ISBN 978-604-60-2981-6。163页。

表2-5　不同盐度下在三周时间内池塘中生物絮团的近似营养成分（%，以干重计）

盐度（克/升）	7天			14天			21天		
	粗蛋白	粗脂肪	灰分	粗蛋白	粗脂肪	灰分	粗蛋白	粗脂肪	灰分
25	12.2	0.80	69.9	17.4	1.05	67.1	9.3	0.65	86.4
60	10.5	0.89	76.2	16.4	0.92	70.4	12.4	1.02	74.8
80	9.8	0.77	80.6	15.6	1.08	69.9	10.4	0.83	81.0
100	8.5	0.70	82.2	15.9	0.94	71.7	9.6	0.91	78.9

资料来源：Hoa, V.N. 和 Nam, T.N.H.。2019。《生物絮团技术在卤虫养殖中的应用》。N.V. Hoa、H.T.H. Hieu、N.A. Khoa和D.T.T. Uyen（编）。越南胡志明市：农业出版社。ISBN 978-604-60-2981-6。163页。

②采用生物絮团技术的雌虫繁殖力（每窝产卵数）显著高于传统绿水培养系统，其卤虫卵产量提升30% ～ 50%（图2-18）。

池塘实验表明，要同时实现微藻和生物絮团的最佳摄食效果，必须频繁监测并持续调控施肥池中的氮磷比（促进藻类生长）与碳氮比（促进生物絮团形成），以确保微藻与生物絮团的同步均衡发展。将藻类密度和生物絮团体积维持在适宜区间，不仅能提升卤虫产量，还可保持环境条件稳定。与绿水培养系统类似，定期耙扫池底对悬浮态生物絮团颗粒的形成与分布至关重要，耙扫可防止絮团颗粒沉积于池底，从而更易被卤虫滤食利用。

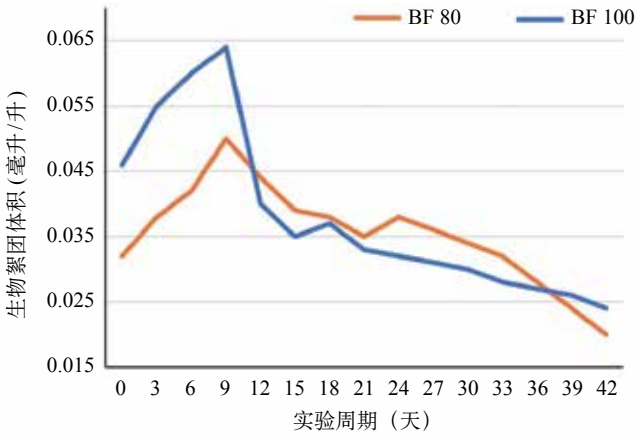


图2-17　不同盐度（80克/升与100克/升）卤虫养殖池中，6周培养期内生物絮团体积（毫升/升）的波动情况

资料来源：Hoa, V.N. 和 Nam, T.N.H.。2019。《生物絮团技术在卤虫养殖中的应用》。N.V. Hoa、H.T.H. Hieu、N.A. Khoa和D.T.T. Uyen（编）。越南胡志明市：农业出版社。ISBN 978-604-60-2981-6。163页。

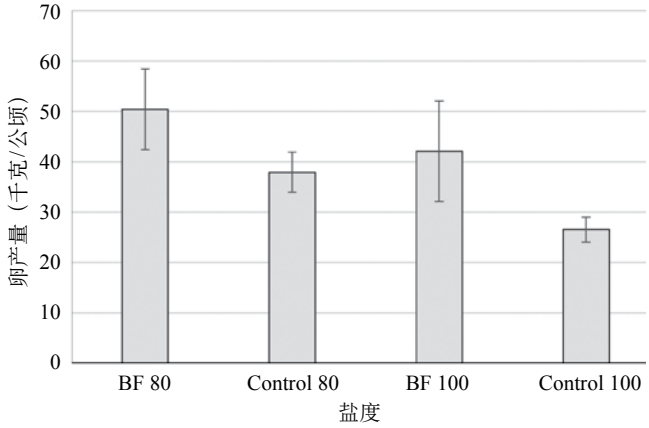


图2-18　在不同盐度（80克/升和100克/升）卤虫养殖池中，采用生物絮团或绿水技术（对照）培养6周的卤虫卵产量（千克/公顷）

资料来源：Hoa, V.N. 和 Nam, T.N.H.。2019。《生物絮团技术在卤虫养殖中的应用》。N.V. Hoa、H.T.H. Hieu、N.A. Khoa 和 D.T.T. Uyen（编）。越南胡志明市：农业出版社。ISBN 978-604-60-2981-6。163页。

2.2.4.4　卤虫配方饲料的应用

越南芹苴大学（Can Tho University）的研究人员利用多种饲料原料（表2-6）成功开发出一种商业化卤虫饲料。该配方饲料既适用于实验室小规模卤虫培养，也可用于大水体或池塘卤虫养殖（Le等，2019；Van Stappen等，2019）。

表2-6　芹苴大学开发的卤虫饲料原料近似成分（%，以干重计）

成分	鱼粉	大豆粉	米糠	小麦粉
粗蛋白	60.04	47.18	15.11	1.96
粗脂肪	7.82	1.24	14.63	0.20
灰分	27.68	7.12	9.17	0.34
纤维	0.47	2.35	7.24	0.14
碳水化合物	3.99	42.10	53.84	97.36
水分（%）	9.89	10.03	11.59	11.76

资料来源：作者整理（越南芹苴大学）。

利用上述原料及鱿鱼油、卵磷脂、维生素预混料等补充成分，研究者配制出蛋白质含量20% ～ 45%、脂肪含量5% ～ 13%的系列实验饲料，并在实验室条件下进行测试。在此参数范围内，中等蛋白质水平（30% ～ 35%）配合9%脂肪含量的饲料能实现最佳存活率、生长性能及雌虫繁殖力。实验饲料原料组成及近似成分见表2-7与表2-8。

表2-7　芹苴大学开发的不同类型的商业卤虫饲料原料配方及近似成分（%，以干重计）

原料	30%蛋白饲料	35%蛋白饲料	9%脂肪饲料
鱼粉	29.00	35.43	29.00
大豆粉	18.45	22.54	18.45
米糠	22.45	18.06	22.74
小麦粉	24.93	18.71	22.68
油*	1.17	1.27	3.13
维生素复合物**	2.00	2.00	2.00
CMC***	2.00	2.00	2.00
合计	100	100	100

*乌贼油：卵磷脂 = 1：1。

**维生素复合物［国际单位（IU）或克/千克］：维生素A（400 000 IU）；维生素D_3（80 000 IU）；维生素E（1克）；维生素K_3（2.4克）；维生素B_1（1.6克）；维生素B_2（3克）；维生素B_6（1克）；烟酸（1克）；维生素B_9（0.8克）；维生素B_{12}（0.004克）；叶酸（0.032克）；生物素（0.17克）；维生素C（60克）；胆碱（4.8克）；肌醇（1.5克）；乙基酯（20.8克）；铜（10克）；硫酸亚铁（20克）；镁（16.6克）；锰（2克）；锌（11克）。

***羧甲基纤维素或纤维素胶。

资料来源：作者整理（越南芹苴大学）。

表2-8　不同类型的卤虫饲料近似成分（%，以干重计）

成分	对照*	30%蛋白饲料	35%蛋白饲料	9%脂肪饲料
粗蛋白	42.12	30.58	35.52	31.14
粗脂肪	6.88	7.06	7.22	8.96
灰分	13.57	12.80	13.34	12.80
纤维	2.24	2.10	2.11	2.12
碳水化合物	35.19	47.46	41.81	44.99
能量（千卡/克）**	4.50	4.39	4.45	4.31
水分（%）	9.58	10.83	10.68	9.04

注：*斑节对虾商用饲料。

** 能量计算基于以下数值（千卡/克）：蛋白=5.65；脂肪=9.45；碳水化合物=4.20。

资料来源：作者整理（越南芹苴大学）。

该配方饲料的制备流程如下：采用机械研磨将所有原料粉碎至50微米以下粒径；按精确配比称重混合，添加羧甲基纤维素黏合剂；加入相当于混合物重量30% ～ 50%的水分后，通过制粒机挤压成型并自然干燥；将干燥颗粒二次粉碎至50微米以下粒径，成品经包装后冷藏储存。

2.2.5　养殖系统的监测与管理

2.2.5.1　卤虫接种

（1）卤虫品系的选择

如第1.4节所述，不同卤虫品系在生态耐受范围及水产养殖应用特性上存在显著差异。因此，选择最能适应当地特殊生态条件或最适合水产养殖应用的卤虫品系至关重要。引入非本地卤虫品系需格外谨慎，尤其在可能形成永久种群的区域，如巴西东北部的日晒盐场（见插文5）；对于可能导致外来品系竞争本地品系进而威胁生物多样性的接种行为应坚决反对。品系筛选可参考文献中关于生长速率、繁殖特性尤其是温度和盐度耐受性的数据（Vanhaecke、Siddall和Sorgeloos，1984）。简言之，应选择在养殖池温度和盐度条件下生长最快且繁殖力最强的卤虫品系。通常优先选择卵径和无节幼体较小的品系，除非以卤虫生物量生产为主要目标（Baert等，2002）。建议后者选用卵胎生繁殖占优势的快速生长品系。

（2）接种与孵化流程

接种应选用Ⅰ期无节幼体阶段的卤虫。后期发育阶段的卤虫（包括后无节幼体、青年期卤虫和成体）因口器和肛门已开放，无法耐受孵化盐度（20 ～ 35克/升）与养殖池高盐（≥80克/升）间的剧烈盐度变化，24小时内

死亡率较高；温度突变亦对其构成威胁。相比之下，Ⅰ期无节幼体具备盐腺功能，可直接转移至高盐环境。因此，应选用孵化同步性好的卤虫卵接种，以获得整齐的Ⅰ期幼体群体；若无法保证，接种前需对卤虫进行逐步的盐度驯化。孵化操作应尽量参照第3.1.5节的标准流程。鉴于野外孵化条件通常不理想，需遵循以下原则：

- 孵化容器置于阴凉处，避免阳光直射过热；
- 孵化用水须经1微米滤袋过滤；
- 若过滤后仍浑浊，应将介质盐度降至20克/升、卵密度不超过1克/升；
- 需保证充足的曝气与光照，特别是傍晚或夜间孵化时。

接种所需卵量根据养殖池容积、选定批次的孵化效率计算，并将30%投放死亡率计算在内。因实际孵化条件欠佳，孵化率可能低于预期，通常仅为正常孵化效率的75%。

（3）接种密度

养殖池投放卤虫密度取决于营养条件（即藻类繁殖所至的水色与浊度）及水温。当浊度为15 ～ 25厘米时，建议投放卤虫100只/升。高密度投放可能导致溶氧不足，尤见于高温天气或静风夜晚。当透明度＞25厘米（即饵料减少）时，投放密度应降至50 ～ 70只/升。根据经验，高密度培养有利于雌性卤虫的卵产量，因此更受青睐。然而，高密度养殖需确保饵料充足，否则会因卤虫生长成熟缓慢和繁殖力下降而使整体产量降低。尤其要避免高密度与饵料不足、高温和溶氧胁迫的叠加情况。另一方面，低密度接种虽有利于雌性卤虫生产无节幼体，但在饵料充足时可能导致种群密度快速上升和过早成熟。因此，初始低密度接种虽可节省接种所需的虫卵量，但需要更长时间来提高种群密度。

2.2.5.2 养殖管理流程概述

自接种之日起，在整个生产周期中需对卤虫池塘实施积极的日常管理。养殖初期及接种后7 ～ 10天内，池塘通常会出现“水华”现象，这源于水中的可溶性养分或池底矿化作用释放的营养物质。此阶段卤虫尚未发育至成虫期，其滤食器官功能尚未完善，摄食需求相对较低，因此种群尚无法有效调控池中藻类生长。建议该阶段暂停施肥或仅少量施肥；若施肥，也仅在肥水池中，因其绿水需数日后才需投入使用。

接种后的常规管理工作包括：水位调控，盐度与温度控制，水色及饵料丰度监测，卤虫种群龄期结构、行为特征、外观状态及营养状况评估（如观察肠道是否完全充盈呈深色，或有断续且颜色浅淡）（图版30）。需定期检查雌虫繁殖状态，观测生殖过程中不同发育时期卵的数量分布。正常情况下，胚胎应同步存在于卵巢、输卵管及育仔囊（即三期共存），若出现异常则可能反映



图版30　卤虫种群日常监测

摄食条件不佳或种群老化问题。此外，还需统计怀卵雌虫与怀无节幼体雌虫的比例。

需同时对绿水池塘进行监测维护，确保足量且适宜藻类组合的绿水供卤虫摄食。绿水池的盐度控制尤为关键，不仅与藻类最大程度增殖有关，而且绿水盐度过低可能导致卤虫池盐度下降。由于池塘养殖属开放系统，异常或突发天气条件可能对卤虫存活与发育产生负面影响，如养殖季初期遭遇异常降雨、低温及弱光照，或季末出现高温、提前降雨、高盐度及底栖藻暴发等。预判这些不利因素的干扰，将有助于优化池塘管理，在确保较低生产成本与较高利润空间的前提下，维持卤虫的正常存活和发育。

在越南永州地区，针对永州*A. franciscana*的养殖实践表明，接种后7～10天通常可观察到首批卤虫交配，繁殖行为多始于10～15天后。初期几代幼体多以卵胎生方式繁殖（即直接产出无节幼体），随后部分卤虫转为卵生模式（即产出卤虫卵）。以卤虫卵生产为目标时，可在卤虫生长15～20天且下风处出现卵时开始采收。若以卤虫生产为目标，12～15天后即可启动采收作业。从第3周起（即接种约20天后），若种群管理得当，卤虫繁殖活动将维持高位稳定状态。确保卤虫生产力的核心要素在于稳定的营养条件与水温。盐度、溶氧水平或底栖藻类滋生等因素的影响相对有限，即便这些参数不够理想，只要营养水平和温度调控得当，卤虫卵和卤虫产出仍能保持稳定甚至增长。

2.2.5.3　非生物参数管理

（1）盐度与水深调控

如前所述，日晒盐场通常采用15～20厘米的浅水位以促进蒸发。为将盐田改造为卤虫养殖系统，需实施工程改进（见2.2.3节），通过加固加高堤坝系统并提升蓄水能力，实现盐田至养殖系统的功能转换。

自然界中卤虫虽能适应广盐环境，但池塘养殖需全程将盐度控制在适宜种群增殖的范围，通常为80～120克/升，该盐度区间也可有效抑制捕食者与竞争者。盐度过高（＞250克/升）亦会导致卤虫死亡。当盐度超标时，有时需要先排出部分高盐水体，再注入半咸水或淡水进行稀释。稀释过程应循序渐

进，每日盐度降幅不超过20 ～ 30克/升，避免对卤虫种群造成盐度冲击。补水量可根据养殖池盐度与补给水盐度，按以下公式计算：

$$S=\frac{(V_1\times S_1)+(V_2\times S_2)}{(V_1+V_2)}$$

其中：S为稀释后池塘盐度（克/升）；V_1为原池塘水量（立方米）；S_1为原池塘盐度（克/升）；V_2为稀释用水量（立方米）；S_2为稀释用水盐度（克/升）。

盐度测量推荐使用可进行温度校正的折射仪。由于藻类浓度及其他悬浮物会影响折射率，建议在测量前对样本进行过滤。如第2.2.3.7节所述，由于朔庄与薄寮沿海区域在11—12月的雨季末期海水盐度较低，卤虫生产季初期的进水盐度通常仅为12 ～ 15克/升。因此，将水体盐度提升至约80克/升的制备过程需耗时约一个月或更长时间。若遭遇寒潮或异常降雨，此阶段还可能延长。为缩短盐水制备时间，养殖户可向蒸发池或卤虫养殖池添加粗盐或前一年储存的卤水。通过耙扫频繁制造水体湍流，亦可加速蒸发进程。

为最大限度延长生产周期，养殖户可在池水深度达平台（池底）上方约10厘米（周边沟渠至少40厘米）、盐度60 ～ 70克/升时开始接种卤虫。随后向接种池持续注入盐水，使水位逐渐升至20 ～ 30厘米（沟渠处至少50厘米），并维持该水位至养殖周期结束。由于蒸发作用，盐度将逐渐升至80 ～ 100克/升。然而，浅水期接种投放卤虫会受昼夜水温波动影响。此外，浅水环境下无节幼体易受风力影响聚集于池角，造成初始种群严重损失。低水位还加剧水禽的捕食风险，卤虫具有缓慢游动、水面漂浮的习性（尤其在静夜之后），更易成为水鸟猎物。当盐度低于80克/升时，桡足类可能迅速入侵养殖池，与卤虫竞争生存空间，同时与卤虫争夺食物的还包括轮虫、原生动物盐生法布虫（*Fabrea salina*）等其他浮游动物以及罗非鱼等鱼类（见第2.2.3.6节）。

接种后，蒸发作用将持续提升池水盐度至80克/升以上。旱季末期的高温会加速蒸发，每日可提升2 ～ 5克/升。在潮汐周期导致低盐度水源短缺、强日照、无风等特殊条件下，池水盐度可飙升至150 ～ 180克/升，水温超过40℃。这种极端环境将导致卤虫种群死亡，并影响绿水池中微藻的密度与群落结构，此时卤虫池的微藻供给往往不足。

浅水池塘中，阳光直射池底会刺激底栖藻类生长，与微藻争夺营养。当营养与光照充足时，丝状藻迅速增殖形成藻垫覆盖池底。藻类进入平台生长期后死亡分解，形成含气泡的碎片漂浮水面。这些碎片经风力作用堆积于池角，可能再次沉降并在厌氧条件下分解释放硫化氢、甲烷、二氧化氮等有毒气体，引发卤虫大规模死亡。水体中的丝状藻会缠绕卤虫个体及虫卵，使其附着于藻丝与黏液上，增加收卵难度，导致减产。

综上，盐度管理与水位控制对卤虫养殖至关重要。养殖初期盐度过低或末期盐度过高均会对卤虫的存活、生长与繁殖造成影响，最终影响产量。科学的盐度调控可显著延长养殖周期，提高产量。

（2）温度控制

温度通过种群发育、繁殖等直接影响卤虫养殖，或通过蒸发速率、盐度、水质及藻类生长间接影响（Vanhaecke等，1984；Vanhaecke和Sorgeloos，1989）。因此，需针对卤虫品系特性将水温维持在适宜范围。水温波动明显受盐度、水深、透明度、风速及季节条件等综合因素影响。朔庄与薄寮地区24小时的水温变化范围为20 ～ 40℃，而永州品系卤虫的最适生长温度范围则为28 ～ 32℃。在3—4月，水深较浅（池底至水面＜20厘米）的池塘中，37 ～ 38℃的最高水温通常出现在下午，而水温超过35℃不利于卤虫养殖，且温度的持续升高可能导致群体性死亡。此外，深水池塘易形成温跃层，尤其在静风夜晚后，水体底层温度升高而溶氧水平降低。当卤虫种群密度较高时，这种现象同样会引发群体性死亡。可通过以下措施避免高温危害：①控制池水盐度不超过120克/升；②通过加深环沟或提高水位维持足够水深；③保持稳定浊度，因为透明度越高越易导致水温上升。定期耙扫池底促进水体混合能有效缓解温跃层影响。养殖户还可利用棕榈叶等廉价材料局部遮盖池面，为卤虫提供日间高温时段的遮蔽场所。

随着旱季末期气温逐渐升高，投放卤虫时需特别注意水温调控。季初水温相对较低，可在10 ～ 15厘米浅水位条件下投放；而3—4月临近季末投放时，需逐步调整至至少20厘米水深，并随旱季推进持续提升水位。

（3）溶解氧控制

卤虫养殖池溶解氧应维持在2.5毫克/升以上，低于2毫克/升显著影响产量。表层水体溶解氧通常较高，尤其在出现分层现象时。溶氧水平与风力作用、藻类密度密切相关，并呈现昼夜周期性变化。黎明时分由于藻类的呼吸作用溶解氧浓度最低，静风夜晚后尤甚；下午时段由于藻类的光合作用溶解氧浓度达到峰值。预判可能出现的缺氧状况时，应于黎明进行检测。若发现溶解氧不足，需及时补充新水并搅动水体。增开泵机、降低藻浓度、暂停施肥（尤其是有机肥）或实施池水循环均可提升溶解氧。使用便携式溶氧仪检测时，因取样后数值变化迅速，建议取样后立即测定或直接在池中检测，测量过程中需持续移动探头。卤虫体色与行为是溶解氧状况的有效判断依据，缺氧胁迫时虫体发红、游动迟缓、聚集水面且生长缓慢，严重缺氧将导致群体性死亡。

（4）pH控制

自然生境中卤虫多存活于pH 7.8 ～ 8.2最适值区间，但卤虫对pH的耐受存在品系差异，部分品系已适应碱性环境（见第1.2节）。pH对卤虫生长繁殖

的具体影响尚未深入研究。藻类繁殖通过消耗二氧化碳（CO_2）升高pH，因此每日pH峰值通常出现在下午，谷值则见于黎明前后。海水普遍具有良好缓冲能力，除酸性硫酸盐土壤区域外，pH异常情况较为罕见。

2.2.5.4 种群管理与季节影响

卤虫种群状况只能通过适当的采样方案进行评估。每周两次需在不同养殖池中采收若干样本（如10个样本/公顷），采样点应相对固定且尽量分布于多个不同“分层”（strata）区域。生境可划分为若干层，各层环境特征略有差异，因而卤虫密度也不同：在具有环沟的池塘中，平台区、沟渠区和角落区可视为三个不同分层，因这三处温度与藻类丰度可能存在差异。此外，幼体发育阶段多聚集于池塘下风区，而成体更常见于平静的上风区域。通过多点采样可降低漏检风险。建议在清晨采样，此时种群分布更为均匀。推荐以下两种采样方法：

- 每个采样点用100微米筛网过滤5 ～ 10升水；
- 使用锥形网在水中拖行特定距离，可水平或垂直拖曳。

网具规格取决于采样水量，而水量又与种群密度相关。高密度时可采用直径30 ～ 50厘米、网目100微米的网具；低密度的大池塘则需使用更大网具（直径达1米）并延长拖曳距离。为防止堵塞，仅网具末端采用100微米的小网目，其余部分可用300 ～ 500微米网目。

样本用4%福尔马林固定后，按发育阶段将卤虫分组。卤虫从Ⅰ期无节幼体开始经历15次蜕皮发育为成虫，通常分为：无胸肢的无节幼体期、胸肢发育明显可见的青年期、拟成体、性别特征显现的成虫及卤虫卵。各阶段相对丰度按以下标准评分：—＝无；＋＝存在；＋＋＝高密度存在。

根据各发育阶段出现的频率，卤虫种群可分为几个连续阶段（表2-9）。根据单池接种后所有样本各发育阶段卤虫的评分以时序图呈现（图2-19）。这种估算虽不精确，无法获得每升水体卤虫具体数量，但能准确反映卤虫的丰度变化。通过图表可追踪种群动态并调整管理措施。

种群评估还需关注雌虫繁殖特征，如是否携带卤虫卵或无节幼体、繁殖力（即单个育仔囊中胚胎数）、空育仔囊雌虫比例及性别比。实践中，不同龄组比例会随养殖条件和种群状态波动，但当各龄组比例稳定时，表明卤虫养殖进入稳定期，此时卵或卤虫的产量达到最高（Hoa，2002）。维持种群健康稳定状态需控制多种因素，如通过保持特定盐度控制敌害生物、避免达到致死温度等。饵料因素对种群增长和维持稳定状态具有决定性作用。当饵料供应不足时，种群数量虽会逐渐下降，但不会完全消亡。

实验室研究表明，雌性个体在最初几胎倾向于产无节幼体，随后在其剩余生殖周期转为产卵（Lavens和Sorgeloos，1984，1987a）。然而野外条件下这

表 2-9　养殖池中卤虫种群的演化

种群状态	种群组成					说明
	幼体	青年期	拟成虫	成虫	卵	
A	++	–	–	–	–	接种时的种群
B	–	–	+	++	–	种群发育至拟成虫和成虫阶段
C	++	–	–	+	–	种群中的雌虫开始产幼体
D	+	+	+	+	–	种群中的雌虫继续产幼体（C），池塘条件好
E	+	–	–	++	–	经过一段时间食物缺乏，种群面临困境而迅速转向F（在饥饿状态下种群中只有成虫存在，小卤虫快速灭绝）
F	–	–	–	++	–	种群中的成虫缺乏足够的食物
G	–	–	–	++	+	大多数雌虫转向产卵，种群密度不再增加
H	+	+	+	+	+	向池塘中适当施肥时，种群中所有龄期的卤虫均存在，雌虫也产卵

注：–=无；+=有；++=高密度。
资料来源：作者整理（LAARC）。

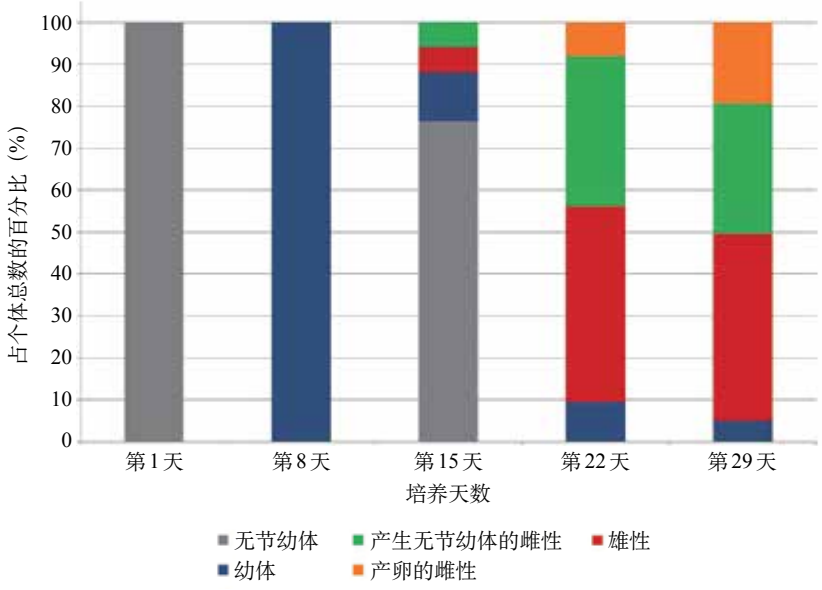


图 2-19　池塘接种后卤虫种群年龄结构演化示例

资料来源：Hoa, V.N.。2002。《越南盐田 *Artemia franciscana* 卤虫的季节性养殖：温度和盐度的影响》。比利时根特大学博士学位论文。184 页。

一规律并不显著呈现。在池塘养殖中，雌虫在高种群密度时往往直接产卵。而在旱季末期当温度和盐度较高时，雌虫倾向于产更多无节幼体。通过调控盐度和饵料条件来控制雌虫生殖模式的实验表明，80 ～ 120克/升的盐度通常利于产卵，而较低盐度配合充足饵料则能刺激卤虫生物量增长。

总之，卤虫养殖管理应以持续高产为目标，其成效取决于种群龄期、饵料供给及气候等环境因素。鉴于卤虫种群状态因这些因素而动态波动，池塘管理的核心应维持稳定的成虫密度，确保雌虫育仔囊中持续充满后代。近年来受气候异常影响，尽管养殖户采取措施促进雌虫转向并维持卵生繁殖方式，朔庄与薄寮地区的卤虫生产周期持续缩短，目前该地区产卵高峰期已压缩至1—3月，即整个生产季最多持续60 ～ 70天。在4—6月旱季剩余时段的高温不利条件下，养殖户通常仅能收获卤虫。若无卤虫的销售市场，建议终止生产以避免维持卤虫种群造成的成本浪费；可在雨季来临前清塘，为鱼类或甲壳类等的养殖做好准备。

2.2.5.5　管理问题与解决方案

（1）藻华现象

朔庄与薄寮盐场池塘底泥通常富含可生物降解的氮和有机质，钙锰含量较高，而铁含量较低。研究表明，高浓度可生物降解氮与土壤氮矿化水平呈正相关（Khoi、Guong和Merckx，2006b；Hoa和Hong Van，2019），因此可生物降解氮的测定是评估盐田注水初期土壤氮矿化程度的指标。可生物降解氮含量越高，藻类繁殖越快，但养殖早期微藻的过度繁殖会抑制卤虫的生长。总体而言，底泥中可生物降解氮水平是调控整个养殖过程中无机肥与有机肥施用量的依据，可避免藻类过度或过早增殖。

（2）底栖藻类的发生

底栖藻类易出现在底泥营养富集的浅水池塘或过度施肥的水体中（图版31）（见第2.2.4.2节）。当微藻密度足够高或频繁耙扫维持适宜浊度时，阳光无法穿透至底层，可抑制丝状藻类在池底增殖。若因卤虫摄食藻类及水体混合不足导致透明度上升，在氮磷营养充足条件下，底栖藻类可在10 ～ 15天内迅速蔓延覆盖池底。人工清



图版31　池底和水体中出现的底栖蓝藻

除底栖藻类需耗费大量人力与时间，期间卤虫种群处于亚健康状态，恢复期可达一周以上，最终导致生产力下降。此外，底栖藻类可能在盐度升高或营养受限时死亡，其分解过程将进一步恶化环境条件，引发卤虫死亡甚至种群灭绝。因此，除通过维持浊度预防底栖藻类增殖外，在其密度较低时及时清除至关重要。若已过度繁殖，应排干池水曝晒至底泥龟裂，才能开启新一轮生产周期。

（3）黏土浊度现象

有时需防止悬浮黏土颗粒导致的浊度过高现象，以确保光线充分透射促进浮游植物生长。当土壤与水体中的钠含量超过钾、钙、镁且盐度较高时，黏土颗粒将分散悬浮于水层中。另一方面，因为有机物会与黏土颗粒结合形成较大团聚体加速沉降，土壤中的有机物含量也是影响浊度的因素（Hoa和Hong Van，2019）。因此，可通过施用有机肥增加卤虫养殖池底部的有机物含量，从而减少池水黏土浑浊问题。此外，将施肥池中富含有机物且藻类密度高的绿水引入卤虫养殖池，也能提高水体溶解有机物含量。

（4）卤虫池塘养殖常见病害

①白丝菌病

由鞭毛细菌白丝菌属（*Leucothrix* sp.）引发，过度繁殖时菌落呈棉籽荚状。这些菌落多附着于卤虫外骨骼尤其是胸肢上，从Ⅴ～Ⅵ龄期开始显现。卤虫胸肢运动受阻，滤食率随之下降。当感染严重时，卤虫的生长与蜕皮过程停滞，种群可能崩溃。该现象通常发生于养殖环境有机物负荷过高时，建议定期更换池水并部分清除有机物。

②黑斑病

确切致病因素尚未完全明确。当种群因食物匮乏或饵料质量低劣导致营养不良时，卤虫胸肢和触角的表皮与角质层分离形成黑斑（坏死）（图版32）。投喂优质饵料虽无法治愈患病卤虫，但可避免进一步损失。

③拖便现象

表现为卤虫拖曳长线状粪便。当投喂过量或不易消化饵料时易发此症，尤其当供给卤虫养殖池的绿水中含有过多厚壁微藻或丝状藻类时。可通过更换含适宜藻种的绿水或直接投喂其他饵料加以改善。

④白尾病

肉眼观察可见卤虫腹部色泽苍白。显微镜下可见肠道末段无食物残留（图版33）。这种现象与饵料问题有关，但具体原因尚未明确。当在种群中观察到该现象，卤虫将在几天内大量死亡。养殖池出现这一问题时，建议导入不同来源的绿水，部分更换新水可控制或完全消除白尾病。



图版32　卤虫胸足黑斑病



图版33　呈现白尾病症状的青年期卤虫

2.3　卤虫罐体养殖生产与卤虫的应用（作者：Yeong Yik Sung、Thirukanthan Chandra Segaran、Khor Waiho、Tan Min Pau、Asmidar Mohamad、Krishnnappriyaa Gopi 和 Patrick Sorgeloos）

2.3.1　卤虫的罐体养殖生产

2.3.1.1　卤虫生产概述

不同发育阶段的卤虫在水产养殖中均有利用，尤其是青年期卤虫和成虫可作为淡水与海水观赏鱼、水产养殖鱼类及龙虾、淡水长臂大虾等甲壳类幼体的饵料。研究表明，投喂卤虫可改善养殖动物的能量平衡，从而促进生长和发育、获得更好的生理状态（Choi 等，2021）。在对虾仔虾培育中，投喂卤虫还能减少对虾自残现象的发生，使存活率提升 30% ～ 40%（Anh 等，2011）。

过去因活体或冷冻卤虫稀缺、成本高昂且质量不稳定，卤虫生物量的应用未能得到开发。但随着水产养殖多领域发展带来的卤虫需求增长，加之虫卵价格降低、技术进步与培养方式改良，这些因素共同推动了养殖场及其周边的高密度池塘与超集约化池养系统的发展，卤虫生产共迎来新的热潮。

水族宠物商店为本地培养的活体卤虫提供了优质市场渠道。马来西亚近期建立的若干卤虫生产设施均采用静水批次培养系统，旨在支持观赏鱼产业发展。目前该区域生产的卤虫多经冷冻销售，因其来源有限且跨洲活体运输成本过高。

2.3.1.2　罐体卤虫养殖的优势

尽管罐体养殖卤虫成本显著高于池塘养殖，但其应用优势显著：可实现全年无间断养殖与采收，不受环境或季节因素限制；选用优质的、可同步孵化的虫卵，通过科学投喂与养殖流程可获得规格均一的卤虫；可根据水产动物的摄食偏好，精准收集特定发育阶段（青年期、拟成虫、成虫）或统一规格的卤

虫。罐体养殖能确保产量与质量的稳定性，并可优化卤虫的营养组成。若管理得当，养殖卤虫可实现无病原（如无弧菌）状态。

超集约化罐体培养技术较池塘生产具有两大优势：其一，该技术不受生产场地与时间约束，既不依赖高盐度水体，也无特定气候条件要求；但建议选址于具备优质海水源的区域，因卤虫与其他水产养殖物种类似，需清洁优质水体才能培育至成虫阶段。其次，相比室外养殖池每升最多仅数百只卤虫的密度，室内养殖系统可实现每升高达数千只的高密度培育。因此，基于罐体的养殖体系能实现单位水体产量的显著提升。

据估算，活体卤虫的生产成本为1.5 ～ 12美元/千克，卤虫卵批发价格则因养殖方式和场地设施差异介于25 ～ 80美元/千克（Nguyen等，2019）。实际进行卤虫养殖时，应首先对现有养殖条件和基础设施进行全面评估。表2–10列出了影响卤虫养殖的非生物与生物因子，后续章节将对此进行详细阐述（Lavens和Sorgeloos，1991）。

表2–10　卤虫养殖的非生物和生物因子

因子		
生物因子	卤虫	卤虫品系的选择 养殖密度
非生物因子	理化条件	盐度和离子组成 温度 pH 溶解氧浓度 水质
	设施	罐体和曝气装置设计 加热和光照
	养殖技术	开放流水养殖 循环水养殖 净水养殖
	投喂策略和饵料	饵料选择 投喂策略

资料来源：改编自Lavens和Sorgeloos，1991。

Lavens，P.和Sorgeloos，P.。1991。第十三章：《罐体卤虫生产》。转引自：R.A. Browne、P. Sorgeloos和C.N.A. Trotman（编）。《卤虫生物学》，第317–350页。美国佛罗里达州博卡拉顿，CRC出版社。

2.3.1.3　生物因子

（1）卤虫品系的选择

目前关于不同卤虫品系在罐体培养条件下的性能研究甚少，限制了我们对于优良品系的筛选。既往研究仅聚焦于旧金山湾品牌的*A. franciscana*品系，

其品质优于中国、菲律宾、新加坡和泰国的卤虫产品，亦优于*A. salina*及其他若干未明确分类的卤虫品系或种（Islam、Kibria和Bhuyan，2019）。

（2）卤虫的培养密度

高密度培养条件不会对卤虫存活率产生负面影响。批次培养中接种密度可达5 000只无节幼体/升，封闭式流水培养可达10 000只无节幼体/升，开放式流水培养可达18 000只无节幼体/升，且不会产生负面影响（表2-11）。极高密度养殖本身对卤虫行为无显著影响。当然每种培养方式都存在承载极限，当密度达到或超过临界值时，水质恶化和个体摄食率降低等会导致生长速率与存活率下降。尽管拥挤效应不直接影响存活率，但会对摄食速率和生长性能产生显著影响。在静水养殖系统中，随着养殖密度上升，卤虫生长速率显著下降，这主要归因于高密度条件下，必须大幅降低投喂率以维持水质（Dhont、Lavens和Sorgeloos，1993）。

随着卤虫密度的提升，培养系统的成本效益显著增加。在开放式流水系统中，最大密度受投喂量的限制；而在循环水或静水养殖系统中，水质维持决定了安全投喂水平和养殖密度。表2-11汇总了采用不同培养技术的最高卤虫密度数据。

表2-11　不同养殖条件下的卤虫密度

养殖系统	卤虫（只/升）	养殖周期	生长	参考文献
开放流水系统	18 000	培养至成虫	高	Tobias等，1980
封闭流水系统	＞10 000	培养至成虫	中等	Lavens等，1986
	5 000 ～ 10 000	培养至成虫	高	
净水系统	5 000	7天	高	Dhont、Lavens和Sorgeloos，1993
	20 000	7天	低	

资料来源：Tobias，W.L.、Sorgeloos，P.、Roels，O.A.和Sharfstein，B.A.。1980。国际卤虫研究。第十三部分：圣克罗伊人工上升流海水养殖系统中17个不同地理品系卤虫生产数据的比较。转引自：G. Persoone、P. Sorgeloos、O. Roels和E. Jaspers（编），《盐水丰年虫卤虫》，第384–392页。第3卷：生态、培养及其在水产养殖中的应用。比利时韦特伦，Universa出版社。

Lavens，P.、Baert，P.、De Meulemeester，A.、Van Ballaer，E.和Sorgeloos，P.。1986。《卤虫高密度流水培养的新进展》。世界海水养殖学会杂志，16：498–508。https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.1985.tb00228.x

Dhont，J.、Lavens，P.和Sorgeloos，P.。1993。《卤虫作为对虾和淡水虾幼体饵料的制备与使用》。转引自：J.V. McVey（编），《CRC海水养殖手册》，第61–93页。第2版，第1卷：甲壳动物养殖。美国佛罗里达州博卡拉顿，CRC出版社。

2.3.1.4　非生物因子

（1）理化条件

①培养介质的盐度与离子组成

在自然界卤虫通常栖息于盐度高于100克/升的高盐度水域，但其在天然

海水中仍能良好生长。就生长速率和饵料转化效率而言，卤虫在32 ～ 65克/升较低的盐度区间内生理表现最优；盐度30 ～ 35克/升的天然海水是规模化卤虫培养最优的选择。培养过程中，可通过添加卤水或低氯自来水稀释进行小幅盐度调节。为防止未溶解盐分在罐体中沉积，应避免直接向培养体系中添加海盐，需配备卤水储备液以便按需提升盐度。除天然海水或稀释卤水外，多种具有不同离子组成的人工培养基已在室内卤虫生产设施中成功应用。尽管人工海水制备成本高昂且费时费力，但在特定条件下仍具经济可行性（Vanhaecke、Siddall和Sorgeloos，1984）。

②温度、pH与溶氧量

多数卤虫品系的适宜温度范围为25 ～ 28℃，因此须将养殖温度维持在所选卤虫品系的最适温度区间内。关于海水加热方式，详见下文论述。现有文献普遍认为，卤虫的pH耐受范围为6.5 ～ 8.0（Vanhaecke、Siddall和Sorgeloos，1984）。由于反硝化作用，培养过程中的pH往往呈下降趋势。当pH＜7.5时，应添加少量工业级碳酸氢钠（$NaHCO_3$）以提高养殖水体的缓冲能力。通常可采用便携式pH计或简易实验室分析试剂盒检测pH。若使用后者，需仔细阅读说明书，确认其检测涉及的化学反应是否适用于海水环境。

溶解氧（DO）是卤虫培养的关键限制因子，当溶氧水平低于2毫克/升时即会限制产量。为实现最佳产量，建议维持溶解氧水平高于2.5毫克/升。若溶氧水平持续超过5毫克/升，会因呼吸色素血红蛋白含量低而使卤虫体色苍白，从而降低摄食动物对卤虫的辨识度和摄食意愿。在收获前数日实施规律性短暂溶氧胁迫（间歇关闭曝气，每次持续数分钟），可获得高血红蛋白含量的深红色卤虫。培养过程中需定期监测溶氧量，其在投喂后可能出现显著下降。便携式溶氧电极是便捷的测量工具。当溶氧水平低于30%饱和度（在盐度32克/升和27℃海水中约合2.5毫克/升）时，应临时增加曝气强度或增设气石。若溶氧量持续偏低，则需提升系统的曝气能力。需特别注意，在相同气流量下，小气泡比大气泡更能有效提升溶氧水平，但过小的气泡可能滞留在卤虫胸肢间，导致卤虫被裹挟至水面（Vanhaecke、Siddall和Sorgeloos，1984）。

③水质

水质首先受悬浮颗粒物及含氮可溶性代谢废物的影响。高浓度悬浮固体会通过干扰卤虫摄食及运动能力，或促进耗氧细菌增殖影响生产。目前尚无实用方法检测有害颗粒物浓度，但可通过显微观察进行定性评估；在正常状态下，卤虫胸肢应无颗粒物附着、肠道充盈且通畅。经验丰富的人员可通过将养殖水体置于透明烧杯中对光观察，直观评估颗粒物负荷水平。可溶性代谢废物则会产生毒性氮化合物，如氨氮（NH_3-N）、亚硝酸盐氮（NO_2-N）和硝酸酸盐氮（NO_3-N），这些指标可通过试剂盒测定（Vanhaecke、Siddall和Sorgeloos，1984）。

（2）基础设施

①罐体与曝气设计

卤虫培养可在任何形状的容器中进行，前提是曝气系统能实现全水体的充分氧和，以及饵料和养殖动物的均匀分布，但需避免过度曝气。曝气方式与罐体设计决定水体的循环模式，二者需协同考虑。实践证明，混凝土、塑料或玻璃钢等多种材质的罐体均适用于卤虫养殖，其中玻璃钢的耐久性能最佳。

图2-20展示了一种典型的罐体设计：1立方米以下培养体系以长方形罐体最便利，圆形池亦常见。曝气可通过气提式（air-water-lift，AWL）系统、环绕中心立管的曝气环或池底铺设的穿孔聚氯乙烯（PVC）管实现。对于容量大于1立方米的养殖系统，推荐采用内衬防渗塑料板或涂刷特种涂料的水泥池体。大型玻璃钢池体同样适用，但成本较高，此类池体通常被用作跑道式养殖系统。

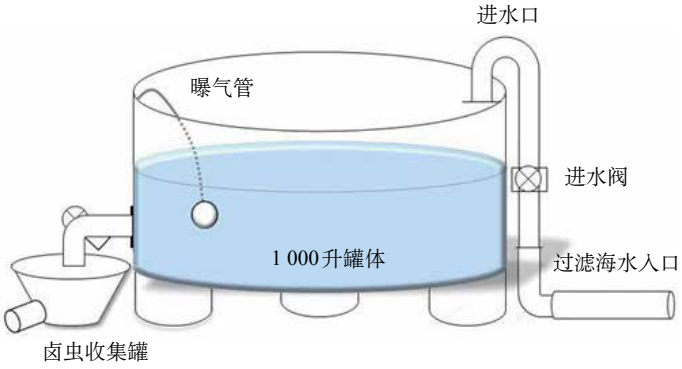


图2-20　1 000升卤虫培养罐体的示意

②加热与光照系统

在热带气候条件下养殖卤虫时，通常无需额外加热。但当环境温度低于25 ～ 28℃理想培养温度时，需启动加热装置。对于小于1立方米的小型水体，电热调节电阻是最实用的加热方式；大型培养系统建议采用热交换器，即通过恒温控制锅炉连接铺设于培养池底部/下方的铜管实现加热。采用聚苯乙烯泡沫板包裹池壁并用塑料薄膜覆盖水面可减少热损耗。亦可选用全封闭式厂房配合保温建材，但该方案成本较高，仅适用于温带气候区。实际生产中应尽可能减少加热能耗以降低生产成本。

补充光照能促进卤虫生长。研究表明，持续光照可使卤虫摄食率显著提升，其生长速度较每日12小时自然光照处理可提高10% ～ 20%。具体实施时可将光源悬挂于距水面1米的培养池上方，采用LED灯具更节能（图版34）。

③培养技术体系

根据不同的目标需求与现有条件，超高密度卤虫生产可采用多种培养体系。设施类型的最终选择取决于当地环境、生产需求和投资能力，但需首先考虑两个基本选项：是否换水（即开放式流水系统）？若选择不换水，则需进一步确定是否配套水处理设施（即封闭式流水系统）？若不配套水处理设施，则采用静态或批次培养。实际应用中存在从零循环率的开放流水到100%循环率的封闭流水等多种过渡形式。需注意的是，全循环系统也需定期少量换水。



图版34　卤虫培养罐体照明系统设置

系统设计应确保水质维持最优水质，将颗粒物与可溶性代谢产物浓度控制在最低水平，从而避免毒性问题、微生物异常增殖以及对卤虫滤食器官的干扰。

④静态培养系统

马来西亚登嘉楼大学（Universiti Malaysia Terengganu）研发了一套简捷可靠的卤虫高密度培养技术，生产最大体长达9毫米、规格齐全的卤虫，为鱼虾育苗提供饵料。培养系统采用1 000升圆形玻璃钢罐体（图2–21），罐底布设四个气石持续供氧。卤虫卵孵化出无节幼体后，经收集、计数，将无节幼体以20只/毫升的初始密度转移至罐体培养14天。投喂微粉化的棕榈仁粕提取物（见插文7），每日将饲料与海水混合孵育24小时后使用。动态调整日投喂量，使水体浊度维持在15 ～ 20厘米，并根据水体实时透明度监测数据对投喂量进行动态调节。

⑤开放式流水培养系统

通过间断或持续更换清洁海水来稀释颗粒及溶解代谢产物，可创造最佳培养条件并实现最高产能。但该技术的应用受限于两个条件：需大量成本低廉的适温海水（或卤水）和充足的藻类饵料供应，可采用人工上升流工程的排水、三级水处理系统或高密度对虾养殖池尾水。系统的核心设备是水过滤装置，需在高效排出废水的同时防止卤虫逃逸。过滤装置须保证连续24小时无堵塞运行，以避免溢流风险。

系统设计初期采用PVC框架结构，外覆可更换的尼龙筛网，底部曝气装置使气泡持续冲刷滤网内壁，显著降低滤网堵塞率（图2–21）。滤袋上端浸没

于气水交界面，滤网采用光滑尼龙布或塑料材质，可以防止因曝气产生的泡沫夹带卤虫。后续研发的新型柱式过滤系统（图2-22）由不锈钢焊接楔形筛网圆筒构成，垂直安装于养殖池中央（图2-23）。该系统底部通过PVC环密封，并配有柔性排水管，滤器下端固定有曝气环。

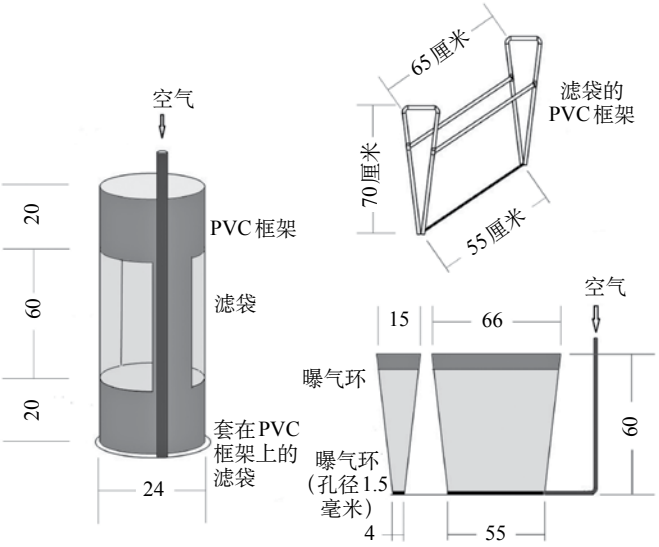


图2-21　流水卤虫培养系统中过滤装置示意及尺寸（单位：厘米）

资料来源：改编自 Brisset 等，1982。

Brisset, P.J.、Versichele, D.、Bossuyt, E.、De Ruyck, L. 和 Sorgeloos, P.。1982。《用惰性饲料高密度流水培养卤虫：改良培养系统的初步结果》。水产养殖工程，1 (2)：115–119。https://doi.org/10.1016/0144-8609(82)90003-6

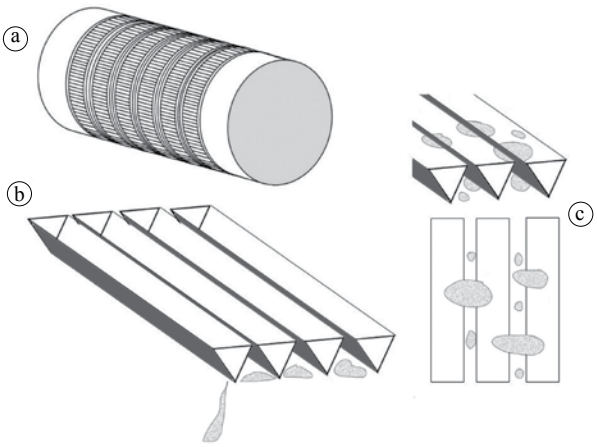


图2-22　基于焊接楔形筛网的过滤系统：a. 不锈钢焊接楔形筛筒；b. 焊接楔形筛网细节；c. 过滤器工作原理示意

资料来源：Dhont, J. 和 Lavens, P. 。1996。《卤虫的罐体生产与应用》。转引自：P. L avens 和 P. Sorgeloos（编）。《水产养殖活饵料生产和使用手册》，第164–195页。粮农组织渔业及水产养殖技术文件第361号。

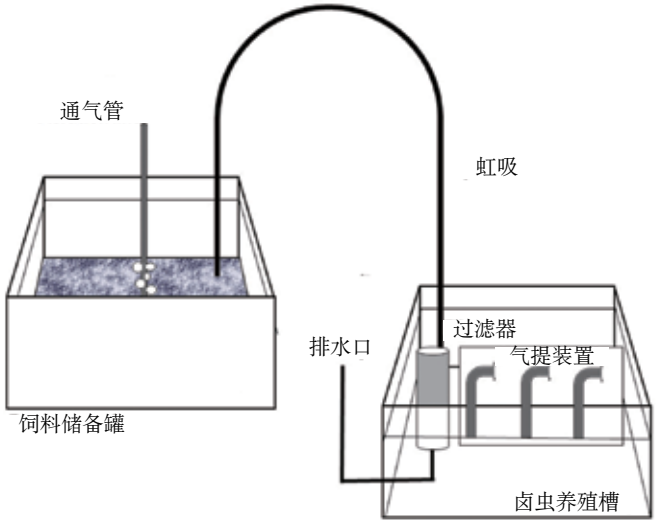


图2-23　1 000升开放式流水养殖系统示意

资料来源：改编自 Dhert 等，1992。

Dhert, P.、Bombeo, R.B.、Lavens, P. 和 Sorgeloos, P. 。1992。《用于可控超高密度生产卤虫幼体和成体的简易半流水养殖技术》。水产养殖工程，11：107–119。https://doi.org/10.1016/0144-8609(92)90013-N

相较于尼龙筛网过滤器，焊接楔形系统具有以下优势：

- 可通过狭缝开口排出细长的超大颗粒（图2-22c）；
- 特殊设计的V型狭缝产生特定流体吸力效应，可主动吸入与狭缝尺寸接近的颗粒；
- 颗粒与过滤器的接触点从筛网的四个减少至两个，显著降低堵塞概率。

该过滤器可自主运行的时长远超传统尼龙筛网过滤器，因此可采用更小尺寸的焊接楔形过滤器，为养殖池中的卤虫保留更多活动空间。同时该过滤器的经济性体现在无磨损特性上。

随着卤虫的生长，需定期更换更大网孔或狭缝的过滤器，以最大化清除蜕皮、粪便等废物。更换前需确认较大网孔或狭缝是否会造成卤虫逃逸。整个养殖周期内，建议使用6种不同规格的网孔或狭缝的过滤器（尺寸120 ～ 550微米）（表2-12）。若养殖池内水循环达到最佳状态，过滤器可布设于池中任意位置。在圆柱形尤其是锥底养殖池，过滤器最宜安装于中心位置。

⑥封闭式流水（循环水）系统

温海水供应量有限时，不宜实施开放式流水养殖。采用高养殖密度或长期养殖模式，颗粒物与可溶性代谢产物的积累可导致水质持续恶化，因此必须通过水处理单元循环处理养殖用水，以保障卤虫高密度流水养殖的顺利进行。

表2-12　300升超高密度养殖系统的投喂策略和换水操作

养殖时间（天）	楔形滤网尺寸（微米）	水流速度（升/小时）	罐体中水保留时间（小时）	投喂间隔（分钟）	日投喂量（克）
1	120	80	3.75	36	100
2	150	100	3	30	120
3 ～ 4	200	100	3	24	150
5 ～ 7	250	150	2	20	180
8 ～ 9	300	150	2	20	180
10 ～ 12	350	200	1.5	15	250
13 ～ 14	350	300	1	12	300

资料来源：数据整理自Lavens和Sorgeloos，1991。第十三章：罐体卤虫生产。转引自：R.A. Browne、P. Sorgeloos和C.N.A. Trotman编，《卤虫生物学》，第317–350页。美国佛罗里达州博卡拉顿，CRC出版社。

该水处理单元须具备清除颗粒物及降低有害含氮化合物浓度的功能。尽管针对高效循环系统的技术研发已较为成熟，但针对卤虫养殖的循环水系统的操作管理仍基于经验，因此本文不作循环水系统的推荐。图2-24所示是马来西亚登嘉楼大学位于Kuala Nerus的卤虫孵化场研发的循环水养殖系统的运行实例。

该系统由通过管道连接的罐体构成，利用重力作用输送过滤海水。系统配备曝气及加热、照明装置。养殖罐体直径1.2米、深度1米，养殖容积约1 000升。系统采用单排水直流式运行模式，养殖废水在排放前需去除固体废物（图版34）。排水口位于罐体底部，可阶段性将卤虫直接收至收集桶中。

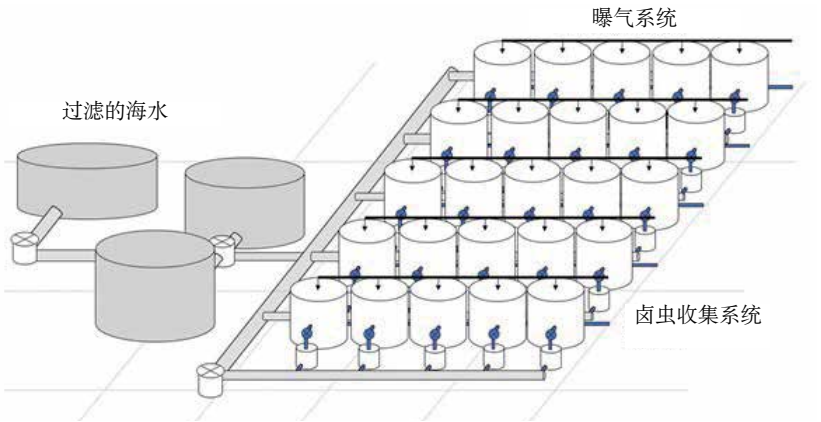


图2-24　卤虫封闭式流水培养系统示意

资料来源：马来西亚登嘉楼大学海洋生物技术研究所。

比利时根特大学卤虫参考中心（*Artemia* Reference Centre at Ghent University，Belgium）开发的循环水系统，则采用转盘式生物过滤器，详细信息参阅Dhont和Lavens（1996）。生物过滤器是循环水养殖系统（recirculating aquaculture system，RAS）的核心单元。其通过为微生物提供巨大的附着表面积，利用微生物的生理氧化作用将氨转化为相对无害的硝酸盐。氨首先经细菌的硝化作用转化为亚硝酸盐，继而进一步氧化为硝酸盐。投放卤虫前，通常需对生物过滤器进行数周的预培养驯化，即通过添加氨并监测其分解情况，确保细菌群落能以养殖运行所需的速率去除氨和亚硝酸盐。牡蛎壳、砾石、尼龙网、塑料环和海绵泡沫垫是最常见的生物滤料，但其他材料亦可采用。构建生物过滤器的关键设计要素包括：最大化细菌生长表面积、维持高溶解氧水平、确保水流均匀通过滤器、有足够空隙防止堵塞（McGee和Cichra，2000）。图2-25展示了生物过滤器设计的作用机制。

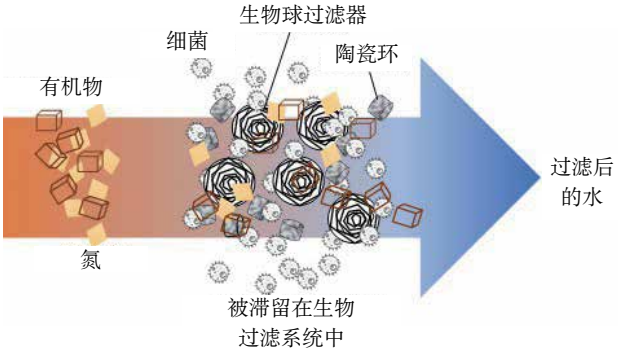


图2-25　生物过滤系统的作用机制

资料来源：马来西亚登嘉楼大学海洋生物技术研究所。

（3）投喂策略与饵料选择

卤虫的非选择性摄食习性使其较易实现规模化培养。其摄食行为受发育阶段、饵料浓度及培养条件等多参数影响，这些因素共同调控卤虫对食物的滤食、摄取和同化过程。当饵料浓度充足时，成虫游泳速度可降低50%。投喂配合饲料时，需精确控制投喂量以维持稳定水质，关键措施是增加每日投喂频次并减少单次投喂量。

①饵料选择

卤虫摄食无选择性，主要依据饵料粒径进行摄食（见1.1节）。随着内源性卵黄储备物质消耗殆尽，外源营养供给对其后续生长发育和繁殖能力至关重要。尽管不同饵料的营养成分存在差异，但高密度培养的卤虫产量未受显著影响。图2-26展示了选择适宜饵料源的关键要素。

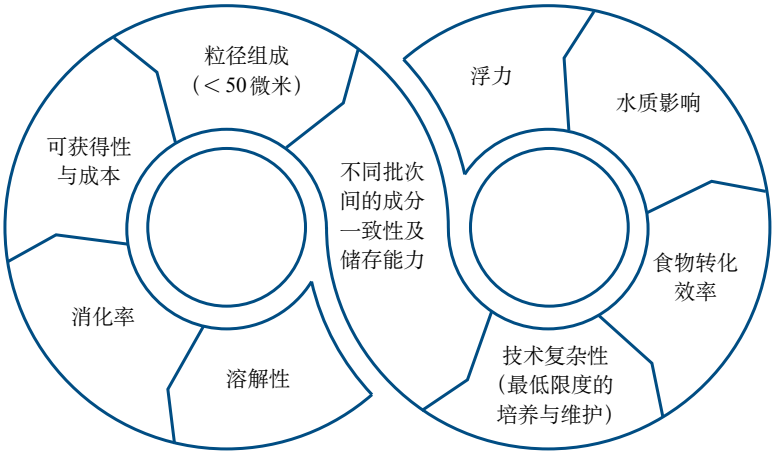


图2-26　卤虫培养适宜饵料选择的影响因素

资料来源：马来西亚登嘉楼大学海洋生物技术研究所。

在卤虫罐体养殖生产中可考虑投喂以下饲料：

a. 微藻

微藻是卤虫的天然饵料，如美国大盐湖中的卤虫*A. franciscana*以杜氏藻（*Dunaliella* sp.）为食。研究表明，多种微藻在水产养殖中具有显著的饲喂与强化价值，能有效提升卤虫生长性能、存活率及繁殖力。等鞭金藻（*Isochrysis* sp.）、拟纳绿球藻（*Nannochloropsis* sp.）、角毛藻（*Chaetoceros* sp.）、四鞭藻（*Tetraselmis* sp.）和杜氏藻（*Dunaliella* sp.）均已应用于卤虫培养。尽管微藻易培养，但维持稳定且高效的微藻生产颇具挑战，而直接采购浓缩微藻成本高昂。此外，微藻大规模培养需占用空间、耗时且依赖专业技术，导致成本攀升。另一局限在于微藻达到最大生物量通常需要4～7天，显著增加了养殖的工作量。高密度卤虫养殖需要充足的微藻供应，藻类投喂量不足将直接影响卤虫的最佳产量。此外，并非所有微藻都适合作为卤虫饵料，如小球藻（*Chlorella*）和裂丝藻（*Stichococcus*）的细胞壁过厚，难以被卤虫消化吸收（Dan等，2022）。

b. 干藻粉

干藻粉与活藻的营养成分近乎相同，如螺旋藻（*Spirulina*）和栅藻（*Scenedesmus*）藻粉，可作为卤虫饵料。但干藻粉成本高昂（10～20美元/千克）。而且藻粉含有难消化的成分，需特别关注培养体系的水质状况。

c. 微藻与细菌/生物絮团的联合投喂

微藻与细菌联合投喂是提升卤虫氮同化效率的有效策略。当二者以特定浓度共存时会产生协同效应，为高密度卤虫种群提供更优质的营养来源（Toi等，2014）。但该投喂策略依赖于适宜菌株的筛选、优化菌藻配比等专业操作。

生物絮团技术的发展提供了新途径，在维持水质的同时为卤虫提供饵料。该技术利用异养细菌将含氮废物转化为微生物蛋白（Yao等，2018），特别适用于卤虫与甲壳类或鱼类等水产动物的综合养殖系统，养殖尾水可转化为生物絮团并用于卤虫投喂，显著降低环境负荷。此外，作为卤虫饵料的生物絮团还可作为益生菌载体，对目标养殖动物产生有益作用（Liang等，2022）。

d. 单细胞蛋白

单细胞蛋白（single cell protein，SCP）来源于细菌或酵母等高蛋白微生物，以纯化蛋白或干全细胞形式存在。单细胞蛋白具备多个优于微藻的特性（图2-27），其中重组蛋白技术可将有益功能特性整合于单细胞蛋白中，再以卤虫为载体，将这些特性传递给鱼类或虾类幼体等摄食者，从而实现功能成分的级联递送。



图2-27　单细胞蛋白作为卤虫养殖替代饲料的特性

资料来源：马来西亚登嘉楼大学海洋生物技术研究所。

e. 食品加工废弃物与副产品

由于卤虫具有非选择摄食特性，可摄入多种食品加工废弃物及副产品。从经济角度考虑，食品加工废弃物与副产品具有现实可行性且优势显著。食品加工废弃物与副产品来源即时可得、储存便捷且成本低廉，尤其与需耗费大量人力培育的微藻相比。燕麦粉、米糠、玉米麸、小麦麸及豆粕等均可作为高密度卤虫养殖的饲料来源。采用此类物料时，必须经过评估卤虫生长状况与存活率，严格验证其作为单一或混合饲料的适用性。在理想条件下，食品加工废弃物与副产品可替代90%～100%的活藻饵料。此外，还可根据需求补充鱼油、胆固醇及磷脂等必需营养素（Vahdat和Oroujlou，2021）。

成虫期卤虫的理想饵料粒径上限为50微米，早期发育阶段则需更小粒径（详见第1.1节）。鉴于市售产品常存在粒径超标问题，通常需通过额外加工处

理以提高50微米以下颗粒占比。在劳动力成本较低且充裕的情况下，可采取以下人工处理方案：用盐水润湿大颗粒产品并用电动搅拌机均质化，然后用50微米滤网过滤。但经过滤的饲料悬浮液保存性较差，须每日进行人工均质与过滤操作。值得注意的是，米糠、小麦麸等高纤维产品可能并不适用均质过滤处理，因超过90%的纤维组分会在操作中流失。如果成本允许，可采用微粉化等机械均质工艺进行大规模干粉制备，以满足高密度卤虫养殖需求。

未被卤虫摄食的有机物会在水体中降解，并通过释放氨、亚硝酸盐等含氮物质影响水质。对于可溶性蛋白含量较高的饲料（如豆粕）而言，这一影响尤为明显。建议对此类饲料进行预洗处理：将其悬浮液强曝气1～2小时以减少可溶性组分，静置后清除泡沫或悬浮水体中的蛋白组分，保留沉淀颗粒中不易破坏水质的不溶性蛋白。

关于农业废弃物在卤虫养殖中应用的更多细节，参阅Jumalon Ogburn等（2022）的专题综述。

插文7　棕榈仁配方卤虫饲料PKC-Nutri+®

马来西亚登嘉楼大学研发了一种以棕榈仁压榨残渣为原料的新型惰性饲料，可显著提升罐体养殖系统中卤虫的生长与产量。该棕榈仁压榨残渣是棕榈油生产副产品，属廉价农业副产物。其商品配方饲料PKC-Nutri+®含21%蛋白质、47%碳水化合物、6%脂类、22%纤维及4%灰分。对投喂该饲料的卤虫进行营养分析显示，其组成为59%蛋白质、13%碳水化合物、6%脂类、14%纤维及8%灰分。尽管棕榈仁粕饲料的粗蛋白含量相对较低，但卤虫摄食后可获得与摄食微藻相当的蛋白质水平。这一现象证明，卤虫能够将棕榈仁粕饲料中的高碳水化合物高效转化为自身蛋白质，同时表明PKC-Nutri+®可作为微藻的廉价替代饲料，对控制运营成本具有重要意义。

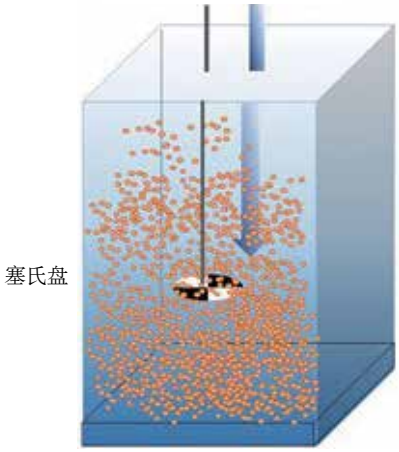


以棕榈仁粕为原料配制的卤虫饲料PKC-Nutri+®

②投喂策略

由于卤虫是连续滤食性生物，提高投喂频率可达到最佳生长效果并减少残饵沉积。投喂单细胞蛋白时，藻类或酵母的浓度应维持在高于特定藻种和卤虫不同发育阶段所需的最低临界浓度（Abreu-Grobois等，1991）。鉴于卤虫对微藻具有较高的滤食速率，每日需多次监测水体的藻类浓度，并通过调整水力滞留时间，使藻浓度显著高于预估最低摄食浓度。若缺乏摄食率或最佳投喂量数据，应尝试不同藻浓度，并通过显微观察评估投喂水平：饱食个体肠道充盈且排出致密粪粒，而摄食不足者肠道空或半空，粪便呈松散状（见2.2.4.1节）。

由于由碎片和不规则颗粒组成的干饲料无法直接计数，需建立最佳投喂量与养殖水体透明度的关联标准，即通常采用塞氏盘（图2-28）测定水体透明度来判定饲料浓度。经验表明，首周养殖透明度维持在15～20厘米、次周20～25厘米时投喂效果最佳（Lavens等，1986）。当卤虫进入成虫阶段后，投喂策略应由依据透明度进行调控，逐步转为按活体重量调控投喂，建议按每天每升水体投喂约相当于10%活体卤虫重量的干饲料，可获得最佳产量（Lavens和Sorgeloos，1987a）。



© 马来西亚登嘉楼大学海洋生物技术研究所

图2-28　借助塞氏盘评估光照穿透并结合丰年卤虫生物量覆盖的投喂策略

2.3.2　卤虫的采收技术

利用卤虫的表层呼吸行为可高效采收高密度培养的卤虫。当培养池停止曝气、断流并中止自动投喂后，水体溶氧水平迅速下降，所有残饵颗粒沉降池底。约30分钟后，卤虫因缺氧而聚集于水面进行表层呼吸。此时可用适当网目的抄网直接捞取无悬浮颗粒的富集卤虫。若水体清澈，也可用半浸没式筛网收集卤虫（图版35）。采收后的卤虫需用淡水或海水充分清洗，所得活体可作为淡水或海水养殖动物的优质饵料。由于卤虫是低渗调节生物，其体液恒定为9克/升的低盐浓度，故捕食者养殖水体的盐度对其投喂效果无明显影响。在海水中卤虫可在饥饿条件下存活数日；将卤虫投放于淡水中，由于渗透调节应激卤虫将在约5小时后死亡。

活体运输可采用充氧和装有低温海水的塑料袋包装（见第2.4.3.2节）。未及时投喂的卤虫可冷冻或干燥保存。为获得最佳品质，活卤虫需经淡水彻底冲洗后立即冷冻。建议将卤虫以0.5厘米薄层装入塑料袋或冰格，并快速冷冻（至少−25℃）。规范的冷冻操作可保持成虫的外骨骼完整，解冻后个体形态完好，避免体液渗出导致水质污染（图版36）。



图版35　采用淹没式筛网收集卤虫



图版36　经过不当冷冻（a. 水体浑浊含部分分解的卤虫）与适当冷冻（b. 水体清澈含完整卤虫）的卤虫解冻后情况

2.3.3　卤虫罐体养殖生产的微生物学特性

在富营养化环境中，丝状白硫菌（*Leucothrix*）的感染可导致拟成体卤虫大量死亡。该菌群主要附着于胸肢等外骨骼，通常仅从Ⅴ/Ⅵ期幼体阶段开始显现（见第2.2.5.5节）。当胸肢运动受阻时，卤虫的滤食效率降低。此时过量的投饵将最终导致卤虫发育停滞与蜕皮障碍，引发卤虫培养系统崩溃。土霉素虽可作为治疗手段，但会破坏生物处理单元功能，不可用于循环水系统。最可行的解决方案是将盐度从35克/升提升至50 ～ 60克/升，并提高换水率。

卤虫培养中另一常见病害为“黑斑病”（图版32），其特征是虫体局部（特别是附肢末端如胸肢、触角）出现黑色斑点。该病症表现为表皮与角质层分离，推测由脂质代谢紊乱引发的营养缺乏所致。黑斑病通常出现在投喂农业副产品饵料的高密度养殖系统中，当水质恶化可能干扰菌群结构或投喂量不当时易发。改善这些状况虽然不能挽救已受影响的动物，但有助于避免后续的损失。

与其他农业副产品不同，采用棕榈仁粕作为饲料不会导致卤虫养殖过程中出现黑斑病。通过对棕榈仁粕饲料微生物宏基因组（图2–29）进行检测，基于16S rRNA扩增子测序的菌群多样性分析显示，其微生物群落中乳杆菌属（*Lactobacillus*）和乳球菌属（*Lactococcus*）约占总量的75%，这两类菌均被公认为益生菌或“有益菌”。

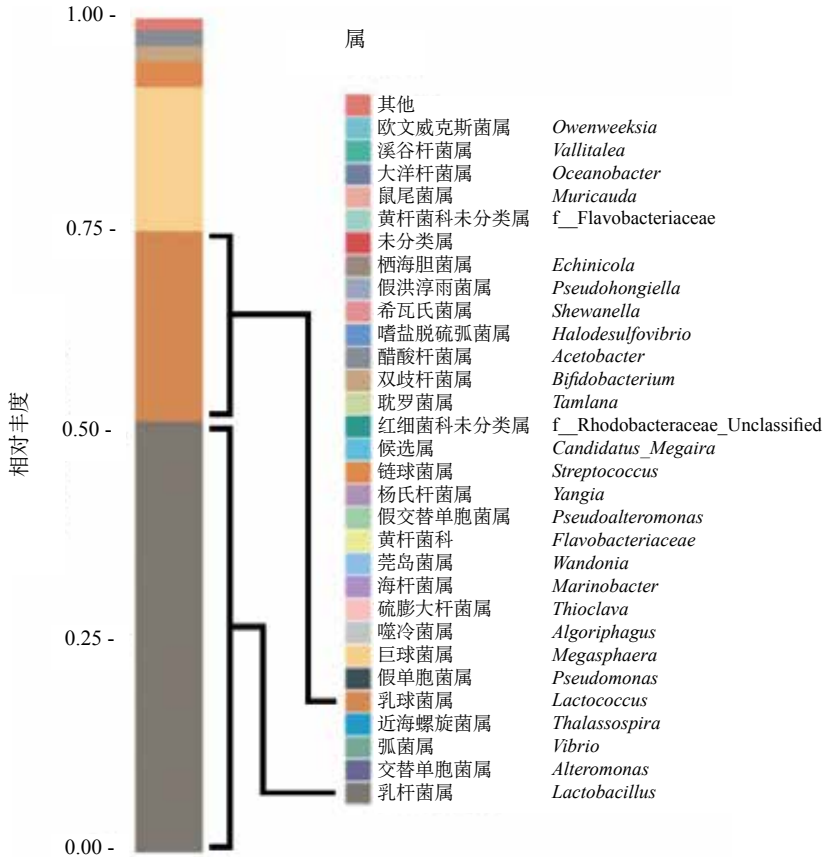


图2–29　基于棕榈仁粕的卤虫饲料中微生物群落组成（属水平）

资料来源：马来西亚登嘉楼大学海洋生物技术研究所。

2.3.4 卤虫罐体养殖生产数据与成本核算

卤虫养殖成本估算比较复杂。虽然可较准确估算固定成本，但运营成本完全取决于地域因素。例如当地条件会影响养殖模式的选择：在清洁温暖海水资源丰富的地区，人们多采用开放式流水养殖；而建立循环水系统则将产生显著的额外支出。饲料选择应以本地易获取资源为前提，不仅需考虑原料价格，还需核算其加工成本。饲料究竟采用机械超细粉碎处理还是人工滤袋挤压工艺，取决于加工成本与当地劳动力成本的对比关系。加热与泵送费用则由电力成本、环境温度、盐水储罐与养殖罐体的相对位置等多重因素决定。图版37展示了马来西亚登嘉楼大学与当地养殖户的合作，向农户传授卤虫罐体养殖技术以提升卤虫产量。



图版37　罐体卤虫养殖技术向马来西亚农户进行技术转移

在马来西亚，许多养殖户尤其是观赏鱼行业的从业者，已通过使用棕榈仁粕饲料投喂卤虫获得收益（见插文7）。与其他地区不同，马来西亚活体卤虫供应稀缺，市售价格高达20 ～ 30美元/千克，养殖户通常依赖进口的冷冻卤虫和红虫等生物饵料，常因长途运输导致品质下降。当地中小规模养殖多采用静水批次培养系统，初始接种量为每500升海水接种3克无节幼体，经14天培养后可收获1 ～ 2千克成虫。运用现有卤虫池养技术配合棕榈仁粕饲料和天然海水，可将生产成本（含饲料、人工、水电等）从10美元/千克降至3美元/千克。

2.4 采收与加工技术（作者：Nguyen Van Hoa和Gilbert Van tappen）

2.4.1 采收管理

本节重点阐述池塘养殖卤虫的采收与加工技术，相关操作规范具有普适

性，亦适用于天然盐湖的卤虫采收作业。池塘采收卤虫可设定两种主要产品目标，即采收卤虫卵或卤虫，亦可二者兼得。为确保最佳产品品质，需重点关注以下关键环节：确定适宜采收时机、设定合理的采收频率以及控制原料产品状态。

2.4.2　卤虫卵的采收与加工

2.4.2.1　池塘卤虫卵采收

根据天气条件、池塘管理及养殖池中卤虫的发育情况，最早可在接种卤虫2周后开始采收（如在越南湄公河三角洲地区）。卤虫卵最初出现在水体中，为浅黄至深黄、浅褐至深褐的微小颗粒，常附着于下风处角落的泡沫或碎屑上，随后上浮至池面聚集成簇。漂浮的卤虫卵借助风力作用向池岸漂移，最终聚集在下风处的卵障后方（图版38）。如第2.2.3.2节所述，应防止卤虫卵被冲上岸边，以免因暴露于高温环境及反复吸水/脱水过程而降低最终产品的活力。此外，岸上堆积的干卵可能随风飘散。若遇强风天气，卤虫卵多悬浮于水层中，因此表层卤虫卵数量减少；风力减弱后，卵将重新浮聚表面。当水体剧烈搅动产生大量泡沫时，卤虫卵可能被泡沫裹挟而散失，应设置卵障以消减波浪并抑制泡沫形成，卵障多以浮式竹竿或植物枝条制成。但遇到无风天气时，卤虫卵难以自然聚集于池角。

即使在适宜生境中，新产出的卤虫卵也不会立即发育为无节幼体。这些卵将保持滞育状态，意味着所有代谢活动可逆性中止。只有解除滞育（去休眠）后，卤虫卵才能在一定孵化条件下重新启动发育。以旧金山卤虫*A. franciscana*为例，去休眠需经脱水处理（Lavens和Sorgeloos，1987b）（见第1.5.4节）。



图版38　风力作用下漂浮于池塘角落的卤虫卵 (a) 与收集卤虫卵 (b)

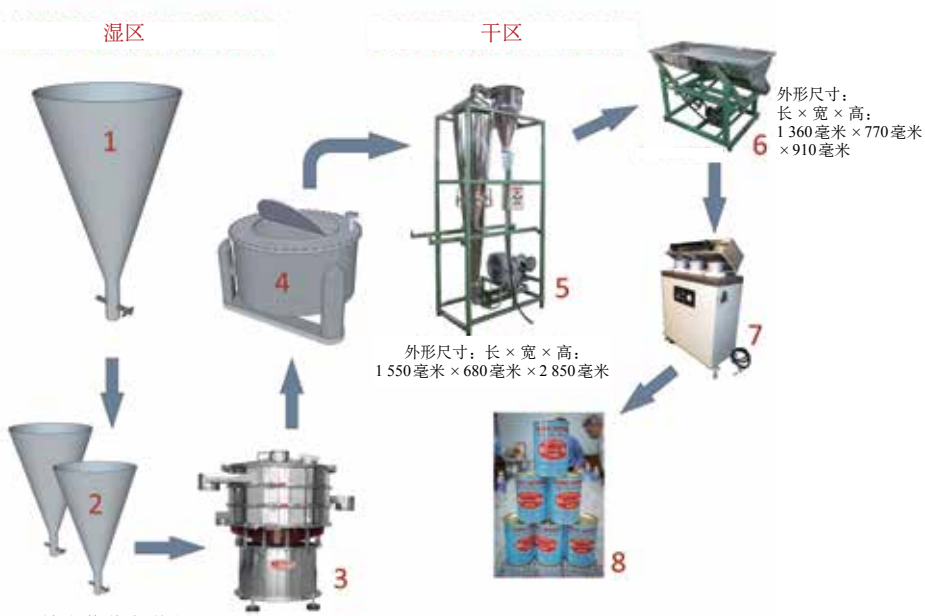
资料来源：Hoa, V.N. 和 Nam, T.N.H.。2019。《生物絮团技术在卤虫养殖中的应用》。N.V. Hoa、H.T.H. Hieu、N.A. Khoa 和 D.T.T. Uyen（编）。越南胡志明市：农业出版社。ISBN 978-604-60-2981-6。163页。

定期采收卤虫卵，可确保卤虫卵的最高品质、减少采收损耗和杂质污染。卤虫卵采收通常每日进行，有时每日两次，分别于清晨和傍晚收集，甚至更为频繁。采收时使用网目100～150微米的捞网，可以是标准浮游生物网或由细密织物制成、便于透水的网具。

2.4.2.2 卤虫卵加工流程概述

对于小规模生产，卤虫养殖户通常将初步加工的卵（加工方法见第2.4.2.3节）以原料的形式直接销售给中间商或加工厂，无需投资建设全套加工设备。而生产规模较大的合作社或大型企业，则需要购置卤虫卵加工和包装设备，以获得洁净、适销的产品（如罐装产品），并确保其具备可接受的孵化参数和货架期。相关设备包括用于分离卵与杂质的分离槽、离心机、流化床等干燥设备、筛分及包装设备等（图2-30；图版39）。加工厂的规模与投资取决于养殖规模（即原料卵的产量）或原料采购量。

在转移至工厂进行进一步加工前，卤虫卵需经过初级处理（见第2.4.2.3节）。如图2-30所示，其处理流程可概括：（1）经饱和卤水浸泡并完成密度分离（重质杂质下沉，卵料上浮）；（2）用淡水/自来水冲洗卤虫卵，以彻底去除盐水，该过程应控制在10分钟内以避免虫卵体吸水。于淡水中短暂静置，



© 越南芹苴大学和LAARC

图2-30 卤虫卵加工厂设备示意

1. 卤水储存与分离维体；2. 卵分离锥体（淡水分离）；3. 去除外部水分及残留杂质的筛网；4. 离心机；5. 流化床干燥单元；6. 筛分/分离设备；7. 真空封装机；8. 成品临时储存仓库



图版39　卤虫卵加工标准设备示例：离心机（左前）；成套筛网（右前）；淡水密度分离槽（后部）

可将完整卵与空壳分离（实卵下沉，空卵上浮）；（3）将湿卵收集于滤袋或筛网中，以去除外部水分并分离杂质；（4）进行离心脱水；（5）将湿卵进行干燥，干燥加工能力取决于干燥室的规格：小型流化床日处理量为20 ～ 30千克湿卵，而大型干燥系统日处理量可达数十至数百千克；（6）干燥卵收集冷却后过筛，去除最终残留杂质；（7/8）净化后的卤虫卵进行罐装（图2–30）。后续章节将详述各加工步骤。

2.4.2.3　卤虫卵的初级处理与储存

刚采收的原料卵通常混杂藻类、杂质及死亡卤虫，须在采收后立即用池水筛分。原料卵的初级处理按以下步骤操作（图版40）。

第一步

将池水缓慢倾注于1毫米网孔规格的筛网（Ⅰ型网）上，去除卤虫卵中的大型杂质；需同时进行冲洗或喷淋，以回收附着于杂质上的卤虫卵。此项操作通常需在养殖池附近进行，尽量保持用于冲洗的池水与采收卤虫卵区域的水体盐度相同。若使用淡水或低盐度水冲洗卤虫卵，可能使卵体吸水并激活休眠胚胎的代谢活动（Lavens和Sorgeloos，1987b），从而影响卵的质量。



图版40　卤虫卵的初级加工：a、b. 池塘角落堆积的卤虫卵；c、d. 用池塘水在筛网上冲洗虫卵；e. 挤压卤虫卵去除多余水分；f. 初级加工后的原料卵

第二步

使用网孔尺寸为400微米的网具（网Ⅱ）清除卤虫卵中大杂质。

第三步

将卤虫卵收集至150微米筛网中，用池水进一步冲洗，获得初步清洁的卤虫卵。可通过轻压卵团去除多余外部水分。

第四步

将经上述步骤清洗的湿原料卵浸泡于饱和卤水（250 ～ 300克/升）中进行部分脱水处理。为避免品质下降，卤水浸泡应在采收后立即进行。每日需人工或机械搅动虫卵，确保所有卵粒均匀接触卤水。容器底部沉积的暗色絮状物及异味水体须虹吸排出，随后补充新鲜饱和卤水以维持最佳储存盐度。加入新卵时需频繁补盐，因其部分水合的卵会降低盐度，导致脱水效率下降。经过初级处理的卤虫卵含水量可降至20% ～ 25%，可在常温下储存数月（图版41），但建议最好低温储存。根据品系差异，该脱水过程可部分或完全解除卤虫胚胎的滞育状态（Lavens和Sorgeloos，1987b）。

第五步：卤水密度分离

密度分离需分别在淡水和卤水中进行，二者以不同机制实现产品净化。卤水分离可将沉性重杂质与卤虫卵分离，而卤虫卵在卤水中呈悬浮状态。淡水分离则去除木屑、羽毛、空壳等漂浮杂质，完整的卤虫卵会下沉。虽然初



图版41　在苦卤中浸泡卤虫卵

级加工时通过池水冲洗已去除大部分大杂质（见前文），但与卤虫卵粒径相当的重杂质需通过卤水密度分离去除。卤水中的卤虫卵会上浮，而沙砾、碎石、重有机物等重杂质则下沉。当卤虫卵采收自近岸或岸边区域且含大量重杂质时，该处理尤为必要。若设备允许，通常于采收后立即在饱和盐水易获取的现场进行密度分离。除卤水浸泡外，亦可人工挤压去除多余卤水，再将半湿的产品储存于棉麻袋中（便于运输），残余卤水将在储存期间持续渗出。若需在空气湿度高的地区长期储存1周以上，应向卤虫卵中掺入粗盐以防止高吸湿性卵粒复水。袋装储存亦便于运输。除脱水过程本身导致的去休眠作用外，卤水储存（即“老化”过程）可能对某些品系和批次的卵产生进一步去休眠效果（Lavens和Sorgeloos，1987b）。

第六步：淡水密度分离

在淡水处理阶段，通过密度分离进一步净化原料卵，为后续干燥做准备。使用淡水会导致卤虫卵发生部分水合。若水合状态的卵在充气及较高温度条件下持续过久，胚胎最终将进入不可逆的孵化代谢状态，即卤虫卵将无法再次脱水，否则会影响胚胎的活力（Lavens和Sorgeloos，1987b）。即便卤虫卵在代谢不可逆阶段前已被脱水，其能量储备可能已消耗至使孵化率下降的水平。为防止代谢过程延长导致的能量储备耗竭，淡水处理环节应严格控制时长不超过10分钟，并使用控温冷水操作。淡水处理阶段的具体操作流程如下：

卤水去除

淡水密度分离前需去除原料卵中残余的卤水，以避免水体盐度（密度）升高导致分离效果不佳。将卵装入纺织袋中静置沥卤后，置于筛网上，用淡水彻底冲洗5～10分钟。

淡水密度分离

原料卵经淡水浸泡后，可分层为高密度（沉降）部分与低密度（上浮）部分。沉降部分主要为完整卵及少量密度或粒径相近的非卵杂质；上浮部分则主要为空壳、破碎卵壳及粒径相近的轻质杂质。为降低终产品的细菌负荷，在投放卵之前，可在淡水分离槽中添加H_2O_2或次氯酸盐（ClO^-；漂白液）进行消毒处理。分离槽淡水中的有效氯浓度需控制在200微升/升（即200 ppm）以下。

余水去除

袋装收集沉降的完整卵后，先经筛网滤除大部分淡水，再强力挤压卵袋排水。若需进行干燥处理，可进一步采用离心脱水，该步骤不仅可显著缩短干燥时长，还可降低产品黏性，从而使干燥工艺更优化（图版42）。

2.4.2.4 卤虫卵的干燥与包装

（1）干燥工艺

干燥方法的选择直接影响卤虫卵的孵化质量与保存期限。以下因素将决定最终干燥产品的品质，因此必须严格控制干燥流程。

- 成品的目标最终含水量：经过淡水处理后，卤虫卵的含水量应尽快降至10%的临界值以下，以终止代谢活动，从而确保长期保存。通常目标含水量控制在3% ～ 8%。
- 最佳干燥时间：在8小时或更短时间内使含水量降至10%以下，可获得最佳效果。延长干燥时间（如＞24小时）会因能量储备消耗导致孵化率下降。快速干燥也可能对产品产生负面影响，因干燥过程中温度过高可能损伤卵内的胚胎（Lavens和Sorgeloos，1987b）。
- 干燥温度：最高干燥温度（包括空气温度与产品温度）取决于产品特性（品系、含水量）及所采用的干燥工艺（处理量、干燥技术）。产品温度低于35℃通常较为安全。



图版42　离心去除多余水分

- 均匀干燥：干燥不均会导致部分卤虫卵干燥过慢，最终无法使含水量降至10%以下，可能导致孵化量和保存期限降低。

最有效的策略是采用相对快速且均匀的干燥工艺（如流化床干燥设备），使最终含水量低于10%。如图2-31所示，流化床干燥设备结构包括锥形干燥室、鼓风机、带温控装置的加热单元、排气过滤器或袋式过滤器。在“流态化”干燥过程中，加热后的高压空气通过多孔床层自下而上吹向潮湿的湿卵粒（卤虫卵）。湿卵粒从底部被托起并悬浮在气流中（即流化状态）。热量通过湿卵粒与热空气直接接触传递，汽化液体后的水分由干燥空气带走。出于节能考虑，有时会部分循环利用出口热空气。

干燥室的锥形设计确保卤虫卵在干燥过程中充分混合，从而实现均匀干燥，避免过度结块。加热单元可进一步提升干燥效率：第一温度传感器控制入口温度（某些情况下高达90℃）。随着卤虫卵逐渐干燥，蒸发量减少，干燥室温度缓慢上升。可在干燥锥内部安装第二温度传感器，防止干燥末期锥体温度超过临界值（该值因品系或批次而异，需经测试确定）。根据流化床规格和卤虫卵处理量的不同，干燥时间通常为3～5小时。

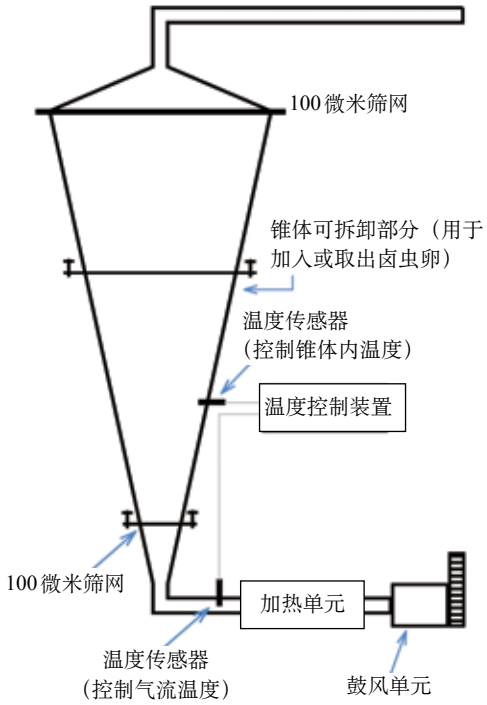


图2-31　卤虫卵流化床干燥器示意

资料来源：LAARC。

尽管露天晾晒或室内干燥等替代干燥方法成本较低，但并不推荐使用。这类干燥过程速度缓慢、均匀性差且难以标准化，尤其在相对湿度较高或波动剧烈的地区更为明显。若混合不充分，会形成卵粒结块，进而影响成品的质量。

大规模的卤虫卵加工企业，其原料来自大型盐湖或沿海盐田，通常采用多种工业干燥机（图版43），其原理均是使卤虫卵在干燥室内保持悬浮状态。

干燥后可进行气流分选，以进一步去除残留的空壳与破损卵壳。该工艺利用干燥卵粒在水平气流中的沉降速度差异：较重颗粒下落速度较快，较轻颗粒则被气流携带至较远位置。当虫卵物料通过水平气流时，下方设置的多级收集装置可分离出不同组分，依次为重型杂质（非卵物质或卵块）、完整卵粒，

以及空壳、破损卵壳和轻型杂质。

因采收批次的虫卵质量会随生产季节或年份或具体采收地点而波动，包装前会将不同批次的卵混合或筛分，以确保上市产品具有稳定的质量，并再次清除卵粒中最终残留杂质（图版44）。

（2）包装工序

罐装前通常需抽取干卵样本进行质量控制。最终产品的包装与标签需根据不同质量等级的商业要求执行。

干制卤虫卵的质量控制包括各项质量参数的测定（图版45），如孵化率、孵化效率、含水量（%）及卵径（微米）（见第3.2节）。脂质组成尤其是高不饱和脂肪酸含量也是重要的质量指标。此外，根据客户需求，特别是针对出口市场，还需进行细菌或病原载量等微生物学检测。



图版43　卤虫卵干燥设备



图版44　卤虫卵筛分组套



图版45　用显微镜观察测定孵化质量。左上角插图：用于孵化质量测定的样本显微视图

真空或充氮罐装的卤虫卵可储存数月乃至数年，其孵化率不会显著下降。但除包装条件（空气/真空/氮气）影响外，干制卵的保质期通常还取决于品系或批次特性。干燥后的卵应立即进行包装，或转移至密封容器或聚乙烯袋中，以防高吸湿性虫卵再度吸水；同时建议将卵置于10℃以下低温储存。

2.4.3　卤虫采收与加工

2.4.3.1　池塘卤虫采收

培养2 ～ 3周后，越南永州*A. franciscana*卤虫发育至成虫阶段并开始繁殖，此时出现由雌虫产的新一代卤虫幼体；当种群密度达到足够规模时，养殖户可决定采收时机。通过选用合适网目的筛网，可采集不同发育阶段的卤虫，包括青年期后期、拟成虫期及成虫期卤虫。

在大型浅水池塘中，可通过在机动船前安装锥形网或由人工拖网采收成虫卤虫。小型池塘通常使用抄网采收（图版46）。也可在池塘出水口临时设置网具，当水体通过泵送或重力作用流入下一池塘时，自动收集卤虫。网具尺寸需满足采收需求：采收100千克成虫时，应使用1米×2米的过滤口及3 ～ 6米



图版46　卤虫尼龙网采收：人工采收（a、b）或池塘出水口采收（c、d）；注意图中增氧水车（如d图箭头所示）及用于辅助卤虫富集的竹竿，后者可使卤虫集中至后方采收网中

长的滤网。网具末端需配置100微米的网目，以防止成虫堆积挤压受损。网具需每小时清空一次，因堆积在网端的卤虫仅能短暂耐受缺氧环境。鉴于卤虫富含蛋白水解酶，必须确保活体采收。

在小规模池塘中，常使用抄网或漂网（drift net）沿池边或卤虫密集区域进行部分采收。采用批次培养模式时，可采收全部卤虫；采用连续培养模式时，可部分采收。实际操作中，采收卤虫成虫时应使用网目1～2毫米的网具；若采收青年期或拟成虫阶段卤虫，则需采用500～750微米的网具。在越南，通常在正午时分进行卤虫采收，因高温条件下成虫易聚集于上风向水面区域，此举可显著提升采收效率。

越南永州地区的池塘实验表明，在整个生产季节不同的采收频率会导致卤虫总采收量不同（Anh，2009）。每3天收获一次的采收策略可在3个月的养殖周期内实现最大卤虫收获（表2-13）。在泰国，养殖户能够实现全年卤虫生产，部分养殖场产量极高（见插文8）。

表2-13　在3个月养殖期间不同采收频率下的卤虫采收总量（平均值±标准误差）

采收时间间隔	1天	3天	6天	9天
总生物量	1 323 ± 116	1 587 ± 128	1 091 ± 101	975 ± 112

资料来源：Anh，N.T.N.。2009。《越南盐田卤虫生物量生产的优化及其作为当地水产养殖饲料原料的利用》。比利时根特，根特大学。博士学位论文。ISBN 978-90-5989-308-5。250页。https://biblio.ugent.be/publication/2064659

插文8　卤虫即将成为鱼粉的经济替代品？（作者：Patrick Sorgeloos）

在泰国北柳省（Chachoengsao Province）的这家卤虫养殖场持续运营逾十五年，可能是全球最成功的卤虫共养殖范例。该场距曼谷以东约60公里，由斑节对虾养殖户Banchong Nissagavanich先生经营。两个全年运行的养殖池总面积约6 500平方米，2米的池深便于强降雨时排放淡水，雨季初期盐度保持110克/升，至雨季末期仍能维持70～80克/升。味精生产废料、果蔬加工废弃物、牛粪乃至厨余垃圾等均被用作有机肥料，每日追加施用。通过船只拖曳重型链条对池底进行隔天耙扫作业。清晨时分水体溶氧较低时，卤虫会富集于水面，此时通过桨轮将其推入采收网进行收集。单池日采收量可达100～120千克湿重卤虫，折合月产量约为4.5吨/公顷。三十余年前自美国旧金山湾引种至泰国且经过本地驯化的*A. franciscanana*卤虫品系虽已丧失产卵能力，但完全适应当地环境条件，成为稳定生产的重要基础。

活体卤虫比冷冻卤虫更具营养价值，既可用于亲本培育，也适用于多种鱼类和甲壳类动物的育苗。在高盐度环境下养殖卤虫显然能保障生物安全性，卤虫中不含对虾病原。Banchong先生多年来使用活体卤虫投喂斑节对虾亲本，从未暴发过疾病。2005年，Kongkeo和Wilkinson已在《循环水养殖与盈利模式》一文中报道过该卤虫养殖场。

Brune（2021）在《零排放水产养殖的微生物共生产物》一文中指出，与将微生物固体作为废弃污泥处理相比，在综合水产养殖过程中，通过罗非鱼或卤虫等滤食性水生生物来收集并转化这类固体废弃物为高价值副产物，是一种潜在解决方案。在对虾超集约化养殖中，卤虫共培养技术可将微生物固体转化为鱼粉替代产品，其潜在价值约为1.5美元/千克（干重）。

尽管卤虫的传统用途主要是水产养殖中的活体饵料来源，但其作为高品质食材应用于人类膳食的潜力正日益受到关注（见插文9）。

插文9　卤虫作为人类直接食物来源（作者：Nguyen Van Hoa和Patrick Sorgeloos）

1979年，在美国得克萨斯州科珀斯克里斯蒂市举行的首届国际卤虫研讨会上，我们曾发表短文《卤虫作为蛋白质来源的潜在应用》（Sorgeloos, 1980）：“除在水产育苗中广泛应用外，卤虫在其他领域同样具有应用潜力，甚至包括人类直接食用。尽管卤虫作为人类食物的可接受度看似有限，或仅局限于全球少数地区，但这一设想非常值得探索，尤其是在发展中国家。从能量转化效率来看，将卤虫直接用于生产动物蛋白，远比将卤虫作为饵料饲喂肉食性鱼类和甲壳类更为高效！”

美洲与非洲原住民部落自古至今保留着直接食用卤虫的传统：“……居住在该地区的印第安人大量采集这种甲壳动物，经干燥处理后作为食物”（Jensen, 1918）。利比亚达瓦达部落将干燥卤虫片视作“……富含β-胡萝卜素和核黄素的优质蛋白质来源”（Ghannudi和Tufail, 1978），并将这种“卤虫面包”作为营养珍馐远销各地（Oudney, 1828，转引自Bovili, 1968；Delga等, 1960；Monod, 1969）。在夏威夷开展的一项卤虫品尝测试得出结论：“……采用冷冻卤虫制作的实验性天妇罗虾获得相当积极的反馈”（Helfrich，1973；Davidson，1974）。尽管卤虫能在极高盐度的水体中繁衍生息，但强大的渗透调节能力使其体内保持着适度的半咸水盐度，因此卤虫并不因栖息环境的高盐特性而影响人类食用价值。

我们等待了三十余年，才得以宣布在越南湄公河三角洲地区成功研发并推广“卤虫煎蛋”这一创新菜肴。盐业与卤虫联产模式已成为当地极具经济效益的产业，在永州和薄寮等沿海地区产生了显著的社会经济辐射效应。根据Hoa和Sorgeloos（2015）的研究数据，超过500户盐农家庭通过卤虫卵的生产销售，在旱季每户增收逾5 000美元。尽管卤虫卵始终是主要生产目标，但近年来养殖户已开始采收并销售卤虫，以鲜活或冷冻形式作为当地水产养殖中鱼类和甲壳类的育苗、养成及亲体培育饵料。

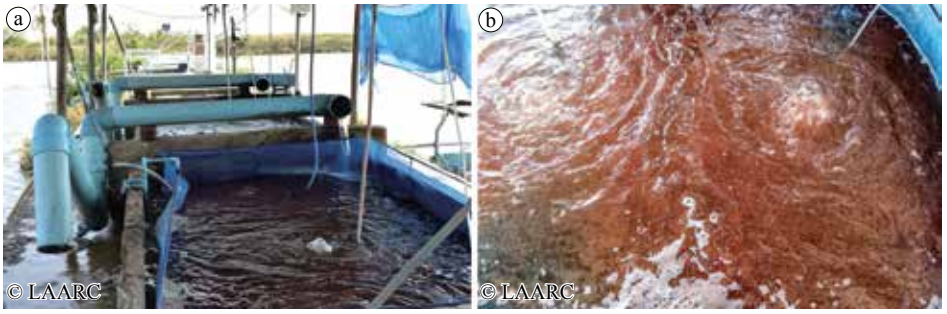
类似的卤虫项目正在亚洲多个国家（如孟加拉国、印度、老挝和缅甸）的小型盐场中建立。尽管项目实施的主要目标是通过本地化供应高质量卤虫卵和卤虫来满足当地水产养殖业的需求，但将卤虫作为社区居民直接的蛋白质来源也具有良好潜力，既可制作本文所述的卤虫煎蛋，也可部分替代当地虾饼、蟹饼或鱼饼的配方原料。



由新鲜卤虫（a）制成的“卤虫煎蛋或烤串”（b、c）

2.4.3.2 卤虫的加工

从养殖池收获的卤虫通常混有碎屑、有机残留物等杂质，需经过清洗处理后方可进入市场流通。可采用配备蛋白质分离器的循环水系统处理（图版47），或使用清洁海水通过1毫米孔径滤网彻底冲洗。后者应提供充足的水体和曝气，且卤虫须始终保持浸没状态，以避免机械损伤（图版48）。



图版47　采用循环水系统与蛋白质分离器（a）对卤虫（b）进行净化处理



图版48　利用网箱储存卤虫

经除杂处理后，将活体卤虫保存于与生产池盐度相同或更低盐度的网箱或罐体中，亦可进一步加工用于不同用途。根据实际需求可采用以下储存方式：

①短期储存卤虫（存活率＞90%），供后续用作活饵使用或冷冻/干燥处理。

将冲洗后的卤虫转移至装有海水的容器中，在强曝气条件下与冰混合冷却至5～10℃。若卤虫需在1～3小时内使用或进一步处理，可维持最高密度500克湿重/升。如需延长储存时间（最长12小时），则应将密度降至不超过300克湿重/升。

②活体运输（24小时后存活率＞90%），活体产品形式销售。采用与鱼或虾苗活体运输相似的技术方案：

——10升塑料袋中注入2～3升海水；

——按100克湿重/升的密度投放卤虫；

——根据运输时长充入空气或氧气，用橡皮筋封口；

——将包装袋置于填充冰块的聚苯乙烯泡沫箱中运输。

除活体使用外，卤虫还可进行冷冻保存（图版49和图版50），作为鱼虾育苗场或宠物市场的饵料，亦可将成虫薄层干燥后用作水产动物幼体饲料成分（虾片或颗粒饲料）。由于卤虫富含蛋白水解酶，必须在其活体状态下进行加工处理，因此需特别注意以下事项（见第2.3.2节）：



图版49　卤虫冷藏运输（泰国）



图版50　冷冻卤虫（泰国）

①冷冻过程应尽可能快速完成，最好以小于5毫米的薄层在−25℃或−30℃下冷冻。缓慢冷冻会使蛋白水解酶活性增强，并在后续使用中造成必需营养物质的流失。

②采用冷冻干燥或喷雾干燥可获得最高品质的卤虫粉。滚筒（压片）干燥或烘箱干燥亦可获得合格品质的卤虫产品。如果干燥过程过于缓慢（如日晒干燥），卤虫会因过度氧化而呈黑色，蛋白酶解活性将导致产品质量下降。

质量要求可能因目标市场而异。在越南，活体卤虫通常无需任何质量控制检测；但对于冷冻卤虫贸易，通常需提供生化成分与微生物组成等相关数据。

参考文献

Abatzopoulos, T.J., Zhang, B.O. & Sorgeloos, P. 1998. *Artemia tibetiana*: preliminary characterization of a new *Artemia* species found in Tibet (People's Republic of China). International Study on *Artemia*. LIX. *International Journal of Salt Lake Research*, p. 41–44 pp. https://doi.org/10.1007/BF02449923.

Abatzopoulos, T., El-Bermawi, N., Vasdekis, C., Baxevanis, A., & Sorgeloos, P. 2003. Effects of salinity and temperature on reproductive and life span characteristics of clonal *Artemia*. (International Study on *Artemia*. LXVI). *Hydrobiologia*, 492(1–3): 191–199. https://doi.org/10.1023/A:1024826702830.

Abreu-Grobois, F.A., Briseno-Dueñas, R., Herrera, M.A & Malagon, M.L. 1991. A model for growth of *Artemia franciscana based* on food ration-dependent gross growth efficiencies. *Hydrobiologia*, 212: 27–37. https://doi.org/10.1007/BF00025984.

Agh, N., Abatzopoulos, T.J., Kappas, I., Van Stappen, G., Razavi Rouhani, S.M. & Sorgeloos, P. 2007. Coexistence of sexual and parthenogenetic *Artemia* populations in Lake Urmia and neighbouring lagoons. I*nternational Review of Hydrobiology*, 92: 48–60. https://doi.org/10.1002/iroh.200610909.

Aladin, N.V, Chida, T., Chuikov, Y.S., Ermakhanov, Z.K., Kawabata, Y., Kubota, J., Micklin, P., Plotnikov, I.S., Smurov, A.O. & Zaitzev, V.F. 2018. The history and future of the biological resources of the Caspian and the Aral Seas. *Journal of Oceanology and Limnology*, 36(6): 2061–2084. https://doi.org/10.1007/s00343-018-8189-z.

Anh, N.T.N. 2009. *Optimisation of Artemia biomass production in salt ponds in Vietnam and use as feed ingredient in local aquaculture*. Ghent University, Ghent, Belgium. PhD dissertation. ISBN 978-90-5989-308-5, 250 pp. https://biblio.ugent.be/ publication/2064659.

Anh, N.T.N., Hoa, V.N., Van Stappen, G. & Sorgeloos, P. 2009. Effect of different supplemental feeds on proximate composition and *Artemia* biomass production in salt ponds. *Aquaculture*, 286(3): 217–225. https://users.ugent.be/~gstappen/www/pdf/ NgocAnh2009.pdf.

Anh, N.T.N., Hoa, V.N., Van Stappen, G. & Sorgeloos, P. 2010. Effect of partial harvesting strategies on *Artemia* biomass production in Vietnamese salt works. *Aquaculture Research*, 41(9). https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2010.02529.x.

Anh, N.T.N., Ut, V.N., Wille, M., Hoa, V.N. & Sorgeloos, P. 2011. Effect of different forms of *Artemia* biomass as a food source on survival, molting and growth rate of mud crab (*Scylla paramamosain*). *Aquaculture Nutrition*, 17, e549–e558. https://doi. org/10.1111/j.1365-2095.2010.00796.x.

Arashkevich, E.G., Sapozhnikov, P.V., Soloviov, K.A., Kudyshkin, T.V. & Zavialov, P.O. 2009. *Artemia parthenogenetica* (Branchiopoda: Anostraca) from the Large Aral Sea: Abundance, distribution, population structure and cyst production. *Journal of Marine Systems*, 76: 359–366.

Asem, A., Yang, C., Eimanifar, A., Hontoria, F., Varo, I., Mahmoudi, F., Fu, C.-Z.,

Shen, C.-Y., Rastegar-Pouyani, N., Wang, P.Z., Li, W., Yoa, L, Meng, X., Dan, Y.-T., Rogers, D.D. & Gajardo, G. 2023. Phylogenetic analysis of problematic Asian species of *Artemia* Leach, 1819 (Crustacea, Anostraca), with the descriptions of two new species. *Journal of Crustacean Biology*, 43: 1–25. https://doi.org/10.1093/jcbiol/ruad002.

Avnimelech, Y. 2009. *Biofloc technology*: *a practical guide book*. 3rd Edition. Baton Rouge, Louisiana, USA, The World Aquaculture Society. 182 pp.

Baert, P., Anh, T.N., do Quynh, V., Hoa, V.N. & Sorgeloos, P. 1997. Increasing cyst yields in *Artemia* culture ponds in Vietnam: The multi-cycle system. *Aquaculture Research*, 28(10): 809–814. https://doi.org/10.1046/j.1365-2109.1997.00945.x.

Baert, P., Thi, N., Anh, N., Burch, A. & Sorgeloos, P. 2002. The use of *Artemia* biomass sampling to predict cyst yields in culture ponds. *Hydrobiologia*, 477: 149–153. https:// doi.org/10.1023/A:1021025402584.

Belovsky, G.E. & Perschon, W.C. 2019. A management case study for a new commercial fishery: Brine shrimp harvesting in Great Salt Lake, Utah, USA. *Ecol Appl*, 29(3): e01864. https://doi.org/10.1002/eap.1864.

Bengtson, D., Léger, P. & Sorgeloos, P. 1991 Use of *Artemia* as a food source for aquaculture. In: R.A. Browne, P. Sorgeloos & C.N.A. Trotman C.N.A., eds. *Artemia Biology*, pp. 255–285. Boca Raton, FL, USA, CRC Press. https://www.researchgate.net/profile/Patrick-

orgeloos/publication/36454771_Use_of_Artemia_as_a_food_source_ for_aquaculture/links/5bc6e559299bf17a1c561746/Use-of-Artemia-as-a-food-source- for-aquaculture.pdf.

Bovili, E.W. 1968. *The Niger explored*. London, UK, Oxford University Press. 263 pp.

Bradley, H.L. & Venkatesh Mannar, M.G. 1984. *Guidelines for the establishment of solar facilities from seawater, underground brines and salted lakes*. UNIDO/IS.330/REV.1. https://downloads.unido.org/ot/47/93/4793176/10001-15000_12271.pdf.

Brisset, P.J., Versichele, D., Bossuyt, E., De Ruyck, L. & Sorgeloos, P. 1982. High density flow-through culturing of brine shrimp *Artemia* on inert feeds - Preliminary results with a modified culture system. *Aquacultural Engineering*, 1(2): 115–119. https://doi. org/10.1016/0144-8609(82)90003-6.

Brune, D.E. 2021. Microbially derived co-products from zero-discharge aquaculture**.** *Current Biochemical Engineering*, 7(1): 38-47. doi: 10.2174/2212711907666210629111129.

Camara, M.R. 2001. Dispersal of *Artemia franciscana* Kellogg (Crustacea; Anostraca) populations in the coastal saltworks of Rio Grande do Norte, northeastern Brazil. *Hydrobiologia*, 466: 145-148. https://doi.org/10.1023/A:1014575001333.

Camara, M.R. 2020. After the gold rush: A review of *Artemia* cyst production in northeastern Brazil. *Aquaculture Reports*, 17: 100359. https://doi.org/10.1016/j. aqrep.2020.100359.

Choi, J., Han, G.S., Lee, K.W., Byun, S.G., Lim, H.J., Lee, C.H., Lee, D.Y. & Kim, H.S. 2021. Effects of feeding differentially enriched *Artemia* nauplii on the survival, growth, fatty acid composition, and air exposure stress response of Pacific cod (*Gadus macrocephalus*) larvae. *Aquaculture Reports*, 21: 100829. https://doi.org/10.1016/j. aqrep.2021.100829.

Clegg, J.S., Jackson, S.A., Hoa, V.N. & Sorgeloos, P. 2000. Thermal resistance, developmental rate and heat shock proteins in *Artemia franciscana*, from San Francisco Bay and southern Vietnam. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 252(1): 85–96. https://doi.org/10.1016/S0022-0981(00)00239-2.

Dan, S., Yamashita, K., Matsunari, H., Nagakura, K. & Hamasaki, K. 2022. Capability of *Artemia* to digest *Chlorella vulgaris* and *Nannochloropsis oculata* under stagnant culture conditions. *Aquaculture Research*, 53(12): 4316–4326. https://doi.org/10.1111/ are.15929.

Dana, G.L. & Lenz, P.H. 1986. Effects of increasing salinity on an *Artemia* population from Mono Lake, California. *Oecologia*, 68: 428–436. https://doi.org/10.1007/BF01036751.

Davidson, J. R. 1974. *A new industry – And perhaps a new protein source*. *Sea Grant Technical Report*. UNIHI Seagrant-MR-74-02. 3 pp.

Davis, J.S. 2000. Structure, function and management of the biological system for seasonal solar saltworks. *Global NEST Journal*, 2(3): 217–226. https://doi.org/10.30955/ gnj.000175.

Davis, J.S. 2009. Management of biological systems for continuously operated solar saltworks. *Global NEST Journal*, 11(1): 73–78. https://doi.org/10.30955/gnj.000569.

De la Cruz, C.R. 1983. *Fishpond engineering*: *A technical manual for small- and medium-scale coastal fish farms in Southeast Asia*. SCS Manual No. 5. https://www.fao.org/3/ e7171e/e7171e00.htm.

Delga, J., Meunier, J.L., Pallaget, C. & Carious, J. 1960. Les mangeurs de vers. *Annls Falsif Expert. Chim*., 617.

De Schryver, P., Crab, R., Defoirdt, T., Boon, N. & Verstraete, W. 2008. The basics of bio-flocs technology: The added value for aquaculture. *Aquaculture*, 277(3–4): 125–137. https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2008.02.019.

De Schryver, P., Boon, N., Verstraete, W., Bossier, P. & Avnimelech, Y. 2012a. The biology and biotechnology behind biofloccs. In: Y. Avnimelech, P. De Schryver, M. Emerenciano, D. Kuhn, A. Ray & N. Taw, eds. *Biofloc technology*: *a practical guide book*, 199–215. 2nd Edition. Boca Raton, FL, USA, The World Aquaculture Society.

De Schryver, P., Defoirdt, T., Boon, N., Verstraete, W. & Bossier, P. 2012b. Managing the microbiota in aquaculture systems for disease prevention and control. Infectious disease in aquaculture: Prevention and control. *Woodhead Publishing Series in Food Science*, *Technology and Nutrition*, 231: 394–418. https://biblio.ugent.be/publication/2957243.

Dhert, P., Bombeo, R.B., Lavens, P. & Sorgeloos, P. 1992. A simple semi flow-through culture technique for the controlled super-intensive production of *Artemia* juveniles and adults. *Aquacultural Engineering*, 11: 107–119. https://doi.org/10.1016/0144- 8609(92)90013-N.

Dhont, J., Lavens, P. & Sorgeloos, P. 1993. Preparation and use of *Artemia* as food for shrimp and prawn larvae. In: J.V. Mc Vey, ed. *CRC handbook of mariculture*, pp. 61-93. 2nd Edition. *Vol 1. Crustacean culture*. Boca Raton, Florida, USA, CRC Press, Inc.

Dhont, J. & Lavens, P. 1996. Tank production and use of ongrown *Artemia*. In: P. Lavens & P. Sorgeloos, eds. *Manual on the production and use of live food for aquaculture*, pp. 164-195. FAO Fisheries Technical Paper 361.

Dhont, J. & Sorgeloos, P. 2002. Applications of *Artemia*. In: T.J. Abatzopoulos, J.A. Beardmore, J.S. Clegg & P. Sorgeloos, eds. *Artemia*: *Basic and Applied Biology*. *Biology of Aquatic Organisms*, 1. Springer Link, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017- 0791-6_6.

FAO. 2017. *Doing aquaculture as a business for small- and medium-scale farmers*. *Practical training manual. Module 1*: *The technical dimension of commercial aquaculture*. Rome. https://www.fao.org/fishery/en/publications/6469.

Gajardo, G.M. & Beardmore, J.A. 2012. The brine shrimp *Artemia*: Adapted to critical life conditions. *Frontiers in Physiology*, 3: 185. https://doi.org/10.3389/fphys.2012.00185.

Gao, M., Wang, J., Ma, G., Van Stappen, G. & Sui, L. 2015. Carbon supplementation and microbial management to stimulate *Artemia* biomass production in hypersaline culture conditions. *Aquaculture Research*, 48(3): 1240–1250. https://doi.org/10.1111/are.12965.

Geider, R. & La Roche, J. 2002. European Journal of Phycology Redfield revisited: variability of C:N:P in marine microalgae and its biochemical basis. *European Journal of Phycology*, 37(1): 1–17. https://doi.org/10.1017/S0967026201003456.

Ghannudi, S.A. & Tufail, M. 1978. A report on a two-day visit to eight salt-water lakes of Ramla Az-Zaliaf, Fezzan. Libyan Arab Jamahiriya. *Libyan Journal of Science*, 8(A): 69-74.

Goodman, M.M., Carling, G.T., Fernandez, D.P., Rey, K.A., Hale, C.A., Bickmore, B.R.,

Nelson, S.T. & Munroe, J.S. 2019. Trace element chemistry of atmospheric deposition along the Wasatch Front (Utah, USA) reflects regional playa dust and local urban aerosols. *Chemical Geology*, 530. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.119317.

Hargreaves, J.A. 2013. *Biofloc production systems for aquaculture Southern Regional Aquaculture Center*. SRAC publication No. 4503. https://aquaculture.ca.uky.edu/sites/ aquaculture.ca.uky.edu/files/srac_4503_biofloc_production_systems_for_aquaculture.pdf.

Helfrich, P. 1973. *The feasibility of brine shrimp production on Christmas Island*. Sea Grant Technical Report UNIHI-Seagrant-TR-73-02. 173 pp.

Herbst, D.B. 2006. Salinity controls on trophic interactions among invertebrates and algae of solar evaporation ponds in the Mojave Desert and relation to shorebird foraging and selenium risk. *Wetlands*, 26(2): 475–485. https://doi.org/10.1672/0277- 5212(2006)26[475:SCOTIA]2.0.CO;2.

Hoa, V.N. 2002 *Seasonal farming of the brine shrimp Artemia franciscana in artisanal salt ponds in Viet Nam*: *effects of temperature and salinity*. Ghent University, Ghent, Belgium. PhD dissertation. 184 pp.

Hoa, V.N., Anh Thu, T., Thi Ngoc Anh, N. & Thanh Toi, H. 2011. *Artemia franciscana* Kellogg, 1906 (Crustacea: Anostraca) production in earthen pond: improved culture techniques. *International Journal of Artemia Biology*, 1: 13–28 https://scholar.google. com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=q-Ww5RYAAAAJ&citation_for_ view=q-Ww5RYAAAAJ:WF5omc3nYNoC.

Hoa, V.N., Le, T.H., Hong Van, N.T., Sorgeloos, P. & Van Stappen, G. 2013. New approaches for *Artemia* pond culture. *Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences*, 78(4): 320-323. https://www.researchgate.net/publication/264990056.

Hoa, V.N. 2014. *Artemia* production in southern Vietnam: geographical, soil structure, climatic and culture technique updating. *International Journal of Artemia Biology*, 4: 30–37. https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=q- Ww5RYAAAAJ&citation_for_view=q-Ww5RYAAAAJ:vV6vV6tmYwMC.

Hoa, V.N. & Sorgeloos, P. 2015. Integrated salt and brine shrimp *Artemia* production in artisanal salt works in the Mekong Delta in Viet Nam: a socio-economic success story as model for other regions in the world. In: S. Lauret, ed. *Proceedings of the International Conference on Solar Salt Works and the Economic Value of Biodiversity*, pp. 137-144. European Union Salt, Brussels. 245 pp. https://users.ugent.be/~psorgelo/ GIZreportMissionUzbekistanMay2021/Doc2.pdf.

Hoa, V.N., Phuong, T.V., Hai, T.N., Tao, C.T., Viet, L.Q., Van, N.T.N., Toi, H.T., Le, T.H., Son, V.N. & Duy, P.Q.A. 2017. Applied biofloc technology for target species in the Mekong Delta in Vietnam: A review. *Journal of Environmental Science and Engineering B*, 6(4). https://doi.org/10.17265/2162-5263/2017.04.001.

Hoa, V.N. & Van, N.T.H 2019. *Principle of Artemia culture in solar saltworks*. N.V. Hoa & P.K.H. Lam, eds. Ho Chi Minh City, Viet Nam, Agriculture Publishing House. ISBN 978-604-60-2946-5. 219 pp.

Hoa, V.N. & Nam, T.N.H. 2019. *Application of bio-floc technology for culture of Artemia*. N.V.

Hoa, H.T. Hieu, N.A. Khoa & D.T.T. Uyen, eds**.** Ho Chi Minh City, Viet Nam, Agriculture Publishing House. ISBN 978-604-60-2981-6. 163 pp.

Hoa, V.N. & Nhi, D.T. 2020. Determination of an appropriate ratio of N:P for optimisation of algal development in fertilizer ponds. *International Journal of the Bioflux Society*. www.bioflux.com.ro/aacl.

Hoa, V.N. & Le, T.H. 2021. *Determination of appropriate fertilisation frequencies for optimising wild algae development*. Department of Coastal Aquaculture, College of Aquaculture and Fisheries, Cantho University, Cantho, Vietnam. www.bioflux.com.ro/ docs/2021.1009-1020.pdf.

Internet Resources of Federal Agency for Fishery. In Russian. https://fish.gov.ru/ otraslevaya-deyatelnost/ekonomika-otrasli/statistika-i-analitika.

Islam, M.S., Kibria, M.M. & Bhuyan, S. 2019. Production of *Artemia* biomass in indoor culture tank in Bangladesh. *Journal of scientific research*, 11(1): 101–110. https://doi. org/10.3329/jsr.v11i1.36467.

Jensen, A.C. 1918. Some observations on *Artemia gracilis*: The brine shrimp of Great Salt Lake. *Biol. Bull*., 34(1): 18-28.

Jumalon Ogburn, N., Duan,L., Subashchandrabose, S.R., Sorgeloos, P., O'Connor, W., Megharaj, M. & Naidu, R. 2022. Agricultural wastes for brine shrimp *Artemia* production: A Review. *Reviews in Aquaculture*, DOI: 10.1111/raq.12784.

Jing-Yan, L., Li-Hua, Z. & Zhen-Hui, R. 2021. The application of spectroscopy technology in the monitoring of microalgae cells concentration. *Applied Spectroscopy Reviews*, 56:3: 171-192. https://doi.org/10.1080/05704928.2020.1763380.

Kappas, I., Abatzopoulos, T.J., Hoa, N.V., Sorgeloos, P. & Beardmore, J.A. 2004. Genetic and reproductive differentiation of *Artemia franciscana* in a new environment. *Marine Biology*, 146(1): 103–117. https://doi.org/10.1007/s00227-004-1420-9.

Khoi, C.M., Guong, V.T. & Merckx, R. 2006a. Growth of the diatom *Chaetoceros calcitrans* in sediment extracts from *Artemia franciscana* ponds at different concentrations of nitrogen and phosphorus. *Aquaculture*, 259 (1–4): 354–364. https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2006.05.050.

Khoi, C.M., Guong, V.T. & Merckx, R. 2006b. Predicting the release of mineral nitrogen from hypersaline pond sediments used for brine shrimp *Artemia franciscana* production in the Mekong Delta. *Aquaculture*, 257(1–4): 221–231. https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2006.02.075.

Kongkeo, H. & Wilkinson, S. 2005. Recycling water and making money. *Aquaculture Asia*, 10(3): 18.

Kuehn, D. 2002. The brine shrimp industry in Utah. In: W.A. Gwynn, ed. *Great Salt Lake*: *An overview of change*, pp. 259–264. DNR Special Publication. Utah Department of Natural Resources, Utah Geological Survey, Salt Lake City, USA.

Kumar, D. 1992. *Fish culture in undrainable ponds*: *a manual for extension*. FAO Fisheries Technical Paper No. 325. Rome, FAO. 239 pp. https://www.fao.org/3/T0555E/ T0555E00.htm.

Lavens, P. & Sorgeloos, P. 1984. Controlled production of *Artemia* cysts under standard conditions in a recirculating culture system. *Aquacultural Engineering*, 3(3): 221–235. https://doi.org/10.1016/0144-8609(84)90016-5.

Lavens, P., Baert, P., De Meulemeester, A., Van Ballaer, E. & Sorgeloos, P. 1986. New developments in the high-density flow-through culturing of brine shrimp *Artemia*. *Journal of the World Mariculture Society*, 16: 498-508. https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.1985. tb00228.x.

Lavens, P. & Sorgeloos, P. 1987a. Design, operation, and potential of a culture system for the continuous production of *Artemia* nauplii: In: P. Sorgeloos, D.A. Bengtson, W. Decleir & E. Jaspers, eds. *Artemia Research and its Applications*, pp. 339–345. *Vol. 3. Ecology*, *culturing*, *use in aquaculture*. Wetteren, Belgium, Universa Press. 556 pp.

Lavens, P. & Sorgeloos, P. 1987b. The cryptobiotic state of *Artemia* cysts, its diapause deactivation and hatching: a review. In: P. Sorgeloos, D.A. Bengtson, W. Decleir & E. Jaspers, eds. *Artemia Research and Its Applications*. *Vol. 3. Ecology*, *culturing*, *use in aquaculture*. Wetteren, Belgium, Universa Press. 556 pp.

Lavens, P. & Sorgeloos, P. 1991. Chapter XIII: Production of *Artemia* in culture tanks. In: R.A. Browne, P. Sorgeloos & C.N.A. Trotman, eds. *Artemia Biology*, pp. 317–350. Boca Raton, Florida, USA, CRC Press, Inc.

Lavens, P. & Sorgeloos, P. 2000. The history, present status and prospects of the availability of *Artemia* cysts for aquaculture. *Aquaculture*, 181(3–4): 397–403. https:// doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00233-1.

Le, T.H., Hoa, V.N., Sorgeloos, P. & Van Stappen, G. 2019. Artemia *feeds*: *A review of brine shrimp production in the Mekong Delta*, *Vietnam*. Wiley-Blackwell. https://doi. org/10.1111/raq.12285.

Liang, X., Zhang, C., Du, D., Gao, M. & Sui, L. 2022. Application of biofloc technology in recirculation *Artemia* culture system. *Journal of Oceanology and Limnology*. https:// doi.org/10.1007/s00343-021-1135-5.

Litvinenko, L.I., Litvinenko, A.I., Boiko, E.G. & Kutsanov, K. 2015. *Artemia* cyst production in Russia. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 33(6): 1436–1450. https://doi.org/10.1007/s00343-015-4381-6.

Litvinenko, L.I., Litvinenko, A.I. & Boiko, E.G. 2016. *Brine shrimp* Artemia *in Western Siberian lakes*. Novosibirsk: Nauka. 295 pp. (in Russian).

Litvinenko, L.I., Boyko, E.G., Kutsanov, K.V., Gerasimov, A.G., Razova, L.F., Pobedintseva, M.A. & Litvinenko, A.I. 2018. On the identification of the population belonging to *Artemia* of reservoirs of Russia by cysts. *Bulletin of Fisheries Science*, Part 5: 1(1–17): 4–25. (in Russian).

Litvinenko, L.I., Bizikov, V.A., Kovacheva, N.P., Saenko, E.M., Vesnina, L.V., Kutsanov, K.V., Semik, A.M. & Parshin-Chudin, A.V. 2019. *Methodological recommendations for assessing the stock and forecasting the recommended volume of production (catch) of Artemia*. Moscow, Russian Federation, VNIRO Publishing House. 50 pp. (in Russian) www.vniro.ru/files/publish/bizikov_artemii.pdf.

Liu, X.C., Deng, H.G., Yu, X.Q., Zhu Y.G., Wang, P.F. & Sui, L.Y. 2022. Effects of different *Artemia* strains on growth and stress resistance of hybrid grouper juveniles. *Journal of Tianjin University of Science and Technology*, 37(2): 18–23. (in Chinese with English abstract).

Loving, B.L., Waddell, K.M. & Miller, C.W. 2000. *Water and salt balance of Great Salt Lake, Utah, and simulation of water and salt movement through the causeway, 1987–98*. Water-Resources Investigations Report, 2000–4221. USGS. https://doi.org/10.3133/ wri004221.

Luo, G.Z., Yao, M.L., Tan, H.X. & Wu, W.H. 2017. The performance of microbial flocs produced with aquaculture waste as food for *Artemia*. *Aquaculture Nutrition*, 23: 1440–1448. https://doi.org/10.1111/anu.12519.

Marden, B., Brown, P. & Bosteels, T. 2020. Great Salt Lake *Artemia*: ecosystem functions and services with a global reach. In: B. Baxter & J. Butler, eds. *Great Salt Lake Biology*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-40352-2_7.

Marden, B., Van Stappen, G., Musaev, A., Mirabdullayev, I., Joldasova, I. & Sorgeloos, P. 2012. Assessment of the production potential of an emerging *Artemia* population in the Aral Sea, Uzbekistan. *Journal of Marine Systems*, 92(1): 42–52. https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2011.10.004. https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2011.10.004.

McGee, M.V. & Cichra, C. 2000. *Principles of water recirculation and filtration in aquaculture*. Gainesville, Florida, University of Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agriculture Sciences. EDIS. https://www.yumpu. com/en/document/view/25773021/principles-of-water-recirculation-and-filtration-in- aquaculture-edis.

Mirabdullayev, I.M., Joldasova, I.M., Mustafaeva, Z.A., Kazakhbaev, S., Lyubimova, S.A. & Tashmukhamedov, B.A. 2004. Succession of the ecosystems of the Aral Sea during its transition from oligohaline to polyhaline water body. *Journal of Marine Systems*, 47(1–4): 101–107. https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2003.12.012.

Monod, T. 1969. A propos du Lac des Vers ou Bahr ed-Dud. Bull. Inst, Fondam. *Afr. noire (A)*, 31(1): 25-41.

Naftz, D. 2017. Inputs and internal cycling of nitrogen to a causeway influenced, hypersaline lake, Great Salt Lake, Utah, USA. *Aquatic Geochemistry*, 23(3): 199–216. https://doi.org/10.1007/s10498-017-9318-6.

Nguyen, P.V., Huang, C.T., Truong, K.H. & Hsiao, Y.J. 2019 Profitability improvement for brine shrimp *Artemia franciscana* commercial farming in coastal saltworks in the Mekong Delta, Vietnam: A bioeconomic analysis. *Journal of the World Aquaculture Society*, 51: 896-917. https://doi.org/10.1111/jwas.12667.

Null, S. & Wurtsbaugh, W. 2020. Water development, consumptive water uses, and Great Salt Lake. In: B. Baxter & J. Butler, eds. *Great Salt Lake Biology*. Springer. Cham. https:// doi.org/10.1007/978-3-030-40352-2_1.

Oudney, W. 1828. Excursion to the westward of Mourzuk in June, July and August 1828. In: D. Denham, H. Clapperton & W. Oudney, eds. *Narrative of travels and discoveries in North and Central Africa*, pp. 64-111. Reprinted by Hakluyt Soc., 1966. London, UK, Cambridge

University Press.

Quynh, V.D. & Ngoc Lam, N. 1987. Inoculation of *Artemia* in experimental ponds in central Vietnam: An ecology approach and a comparison of three geographical strains. In: P. Sorgeloos, D.A. Bengtson, W. Decleir & E. Jaspers, eds. *Artemia Research and its Applications*, 3: 253-269. Wetteren, Belgium, Universa Press.

Rasdi, N.W. & Qin, J.G. 2015. Effect of N:P ratio on growth and chemical composition of *Nannochloropsis oculata* and *Tisochrysis lutea*. *Journal of Applied Phycology*, 27(6): 2221–2230. https://doi.org/10.1007/s10811-014-0495-z.

Ricker, W.E. 1954. Stock and recruitment. *J Fish Res Board Can*, 11: 559–623.

Ronald, L., Van Stappen, G., Hoa, N.V. & Sorgeloos, P. 2013. Effect of carbon/nitrogen ratio manipulation in feed supplements on *Artemia* production and water quality in solar salt ponds in the Mekong Delta, Vietnam. *Aquaculture Research*, 45(12): 1906–1912. https://doi.org/10.1111/are.12135.

Rothuis, A. 1987. *First report on the activities on the culture of Artemia salina and Macrobrachium rosenbergii in Can Tho and Vinh Chau in southern Vietnam*. Dutch Committee for Science and Technology (KWT) and Institute of Agricultural Engineering, Wageningen, Netherlands.

Shadrin, N. & Anufriieva, E. 2012. Review of the biogeography of *Artemia* Leach, 1819 (Crustacea: Anostraca) in Russia. *International Journal of Artemia Biology*, 2(1): 51–61. ISSN: 2228-754X. https://www.researchgate.net/publication/235683971_Review_of_the_biogeography_of_Artemia_Leach_1819_Crustacea_Anostraca_inRussia.

Skiles, S.M., Mallia, D.V., Hallar, A.G., Lin, J.C., Lambert, A., Petersen, R. & Clark, S. 2018. Implications of a shrinking Great Salt Lake for dust on snow deposition in the Wasatch Mountains, UT, as informed by a source to sink case study from the 13–14 April 2017 dust event. *Environmental Research Letters*, 13(12). https://iopscience.iop.org/ article/10.1088/1748-9326/aaefd8.

Sneyers, G. & Ingawa, S.A. 2005. *Fishpond construction and management (a field guide and extension manual)*. Technological information materials from NSPFS rural aquaculture training shops in Nigeria. AK506E. https://www.fao.org/publications/card/ en/c/b042ce2c-4c58-500f-aab0-bb0b48638980.

Solovchenko, A., Lukyanov, A., Vasilieva, S. & Lobakova, E. 2022. Chlorophyll fluorescence as a valuable multitool for microalgal biotechnology. *Biophysical Reviews*, 1: 3. https://doi.org/10.1007/s12551-022-00951-9.

Son, N.P. 2010. *Socio-economic efficiency and development potential of* Artemia *production on salt-based area in the Mekong Delta*, *Vietnam*. University of Antwerp, Belgium. (PhD dissertation).

Sorgeloos, P. 1980. The use of the brine shrimp *Artemia* in aquaculture. Pages 25–46 in G. Persoone, P. Sorgeloos, O. Roels & E. Jaspers, eds. *The Brine Shrimp Artemia. Vol. 3. Ecology, Culturing. Use in Aquaculture*, pp. 25–46. Universa Press, Wetteren. Belgium.

Stephens, D.W. & Birdsey P.W. 2002. Population dynamics of the brine shrimp, *Artemia*

franciscana, Great Salt Lake, and regulation of commercial shrimp harvest. In: J. W. Gwynn, ed. *Great Salt Lake*: *A scientific*, *historical and economic overview*, pp. 327–336. Utah Geological and Mineral Survey, Salt Lake City, USA.

Sturm, P.A., Sanders, G.C. & Allen, K.A. 1980.The brine shrimp industry on the Great Salt Lake. In: J.W. Gwynn, ed. *Great Salt Lake*: *A scientific*, *historical and economic overview*, pp. 243–248. Utah Geological and Mineral Survey, Salt Lake City, USA.

Sui, L.Y., Wang, J., Hoa, N.V., Sorgeloos, P., Bossier, P. & Van Stappen, G. 2013. Increased carbon and nitrogen supplementation in *Artemia* culture ponds results in higher cyst yields. *Aquaculture International*, 21: 1343–1354. https://doi.org/10.1007/ s10499-013-9637-6.

Takahashi, T. 2019. *Molecules routine management of microalgae using autofluorescence from chlorophyll*. Department of Chemical Science and Engineering, National Institute of Technology (KOSEN) Miyakonojo College, Japan. https://doi.org/10.3390/ molecules24244441.

Tobias, W.L., Sorgeloos, P., Roels, O.A. & Sharfstein, B.A. 1980. International study on *Artemia*. XIII. A comparison of production data of 17 geographical strains of *Artemia* in the St. Croix artificial upwelling mariculture system. In: G. Persoone, P. Sorgeloos, O. Roels & E. Jaspers, eds. *The brine Shrimp Artemia*, pp. 384–392. *Vol. 3. Ecology*, *culturing*, *use in aquaculture*. Wetteren, Belgium, Universa Press.

Toi, H.T., Boeckx, P., Sorgeloos, P., Bossier, P. & Van Stappen, G. 2013. Bacteria contribute to *Artemia* nutrition in algae-limited conditions: A laboratory study. *Aquaculture*, 388– 391(1): 1–7. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.01.005.

Toi, H.T., Boeckx, P., Sorgeloos, P., Bossier, P. & Van Stappen, G. 2014. Co-feeding of microalgae and bacteria may result in increased N assimilation in *Artemia* as compared to mono-diets, as demonstrated by a 15N isotope uptake laboratory study. *Aquaculture*, 422–423: 109–114. https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2013.12.005.

Triantaphyllidis, G.V., Zhang, B., Zhu, L. & Sorgeloos, P. 1994. International study on *Artemia*. L. Review of the literature on *Artemia* from salt lakes in the People's Republic of China. *International Journal of Salt Lake Research*, 3: 1–12. https://doi.org/10.1007/ BF01990645.

Triantaphyllidis, G.V., Poulopoulou, K., Abatzopoulos, T.J., Pinto Pérez, C.A., & Sorgeloos, P. 1995. International study on *Artemia*, XLIX: Salinity effects on survival, maturity, growth, biometrics, reproductive and lifespan characteristics of a bisexual and a parthenogenetic population of *Artemia*. *Hydrobiologia*, 302(3): 215–227. https://doi. org/10.1007/BF00032111.

Triantaphyllidis G.V., Abatzopoulos, T.J. & Sorgeloos, P. 1998. Review of the biogeography of the genus *Artemia* (Crustacea, Anostraca). *Journal of Biogeography*, 25: 213–226. https://doi. org/10.1046/j.1365-2699.1998.252190.x.

Vahdat, S. & Oroujlou, M. 2021. Use of agriculture by-products (brans and meal) as food for *Artemia franciscana* (Kellogg, 1906) and effects on performance and biochemical compositions. *Survey in Fisheries Sciences*, 7(3): 23–40. https://doi.org/10.18331/ SFS2021.7.3.3.

Vanhaecke, P., Siddall, S.E. & Sorgeloos, P. 1984. International study on *Artemia*. XXXII. Combined effects of temperature and salinity on the survival of *Artemia* of various geographical

origin. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 80(3): 259–275.https://doi.org/10.1016/0022-0981(84)90154-0.

Vanhaecke, P. & Sorgeloos, P. 1989. International study on *Artemia*. XLVII. The effect of temperature on cyst hatching, larval survival and biomass production for different geographical strains of brine shrimp *Artemia* spp. *Annales de la Société Royale Zoologique de Belgique*, 119(1): 7–23.

Van Stappen, G., Fayazi, G. & Sorgeloos, P. 2001. International study on *Artemia*. LXIII. Field study of *Artemia urmiana* (Günther, 1890) population in Lake Urmiah, Iran. *Hydrobiologia*, 466: 133-143. https://doi.org/10.1023/A:1014510730467.

Van Stappen, G. 2002. Zoogeography. In: T.J. Abatzopoulos, J.A. Beardmore, J.S. Clegg & P. Sorgeloos, eds. *Artemia*: Basic and Applied Biology. *Biology of Aquatic Organisms*, Vol. 1. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-0791-6_4.

Van Stappen, G., Litvinenko, L.I., Litvinenko, A.I., Boyko, E.G., Marden, B. & Sorgeloos, P. 2009. A survey of *Artemia* resources of Southwest Siberia (Russian Federation). *Reviews in Fisheries Science*, 17(1): 117–148. https://doi.org/10.1080/10641260802590095.

Van Stappen, G., Sui, L., Hoa, V.N., Tamtin, M., Nyonje, B., de Medeiros Rocha, R., Sorgeloos, P. & Gajardo, G. 2019. Review on integrated production of the brine shrimp *Artemia* in solar salt ponds. *Reviews in Aquaculture*, 12(2): 1054-1071. https://doi. org/10.1111/raq.12371.

Vinh, P., Huang, C.T., Truong, K.H. & Hsiao, Y.J. 2019. Profitability improvement for brine shrimp *Artemia franciscana* commercial farming in coastal saltworks in the Mekong Delta, Vietnam: A bioeconomic analysis. *Journal of the World Aquaculture Society*, 51(4): 896–917. https://doi.org/10.1111/jwas.12667.

Wainberg, A.A., Ribeiro, F.A.S., Ribeiro, K. & Camara, M.R. 2011. Aquaculture in Rio Grande do Norte, NE-Brazil: Past, present and future. *J World Aquaculture*, 42(1): 21–25. https://www.researchgate.net/publication/268179058_Review_of_the_biogeography_ of_Artemia_Leach_1819_Crustacea_Anostraca_in_Brazil.

Wang, W., Luo, Q. Guo, H., Bossier, P., Van Stappen, G., Sorgeloos, P., Xin, N., Sun, Q., Hu, S. & Yu, J. 2008. Phylogenetic analysis of brine shrimp (*Artemia*) in China using DNA barcoding. *Genomics*, *Proteomics G Bioinformatics*, 6(3-4): 155–162. https://doi. org/10.1016/S1672-0229(09)60003-6.

Wurtsbaugh, W.A. & Berry, T.S. 1990. Cascading effects of decreased salinity on the plankton, chemistry, and physics of the Great Salt Lake (Utah). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 47(1): 100–109. https://doi.org/10.1139/f90-010.

Xin, N., Sun, J., Zhang, B., Triantaphyllidis, G.V., Van Stappen, G. & Sorgeloos, P. 1994. International study on *Artemia*. LI. New survey of *Artemia* resources in the People's Republic of China. *International Journal of Salt Lake Research*, 3: 105–112. https://users. ugent.be/~gstappen/WWW/pdf/Xin1994.pdf.

Xing, M.W., Deng, H.G., Gao, M.R., Xie, Y.S., Cui, Z.A. & Sui, L.Y. 2022. Effects of

Artemia nauplii from different origins on growth, muscle composition and stress resistance of *Litopenaeus vannamei* postlarvae. *Journal of Fishery Sciences of China*, 29(1): 70–78. (in Chinese with English abstract).

Yao, M., Luo, G., Tan, H., Fan, L. & Meng, H. 2018. Performance of feeding *Artemia* with bioflocs derived from two types of fish solid waste. *Aquaculture and Fisheries*, 3(6): 246-253. https://doi.org/10.1016/j.aaf.2018.07.002.

Zheng, M. 1997. *An introduction to saline lakes on the Qinghai-Tibet plateau*. Dordrecht, the Netherlands, Kluwer Academic Publishers. 294 pp.

Zheng, B. & Sun, S.C. 2013. Review of the biogeography of *Artemia* Leach, 1819 (Crustacea: Anostraca) in China. *International Journal of Artemia Biology*, 3(1): 20–50. ISSN:2228-754X.

3　卤虫卵、无节幼体及后无节幼体的应用

（作者：Gilbert Van Stappen、Geert Rombaut和Patrick Sorgeloos）

市场上销售的卤虫卵品牌众多，其质量标准各异，其中孵化质量、卵径（或无节幼体生物量）及营养成分（尤其是高不饱和脂肪酸含量）最为关键。育苗场日常使用操作（包括无节幼体收集便捷性和微生物控制等）也直接影响产品质量。

卤虫卵孵化后，通常以两种形式投喂水产动物幼苗：一种是初孵的Ⅰ期无节幼体阶段；另一种是经过营养强化后营养价值提升的Ⅱ期后无节幼体阶段（根据强化方法不同，卤虫也可能处于后续龄期阶段）。具体选择使用初孵卤虫或强化卤虫取决于具体应用场景，即所用卤虫品系与所投喂幼苗的种类及发育阶段的匹配关系。作为生物饵料，卤虫也可以脱壳卵（通过化学处理去除外层卵壳）或伞状幼体形式投喂，但与无节幼体的广泛实用性相比，前者的使用仅限于特定场景。

本章将阐述卤虫的规范化使用方法。相关研发工作仍在持续推进，以巩固、拓展和丰富卤虫在水产养殖中的应用知识，充分发挥其效能，为使用者提供最大便利。本章还将介绍针对卤虫卵、无节幼体及后无节幼体的自动化与合理化日常操作流程的最新见解与实践经验。

3.1　育苗场中卤虫卵产品的正确使用条件与设备优化

3.1.1　生物安全

“生物安全”通常指为最大限度减少（甚至完全杜绝）传染性病原体侵入群体并扩散而采取的一整套规程与措施。随着近几十年水产养殖产业的发展，生物安全在整个水产动物生产链（尤其是育苗阶段）中具有极其重要的意义。

本章重点描述的卤虫卵、无节幼体及后无节幼体的获得与应用，仅是鱼虾类育苗场全流程作业中的一个环节。从生物安全角度而言，必须强调将卤虫

使用规范纳入整个育苗场标准化操作框架中统筹考量。换言之，若脱离育苗场整体生物安全规范体系，仅实施卤虫的生物安全措施将无法实现其保障育苗场生物安全的终极目标。第3.1.1节将系统阐述育苗场的组织架构与运营中生物安全的基本原则及实施措施。

3.1.1.1　生物安全理念

生物安全是通过风险管控降低胁迫因子发生概率、促进水产养殖可持续发展的重要策略，是指在水产养殖各环节（包括育苗、仔虾/稚鱼培育和养成）采取的措施和方法，通过降低病原体从养殖单元内/外的引入、定殖和传播的风险，确保无病生产环境。商业化育苗场实施生物安全措施的先决条件是获取优质幼体、确保虾类和鱼类养殖业可持续盈利发展（粮农组织，2003，2007），要求从业人员在日常操作中贯彻一系列规范态度与行为准则。鉴于生物饵料生产是鱼虾幼体培育的关键环节，严格遵循标准操作规程（standard operating procedures，SOPs）并以充分的科学知识支撑，是实现良好生产规范与管理的重要驱动力。

3.1.1.2　生物安全规划与实施方案

生物安全体系需通过严格的管理规程防止特定病原体侵入生产系统。良好的生物安全方案的基础要素包括：

①通过掌握疾病传播机制与风险因子识别危害源；

②评估并防控风险因子；

③确定需优先实施的生物安全措施；

④监督生物安全方案执行情况。

生物安全规划中制定的措施必须作为标准操作规程的核心组成部分，并持续进行审查、更新及适应性调整。相关标准操作规程的文件应分发至每位员工及各操作区域，同时需通过培训、考核与监督机制确保员工充分理解这些规程的重要性。

3.1.1.3　生物安全基本原则

（1）隔离

隔离是生物安全体系中最关键的要素，其核心在于将潜在感染动物与物料同健康种群严格分离。若病原体未进入养殖区域，则感染无从发生。具体措施包括：控制外部动物、人员及设备进入育苗场；设置生产区域围栏并限制人员与宠物进出；配备专用工作服与鞋具；实行“全进全出”管理制度。

（2）清洁

清洁是生物安全的第二道有效防线，即清除水产养殖系统内所有异物及有机残留（后续需进行消毒以彻底杀灭潜在病原微生物，详见后文）。所有进出隔离屏障的物料须双向彻底清洁，表面不得留存可见污渍。小型物件使用肥

皂水配合刷洗即可，大型设备或车辆则需高压冲洗装置。

（3）消毒

消毒指在彻底清洁后实施杀灭病原体或寄生虫（包括人畜共患病病原）的处理程序，适用于可能受到直接或间接污染的场所、建筑、地面、车辆及各类物品。消毒效果取决于作用时间与药剂浓度。为预防或降低系统及孵化池病原负荷，推荐采用以下卫生消毒流程。

▶ 孵化池与孵化场所的规范清洁流程：

–清除所有可见残渣与污物；

–使用肥皂水进行清洗，彻底冲洗并干燥；

–使用适当浓度的消毒液消毒；

–用硫代硫酸钠（$Na_2S_2O_3$）中和余氯；

–最终冲洗。

▶ 系统整体维护与清洁标准：

–定期反冲洗并处理过滤器，降低育苗场的有机质负荷；

–清洗消毒育苗场的气泵或输水管线；

–及时冲洗输水管线中的沉积物并实施消毒；

–执行规范的卫生消毒策略；

–网具等设备需离地存放以保持无菌状态；

–及时清除死亡或濒死养殖动物并妥善处置；

–防止不同系统间设备或水体交叉污染；

–对网具、消毒脚池等设备实施消毒，消毒脚池应设置于隔离区、育苗场、养殖区等关键位置出入口。

卤虫产品的规范管理：确保卤虫卵储存于阴凉干燥环境，严格遵循生产商建议并在保质期内使用卤虫卵，防止由微生物、病原体或毒素污染造成的损失。

3.1.1.4 生物安全措施

（1）水体处理

水源选择与处理至关重要，因其是病原体进入孵化系统的主要途径。优质水源的获取取决于场地条件：

▶ 海水盐度34 ～ 36克/升，化学组成和质量稳定。水体的微生物状况取决于育苗场区的位置与季节。

▶ 卤水是高浓度的盐水溶液，浓度范围可从3.5%（35克/升，接近海水浓度）至26%（260克/升，接近饱和溶液）。在远离海洋的地区，建议育苗场使用盐度90 ～ 120克/升的卤水，孵化用水时将卤水稀释至盐度28 ～ 30克/升。

▶ 深井水取自40～60米深井，含高浓度铁和锰，需氧化后机械过滤去除。这种类型的水体恒温且微生物指标优良。

理想的孵化用水的理化参数范围见表3-1，确保各项指标达标是维持育苗场高效运行的关键环节。

表3-1　育苗场用水的推荐水质参数范围

水质参数	单位	范围
盐度	克/升	10～35
pH		7.5～8.5
溶解氧	毫克/升	＞4
碱度	毫克/升	＞120
总硬度（以$CaCO_3$计）	毫克/升	＞150
钙硬度（以$CaCO_3$计）	毫克/升	＞100
镁硬度（以$CaCO_3$计）	毫克/升	＞50
总氨氮	毫克/升	＜1.0
亚硝酸盐氮（NO_2^-）	毫克/升	＜1
硝酸盐氮（NO_3^-）	毫克/升	＜60
硫化氢（H_2S）	毫克/升	＜0.002
总溶解固形物	毫克/升	10～50
总悬浮固形物	毫克/升	10～50
重金属	毫克/升	＜0.01
农药	毫克/升	气相或液相色谱未检出

资料来源：Venkateswarlu，V.、Seshaiah，P.V.、Arun，P.和Behra，P.C.。2019。《印度安得拉邦沿海地区凡纳滨对虾半集约化养殖场水质参数研究》。国际渔业与水生研究杂志，7（4）：394–399。https://www.fisheriesjournal.com/archives/2019/vol7issue4/PartF/7-4-64-509.pdf

Van Wyk，P.和Scarpa，J.。1999。《水质要求与管理》。转引自：《循环淡水系统中的海水虾养殖》，第141–161页。

定期监测水质可在问题导致幼苗孵化率下降、生长减缓或死亡前及时识别潜在风险。因此建议高频次检测水质参数（表3-2），以便分析异常事件并在必要时进行校正调整。电子测量仪与探头通常能提供最精确数据，但防水型设备价格昂贵，若未规范使用或定期校准，可能产生较大误差。对于氨氮等参数，检测探头的购置成本可能过高。但若维护得当，这类设备的长期使用成本反而低于测试盒，且因无需消耗试剂而可提升检测频次。

替代方案是采用多种水质测试盒。虽然人为判读颜色或色度可能降低准

确性，但测试盒实用，可避免仪器采购的初始投入，也无需承担维修或损毁费用。测试盒往往依赖复杂的显色化学反应，必须确保选用量程匹配的型号并规范使用。部分型号不适用于海水检测，并且不同型号的测量范围各异，例如在检测氨（或氨氮）时，必须明确测定的具体形态（如总氨氮、非离子氨等），并充分理解及其对卤虫孵化过程、卤虫质量及幼苗的确切影响。

表3-2　水质监测推荐频率

水质参数	最小频率
温度	每天4次
溶解氧	每天4次
盐度	每天1次
pH	每天2次
碱度	每天1次
总氨氮、NO_2^-、NO_3^-	每天1次
可沉降固形物	每天1次

注：总氨氮＝NH_3+NH_4^+；NO_2^-＝亚硝酸盐氮；NO_3^-＝硝酸盐氮。

资料来源：全球海产品联盟。2022。《孵化场标准2.0》。最佳水产养殖规范认证标准。76页。

注：强烈建议每日工作前校准所有测量设备，以避免数据误差导致误判，造成生产损失。

为预防或降低水产养殖系统中的病原体负荷，推荐采用以下水处理步骤与单元。典型水处理流程包括：

- 水源取水；
- 通过砂滤对海水进行机械过滤（去除大于50微米颗粒物）；
- 将过滤海水储存于沉淀池，添加0.5～2毫克/升高锰酸钾（$KMnO_4$）促进沉降与消毒；
- 在氧化池中对溶解性有机物及重金属进行氧化处理；
- 通过蛋白质分离器结合臭氧（O_3）氧化去除溶解性有机物，推荐氧化还原电位维持在550～600毫伏以获得最佳效果；
- 经机械过滤将预处理水输送至二级储水池（去除大于1微米的残留颗粒）；
- 调节碱度、矿物质、pH等水质参数；
- 添加5～10毫克/升乙二胺四乙酸（EDTA），螯合溶解态金属；
- 实施强曝气；

- 通过配备紫外系统、活性炭过滤器、筒式过滤器（去除大于0.5 ～ 1微米颗粒）或超滤系统（去除大于0.03微米颗粒）的水处理系统向生产区输水；
- 按需调节水温。

水处理系统各单元组成见表3-3和图版51。

表3-3　水处理系统的单元组成

指标	用途
海水泵窝	吸水
排沙管	进水
沉降水槽	沉降尘土、碎渣和有机质
氧化水槽	有机质氧化
蛋白分离器	去除可溶性有机质
臭氧发生器	水中有机质氧化和消毒
消毒水槽	氯气和臭氧消毒
调水水槽	调节碱度和矿物质，加入EDTA
机械过滤（砂滤）	去除粒径＞50微米的颗粒物质
机械过滤（滤芯过滤）	去除粒径＞1微米的颗粒物质
机械过滤（超滤）	去除粒径＞0.03微米的颗粒物质
紫外处理	消毒
曝气装置	曝气和去除臭氧（O_3）
换热器	调控温度
冷却器	调控温度

资料来源：作者整理（比利时英伟水产公司）。



图版51　水处理系统组件：a. 机械超滤系统（0.03微米）；b. 文丘里臭氧注入装置；c. 蛋白质分离器

水处理系统的有效性必须通过微生物学及化学检测进行验证。

（2）管道系统的水气消毒

强烈建议制定定期消毒计划，对空气及水输送系统实施消毒。适用于PVC管道系统的消毒剂包括（粮农组织，2003）：

- Sanocare PUR®、VIRKON®：配置1% Sanocare® PUR溶液用于池壁与池底消毒，每平方米表面约需300毫升溶液；
- 次氯酸钠（NaClO）：有效氯浓度20 ～ 30毫克/升；
- 次氯酸钙［$Ca(ClO)_2$］：有效氯浓度20 ～ 30毫克/升；
- 盐酸（37%浓度）：配置10%溶液。

防止海水及空气输送系统微生物滋生的推荐处理流程包括：

- 测算海水输送系统的总容水量；
- 向储水罐注入所需海水；
- 溶解推荐剂量的消毒剂并混匀；
- 排空输水系统的存水，注入消毒液；
- 检查系统并启闭所有阀门，确保消毒液遍布管网；
- 保持消毒液在系统中至少停留2小时；
- 排出系统内消毒液；
- 用常规过滤海水冲洗20分钟；
- 检测消毒剂残留情况。

注：生产过程中需协调消毒流程，避免消毒剂进入生产池。

（3）生产期间的水体与池体消毒

作为初级水处理的补充，建议在使用前对池水进行消毒处理，该过程可杀灭池体表面及水中的残留微生物：

- 采用有效氯150毫克/升的次氯酸盐溶液浸泡消毒；
- 用皂液清洗池体后用消毒净水冲洗；
- 使用次氯酸盐溶液等消毒剂二次清洁；
- 再次用消毒净水彻底冲洗；
- 晾干池体；
- 通过硫代硫酸盐-柠檬酸盐-胆盐-蔗糖（TCBS）琼脂平板培养检验清洁消毒程序的效果（见第3.2.4.1节），向养殖池注入经过滤消毒的海水前，须确保清除池内所有有机残留物（如卤虫孵化池中的卵壳及残余卵），包括排水口和阀门等部位；
- 使用10毫克/升的有效氯对孵化水体进行消毒，并轻微曝气约1小时；

▶ 添加8毫克/升硫代硫酸钠（$Na_2S_2O_3$）中和余氯。

（4）设施要求

育苗场生产区域须保持清洁消毒状态。所有使用的设备应移开清洗，经干燥消毒后规范存放备用。从生物安全角度考量，卤虫卵孵化场所必须与鱼虾育苗场的其他功能区域实现物理隔离。孵化场所的清洁消毒按以下流程执行：

▶ 清除地面、养殖池及排水沟的粉尘与废弃物；

▶ 依据育苗场标准操作规程对地面和排水沟进行清洁消毒；

▶ 彻底清洗采样桶、托盘、网具等设备，清水冲洗后实施消毒；不同设施与养殖池的器具非必要不混用，确需共用时须在使用前彻底消毒；

▶ 保持设施干燥。

育苗场周边应设置围栏或围墙，防止可能携带病原的动物和人员进入。

（5）人员流动限制

工作人员的衣物、靴体及皮肤表面携带多种细菌。必须通过规范同事及其他人员来访制度，最大限度降低细菌在不同区域间及不同育苗场间的传播风险。严禁未穿戴指定防护服者进入生产区域。作为生物安全规程的重要组成部分，应实施访客管理制度，严格限制外来人员在育苗场各生产区域的流动。同时需科学调配内部人员，尽可能减少跨区域流动。

各区域间须设置消毒脚池隔离，并强制要求穿着橡胶靴进场。每个区域还应配备商用消毒剂的手部清洁设施，并定期更换消毒液。必须严格执行以下规定：人员进出育苗场或跨区域移动时，必须使用消毒设施，不得跨越消毒脚池或省略手部清洁程序。亲本培育车间应配备专用靴具及工装；大型育苗场可采用色标管理系统（如不同颜色工装），以便识别特定区域工作人员，有效减少人员跨工作区域流动。

若需通过实操演示使员工充分认识生物安全的重要性，可采用无菌棉签擦拭橡胶靴底，随后在琼脂细菌培养平板表面涂抹；或直接按压育苗场工作人员手掌于琼脂平板表面。将平板置于28℃环境下培养48小时后，可观察到大量菌落形成，从而直观显示靴体与手部的微生物污染状况。

（6）手部与靴具消毒

出于前述相同原因，所有工作人员应在开始工作前、休息后及转换作业活动时清洗双手。所有访客进入生产区域前均须进行手部清洁。为此，每个生产单元入口处须配备肥皂、消毒剂及洗手池。

（7）废水排放管理

生产区排放的废水可能含有大量有机物、粪便、蜕皮、残饵、藻类及细菌等，需规范管理以避免与设施及海水取水的交叉污染。推荐废水处理流程如下：

▶ 废水须泵入主排水管，输送至不同废水储池；

- 氧化塘分四个处理单元轮换使用，每周启用不同单元；
- 废水进入处理单元前需过滤以截留活体生物，防止其进入氧化塘；
- 处理单元达到最大容量时，按100毫克/升剂量投加次氯酸钙［$Ca(ClO)_2$］；
- 检测无余氯残留后排放废水。

（8）标准操作规程

应编制涵盖育苗场各环节的标准操作规程（SOPs）文件，分发给全体员工并存放于公共办公区。需对员工开展规程培训，重点强调关键控制点；员工应签署确认已阅读并理解规程的书面文件。

3.1.2 卤虫卵贮存

干制卤虫卵具有极强的逆境抗性，可耐受高剂量紫外线和电离辐射（Tanguay等，2004），当在生理温度下水合，持续数年缺氧仍能存活，并能承受极端温度及交替“干燥-水合”（Clegg和Conte，1980；MacRae等，1989；Warner等，1989；Liang和MacRae，1999；Clegg，2001；Clegg和Trotman，2002）。卤虫卵胚胎中存在多种生化适应机制，其中海藻糖、丰富的乌苷酸库、小热休克蛋白p26和artemin、与晚期胚胎发生相关的大量蛋白对其抗逆性至关重要。此外，卵壳在保护胚胎免受机械损伤和紫外线辐射方面起关键作用（Clegg，2005；Liu等，2009；Hibshman等，2020）。

水合卵对温度和操作胁迫的敏感性远高于干制卵。水合卵的活力在温度低于−18℃和高于40℃时会受到影响；在−18 ～ 4℃以及33 ～ 40℃温度范围内，会出现可逆性代谢中断（此时胚胎活力不受损），具体的温度上限和下限因品系略有差异；胚胎的活跃代谢发生在4 ～ 33℃。当含水量达到30% ～ 65%会启动胚胎代谢活动，即使最佳孵化条件下也可能因能量耗尽而无法完成孵化（图3-1）。卵的含水量可通过标准程序测定（见附件9）。反复脱水或水合会加速能量储备耗竭，这类卵长期储存可能导致孵化率显著下降。

若卤虫卵长期暴露于含水量超过65%的环境中，其胚胎发育将在出壳前完成。若对此类卵进一步脱水，会导致已分化胚胎死亡。

基于水合状态下卤虫卵的代谢特性，建议长期储存卤虫卵与脱壳卵时，必须采取防护措施以维持其最大的能量储备与孵化性能。卤虫卵的孵化率主要取决于采收、清洗、干燥及储存环节的条件与技术控制，这些处理过程的影响多与脱水或“脱水-水合”交替效应相关。对于休眠卵（见第1.5.4节），上述因素还可能干扰滞育诱导或终止进程；而对处于静息状态的卵（已打破滞育），不加控制的“脱水-水合”将使胚胎活力显著下降。

尽管休眠卵与静息卵具备一系列耐干燥与耐温组分，但仍对特定加工和储存条件敏感。当卤虫卵含水量在10% ～ 35%时，贮存过程中孵化品质会缓

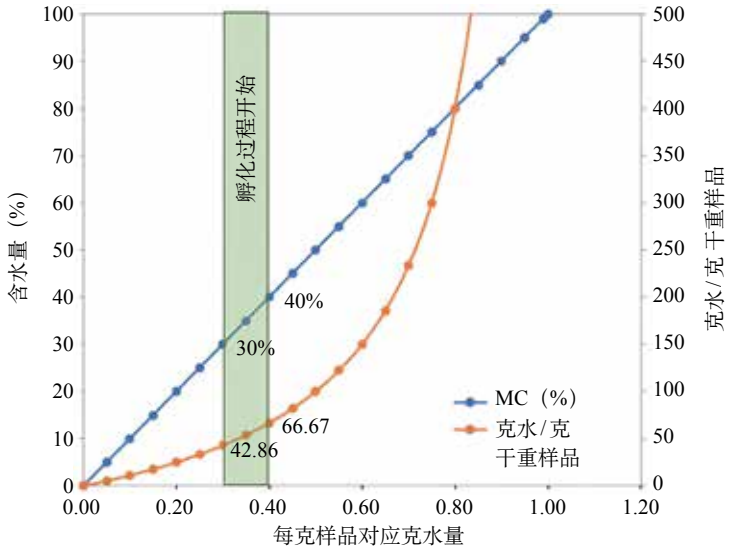


图3-1　含水量（MC）与每克干卵吸水量的相关性：绿色柱状区域表示干卵吸水后启动孵化过程的含水量范围（即30% ～ 40%含水量，或42.86 ～ 66.67克水/100克干燥卵）

资料来源：Clegg，J.S.、Zettlemoyer，A.C.和Hsing，H.H.。1978。《干燥但仍具活性细胞中残余水分含量的研究》。实验生物学，34：734–735。https://doi.org/10.1007/BF01947290

慢下降。若将卵贮存于冷冻或冷藏环境（最高4℃），可延缓孵化率下降。即便是包装很好的脱水卵，也需在干燥环境且温度不超过4℃条件下贮存才能保持活性，高温会导致产品品质下降。冷冻保存的卵应在室温下适应一周再进行孵化。虽然过度脱水（含水量降至1% ～ 2%）会导致活力下降，但目前尚未明确卵内最佳含水量阈值。胚胎活力不仅受卵内低含水量影响，还与采用的干燥方法有关。干燥过程中必须严格控制脱水速率，快速失水会显著降低卤虫卵的品质与孵化潜力（见第2.4.2.4节）。事实上，只要不采用极端破坏性的高温，卤虫卵的干燥几乎不存在含水量的下限阈值。人们曾采用Burnauer-Emmett-Teller气体轰击技术，几乎将胚胎中的所有水分完全去除，而胚胎仍全部存活（Clegg、Zettlemoyer和Hsing，1978）。

3.1.3　卤虫卵的消毒

海水鱼虾早期育苗阶段的主要问题是幼体易受微生物感染。干制卤虫卵本身携带细菌数量极少，但孵化水体中会快速滋生细菌，因为卤虫卵水合所释放的甘油为弧菌等细菌提供了理想的培养基（见第3.2.3.4节）。大多数弧菌属（*Vibrio*）细菌是条件致病菌，在育苗过程中可引发疾病并导致大规模死亡，尤其当养殖动物处于应激状态或亚适条件下时更为显著。

3.1.4 卤虫卵的脱壳

3.1.4.1 操作流程与注意事项

卤虫卵壳可通过短暂的次氯酸盐溶液（漂白剂）处理完全去除，该过程能保持未孵化卤虫胚胎外层角质膜的完整性，此操作称为脱壳。脱壳流程依次包括：卤虫卵水合（仅当卵呈球形时才能彻底脱壳）、次氯酸盐溶液去除外壳、残余次氯酸盐的清洗与中和。在较高pH时该化学脱壳反应速度加快，通常添加氢氧化钠（NaOH）以加快脱壳过程（Sorgeloos等，1977）。

次氯酸盐引发的化学反应为放热反应，尤其在较高环境温度下（如热带地区）可能导致脱壳液温度超过35℃，从而对水合胚胎造成损伤，因此必须采取降温措施（见附录4）。市售漂白剂通常标注有效氯浓度用于计算所需用量，但也可采用滴定法测定次氯酸盐溶液的有效氯含量（见附录5）。尽管脱壳卵相较未脱壳卵具有多项优势，该技术也曾广泛应用，但如今不建议将其作为育苗场的常规操作，原因如下：

- 次氯酸盐使用过程中会释放氯气，对操作人员存在安全隐患（尤其是在大规模操作时）；
- 脱壳过程产生的废水含次氯酸盐等有毒化合物，严禁直接排放（主管部门正日益加强废水排放限制）。

该技术还存在以下操作方面的缺陷：

- 须具备专业技术以避免脱壳胚胎长期暴露于有毒次氯酸盐中，大规模操作时更需谨慎；
- 不同卤虫品系因卵壳特性差异，操作参数需微调；
- 流程耗时较长。

脱壳卵的使用主要基于以下实用与营养学考量（相对于投喂Ⅰ期无节幼体或微颗粒饲料）：

- 孵化“常规”（即未脱壳）卤虫卵时，无节幼体与卵壳的完全分离难以保证。进入育苗池的未孵化卵及空壳若被捕食者吞食，将无法被消化并可能导致肠道阻塞，进而增加死亡率（Herald和Rackowicz，1951；Morris，1956；Rosenthal，1969；Shelboume，引自Provasoli，1969；Stults，1974）。这类问题在鱼类育苗中更易发生，因其摄食行为不同于甲壳类幼体。
- 因孵化过程能耗更低，脱壳卵孵化的无节幼体较常规Ⅰ期无节幼体具有更高能量值与个体重量，依据品系不同可增幅30% ～ 55%。对于部分能量值较低的卵，脱壳处理可通过降低破壳能耗，提升孵化率（Vanhaecke、Lavens和Sorgeloos，1983）。

- 脱壳处理能实现卵的初始消毒，但此效果是暂时的，因甘油释放后弧菌仍可能在孵化池中增殖（见第3.2.3.4节）。
- 在可直接投喂脱壳卵的应用场景中（见下文），其使用可省去孵化设施配置及每日大量的无节幼体生产作业。
- 适用于构建悉生卤虫无菌培养系统（见插文10）。

插文10　悉生卤虫实验系统

如第3.1.4节所述，卤虫卵的卵壳可通过脱壳处理去除，该过程需使用次氯酸盐等强氧化剂。脱壳过程中卤虫卵同时完成灭菌处理。因此，若在无菌环境中进行脱壳操作，并在后续孵化阶段通过使用过滤除菌的空气和灭菌孵化液来维持无菌条件，即可获得完全不携带细菌的无节幼体。

此类无菌无节幼体可用于精准研究微生物与其相互作用机制。通过构建实验环境，使无节幼体与人为添加至无菌体系的一种或多种已知微生物建立关联，从而形成所谓的“悉生”实验环境，该体系中所有生物组分均为已知。这种悉生卤虫培养系统简称为GART（Gnotobiotic *Artemia*）。

GART系统具有多重应用价值。通过测定卤虫与单一或多个特定微生物食物（细菌种或品系或无菌藻类）共培养时的生长速率，可评估这些饵料的营养价值。亦可使无菌卤虫与致病性弧菌品系共培育，验证其在单一关联条件下的毒力表现。某些弧菌品系存在功能缺失突变体，借此可验证特定功能对在体（*in vivo*）毒力的重要性。GART系统还能验证益生菌品系的在体活性，或检测葡聚糖等免疫刺激剂对卤虫的抗弧菌保护效果。此外，随着卤虫基因组图谱的解析，该系统可在严格受控环境中精细探究卤虫对特定处理的反应机制（见插文1）。基于GART系统的研究发现可加速科学认知进程，并为水产养殖虾类幼体验证实验提供理论基础。

根据捕食者的摄食习性和消化能力，脱壳卵可直接孵化成无节幼体投喂或直接投喂。脱壳卵在0～4℃冰箱中可保存数日而不影响孵化率。若需数周至数月的长期储存，可将脱壳卵置于饱和卤水中脱水后保存，供后续孵化或直接投喂。脱壳卵在充气悬浮状态下经过夜脱水处理，可释放80%以上的细胞水分；停止充气后，呈咖啡豆状的脱壳卵即会下沉。用筛网收集后，应置于新鲜卤水中冷藏保存。此外，由于紫外线会使其丧失孵化能力，建议避光储存。

在鱼类育苗中，实现无节幼体与未孵化卵、空卵壳的彻底分离曾是脱壳处理的主要动因。现已有替代技术（见第3.1.6节），可不经脱壳即实现近乎完全的物理分离。

3.1.4.2 脱壳卵的直接应用

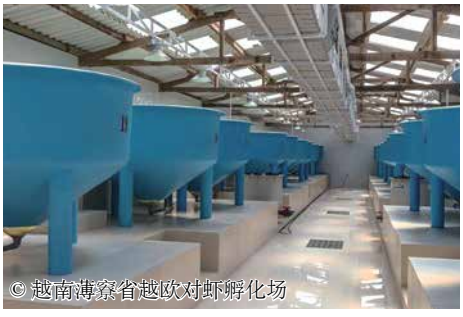
脱壳卤虫卵可作为高能饲料直接投喂能摄食消化，且接受这种非游动型活饵的鱼虾幼体。其外观与实用特性类似干饲料，且200～250微米的胚胎大小较体长450～500微米的初孵卤虫更适合口径小的捕食者。经干燥处理的脱壳卵在海水中有比较良好的悬浮性，沉降缓慢。其外角质膜可阻隔大分子渗出，避免了人工饲料常见的营养流失问题。

但相比卤虫无节幼体，脱壳卵在鱼虾育苗中的应用仍有限。研究证实，干制脱壳卵适用于多种水产苗种的培育，包括淡水鱼类非洲鲶（*Clarias gariepinus*）（Verreth等，1987；Bardócz等，1999）和鲤鱼（*Cyprinus carpio*）（Vanhaecke等，1990；Sui等，2000）、海水对虾（Stael等，1995；Ribeiro和Jones，1998）、遮目鱼（*Chanos chanos*）（De Los Santos等，1980）及热带观赏鱼（Lim等，2002）。此外，脱壳卵还用作捕食性蝽类和甲虫的大规模培养饲料，这些生物可防治作物害虫。脱壳卵的使用成本效益优于其传统饲料如粉斑螟（*Ephestia kuehniella*）卵。

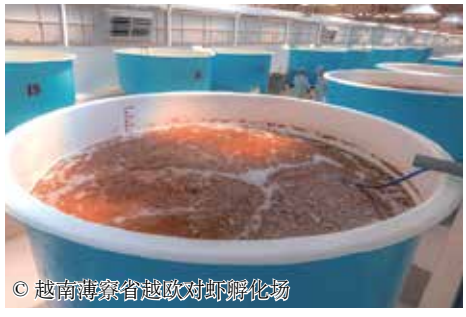
营养学上，脱壳卵与初孵无节幼体的总体化学成分相当，但其惰性可能导致视觉诱食效果较差，且经卤水脱水处理的卵粒易快速下沉，影响鱼类摄食，因此需额外充气或干燥处理以维持其悬浮。但对虾后期幼体等底栖生物则不受此限制。由于脱壳卵仅去除了卵壳的外蜂窝层，其内层膜结构仍保持完整，某些捕食者（如青蟹*Scylla* sp.幼体）可能很难消化脱壳卵。

3.1.5 卤虫孵化

尽管少量卤虫卵的孵化操作非常简单，但在大规模孵化场中，成功孵化以千克计的大量卵时需要考虑多个参数（见图版52、图版53、图版54及附录6）。这些参数主要包括曝气、pH、温度、卤虫卵密度、盐度和光照。



图版52　带支架的孵化槽（便于排水与采收）置于恒温室内；采光通过天窗与人造光源实现



图版53　配备充足曝气装置的卤虫孵化罐



图版 54　各地孵化场采用的不同类型与规格的圆柱锥形孵化罐，从容量数百升小锥形罐至 2 500 升大型罐体

在常规操作中，采用标准化条件最为高效经济，可在固定孵化时间内，获得产量可预测、同步孵化程度最大的Ⅰ期无节幼体。

（1）曝气

采用锥底容器从底部持续充气可实现最佳孵化效果。圆柱形或平底容器会存在充气死角，导致卤虫卵和无节幼体堆积并缺氧。透明或半透明容器便于观察孵化情况，尤其在收集阶段更为实用。应提供充足曝气以维持溶氧水平，通气强度须保持溶氧含量大于2毫克/升，最优条件下应大于4毫克/升。最佳通气速率与孵化容器尺寸和卤虫卵的孵化密度相关。通过孵化前对卤虫卵进行消毒处理或添加水质调节剂，可有效抑制泡沫的过度产生（见第3.1.3节）。

（2）温度

尽管不同品系间的最适孵化温度可能存在细微差异（见第1.4.4节），但为确保孵化流程的标准化（即获得最大量Ⅰ期无节幼体所需时间），孵化介质温度应恒定维持在25 ～ 30℃范围内（建议使用恒温加热器或控温室）。当温度低于25℃时，卤虫卵孵化速度减缓；超过33℃则会导致卵代谢不可逆终止（见第3.1.2节）。需注意的是，超出该温度范围对孵化产出的影响具有显著品系特异性。

（3）盐度

孵化盐度对卤虫卵孵化的影响首先与水合程度相关。当盐度超过阈值时，卤虫卵无法吸收足量水分。该阈值因品系而异，但多数卤虫品系为85 ～ 90克/升。其次，孵化盐度会影响卤虫卵外角质层内达到临界渗透压所需积累的甘油量，从而决定卵壳是否破裂。因此，在最低盐度条件下孵化速率快，因为此时达到卵壳破裂点所需的时间最短。总体而言，10 ～ 35克/升的盐度范围内可获得最佳孵化效果。出于操作便利性考虑，通常采用天然海水进行卤虫卵孵化。但在5克/升盐度时，由于所需积累的甘油量较少，无节幼体孵化速度更快。对于某些品系的卤虫卵，低盐度孵化能获得更高孵化效率，且孵出的无节幼体具有更高的能量储备。盐度可通过折射仪便捷测定。

（4）pH

海水中的碳酸氢盐缓冲体系通常能为孵化介质提供足够的缓冲能力，确保孵化过程中的pH维持在8以上，这一指标是孵化酶保持最佳活性的必要条件。在低盐度孵化时，可通过添加不超过1克/升的$NaHCO_3$来提高水体缓冲容量。当进行高密度卤虫卵孵化时，大量产生CO_2可能导致pH下降，此时通过添加碳酸氢盐或氢氧化钠来提升缓冲容量尤为关键。

（5）卤虫卵密度

卤虫卵密度可能干扰其他对孵化至关重要的非生物因子，如pH、溶氧水平和光照强度。推荐采用2克/升的标准密度，但亦可提高至≥5克/升，此时

需更严格调控溶解氧、pH及光照强度等关键参数。

（6）光照

光照是激活胚胎发育并确保更高孵化同步性的关键要素，至少在完全水合后的最初数小时内，强光照条件至关重要（见第1.5.2节）。光的测量（定义为人类视觉可感知的电磁波谱部分）具有复杂性，其具体测量方式取决于所测光（电磁波）的特性参数。光“照度”是表征人眼感知光亮度的一种常规指标，该参数通常以“勒克斯（Lux）”为单位。为获得最佳孵化效果，孵化池水表面的照度应至少达到2 000勒克斯。特别是在采用较高卵密度或较大孵化容器时，必须确保光照不会成为孵化过程的限制性因素，根据实际装置和尺寸，孵化池内部的光强可能显著低于水面照度。虽然户外遮光环境下，透明容器在日间通常能达到足够照度，但建议将孵化装置置于室内并采用人工光源，以此保证孵化过程的标准化。

3.1.6　卤虫无节幼体的分离与收集

分离与收集操作应以获取Ⅰ期无节幼体为目标，而非收集更后期阶段的卤虫幼体：首先是营养因素（见3.1.7节），同时基于生物安全考量，即当卤虫幼体蜕皮进入Ⅱ期阶段后，可能摄食孵化介质中存在的弧菌。某大型对虾育苗场的分析数据表明，孵化后收获的卤虫中，弧菌载量范围可从每克10^3菌落形成单位（CFU/克）（见附录11）至高达10^7CFU/克，即使经过规范清洗后亦然。此数值差异取决于收获群体中Ⅱ期无节幼体所占比例，因为被Ⅱ期卤虫摄入的弧菌无法通过清洗去除。

在孵化后、将Ⅰ期无节幼体投喂鱼虾幼体前，需将卤虫Ⅰ期无节幼体与空卵壳、未孵化卵（二者均具有不可消化的几丁质硬壳）、孵化膜、杂质及孵化介质分离，并用清洁消毒海水冲洗以确保生物饵料品质。

如第3.1.4节所述，化学法脱壳可省去分离步骤，但该操作可能危害人体健康并引发环境问题。若未采用脱壳工艺或卵壳磁选分离等其他分离技术（详见下文），则应按照附录7所述方法收集无节幼体。关键要素之一是无节幼体收集网必须全程浸没于水中，以避免机械损伤无节幼体，此类损伤会加剧后续贮存和使用过程中弧菌的滋生。正确执行该收集规程需要充足的实操经验，这对育苗场的常规应用仍具挑战性。

孵化结束后，先将上浮的空卵壳与下沉的未孵化卵在孵化装置中实现物理分离。有时会进一步采用“双层筛滤法”，将两层细目网叠置形成双层过滤器，迫使无节幼体透过网孔而截留未孵化卵。该过滤过程耗时费力，分离效果取决于操作者的技能且波动较大，同时不可避免地造成无节幼体的机械损伤。受损及死亡的无节幼体不仅适口性下降，还会向水体中释放营养物质，助长弧

菌等有害菌群繁殖，增加育苗场生物安全风险。因此，强烈不建议采用双层筛滤法。

为规避机械分离的耗时性和缺陷以及脱壳卵引发的环境问题，现已开发出替代技术方案。其中一项技术利用遇水释放过氧化氢的化学剂（如过碳酸钠，$2Na_2CO_3 \cdot 3H_2O_2$）促进分离：标准孵化结束后将药剂加入孵化池短暂混匀，停止曝气后静置使无节幼体与卵壳分离，再按标准流程收集冲洗。

另一项商业化分离技术是SEP-Art® 系统（图版55），其通过磁选原理实现分离：SEP-Art® 卵壳表面覆有不影响孵化特性的无毒磁性涂层，磁选工具仅吸附未孵化卵与空壳，从而将其从卤虫无节幼体悬浮液中分离。卵壳被磁体吸附后即可轻松移除。与传统分离方法不同，SEP-Art® 技术既不依赖物理外力，也不涉及化学反应，因此不会对卤虫无节幼体的活力造成影响。该技术能最大限度地提高孵化产出回收率，并加快无节幼体的收集作业。相较于需要专业操作技能的脱壳工艺，SEP-Art® 工具易于使用，未经培训的人员亦可操作。该过程不产生化学废弃物，即使大规模应用也更具环境友好性。



图版55　SEP-Art® 技术应用：将磁棒（左）浸没于浓缩/冲洗罐（右）中吸附卵壳与未孵化的卵

在孵化至Ⅰ期无节幼体前，处于伞状幼体阶段的卤虫也可作为鱼类和甲壳类幼体的饵料（见插文11）。自该技术应用于越南湄公河三角洲地区青蟹商业化育苗以来（Hai等，2020），已获得越来越多的关注。

插文11　伞状幼体期卤虫作为活饵料的应用（作者：Nguyen Van Hoa和Patrick Sorgeloos）

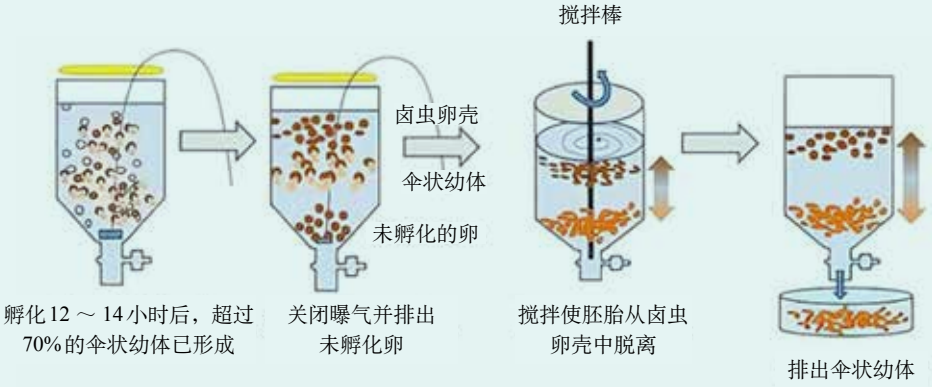
伞状幼体是卤虫破壳后的非游动幼体阶段，此时胚胎仍被孵化膜包裹。伞状幼体期卤虫已被用于对虾和军曹鱼（*Rachycentron canadum*）等甲壳类和鱼类幼体的培育。在拟穴青蟹（*Scylla paramamosain*）育苗中，采用最小的越南永州卤虫品系的伞状幼体替代轮虫作为开口饵料，成为湄公

河三角洲地区青蟹育苗产业成功发展的关键因素。

卤虫卵孵化过程中可收集伞状幼体。当卵壳破裂时，仍被孵化膜包裹的伞状幼体从中突出并悬垂于空壳下方。当孵化膜破裂、自由游动的 I 期无节幼体出现时，“破壳”过程即结束（见第 1.1 节）。

伞状幼体的应用具有多重优势：

- 伞状幼体卤虫可缩短甚至完全替代青蟹幼体及其他捕食者的轮虫投喂周期（Van Can Nhu, 2009），从而规避轮虫复杂的生产流程。在轮虫培养突发崩溃或短缺时，伞状幼体亦可作为相对易得的“应急”活饵。
- 相较于轮虫及卤虫无节幼体，伞状幼体所含能量更高且微生物负荷更低，因其无需消耗能量发育成游动的幼体或维持其游泳行为。
- 对于捕食能力弱的生物（如蚤状幼体期的虾类），伞状幼体是卤虫无节幼体的理想替代品，因为无节幼体的游动会降低捕食效率（Cobo 等，2015）。虽然热灭活、匀浆或冷冻处理可提升被捕食率，但这些处理会降低饵料的营养品质并恶化水质。需注意的是，因伞状幼体无自主运动能力，应采用滴流投喂方式以实现活饵的持续供应。否则未摄食的伞状幼体会沉入育苗池底部，难以被有效摄取。而这些伞状幼体最终将孵化成无节幼体悬浮于水体中，但其对青蟹幼体而言体型往往过大，无法被捕食。



“伞状幼体”卤虫的生产

资料来源：作者整理（越南芹苴大学）。

3.1.7 无节幼体的营养强化

早在卤虫成为水产养殖常用生物饵料之初，研究者便发现许多卤虫品系缺乏某些必需营养素，且不同地理来源的卤虫存在特异性营养缺陷（Léger等，1987；Navarro、Amat和Sargent，1992，1993），因而无法完全满足捕食性幼体的营养需求，特别是海洋水产动物。随后大量研究聚焦于高不饱和脂肪酸（HUFAs，即含20个以上碳原子和3个以上双键的多不饱和脂肪酸）在鱼虾幼体发育中的作用及其在卤虫体内的存在（或缺失）状况。

亚油酸（LA，18:2ω6）与α-亚麻酸（ALA，18:3ω3）可在植物体内合成，但动物组织无法自主合成。这两种脂肪酸不仅是细胞代谢的基础物质，更是合成ω6系列与ω3系列关键脂肪酸的前体，因此必须通过摄食获取，被定义为必需脂肪酸（EFAs）。虽然多数动物能将母体化合物转化为ω6和ω3高不饱和脂肪酸，但其生成量常低于维持最佳健康状态所需水平。淡水鱼类可将α-亚麻酸高效转化为二十碳五烯酸（EPA，20:5ω3），而绝大多数海水鱼类则难以将α-亚麻酸转化为EPA，更无法进一步生成二十二碳六烯酸（DHA，22:6ω3）。这意味着海水鱼类必须通过食物足量获取这些必需营养素。

ω3高不饱和脂肪酸对海水鱼幼体发育尤为重要。早期研究主要关注提升卤虫EPA含量，20世纪80年代末期DHA也成为研究重点（Léger、Naessens-Foucquaert和Sorgeloos，1987）。野生海水鱼卵黄中DHA与EPA的比例通常为2：1，表明开口摄食阶段的鱼类幼体至少需要维持该比例。研究证实，较高的DHA：EPA比例对促进海水鱼幼体生长、增强应激耐受性及完善体色发育具有关键作用。海水鱼细胞膜磷脂中含有大量DHA和EPA，这些物质能显著提升细胞膜的通透性，尤其在视觉与神经细胞膜系统中。缺乏此类必需脂肪酸可能导致生理发育迟滞和行为异常，如弱光环境下视力低下、应激耐受力减弱及体色异常等。另有研究表明，除DHA和EPA外，ω6高不饱和脂肪酸花生四烯酸（ARA，20:4ω-6）对海水鱼幼体同样不可或缺（Bell和Sargent，2003）。与ω3高不饱和脂肪酸类似，海水鱼类无法从其母体化合物合成ARA。ARA是类二十烷酸合成的前体物质，这类免疫活性化合物对鱼类免疫系统至关重要。然而研究表明，鱼类对ARA的需求量因鱼种及幼体发育阶段而异，因此在提供该营养素时需格外注意。

鉴于许多卤虫品系存在脂肪酸不足的问题（见第1.4.6节），研究者已开展改善卤虫脂质组成的研究。基于卤虫的摄食特性，其生化成分可通过便捷方式进行调控。孵化约8小时后（具体取决于环境条件），卤虫蜕皮进入Ⅱ期幼体阶段，此时卤虫可无选择性摄取颗粒状物质（见第1.1节），现已开发出向其体内富集脂质的技术（图3-2）。该方法最初为高不饱和脂肪酸强化而设计，随

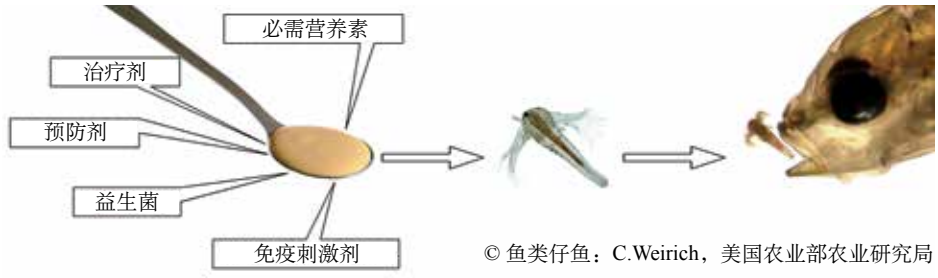


图3-2　卤虫作为载体将特定成分向养殖动物幼苗传递的示意

资料来源：作者整理（LAARC）。

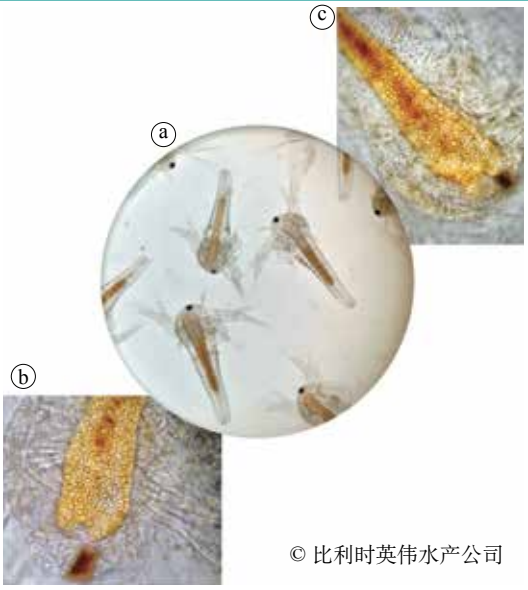
后迅速扩展至磷脂、免疫刺激剂、维生素、类胡萝卜素等其他化合物，这些物质均能以足够小的颗粒形式被卤虫摄取。这种被称为“卤虫强化”（*Artemia* enrichment）的生物包裹技术，已成为众多海水鱼类和甲壳类育苗场的常规操作，用于提升卤虫必需脂肪酸的营养价值。该技术对育苗生产产生了深远影响：不仅提高了水产动物幼体的存活率、生长速度和变态成功率，还显著改善了其品质，如降低畸形率、增强体色及提升抗应激能力。然而对于部分海水鱼类，强化后的卤虫仍无法满足其对 ω3 高不饱和脂肪酸的需求水平。

目前，基于精选微藻、酵母、益生菌、微胶囊或微粒制品、乳化产品及自乳化浓缩物或其组合，已开发出多种强化剂产品和工艺，其中使用乳化浓缩物可获得最高强化水平。该乳液是由精选海洋油脂构成的自分散复合体系，通常辅以脂溶性维生素和类胡萝卜素等营养组分。乳液经海水稀释后形成稳定分散的微球，易被卤虫摄食。高强化水平的实现不仅依赖优化的产品配方与生产工艺，还需遵循规范的操作流程：将初孵无节幼体以不超过500只/毫升的密度转移至强化槽，强化介质为经消毒的海水，水温维持在25 ～ 30℃（见第3.1.1节）。根据使用说明，强化产品需分1 ～ 2次投加，且需通过使用气石强曝气或注入纯氧来维持溶氧水平始终维持在4毫克/升以上，以避免由缺氧导致的卤虫高死亡率。此外，脂质过氧化反应还可能进一步增加耗氧量，加剧环境恶化。强化后的后无节幼体（图版56）需在22小时后采收，经彻底冲洗后直接投喂，或在10℃以下低温贮存待用（见第3.1.6节和附录7）。该操作既能通过最大限度减少卤虫体内高不饱和脂肪酸的代谢消耗来保障高营养价值（图3-3），又可实现生物安全管控。

采用这些强化技术获得的高不饱和脂肪酸富集水平远超天然卤虫品系中的最高浓度（见表3-4）。

新型商业化强化产品不仅能提升必需脂肪酸含量，更致力于获得蛋白质、磷脂与能量配比更均衡的生物饵料。这些产品通常还富含多种必需或有益的

微量营养素，包括维生素、色素、甾醇、抗氧化剂及酶类。当前商业强化产品的研发趋势是在配方中添加微藻或特种酵母等“天然”成分，使其具有单一营养素无法提供的附加营养或免疫刺激功能。该强化工艺还可与育苗场的卫生防疫体系相结合，或作为抑菌剂、免疫刺激剂、益生菌、疫苗及抗菌肽等活性物质的载体。就物理形态而言，干粉状强化产品因不易变质、仓储更便捷、使用更灵活（如剂量控制）等特点，已确立了独立的市场地位。最新研发成果还包括能缩短强化时长或支持高密度卤虫强化的产品，从而为育苗场节省时间、空间及人力成本。



图版56　强化后的卤虫后无节幼体（a）；在其消化道内（b、c）可见摄入的强化产品的细小油滴

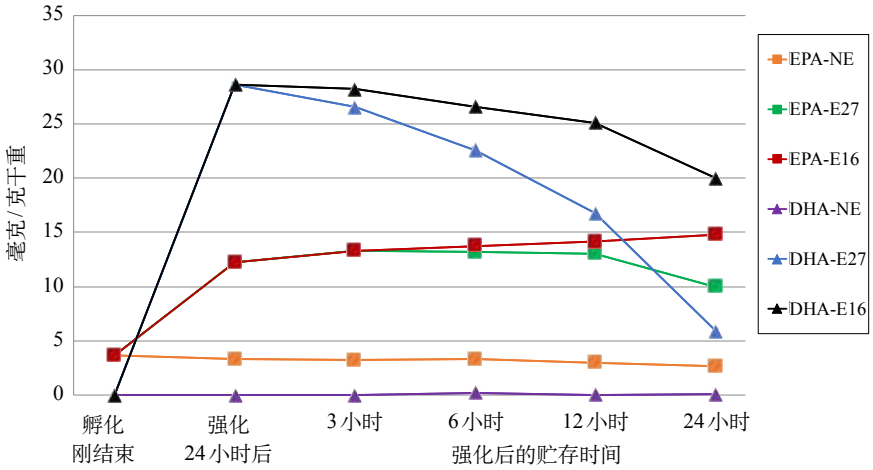


图3-3　二十二碳六烯酸（DHA）与二十碳五烯酸（EPA）含量的变化：富含DHA和EPA的大盐湖卤虫（*Artemia franciscana*）在27℃和16℃贮存期间的含量（以毫克/克干重计，含DHA分解代谢）

注：E16=16℃贮存；E27=27℃贮存；NE=未强化

表3-4　用不同乳化液分别强化大盐湖卤虫*Artemia franciscana* 12小时和24小时所获得后无节幼体与未强化Ⅰ期无节幼体的高不饱和脂肪酸水平（毫克/克干重）

脂肪酸（毫克/克干重）	未强化GSL Ⅰ期无节幼体	A产品强化的卤虫		B产品强化的卤虫		C产品强化的卤虫	
		12小时	24小时	12小时	24小时	12小时	24小时
LA：18:2 ω 6	8.5	9.1	8.6	10.4	15.2	10.1	13.3
ALA：18:3 ω 3	45.2	36.2	29.7	35.5	37.5	41.6	34.9
ARA：20:4 ω 6	0.8	2.2	4.0	1.6	1.6	1.2	2.9
EPA：20:5 ω 3	2.7	6.3	11.2	7.8	13.5	6.9	18.5
DHA：22:6 ω 3	微量	20.9	35.5	12.5	34.9	5.0	17.3
DHA/EPA	—	3.3	3.2	1.6	2.6	0.7	0.9
合计 ω 3 > 20:3 ω 3	5.4	29.8	50.1	24.6	54.7	14.1	40.0
合计 ω 6 > 18:2 ω 6-t	10.2	18.2	24.3	14.6	19.7	13.1	1.2
ω 3/ ω 6	0.5	1.6	2.1	1.7	2.8	1.1	2.1

注：ALA = α- 亚麻酸；ARA = 花生四烯酸；DHA = 二十二碳六烯酸；EPA = 二十碳五烯酸；GSL = 大盐湖；HUFA = 高不饱和脂肪酸；LA = 亚油酸。

资料来源：作者整理（LAARC）。

3.1.8　无节幼体的冷藏保存

卤虫无节幼体的冷藏与品质维护对于防止储存期间细菌滋生及营养质量下降至关重要。迄今许多孵化场仍忽视一个事实：Ⅰ期卤虫无节幼体不摄食，而是通过消耗自身能量储备来实现生长与发育。在卤虫卵孵化的温度环境下，初孵无节幼体仅需数小时便会发育至Ⅱ期幼体阶段，期间将消耗大量能量储备（可达30%以上）（图3-4）。Ⅱ期无节幼体因透明度更高、体型更大且游动速度更快，其可见度反而降低，导致作为饵料的适口性较Ⅰ期幼体有所下降。

鉴于育苗场需要长期投喂优质卤虫，必须配备冷藏设施以确保活饵的高品质。将初孵无节幼体储存在低于10 ℃的环境中（Léger、Vanhaecke和Sorgeloos，1983），既可避免其蜕皮进入Ⅱ期无节幼体阶段，又能显著降低能量代谢水平。在不使用纯氧的条件下贮存密度可达5 000只/毫升，而充纯氧可提升至10 000只/毫升。通过该方法，无节幼体可保存长达24小时且死亡率无显著上升，能量损耗低于5%。需特别注意的是，尽管冷藏设备能极大抑制细菌繁殖，但抑制作用并未达到100%，因此必须严格遵守卫生规范与生物安全流程（见第3.1.1节）。

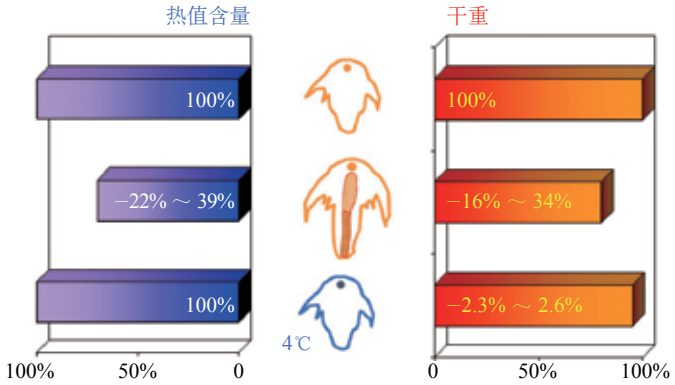


图3-4　不同发育阶段卤虫的能量（热值含量）与干重下降情况：设定刚孵化的Ⅰ期无节幼体（上图）为100%基准值。Ⅱ～Ⅲ期后无节幼体（中图）及4℃贮存24小时的Ⅰ期无节幼体（下图）分别显示其百分比下降值

为延长卤虫无节幼体的低温活体保存时间，可采用多种设备，如浸没式储罐（将收集的无节幼体置于水浸状态，通过聚苯乙烯泡沫隔热罐体、冰袋或密封塑料袋装冰块等常规制冷手段维持低温）、冷藏柜、低温库或“牛奶”冷却槽（图版57）。冷却容器贮存仅需微量充气，防止无节幼体沉积罐底导致缺氧应激乃至死亡。建议采用旋转系统配合空气或氧气供给，以维持幼体悬浮状态。关键是在卤虫采收后迅速冷却，可加经过消毒的塑料封装冰块于卤虫无节幼体悬浮液，或在采收末期使用预冷的消毒海水实现快速降温。

采用24小时冷藏技术可优化商业孵化场优化的卤虫卵孵化流程，如减少



图版57　用于卤虫无节幼体冷藏的牛奶冷却槽；俯视图（a）与侧视图（b）

每日孵化与采收次数、缩减孵化池占用数量、扩大单次孵化规模。该技术使养殖者能够更频繁甚至自动化地投喂高质量活性饵料，这对鱼虾幼体培育具有双重优势：一方面可缩短育苗池中饵料滞留时间，另一方面能有效抑制卤虫在育苗池内的生长。尤其对于捕食能力较弱的大菱鲆（*Scophthalmus maximus*）幼体、斑节对虾（*Penaeus monodon*）和凡纳滨对虾（*Litopenaeus vannamei*）早期幼体，投喂经冷藏处理的卤虫效果更好。卤虫脱离冷藏环境后活动性暂时降低，可大幅提升摄食效率。

如今，卤虫无节幼体也由专业公司以浓缩浆或冷冻产品的形式生产并供应至育苗场。新鲜或冷冻浆体的浓度可达8 000万只无节幼体/升，开袋即可投入养殖池使用。根据供应商不同，新鲜浆体产品可能通过病原体检测认证，并保证无节幼体的质量（包括存活率及投入育苗池后的恢复状态）。若为冷冻产品，无节幼体会在冷冻过程中失去活力死亡，更适合投喂早期阶段虾类幼体，产品可在冷冻柜中保存数日乃至数周。需要特别强调的是，若操作不当，极端高密度浓缩过程可能对无节幼体造成物理损伤，导致卤虫降解而丧失营养价值；此外，投喂的卤虫或沉降至育苗池底部未被摄食，进而增加水体细菌负荷。

综上所述，以下参数对实现卤虫的最佳冷藏效果至关重要，可确保生物饵料的最佳品质：

①无节幼体阶段（Ⅰ/Ⅱ期）

该阶段幼体的贮存取决于以下因素：无节幼体的收集时间（孵化时长）、特定孵化条件下该批次或品系的卤虫卵孵化动力学特征，以及完成收集、冲洗并将无节幼体转移至冷藏设施所需的时间。

②关键参数温度

- 必须对无节幼体悬浮液进行快速冷却；
- 最佳储存温度：1 ～ 4℃；
- 最低温度：0℃（冷冻会导致个体损伤及营养物质流失）
- 最高温度：10℃（此温度下虽然蜕皮过程减缓但仍会发生，导致能量消耗与体型增大）

③搅动

应持续搅动无节幼体悬浮液，以防止其沉降死亡。

④氧气/空气

尽管代谢过程减缓，卤虫在冷藏期间仍存活并需要氧气维持生命。建议优先使用纯氧。若无纯氧供应，亦可采用空气，通过常规空气压缩机及耐高压多孔石（如陶瓷石）进行高压输送。此时需对空气进行过滤，以避免细菌进入卤虫悬浮液。溶氧水平应维持在6毫克/升以上。曝气强度需足够防止无节幼体沉底，同时需保持适度以避免损伤卤虫个体。

⑤密度

在不使用纯氧的情况下，无节幼体密度可达5 000只/毫升；使用纯氧时，密度可达10 000只/毫升。

⑥储存时长

最长24小时。

⑦细菌控制

低温会显著抑制细菌生长，但无法完全阻止其繁殖。若采收时细菌载量已处于高位，则冷藏阶段结束时仍将维持高位。因此，必须对孵化采收流程及冷藏设备进行消毒，并严格遵守卫生规范与生物安全规程（见第3.1.1节）。

⑧投喂

当需要卤虫无节幼体时，可从冷藏容器中取出适量生物饵料立即投喂。卤虫无节幼体将在数分钟内从低温状态恢复活性。剩余悬浮液应立即放回冷藏环境直至下次使用。

3.2 卤虫卵产品质量评估

市场上销售的卤虫卵产品品牌众多，源自不同品系，各自对应着多样化的质量标准。这些标准构成了各品牌的价值基础。为评估卤虫产品质量，水产养殖业已建立一系列评价指标，其中以下三项最为常见：卤虫卵与无节幼体的生物学测量数据、卤虫卵孵化特性以及无节幼体的营养组成。

3.2.1 生物学测量特征

生物学测量涉及饵料生物的大小与形态，这些特性直接影响其适口性及最终的营养效能。不同地理来源的卤虫所产无节幼体体长差异显著（见1.4.1节），但对甲壳类幼体通常不构成关键限制，因其能利用摄食附肢捕捉并撕碎饵料颗粒（图版58）。然而对于口器很小且需整口吞食饵料的海水鱼类幼体而言，无节幼体的大小则至关重要，投喂体型过大的卤虫无节幼体可能导致鱼苗因无法摄食而饥饿。对于产小卵型的金头鲷、大菱鲆和石斑鱼等鱼类，其首选开口饵料必须是轮虫，因所有卤虫品系的无节幼体均体型过大。此时，选定品系的无节幼体尺寸将决定鱼类从轮虫转为卤虫饵料的最佳时机。

基于生物学测量的质量评估采用以下参数：

- 水合状态下未脱壳卵与脱壳卵的卵径（需充分水合以确保完全球形的卵达到最大尺寸）；
- 卵壳厚度；
- 初孵无节幼体的体长与体宽。



图版58　摄食卤虫幼体的虾类（a）与鱼类（b）幼体

传统生物测定方法是在显微镜下测量卤虫和卤虫卵的生物学数据（见附录8），目前则普遍采用配备专业软硬件的计算机图像分析技术。

（1）卤虫卵的生物学测量

所有生物学测量参数均显示，不同卤虫品系间存在显著差异（见第1.4.1节），大多数未脱壳水合卵的平均卵径介于220 ～ 290微米，因此一定程度上可通过其生物学特征区分品系。根据卵径差异可划分为三个类群：

①最小型卤虫卵（220 ～ 230微米），如美国旧金山品系及其衍生的越南永州品系；

②中型卤虫卵（240 ～ 260微米），如美国大盐湖品系；

③大型卤虫卵（260 ～ 290微米），包括俄罗斯大亚罗沃耶湖孤雌生殖品系、中国西藏卤虫品系等。

由于小型卵个体重量较低，卵径这一生物学测量参数会影响孵化效率（见第3.2.2节）。同一品系中，不同季节或年份采集的卵批平均卵径基本保持稳定。但温度、盐度和饵料条件等环境因素可能造成卵径微小差异，因此卵径主要体现品系特性。脱壳卵在不同品系间呈现与未处理卵相似的差异范围，平均脱壳卵径介于200 ～ 270微米。未脱壳卵大小与卵壳厚度无相关性。

（2）无节幼体的生物学测量

卵径与无节幼体生物学测量参数显著相关，各品系无节幼体测量数据差异与卵径差异一致（图3-5）。卵径是决定市场售价的因素之一，小型卵通常价格更高。选择适宜品系作为水产动物的饵料时，无节幼体生物学特征比卵径更具实际参考价值：

①当摄食机制不受幼体大小限制时，个体较重的大型无节幼体更具优势：捕食者通过摄取较少数量的大型幼体即可满足需求，这对于捕食效率低的鱼类幼体而言更节能。

②若摄食机制对幼体大小敏感，则小型无节幼体效果更佳。

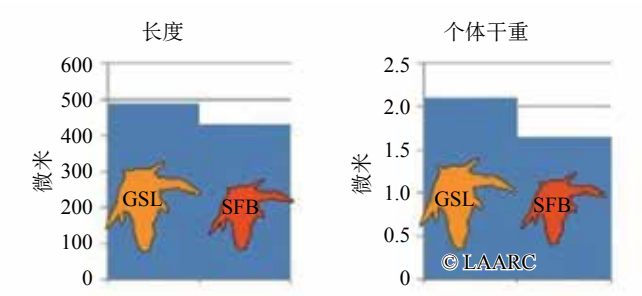


图3-5　大盐湖（GSL）与旧金山湾（SFB）卤虫在Ⅰ期无节幼体体长（左）和干重（右）方面的品系特性差异

3.2.2　孵化质量

优质卤虫卵产品应首先满足：杂质（包括沙粒、破碎卵壳、羽毛、盐结晶等）含量极低，结合低含水量，以确保每克产品的高卵粒数。通常经过24小时标准孵化后，需检测主要参数孵化效率（即每克干卵孵出的无节幼体数量）和孵化率（即完整卵的实际孵化百分比）。这些参数在不同商业产品间差异显著，是价格差异的主要因素。一般认为，孵化效率比孵化率具有更优的综合商业指标，因为它反映了每克卤虫卵产品（包含杂质和水分）实际提供的饵料（无节幼体）数量等。市售卤虫卵产品的孵化效率可能低至10 000只无节幼体/克，而优质大盐湖品系卤虫卵可达250 000只无节幼体/克（对应孵化率＞90%），越南产旧金山卤虫小型卵甚至可孵化产出＞300 000只无节幼体/克。由于小型卵具有更低的单粒重量（见第3.2.1节），1克小型卵品系产品所含卵粒数量多于1克大型卵品系。因此小型卵品系产品具有相应更高的潜在孵化效率。

孵化质量的另一个方面与标准孵化时间内获得的孵化量无关，而是反映卤虫卵达到最大孵化率的速率，即所谓的孵化同步性。孵化速度和同步性必须足够高，当在28℃、盐度32克/升的海水中孵化时，首批无节幼体应在孵化后8～12小时（T_0；详见后续说明）时出现，而末批无节幼体应在之后约8小时内完成孵化（T_{100}）。同理可推算出其他T值，如T_{90}表示90%可孵化卵完成孵化所需时间。若孵化同步性不足（即$T_{100} - T_0 > 10$小时），待末批幼体孵出并进行采收时，先孵化的无节幼体将蜕皮进入Ⅱ期幼体阶段，其能量储备已大量消耗。而且，这些Ⅱ期幼体可能携带更高生物安全风险，因其可能摄入了孵化环境中存在的致病性弧菌。此外，当达到最大孵化率所需总时长超过24小时，使用者将无法利用同一孵化容器进行次日采收作业，进而导致基础设施成本增加。

评估卤虫卵产品的孵化质量采用以下标准：

（1）水分含量（%）（见附录9）

为研究卤虫卵中水分含量与代谢的相互关系，可采用多种定量分析方法，如测定完整卵、胚胎或卵壳的水分含量；以每克卤虫卵产品重量或每克干卵重量为单位计算水分含量。在实际应用中，为确保长期储存后的高孵化率，经标准流程干燥处理的卤虫卵样品水分含量必须低于10%（见第2.4.2.4节）。商业卵样品水分含量越高，孵化效率相应越低（因卵内水分计入总重量，而孵化效率以重量为计算基准）。通常建议将水分含量控制在8%。

（2）克卵数（卵粒数/克）（见附录10）

指1克产品中完整卵与空卵的总数。该指标可初步反映：

- 样品前期加工的质量，包括杂质和不完整卵比例等；
- 空壳比例，需结合孵化率与孵化效率数据综合判断；
- 单卵重量及卵径大小，小型卵的克卵数（卵粒数/克）更高。典型克卵数值如下（不同规格品系数据见第3.2.1节）：小卵型：＞300 000卵粒/克；中卵型：250 000～300 000卵粒/克；大卵型：＜250 000卵粒/克。

另一种方法可采用胚胎计数法，即仅统计每克产品中的完整卵数量。

（3）孵化率（H%）（见附录10）

指在标准孵化条件下，100枚完整卤虫卵于标准孵化时间内所孵化出的无节幼体数量；该指标计入卵的杂质（如破碎卵壳、沙粒、盐分等），仅反映完整卵的孵化能力。该指标反映：

- 滞育终止程度：即便在适宜孵化条件下，处于滞育状态的卵也不会孵化（见第1.5.4节）。
- 卵内能量储备：因加工或储存不当、亲代所受环境或基因型条件影响，可能导致能量不足以合成足量甘油来实现破壳孵化（见第1.5.2节）。
- 自然存在的或由于加工/储存不当导致的死亡、无活力、流产胚胎数量。

孵化率测定通常仅计入被视为“已孵化卵”的自由游动的无节幼体。但在24小时标准孵化时间内，并非所有孵化胚胎都能发育至无节幼体阶段，部分可能仍处于伞状幼体阶段。为更全面评估样本孵化潜力，有时将这些伞状幼体也计入，所得结果称为“孵化率+”（H+%）。H+%与H%的差值可反映相对延迟孵化的卵数量。

（4）孵化效率（HEff）（见附录10）

指在标准孵化条件下，1克干制卵产品于标准孵化时间内产生的无节幼体数量。该指标针对即用型商业产品，产品价格可直接关联其孵化产出量，具有实际应用价值。该指标反映：

- 孵化率；
- 每克产品的胚胎（完整卵）计数。此参数受以下因素影响：

–卵产品中除完整卵外的其他组分（如空壳、盐分、沙粒、卵含水量）；

–个体干重（小型的克卵数更多）。

因此可通过“孵化率 × 胚胎数”计算每克卵产品的无节幼体产量（即孵化效率）。类比H+%计算方法，亦可计算HEff+值。

（5）孵化速率（见附录10）

指从卵开始水合（即孵化启动）至无节幼体释放（即孵化完成）所需时长。该指标不以单一数值表示，而是记录多个时间节点，如T_{10}（10%可孵化卵完成孵化所需时间）、T_{90}（90%可孵化卵完成孵化所需时间）、T_{100}（最大孵化率，即可孵化卵完成孵化所需时间）。通过孵化速率数据可计算最佳孵化时间，以获取含最高能量储备的新鲜Ⅰ期无节幼体。

孵化同步性指大多数无节幼体孵出的时间跨度，通常计算T_{90}与T_{10}的差值（即$Ts = T_{90} - T_{10}$）。高同步性可确保短时间内获得最大量Ⅰ期无节幼体；若同步性差，则需对同一批卵孵化进行多次采收，以避免在T_{90}或T_{100}单次采收时获得Ⅰ-Ⅱ-Ⅲ期的混合群体。

（6）孵化产量

指在标准孵化条件下，1克干制卤虫卵产品于标准孵化时间内所产生的无节幼体干重生物量；优质产品每克卵可产出约600毫克无节幼体干重。孵化产量的计算公式为：孵化效率 × Ⅰ期无节幼体个体干重。

孵化效率指标仅反映无节幼体产出数量，而不涉及与品系特性相关的体型大小。孵化产量指标关联每克卵产品可为捕食者提供的饵料生物总量（参见食物转化率计算）。尽管实际应用中常采用基于无节幼体湿重的活体生物量，但湿重测定难以标准化，故干重是表征投喂量的更具重现性的参数。

根据上述孵化指标定义及生物学测量参数间的相关性，卤虫卵产品的部分孵化质量指标与其所属品系的生物学特征存在直接关联（表3-5）。其他关

表3-5　小型卵（VC：越南永州）、**中型卵**（GSL：美国大盐湖）**和大型卵**（BY：俄罗斯大亚罗沃耶湖）**品系卤虫卵的相关生物学测定值特性**

卤虫品系	卵径（微米）	Ⅰ期无节幼体体长（微米）	卵粒数（个/克）	胚胎数（完整卵/克）	%空壳	HEff（幼体数/克）	H%	幼体个体干重（微克）	孵化产量（毫克）
VC（小型卵）	239	472*	333 211**	322 566	3.19	285 342**	88.46	1.65*	471
GSL（中型卵）	248	483	309 444	273 780	11.53	253 000	92.41	2.40	607
BY（大型卵）	262	498*	260 428**	240 442	7.68	204 665**	85.12	3.30*	675

注：*表示参数与卵径呈正相关；**表示参数与卵径呈负相关。H%＝孵化率；HEff＝孵化效率。

资料来源：作者整理（LAARC）。

系则更为复杂，例如即便孵化效率较低，大型卵（如俄罗斯大亚罗沃耶湖品系）仍可能比小型卵（如越南永州品系）获得更高的孵化产量。

3.2.3 （后）无节幼体的营养质量

3.2.3.1 生物饵料的营养组成与消化率

几乎所有海洋鱼类及多数淡水鱼类的幼体，以及甲壳类幼体的开口饵料均依赖活体生物。相较于单纯投喂人工饲料，在饲喂方案中加入活饵能显著提升养殖对象的生长速度和存活率。对此现象的解释包括：活体生物提供的化学与视觉刺激，以及食物组成与营养质量相关的诸多因素（如蛋白质结构与消化率等）。虽然活饵也是外源消化酶的来源，但其对鱼类幼体消化过程的影响仍存争议。

生物饵料的整体营养质量取决于碳水化合物、蛋白质和脂类的含量及营养平衡，即其近似组成。如本节后续所述，在卤虫孵化及后续发育过程中，蛋白质、脂类、碳水化合物及灰分的含量会发生显著变化。表3-6综合展示了初孵大盐湖卤虫*A. franciscana*无节幼体的常量营养素、维生素及矿物质组成情况。

表3-6　初孵大盐湖卤虫*Artemia franciscana*的常量营养素、维生素和矿物质含量

常量营养素（克/千克干重）	**数值**
总氨基酸（TAA）	471 ～ 503
氮	85 ～ 102
蛋白质/氮系数	4.7 ～ 5.6
可溶性氨基酸（%）	54 ± 4
游离氨基酸（%）	9 ～ 10
总脂肪（TL）	102
极性脂（%）	31
中性脂（%）	69
总脂肪酸	119
糖原	74 ～ 96
灰分	90
维生素（毫克/千克干重）	**数值**
维生素A（视黄醇）	0
维生素A前体（类胡萝卜素）	630 ～ 750

续表

维生素（毫克/千克干重）	数值
维生素B_1（硫胺素）	4.2
维生素B_2（核黄素）	37
维生素B_3（烟酸）	159
维生素B_6（吡哆醇）	28
维生素B_7（生物素）	4.5
维生素B_9（叶酸）	14
维生素B_{12}（钴胺素）	0
维生素C（抗坏血酸）	798
宏量矿物质（克/千克干重）	**数值**
磷	12 ～ 19
钙	1.9 ～ 2.0
镁	2.0 ～ 5.0
微量矿物质（克/千克干重）	**数值**
碘	0.5 ～ 4.6
锰	4 ～ 30
铜	7 ～ 40
锌	120 ～ 310
硒	2.2
铁	63 ～ 130

资料来源：Hamre，K.、Yú Fera，M.、Rønnestad，I.、Boglione，C.、Conceiçã，L.E.C.和Izquierdo，M.。2013。《鱼类仔鱼营养与饲料配方：仔鱼培育发展中的知识空白与瓶颈》。水产养殖综述，5（增刊1）：S26–S58。https://doi.org/10.1111/j.1753-5131.2012.01086.x

Hamre，K.、Fera，M.Y.、Rønnestad，I.、Boglione，C.、Conceição，L.E.和Izquierdo，M.。2002。《摄食天然浮游动物或卤虫的大西洋庸鲽仔鱼的营养组成与变态成功率》。水产养殖营养，8（2）：139–148。https://doi.org/10.1046/j.1365-2095.2002.00201.x

Hamre，K.、Holen，E.和Moren，M.。2007。《大西洋庸鲽仔鱼的体色形成与眼位迁移：新发现与假说》。水产养殖营养，13（1）：65–80。https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2007.00467.x

Hamre，K.、Erstad，B.、de Kok，J.、Norberg，B.和Harboe，T.。2020。《卤虫培养3～4天后营养组成的变化及投喂继续培养卤虫对大西洋庸鲽仔鱼生长表现的影响》。水产养殖营养，26：1542–1554。https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/anu.13101

鱼虾幼体因其生长潜力巨大且能量代谢过程中氨基酸动员程度高，对膳食氨基酸的需求量较大。研究表明，在发育早期阶段，幼体对游离氨基酸

（FAA）的吸收速率及保留效率均显著高于多肽类物质。游离氨基酸和小肽通常具有水溶性，无需预先消化即可被肠道高效吸收，因此可视为预消化膳食蛋白。与配合饲料不同，卤虫无节幼体含有高比例的水溶性蛋白（占总氮量的67%；表3-7）及小肽，这些成分易被捕食者幼体消化。此外，卤虫的不溶性组分同样表现出高消化率（达71%），据此估算完整卤虫无节幼体的消化率最高可达84%，而人工配合饲料的消化率通常显著偏低（表3-8）。

表3-7　卤虫、桡足类和配合饲料中水溶性及水不溶性粗蛋白的比例

样品	水溶部分（%）	水不溶部分（%）
卤虫（无节幼体）	67	33
哲水蚤（桡足类）	54	46
鱿鱼粉	11	89
鱼粉	17	83
燕麦粉	11	89

资料来源：Tonheim，S.K.、Nordgreen，A.、Høgøy，I.、Hamre，K.和Rønnestad，I.。2007。《几种常见鱼类仔鱼饵料及饲料原料中水溶性和水不溶性蛋白组分的体外消化率》。水产养殖，262（2–4）：426–435。https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2006.10.030

表3-8　生物饵料和鱼类开口饲料原料的体外消化率

样品	水溶部分的消化率（%）			水不溶部分的消化率（%）			总消化率（%）		
	0小时	1小时	12小时	0小时	1小时	12小时	0小时	1小时	12小时
卤虫（无节幼体）	37	66	91	17	46	71	30	59	84
哲水蚤（桡足类）	93	88	96	9	45	72	54	68	87
鱿鱼粉	79	85	90	7	42	75	15	47	77
鱼粉	56	99	103	6	46	71	15	55	77
燕麦粉	57	71	91	6	21	43	12	27	49
蛋白质被膜饲料							1	29	53
蛋白质被膜饲料的混合原料							8	54	74

注：本研究中的消化率以蛋白源经蛋白酶处理后、再用三氯乙酸沉淀未消化蛋白后可溶性组分中氮所占百分比表示。对于每一种分析组分，分别在加入蛋白酶后的0、1和12小时采集样品进行消化率分析。

资料来源：Tonheim，S.K.、Nordgreen，A.、Høgøy，I.、Hamre，K.和Rønnestad，I.。2007。《几种常见鱼类仔鱼饵料及饲料原料中水溶性和水不溶性蛋白组分的体外消化率》。水产养殖，262（2–4）：426–435。https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2006.10.030

3.2.3.2 蛋白质与氨基酸

饲料蛋白质的质量至关重要。研究表明，在鱼虾幼体饲料中添加中低水平的高消化率蛋白质，可显著提高鱼虾的存活率并促进生长。

卤虫蛋白质含量的测定可采用两种方法：总水解氨基酸（TAA）测定法和氮分析法。TAA法无法检测半胱氨酸、胱氨酸和色氨酸，因此会低估蛋白质含量。采用氮分析法时，需先测定氮含量，再乘以标准氮-蛋白质转换系数（即琼斯系数）获得总蛋白量。动物蛋白通常按N×6.25计算，但实际每种生物体均有其特定琼斯系数。研究发现卤虫无节幼体的氮-蛋白质系数为4.7，而发育期卤虫为5.3（Hamre等，2013，2020）。

卤虫的蛋白质含量在卵和伞状幼体阶段为47% ～ 51%，并随发育进程逐渐降低。由于不同卤虫种及品系的卵和Ⅰ期无节幼体的大小存在差异（见第1.4.1节），单个无节幼体所含蛋白质总量亦存在差异（表3-9），大型孤雌生殖品系个体所含蛋白质，分别高于中小型旧金山湾或大盐湖卤虫*A. franciscana*品系。

表3-9 不同卤虫种群在盐度35克/升条件下孵化的Ⅰ期无节幼体粗蛋白含量

卤虫种群	蛋白质（微克/个）
巴西Macau（MAC）	1.12
越南永州（VC）	1.00
美国大盐湖（GSL）	1.19
美国旧金山湾（SFB）	0.91
希腊迈加伦恩博隆（Megalon Embolon，MEG）	1.56
纳比米亚斯瓦科普蒙德（Swakopmund，SWA）	1.38

注：MAC、VC、GSL和SFB为*A. franciscana*卤虫品系，MEG和SWA为孤雌生殖卤虫品系。

资料来源：Helland，S.、Triantaphyllidis，G.V.、Fyhn，H.J.、Evjen，M.S.、Lavens，P.和Sorgeloos，P.。2000。《卤虫游离氨基酸库和蛋白质含量的调节》。海洋生物学，137：1005–1016。https://link.springer.com/article/10.1007/s002270000409

不同卤虫品系的蛋白质总氨基酸组成表现出高度相似性，表明其并非像脂肪酸那样受环境因素决定。然而，鉴于不同品系卤虫卵的卵径存在特异性差异，脱壳卵中游离氨基酸（FAA）总含量在卤虫种群间可能具有差异性（表3-10）。虽然难以归纳出普遍规律，但品系间FAA含量的差异在初孵无节幼体中有时会减小（表3-11）。

表3-10　不同种群卤虫脱壳卵的游离氨基酸组成（皮摩尔/个）

氨基酸	卤虫种群					
	MAC	VC	GSL	SFB	MEG	SWA
必需氨基酸						
亮氨酸	1.0	1.5	1.1	1.7	5.4	2.4
缬氨酸	1.1	1.7	1.4	1.6	6.0	2.7
异亮氨酸	0.6	1.2	0.8	1.1	3.0	1.9
赖氨酸	5.8	3.8	2.7	4.2	9.9	7.0
苏氨酸	1.9	2.4	2.6	2.3	9.6	3.0
精氨酸	微量	2.1	1.6	1.1	7.3	3.4
苯丙氨酸	微量	0.5	0.9	1.5	3.8	1.8
组氨酸	4.3	2.4	2.0	3.0	14.0	6.5
酪氨酸	1.7	1.0	1.5	3.4	4.3	1.9
甲硫氨酸	微量	微量	0.1	微量	微量	微量
非必需氨基酸						
丙氨酸	18.6	32.6	24.9	28.8	80.7	63.1
丝氨酸	8.4	8.3	8.3	9.2	19.5	11.3
谷氨酸	7.6	19.4	5.8	19.9	42.5	23.1
甘氨酸	7.6	8.4	7.8	14.6	49.7	28.5
牛磺酸	10.3	18.1	11.5	32.0	194.3	103.6
脯氨酸	3.2	6.3	5.6	5.7	24.0	7.3
天冬氨酸	11.0	19.3	5.4	20.8	61.7	20.1
α-氨基丁酸	微量	微量	0.1	微量	微量	0.4
谷氨酰胺	微量	1.2	0.8	0.5	0.8	微量
磷酸丝氨酸	微量	微量	微量	微量	微量	微量
游离氨基酸总量	82	131	85	151	536	288
必需氨基酸占比（%）	20.0	13.2	17.4	13.0	14.5	13.7

注：FAA＝游离氨基酸；GSL = 美国大盐湖；MAC = 巴西马考市；MEG = 希腊迈加伦恩博隆；SFB = 美国旧金山湾；SWA＝纳米比亚斯瓦科普蒙德；VC = 越南永州。

资料来源：Helland，S.、Triantaphyllidis，G.V.、Fyhn，H.J.、Evjen，M.S.、Lavens，P.和Sorgeloos，P.。2000。《卤虫游离氨基酸库和蛋白质含量的调节》。海洋生物学，137：1005–1016。https://link.springer.com/article/10.1007/s002270000409

表3-11　不同卤虫种群Ⅰ期无节幼体的游离氨基酸组成（皮摩尔/个）

氨基酸	卤虫种群					
	MAC	VC	GSL	SFB	MEG	SWA
必需氨基酸						
亮氨酸	3.6	3.7	4.0	3.1	6.9	4.7
缬氨酸	5.2	4.2	5.3	4.4	11.2	5.4
异亮氨酸	2.8	2.3	2.5	2.5	4.0	2.5
赖氨酸	11.9	14.2	15.3	9.5	15.4	12.5
苏氨酸	17.3	12.5	18.6	12.0	30.7	18.0
精氨酸	20.5	12.6	20.2	15.5	33.6	21.4
苯丙氨酸	2.7	2.2	2.7	2.4	3.7	3.2
组氨酸	13.6	18.2	15.3	13.3	18.6	13.6
酪氨酸	10.6	5.3	12.8	6.8	11.3	11.0
甲硫氨酸	微量	微量	0.4	1.3	微量	微量
非必需氨基酸						
丙氨酸	22.1	19.6	25.8	20.9	50.0	48.6
丝氨酸	37.4	32.7	39.2	26.7	49.2	49.8
谷氨酸	30.3	23.8	39.2	26.6	66.4	61.9
甘氨酸	36.5	34.7	48.8	32.6	116.2	123.7
牛磺酸	48.0	29.5	57.9	41.5	149.0	172.3
脯氨酸	15.5	14.9	79.1	21.0	70.1	27.7
天冬氨酸	29.9	25.8	31.8	27.2	54.4	33.4
α-氨基丁酸	0.7	微量	1.0	微量	1.1	微量
谷氨酰胺	3.2	28.8	8.1	2.3	微量	1.1
磷酸丝氨酸	微量	微量	10.4	5.2	30.3	22.6
游离氨基酸总量	**312**	**312**	**431**	**306**	**722**	**634**
必需氨基酸占比（%）	**28.2**	**26.0**	**22.5**	**26.5**	**18.7**	**14.7**

注：FAA＝游离氨基酸；GSL＝美国大盐湖；MAC＝巴西马考市；MEG＝希腊迈加伦恩博隆；SFB＝美国旧金山湾；SWA＝纳米比亚斯瓦科普蒙德；VC＝越南永州。

资料来源：Helland，S.、Triantaphyllidis，G.V.、Fyhn，H.J.、Evjen，M.S.、Lavens，P.和Sorgeloos，P.。2000。《卤虫游离氨基酸库和蛋白质含量的调控》。海洋生物学，137：1005–1016。https://link.springer.com/article/10.1007/s002270000409

对越南永州*A. franciscana*品系（图3-6）早期发育中的卤虫无节幼体个体蛋白质与游离氨基酸含量关系进行的分析表明，随着卤虫卵发育进入伞状幼体期并完成孵化，单个卵的游离氨基酸含量会增加约3倍，随后到无节幼体Ⅲ期时逐渐降低。相对于蛋白质含量而言，FAA总量在卤虫卵中约占1.5%，至伞状幼体后期和无节幼体阶段则升至约4%。孵化后，单个无节幼体的FAA含量总体呈下降趋势，但部分氨基酸（如天冬氨酸和谷氨酸）可出现短暂峰值。氨基酸类似物牛磺酸在卤虫发育过程中持续积累，孵化后72小时其含量可占FAA总量的50%左右。总体而言，就营养学角度评估，卤虫体内必需氨基酸水平通常不构成主要限制因素。

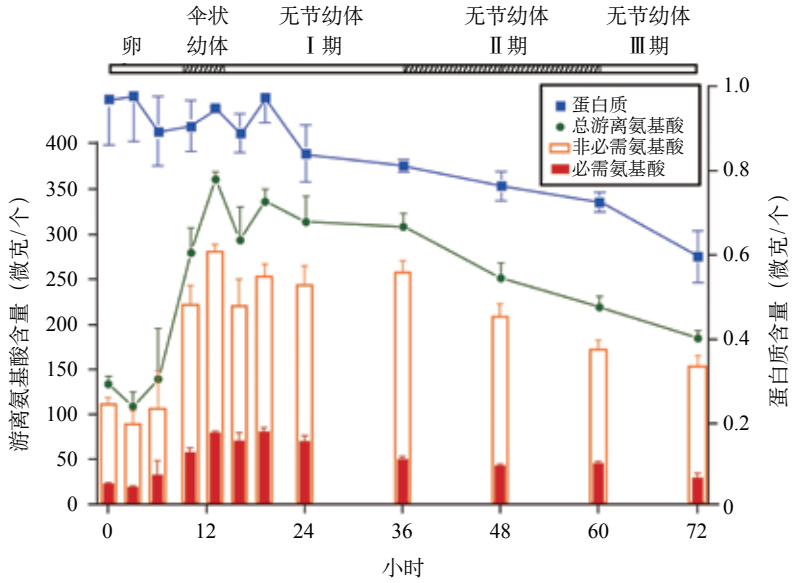


图3-6　*Artemia franciscana*卤虫在35克/升盐度下孵化及早期发育过程中游离氨基酸（FAA）与蛋白质含量变化

资料来源：Helland, S.、Triantaphyllidis, G.V.、Fyhn, H.J.、Evjen, M.S.、Lavens, P.和Sorgeloos, P.。2000。《35克/升盐度下越南永州旧金山卤虫孵化及早期发育期间游离氨基酸库和蛋白质含量的调节》。海洋生物学，137：1005–1016。https://link.springer.com/article/10.1007/s002270000409

3.2.3.3　脂类与脂肪酸

20世纪70年代末至80年代初，随着鱼虾育苗的规模扩大，育苗场在更换卤虫卵产品来源时频现异常问题，由此引发了学界对卤虫无节幼体的一项重要营养特性的关注。美国、欧洲和日本学者研究证实，使用不同地理来源（品系）的卤虫会导致鱼虾的营养出现显著差异。即使使用同一卤虫品系的不同批

次的卤虫卵时，育苗效果亦可能悬殊，这更显示出该问题的严峻性。日本及多学科国际卤虫研究计划表明，卤虫无节幼体中必需脂肪酸EPA的浓度是决定其对多种海水鱼类和甲壳类幼体营养价值的关键因素。同一地理来源的不同批次卤虫因EPA含量差异，在饲喂巴氏拟隆首水蚤（*Mysidopsis bahia*）时呈现显著不同的生长和存活率。卤虫EPA含量不仅存在品系间差异，甚至同品系不同批次间波动显著（表3-12；见第1.4.6和第3.1.7节），其根本原因在于繁殖期成虫群体所摄食的初级生产者（微藻）生化组成存在波动。卤虫EPA和其他ω3高不饱和脂肪酸（如DHA）含量会显著影响甲壳类或鱼类幼体的多项生理指标。大量针对鱼类和甲壳类的研究表明，这些指标包括：存活率、生长、鳔充气率、抗应激存活能力、比目鱼等体色色素沉着，以及整体发育状况。商业供应的高EPA含量的卤虫卵资源有限，因此价格更为昂贵。故此类高EPA卤虫卵应仅限于需要投喂小型初孵无节幼体的特定饲喂阶段使用。

表3-12　不同卤虫种群品系的20:5ω3（EPA）含量

卤虫种群	20:5ω3含量范围（毫克/克干重）
越南永州	14.0 ～ 21.8
美国大盐湖	0.6 ～ 2.9
俄罗斯大亚罗沃耶湖	0.7 ～ 4.9
中国艾比湖	2.9 ～ 14.5

注：数值以范围表示（毫克/克干重），数据基于若干随机样本，来源于由比利时根特大学水产养殖实验室与卤虫参考中心分析测定的样本。该结果未必涵盖相关卤虫种群中可能存在的最大范围。

资料来源：作者整理（LAARC）。

采用薄层色谱法对大盐湖卤虫*A. franciscana*不同发育阶段（包括卤虫卵、Ⅰ期无节幼体、Ⅱ期无节幼体）的脂质组成（如溶血磷脂、磷脂、色素、胆固醇及其他中性脂质）及其动态变化进行了系统分析（表3-13）。以磷脂酰胆碱（PC）为例，其在卤虫卵中含量较高（约占总脂质的22%），至后续无节幼体阶段逐渐降低至约13%。磷脂酰乙醇胺（PE）与磷脂酰甘油（PG）在这三个阶段的合计占比稳定维持在9% ～ 10%；而磷脂酰丝氨酸（PS）含量虽处于极低水平（≤1%），但保持稳定。值得注意的是，部分溶血磷脂在从卤虫卵发育至Ⅱ期无节幼体的过程中呈现上升趋势。

卤虫中性脂质含量高，其在卤虫卵中占总脂质的80%、在无节幼体中占总脂质的60%，表明这些在卤虫发育阶段储存的脂质具有高的能量可利用性。在卤虫卵中，中性脂质的三酰甘油（TAG）占比达67%，随着发育至Ⅰ期和Ⅱ期无节幼体阶段，该比例降至47% ～ 49%。此外，卤虫卵中游离脂肪酸（FFA）

与二酰甘油（DAG）含量极低（分别占中性脂质总量的3.7%和2.0%），但在两个无节幼体阶段均显著上升至20%（FFA）与6%（DAG）。相比之下，胆固醇与胆固醇酯水平在卤虫发育过程中变化幅度较小。

表3-13　美国大盐湖*Artemia franciscana*卤虫卵、Ⅰ期和Ⅱ期无节幼体极性脂和中性脂类型

类型	卵	Ⅰ期无节幼体	Ⅱ期无节幼体
极性脂		占总脂肪（%）	
溶血卵磷脂酰胆碱	0.9 ± 0.6	1.8 ± 0.4	2.6 ± 0.5
磷脂酰肌醇＋鞘磷脂＋溶血磷脂酰乙醇胺	4.6 ± 1.5	4.0 ± 1.0	4.3 ± 1.1
磷脂酰丝氨酸	0.8 ± 0.1	0.6 ± 0.2	1.0 ± 0.3
磷脂酰胆碱	21.8 ± 5.6	12.9 ± 2.2	12.7 ± 1.3
磷脂酰乙醇胺＋磷脂酰甘油	9.7 ± 2.8	8.6 ± 0.9	9.3 ± 1.3
心磷脂	1.8 ± 0.7	3.9 ± 0.8	4.1 ± 0.9
中性脂		占总中性脂（%）	
胆固醇酯	21.3 ± 7.2	20.3 ± 8.1	20.7 ± 11.1
三酰甘油	67.0 ± 3.5	49.0 ± 3.5	47.3 ± 6.6
游离脂肪酸	3.7 ± 0.6	20.0 ± 1.0	20.3 ± 1.1
胆固醇	5.7 ± 2.9	4.0 ± 1.7	4.7 ± 2.1
二酰甘油	2.0 ± 1.0	6.3 ± 1.5	6.3 ± 1.5

资料来源：Lopalco，P.、Lobasso，S.、Alfama Lopes Dos Santos，R.M.、Van Stappen，G.和Corcelli，A.。2019。《卤虫从卵发育至前两个无节幼体阶段过程中脂质谱的变化》。生理学前沿，9。https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01872

基于上述结果，现已开发出针对高不饱和脂肪酸缺乏型卤虫品系的脂质改良技术（详见第3.1.7节）。通过联合使用富含高不饱和脂肪酸的中性脂质乳剂与大豆卵磷脂，或使用富含高不饱和脂肪酸的磷脂类物质，已成功使强化后的卤虫无节幼体中高不饱和脂肪酸与极性脂质水平的同步提升。磷脂作为生物膜的结构组分，在快速生长的幼体阶段需求旺盛。其不仅参与脂质的消化吸收过程，还介导脂质由肠道至全身的转运。多项证据表明，幼体自身合成磷脂的速率难以满足其高代谢需求，因此必须通过饵料进行外源性补充。

3.2.3.4　甘油与碳水化合物代谢

干制卤虫卵中甘油含量约占卵干重的5%（Clegg，1962）。随着无节幼体

形成，胚胎内甘油含量持续累积，糖原水平同步上升（表3-14）。该糖原来源于海藻糖，以非还原性葡萄糖二糖形式存在，其在卤虫卵中的浓度较高（占干重的15% ～ 17%），是水合状态下能量代谢与碳水化合物合成的主要储能物质。如第1.5.2节所述，甘油浓度升高导致卵内渗透压增大，其最终破裂时机与孵化液盐度相关，低盐度环境下更易引发早期破膜。

表3-14　卤虫卵和初孵卤虫无节幼体的甘油和糖原含量

样品	甘油（%，以干重计）	糖原（%，以干重计）
全卵（壳+胚胎）	4.91	1.13
壳	0.19	0.04
胚胎	6.30	1.86
初孵无节幼体	4.85	15.1

资料来源：Clegg，J.S.。1962。《卤虫*Artemia franciscana*休眠卵中的游离甘油及其在发育过程中的消耗》。生物学通报，123：295–301。https://www.journals.uchicago.edu/doi/pdf/10.2307/1539275

3.2.3.5　灰分

卤虫部分矿物质含量如表3-6所示。目前对海洋生物矿物质需求的认识尚不充分，学界普遍认为其可通过吸收海水来满足。关于卤虫矿物质组成的主要关注点在于，卤虫是否能够满足淡水环境中鱼类或甲壳类幼体的需求。除碘和锌外，卤虫所含微量元素水平都比较充足。通过将碘化钾溶解于强化水体中可有效提升碘浓度，亦可将碘直接添加至强化乳剂中。类似地，使用锌盐可提高锌的含量。

3.2.3.6　维生素

大盐湖*A. franciscana*卤虫初孵无节幼体的维生素水平见表3-6。参照仔稚鱼和成鱼的营养需求，除硫胺素与钴胺素外，这些未经强化的卤虫所含多数水溶性维生素均达充足水平。脂溶性维生素中，维生素A、维生素E及作为维生素A前体的类胡萝卜素，已在生物饵料中得到明确表征。未经营养强化的生物饵料通常不含维生素A，但卤虫体内含有大量角黄素。卤虫卵中存在一种稳定的水溶性维生素C形态（即抗坏血酸-2-硫酸酯），该衍生物在孵化过程中水解为游离抗坏血酸；不同品系初孵卤虫的抗坏血酸含量范围为310 ～ 520微克/克干重（Merchie等，1997）。尚未见关于未强化卤虫中维生素D和维生素K含量的数据，但通过使用维生素强化乳液，可有效调控其在卤虫体内的含量。

3.2.3.7　酶

卤虫胚胎发育期及无节幼体中存在多种蛋白水解酶，这些外源酶对水产动物幼苗消化道消化吸收卤虫至关重要。鉴于多数开口期水产动物幼体消化酶水平较低且人工饲料适口性不及生物饵料，该发现具有重要意义。研究证实，

A. franciscana 卵及幼体中的半胱氨酸蛋白酶占其总蛋白酶活性90%以上。该酶在卤虫发育中具有多重功能：在胚胎期参与卵黄利用，在蜕皮时作为孵化酶促进角质层剥离，还在无节幼体摄食时发挥消化酶作用。

此外，*A. franciscana* 的Ⅰ期和Ⅱ期幼体发育阶段，在其孵化介质中可检测到大量丝氨酸蛋白酶和*N*-乙酰-β-氨基葡萄糖苷酶（一种特征明确的几丁质降解酶）。其中丝氨酸蛋白酶与卤虫幼体早期发育阶段合成的两种消化酶高度相似（Warner等，1995；Warner和Matheson，1998）。在幼体发育过程中，丝氨酸蛋白酶向孵化介质中的分泌或释放是蜕皮和脱壳的必要条件，且该过程似乎依赖于表皮层下半胱氨酸蛋白酶的活性。针对希腊沿海盐场多个孤雌生殖卤虫品系，研究者系统测定了脱壳卵及各龄期幼体的酶活水平（表3-15）。

表3-15　希腊米洛斯（Milos）、波利赫尼托斯（Polychnitos）和梅索隆吉（Messolongi）盐场孤雌生殖卤虫种群不同发育阶段的酶活力

酶（毫摩尔/100微克干重，5分钟）	脱壳卵	Ⅰ期无节幼体	Ⅱ期无节幼体	Ⅲ期无节幼体
碱性磷酸酶	0.57	27.19	66.09	68.99
胰蛋白酶	0.00	0.00	0.00	3.12
亮氨酸氨基肽酶	12.84	101.77	140.90	92.45
缬氨酸氨基肽酶	2.06	11.74	24.88	16.56
胱氨酸氨基肽酶	0.38	9.07	21.55	13.83
脂肪酶（C14）	0.20	0.00	4.63	3.12
酯酶脂肪酶（C8）	1.69	12.85	18.50	15.81
酯酶（C4）	2.07	24.39	45.47	32.43
酸性磷酸酶	12.43	22.19	28.36	19.76
β-半乳糖苷酶	10.95	77.27	133.62	79.59
β-葡萄糖苷酶	1.89	12.88	21.78	14.71
N-乙酰-β-氨基葡萄糖苷酶	11.63	19.54	35.17	25.62
α-岩藻糖苷酶	5.24	15.63	26.42	15.71
萘酚-AS-BI-磷酸水解酶	0.95	5.16	14.99	8.25

资料来源：Moraiti-Ioannidou，M.、Castritsi-Catharios，J.、Miliou，H.和Kotzamanis，Y.P.。2007。《适用于水产养殖的五个希腊卤虫种群的脂肪酸组成与生物学测量特征》。水产养殖研究，38（15）：1664–1672。https://doi.org/10.1111/J.1365-2109.2007.01835.X

3.2.3.8　分析方法

卤虫的营养成分可通过国际标准化组织（ISO，International Organization for Standardization）认证的常规分析方法进行测定。表3-16汇总了最常用的生化分析方法及其原理，并附有相关文献参考。

表3-16　不同营养成分的分析方法

分析成分	分析方法-原理	参考文献
干物质	重量法(103 ℃，4小时)	ISO 6496:2001
粗蛋白*	凯氏定氮法 LECO氮分析仪	García–Ortega等（1998） Hamre和Mangor–Jensen（2006）
总氨基酸	水解、衍生化和HPLC分析	Espe等（2006）
游离氨基酸	HPLC和柱后衍生化	Srivastava等（2006）
总脂肪	Folch法	Folch等（1957）
脂肪酸	甲基化提取和GC/FID	Lepage和Roy（1984）
脂质类别	HPTLC	Jordal等（2007）
总碳水化合物	苯酚–硫酸反应	García–Ortega等（1998）
糖原	水解和光谱检测	Hemre等（1989）
体外消化率	改良Babinszky等（1990）过滤方法	García–Ortega等（1998）
硫胺素=维生素B_1	HPLC	CEN（2003a）
核黄素=维生素B_2	HPLC	CEN（2003a）
烟酸=维生素B_3	微生物学方法	Mæland等（2000）
叶酸=维生素B_9	微生物学方法	Mæland等（2000）
总维生素B_6	HPLC	CEN（2005）
维生素C	HPLC	Maeland和Waagbø（1998）
总维生素A	HPLC	CEN（2000a）
总维生素D	HPLC	CEN（1999）
总维生素E	HPLC	CEN（2000b）
总维生素K	HPLC	CEN（2003b）
微量矿物质	ICP–MS	Julshamn、Dahl和Eckhoff（2001）
宏量矿物质	ICP–MS	Liaset、Julshamn和Espe（2003）
碘	ICP–MS	Julshamn、Dahl和Eckhoff（2001）
总蛋白酶	对Walter（1984）匀浆和超声处理进行改良的酪蛋白方法	García–Ortega等（1998）
胰蛋白酶活力	改良自Hofer、Köck和Bergmeyer	García–Ortega等（1998）

*通常蛋白质以$N \times 6.25$（琼斯系数）计算；对于Ⅰ期和Ⅱ期卤虫无节幼体而言，以$N \times 4.7$计算；对于生长期卤虫而言，以$N \times 5.3$计算。

注：GC/FID=气相色谱–火焰离子化检测；HPLC=高效液相色谱；HPTLC=高效薄层色谱；ICP–MS=电感耦合等离子体质谱。

资料来源：Hamre, K.、Erstad, B.、de Kok, J.、Norberg, B.和Harboe, T.。2020。《培育3～4天卤虫的营养成分变化，以及投喂该培育卤虫对大西洋庸鲽仔鱼生长性能的影响》。水产养殖营养，26：1542–1554。https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ anu.13101

3.2.4　孵化过程的微生物学特性（作者：Peter De Schryver）

3.2.4.1　引言

在针对卤虫孵化过程的微生物研究中，细菌是目前最重要乃至唯一的研究焦点。所投喂卤虫无节幼体的细菌质量是鱼虾幼体培育成功的关键因素。因此，对卤虫孵化过程中细菌的出现与增殖需持续监控。为此，需要建立适当的分析方法来评估孵化期间及孵化后水体和无节幼体中的细菌种群状况。

现有多种技术可用于样品细菌分析，各具特性与优劣。下文将简要介绍当前研究卤虫孵化液及无节幼体细菌组成的常用技术。

3.2.4.2　琼脂平板培养法

该法基于培养原理，将孵化液或卤虫无节幼体样本接种于营养琼脂平板，使样本中细菌在平板上生长。通过统计生长菌落数量，可估算待测样本的细菌总数，并换算为“菌落形成单位（CFUs）/毫升孵化液”或“CFUs/无节幼体”。

除允许多种细菌生长的非选择性琼脂培养基外，亦可采用具有选择性的琼脂培养基配方。其目的在于使样本中特定菌群生长，从而定性或定量评估目标菌群的存在状况及丰度。在卤虫孵化中，最常用的选择性琼脂培养基为硫代硫酸盐-柠檬酸盐-胆盐-蔗糖（TCBS）琼脂，用于评估样本中的弧菌数量（图版59）。


© LAARC

图版59　TCBS平板

琼脂平板法在微生物研究与环境监测（包括水产养殖业）中已有数十年应用历史。该方法因成本低廉、操作简便且耗时较短而得到广泛采用，但其主要缺陷是结果易被误判。首先，环境样本中平均仅有1%的细菌种群可在琼脂平板上生长，其余99%被视为“不可培养菌群”，此现象称为“平板计数异常”。在实践中，这意味着通过平板计数法测得的细菌数量平均被低估约100倍。其次，所谓选择性培养基往往不具备绝对的完全选择性，即非目标菌群液也可能在其中生长，而目标菌群亦可能无法全部生长，TCBS琼脂即是如此。因此，选择性培养基的结果应视为目标菌群的估算值。若在结果解读

时充分考虑上述两项局限，该方法仍具有重要应用价值。

目前，琼脂平板培养法是评估卤虫孵化液及无节幼体细菌学质量最常用的方法，这主要得益于其操作便捷且便于现场实施。然而，该方法的简易性极易使人产生“人人皆可操作”的错觉，往往导致对操作精确性和严谨性的要求被低估。不当的取样与样品储存、制备过程中的稀释误差，以及外来细菌污染等因素，均易导致检测结果失真。因此，必须采用标准化操作流程并严格执行。测定卤虫孵化液及卤虫无节幼体中细菌量的操作规程详见附录11。

3.2.4.3 16S rRNA基因扩增子测序

扩增子测序是一种基于分子检测与鉴定的细菌群落分析方法，无需培养过程。16S rRNA基因是常用标记基因，因其存在于所有细菌分类单元中，且同时包含保守区域和可变区域。保守区域确保样本中所有细菌均被纳入分析，而可变区域则支持对检出细菌进行系统发育分化分析。分析过程中会对样本中每个检出的细菌进行鉴定，最终获得分类学名称列表（亦称操作分类单元，OTU）。

简言之，16S rRNA基因扩增子测序首先提取样本中所有细菌的16S rRNA基因（即DNA）。随后通过聚合酶链式反应（PCR）对样本中所有提取的16S rRNA基因选定区域（或片段）进行扩增（即复制）。由此获得每个细菌的大量片段拷贝，原始样本中特定细菌的数量越多，其片段拷贝数也越高。然后通过测序流程确定每个拷贝的基因序列，最终得到海量已知片段序列（即原始读数数据）。在聚类步骤中，对相同拷贝进行判定与计数，从而明确不同片段序列的数量及其丰度。最后将每个不同序列与参考数据库比对，获取对应序列的分类学身份（即OTU）。最终输出结果为样本中检测到的不同OTU列表及其出现频率，据此可解析样本中微生物群落的组成结构（图3-7）。

尽管该方法已广泛应用于微生物学研究和环境监测领域，但其操作过程并不简便，耗时较长且成本高于琼脂平板培养法。因此在水产养殖应用中，该技术较少用于常规检测，主要局限于科研场景。但值得注意的是，由于众多学术研究机构和商业公司均可提供此项服务，实际获得此类分析的途径非常广泛。

该方法的主要缺陷在于无法对样本中检测到的OTU进行绝对定量。由于扩增步骤的限制，仅能获得相对丰度数据，即某OTU在细菌群落总量中所占百分比。因此无法获知样本中细菌总量及各类菌的具体数量。

理论上，特定类群的基因组丰度可转化为更直观的细胞数量，但这需要掌握该类群的倍性信息（即每个细胞所含基因组拷贝数）。传统观点认为原核生物多为单倍体（每个细胞含1个基因组拷贝），但近期多项研究发现存在寡倍体（每个细胞＜10个基因组拷贝）和多倍体（每个细胞＞10个基因组拷贝）

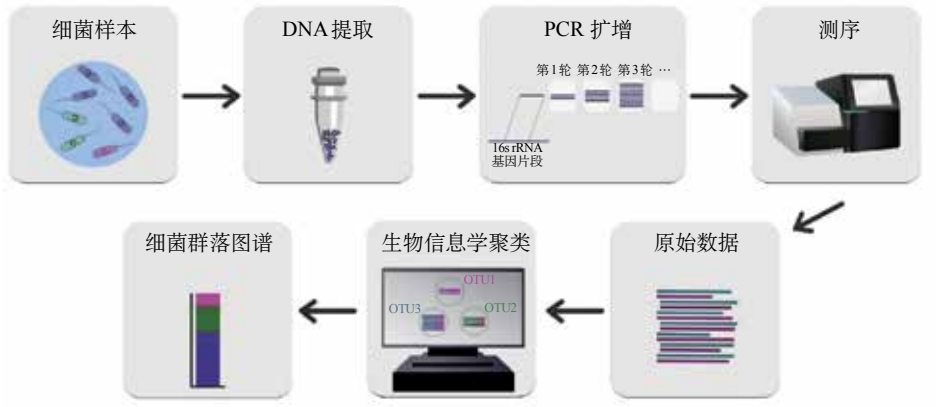


图3-7　细菌群落组成与结构研究的典型工作流程示意：样本DNA经提取后，采用PCR技术对标记基因序列（如16S rRNA基因片段）进行扩增并测序。原始测序数据通过生物信息学流程处理：（1）剔除错误及低质量数据；（2）构建反映群落的生物多样性（如操作分类单元）。最终生成的列联表可呈现细菌群落特征信息。

资料来源：Props, R.。2018。《天然与人为管理的淡水系统中微生物种群和群落动态：从方法开发到机制洞见》。比利时根特大学博士学位论文。282页。https://biblio.ugent.be/publication/8576485

Heyse, J.。2021。《识别水产养殖中微生物动态的驱动因素：从单细胞技术到宏基因组学》。比利时根特大学博士学位论文。206页。https://lib.ugent.be/catalog/pug01:8734215

的古菌和细菌，单倍体原核生物反而成为例外而非普遍规律。倍性校正极为困难，因此基因组丰度与细胞数量及生物量之间的精确换算仍是当前面临的挑战。

3.2.4.4　流式细胞术

流式细胞术是一种通过光学检测对样本中单个细菌进行计数的细菌群落分析技术，但无法提供细菌种类信息。其原理是将样本中每个细菌的细胞进行荧光标记后，使它们依次通过激光束进行检测（图3-8）。当激光束照射细胞时会产生光散射和荧光信号，通过检测这些信号实现细胞计数。由于该过程针对样本中的所有细菌实施，因此可获得细菌总量数据。该技术每秒可检测数千个细胞，数分钟内即可完成样本分析。除基础计数功能外，光散射和荧光信号还会被转换为电信号。由于这些信号会随检测细胞的表型特征（物理化学结构）差异而变化，流式细胞术不仅能区分不同表型特征的细菌群体及其数量，还可用于微生物群落特征分析。虽然流式细胞术在微生物研究和环境监测领域已是成熟技术，但应用于微生物群落特征分析仍属较新应用。特别是在水产养殖领域，该技术尚处于应用初期，目前仅有极少数服务商能提供相关检测服务。因此，尽管该技术潜力显著，其主要缺陷在于现阶段尚无法鉴定群落中的具体菌种，这对某些应用需求而言显然存在局限性。

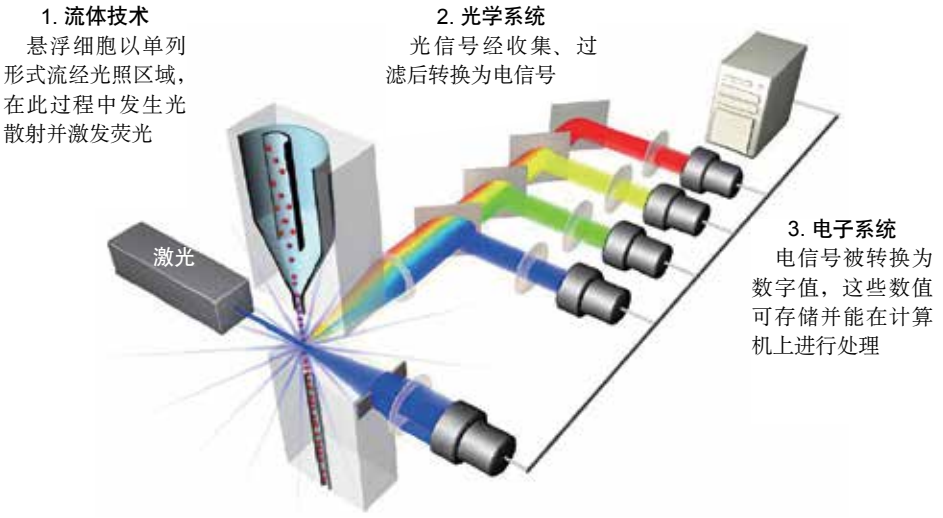


图3-8　流式细胞仪示意图

资料来源：赛默飞世尔科技-生命科学解决方案。

参考文献

Babinszky, L. van der Meer, J.M., Boer, H., den Hartog, L.A. 1990. An in vitro method for prediction of the digestible crude protein content in pig feeds. *J. Sci. Food Agric*., 50: 173–178.

Bardocz, T., Kovacs, E., Radics, F. & Sandor, Z. 1999. Experiments for the improved use of decapsulated *Artemia* cysts in intensive culture of African catfish larvae. *Journal of Fish Biology*, 55(sA): 227–232. https://doi.org/10.1111/J.1095-8649.1999.TB01058.X.

Bell, J.G. & Sargent, J.R. 2003. Arachidonic acid in aquaculture feeds: Current status and future opportunities. *Aquaculture*, 218(1–4): 491–499. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(02)00370-8.

CEN. 1999. Comité Européen de Normalisation. *Foodstuffs – Determination of vitamin D by high performance liquid chromatography - Measurement of cholecalciferol (D3) and ergocalciferol (D2)*. EN12821.

CEN. 2000a. Comité Européen de Normalisation. *Foodstuffs - Determination of vitamin A by high performance liquid chromatography - Part 1*: *Measurement of all-E-retinol and 13-Z-retinol*. EN 12823-1:2014.

CEN. 2000b. Comité Européen de Normalisation. *Foodstuffs - Determination of vitamin E by high performance liquid chromatography - Measurement of* α -, β -, γ - *and* δ *-tocopherol*. EN 12822:2014.

CEN. 2003a. Comité Européen de Normalisation. *Foodstuffs – Determination of Vitamin B1 by HPLC*. EN 14122.

CEN. 2003b. Comité Européen de Normalisation. *Foodstuffs - Determination of Vitamin K1 by HPLC*. EN14148.

CEN. 2005. Comité Européen de Normalisation. *Foodstuffs – Determination of vitamin B6 (including its glycosylated forms) by HPLC*. EN 14663.

Clegg, J.S. 1962. Free glycerol in dormant cysts of the brine shrimp *Artemia salina*, and its disappearance during development. *The Biological Bulletin*, 123: 295–301. https://www.journals.uchicago.edu/doi/pdf/10.2307/1539275.

Clegg, J.S., Zettlemoyer, A.C. & Hsing, H.H. 1978. On the residual water content of dried but viable cells. *Experientia*, 34: 734–735. https://doi.org/10.1007/BF01947290.

Clegg, J.S. & Conte, F. 1980. A review of the cellular and developmental biology of *Artemia*. In: G.P. Persoone, P. Sorgeloos, O. Roels & E. Jaspers, eds. *The brine shrimp*, *Artemia*, Vol. 2, pp. 11–54. Wetteren, Belgium, Universa Press.

Clegg, J.S. 2001. Cryptobiosis – a peculiar state of biological organization. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B*, 128(4): 613–624. https://doi.org/10.1016/S1096-4959(01)00300-1.

Clegg, J.S. & Trotman, C.N.A. 2002. Physiological and biochemical aspects of *Artemia* ecology. In: T.J. Abatzopoulos, J.A. Beardmore, J.S. Clegg & P. Sorgeloos, eds. *Artemia*: *Basic and Applied Biology*, pp.129–170. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.

Clegg, J.S. 2005. Desiccation tolerance in encysted embryos of the animal extremophile, *Artemia* 1. Integrative and Comparative Biology, 45(5): 715–724. https://doi.org/10.1093/ icb/45.5.715.

Cobo, M. de L., Wouters, R., Wille, M., Sonnenholzner, S. & Sorgeloos, P. 2015. Evaluation of frozen umbrella-stage *Artemia* as first animal live food for *Litopenaeus vannamei* (Boone) larvae. *Aquaculture Research*, 46: 2166–2173. https://doi.org/10.1111/ are.12372.

De Los Santos, C. Jr, Sorgeloos, P., Lavina, E. & Bernardino, A. 1980. Successful inoculation of *Artemia* and production of cysts in man-made salterns in the Philippines: In: G. Persoone, P. Sorgeloos, O. Roels & E. Jaspers, eds. The brine shrimp *Artemia*, pp. 159–163. *Vol. 3. Ecology*, *culturing*, *use in aquaculture*. Wetteren, Belgium, Universa Press. 456 pp. http://hdl.handle.net/10862/230.

Hai, T.N., Phuong, N.T., Hoa, N.V, Viet, L.Q., Khanh, L.V., Chau Tai Tao, C.T., Anh, N.T.N., Thao, N.T.T. & Sorgeloos, P. 2020. Promoting Coastal Aquaculture for Adaptation to Climate Change and Saltwater Intrusion in the Mekong Delta, Vietnam. *World Aquaculture*, 19–26.

Espe, M., Lemme, A., Petri, A. & El-Mowafi, A. 2006. Can Atlantic salmon (*Salmo salar*) grow on diets devoid of fish meal? *Aquaculture*, 255(1–4): 255–262. https://doi. org/10.1016/J.AQUACULTURE.2005.12.030.

FAO. 2003. *Inland water resources*, *and aquaculture service*. *Health management and biosecurity maintenance in white shrimp (Penaeus vannamei) hatcheries in Latin America*. No. 450. Rome. https://www.fao.org/3/y5040e/y5040e.pdf.

FAO. 2007. *Biosecurity priority area for interdisciplinary action*. *FAO biosecurity toolkit*. Rome. https://www.fao.org/3/a1140e/a1140e00.htm.

Folch, J., Lees, M. & Sloane Stanley, G.H. 1957. A simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissues. *The Journal of biological chemistry*, 226(1): 497–509. https://doi.org/10.1016/S0021-9258(18)64849-5.

García-Ortega, A., Verreth, J.A.J., Coutteau, P., Segner, H., Huisman, E.A. & Sorgeloos, P. 1998. Biochemical and enzymatic characterization of decapsulated cysts and nauplii of the brine shrimp *Artemia* at different developmental stages. *Aquaculture*, 161(1–4): 501–514. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(97)00297-4.

Global Seafood Alliance. 2022. *Hatchery Standard 2.0. Best Aquaculture Practices Certification Standard*. 76 pp.

Hamre, K., Fera, M.Y., Rønnestad, I., Boglione, C., Conceição, L.E. & Izquierdo, M. 2002. Nutrient composition and metamorphosis success of Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus* L.) larvae fed natural zooplankton or *Artemia. Aquaculture Nutrition*, 8(2): 139–148. https://doi.org/10.1046/j.1365-2095.2002.00201.x.

Hamre, K. & Mangor-Jensen, A. 2006. A multivariate approach to optimization of macronutrient composition in weaning diets for cod (*Gadus morhua*). *Aquaculture Nutrition*, 12(1): 15–24. https://doi.org/10.1111/J.1365-2095.2006.00377.X.

Hamre, K., Holen, E. & Moren, M. 2007. Pigmentation and eye migration in Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus* L.) larvae: New findings and hypotheses. *Aquaculture Nutrition*, 13(1): 65–80. https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2007.00467.x.

Hamre, K., Yú Fera, M., Rønnestad, I., Boglione, C., Conceiçã, L.E.C. & Izquierdo, M. 2013. Fish larval nutrition and feed formulation: Knowledge gaps and bottlenecks for advances in larval rearing. *Reviews in Aquaculture*, 5(s1): S26–S58. https://doi. org/10.1111/j.1753-5131.2012.01086.x.

Hamre, K., Erstad, B., de Kok, J., Norberg, B. & Harboe, T. 2020. Change in nutrient composition of *Artemia* grown for 3–4 days and effects of feeding on-grown *Artemia* on performance of Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus*, L.) larvae. *Aquaculture Nutrition*, 26: 1542-1554. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/anu.13101.

Helland, S., Triantaphyllidis, G.V., Fyhn, H.J., Evjen, M.S., Lavens, P. & Sorgeloos, P. 2000. Modulation of the free amino acid pool and protein content in populations of the brine shrimp *Artemia* spp. *Marine Biology*, 137: 1005–1016. https://link.springer.com/ article/10.1007/s002270000409.

Hemre, G.I., Lie, Ø., **Lied, E. & Lambertsen, G.** 1989. Starch as an energy source in feed for cod (*Gadus morhua*): Digestibility and retention. *Aquaculture*, 80(3–4): 261–270. https://doi.org/10.1016/0044-8486(89)90174-9.

Herald, R. & M. Rakowicz. 1951. Stable requirements for raising sea horses. *Aquarium* J., 22: 234–242.

Heyse, J. 2021. *Identifying drivers of microbial dynamics in aquaculture*: *from single–cell technology to metagenomics*. Ghent University, Ghent, Belgium PhD dissertation. 206pp. https://lib.ugent.be/catalog/pug01:8734215.

Hibshman, J.D., Clegg, J.S. & Goldstein, B. 2020. Mechanisms of desiccation tolerance: themes and variations in brine shrimp, roundworms, and tardigrades. *Frontiers in Physiology*, 11: 592016. https://doi.org/10.3389/fphys.2020.592016.

Hofer, R. & Köck, G. 1989. Method for quantitative determination of digestive enzymes in fish larvae. *Pol. Arch. Hydrobiol*., 36: 439–441.

Jordal, A.-E.O., Lie, Ø., **Torstensen, B.E. & Torstensen, B.E.** 2007. Complete replacement of dietary fish oil with a vegetable oil blend affects liver lipid and plasma lipoprotein levels in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *Aquaculture Nutrition*, 13: 114–130. https:// doi.org/10.1111/ j.1365-2095.2007.00455.x.

Julshamn, K., Dahl, L. & Eckhoff, K. 2001. Determination of iodine in seafood by inductively coupled plasma/mass spectrometry. *Journal of AOAC International*, 84(6): 1976–1983. https:// doi.org/10.1093/jaoac/84.6.1976.

Léger, Ph., Vanhaecke, P. & Sorgeloos, P. 1983. International Study on Artemia XXIV. Cold storage of live *Artemia* nauplii from various geographical sources: Potentials and limits in aquaculture. *Aquacultural Engineering*, 2(1983): 69–78.

Léger, Ph., Naessens-Foucquaert, E. & Sorgeloos, P. 1987. International Study on *Artemia*. XXXV. Techniques to manipulate the fatty acid profile in *Artemia* nauplii and the effect on its nutritional effectiveness for the marine crustacean *Mysidopsis bahia* (M.). In: P. Sorgeloos, D.A. Bengtson, W. Decleir & E. Jaspers, eds. *Artemia Research and its Applications*. 1987.Vol. 3. Ecology, culturing, use in aquaculture. Universa Press, Wetteren, Belgium.

Léger, Ph., Bengtson, D.A., Sorgeloos, P., Simpson, K.L. & Beck, A.D. 1987. The nutritional value of *Artemia*: A review. In: P. Sorgeloos, D.A. Bengtson, W. Decleir & E. Jaspers, eds. *Artemia Research and its Applications. Ecology*, *Culturing*, *Use in Aquaculture*, pp. 357–372. Wetteren, Belgium, Universa Press.

Lepage, G. & Roy, C.C. 1984. Improved recovery of fatty acid through direct transesterification without prior extraction or purification. *Journal of Lipid Research*, 25: 1391–1396. https://doi. org/10.1016/S0022-2275(20)34457-6.

Liang, P. & MacRae, T.H. 1999. The synthesis of a small heat shock/a-crystallin protein in *Artemia* and its relationship to stress tolerance during development. *Developmental Biology*, 207(2): 445–456. https://doi.org/10.1006/dbio.1998.9138.

Liaset, B., Julshamn, K. & Espe, M. 2003. Chemical composition and theoretical nutritional evaluation of the produced fractions from enzymic hydrolysis of salmon frames with Protamex™. *Process Biochemistry*, 38(12): 1747–1759. https://doi.org/10.1016/S0032-9592(02)00251-0.

Lim, L.C., Cho, Y.L., Dhert, P., Wong, C.C., Nelis, H. & Sorgeloos, P. 2002. Use of decapsulated *Artemia* cysts in ornamental fish culture. *Aquaculture Research*, 33(8): 575–589. https://doi.org/10.1046/j.1365-2109.2002.00687.x.

Liu, Y.L., Zhao, Y., Dai, Z.M., Chen, H.M. & Yang, W.J. 2009. Formation of diapause cyst shell in brine shrimp, *Artemia parthenogenetica*, and its resistance role in environmental

stresses. *Journal of Biological Chemistry*, 284(25): 16931–16938. https://doi.org/10.1074/ jbc. M109.004051.

Lopalco, P., Lobasso, S., Alfama Lopes Dos Santos, R.M., Van Stappen, G., & Corcelli, A. 2019. Lipid profile changes during the development of *Artemia franciscana*, from cysts to the first two naupliar stages. *Frontiers in Physiology*, 9. https://doi.org/10.3389/ fphys.2018.01872.

MacRae, T.H., Bagshaw, J.C. & Warner, A.H., eds. 1989. *Biochemistry and cell biology of Artemia*. Boca Raton, Florida, CRC Press, USA. https://doi.org/10.1201/9781351070157.

Mæland, A. & Waagbø, R. 1998. Examination of the qualitative ability of some cold-water marine teleosts to synthesize ascorbid acid. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A*, 249-255. https://www.semanticscholar.org/paper/EXAMINATION-OF-THE- QUALITATIVE-ABILITY-OF-SOME-COLD-M%C3%A6land-Waagb%C3%B8/af577ebdd1f2d44e2e1364fe07244f8f6c612d8b.

Mæland, A., Rønnestad, I., Fyhn, H.J., Berg, L. & Waagbø, R. 2000. Water-soluble vitamins in natural plankton (copepods) during two consecutive spring blooms compared to vitamins in *Artemia franciscana* nauplii and metanauplii. *Marine Biology*, 136: 765–772. https://link.springer.com/article/10.1007/s002270000280.

Merchie, G., Lavens, P. & Sorgeloos, P. 1997. Optimization of dietary vitamin C in fish and crustacean larvae: A review. *Aquaculture*, 155: 165–181.

Moraiti-Ioannidou, M., Castritsi-Catharios, J., Miliou, H. & Kotzamanis, Y.P. 2007. Fatty acid composition and biometry of five Greek *Artemia* populations suitable for aquaculture purposes. *Aquaculture Research*, 38(15): 1664–1672. https://doi.org/10.1111/ J.1365-2109.2007.01835.X.

Morris, R.W. 1956. Some aspects of the problem of rearing marine fishes. *Bull. Inst. Oceanogr. Monaco*, 1082. 61 pp.

Navarro, J.C., Amat, F. & Sargent, J.R. 1992. Fatty acid composition of coastal and inland *Artemia* sp. Populations from Spain. *Aquaculture*, 102: 219–230. https://doi. org/10.1016/0044-8486(92)90150-J.

Navarro, J.C., Amat, F. & Sargent, J.R. 1993. The lipids of the cysts of freshwater-and marine-type *Artemia*. *Aquaculture*, 109(3–4): 327–336. https://doi.org/10.1016/0044- 8486(93)90172-U.

Props, R. 2018. Microbial population and community dynamics in natural and managed freshwater systems: From methodology development to mechanistic insights. Ghent University, Belgium. PhD dissertation. 282 pp. https://biblio.ugent.be/ publication/8576485.

Provasoli, L. 1969. Laboratory methods in cultivation. In: J.D. Costlow, ed. *Marine Biology*, pp. 225–398. Proc. 5th Int. Interdiscip. Conf. Gordon and Breach, New York, N.Y.

Ribeiro, F.A.L.T. & Jones, D.A. 1998. The potential of dried, low-hatch, decapsulated *Artemia* cysts for feeding prawn post-larvae. *Aquaculture International*, 6(6): 421–440. https://doi.org/10.1023/A:1009231417434.

Rosenthal, H. 1969. Verdauungsgeschwindigkeit, Nahrungswahl und Nahrungsbedarf bei den Larven des Herings, Clupea harengus L. *Berichte der Deutschen wissenschaftlichen Kommission* für *Meeresforschung*, *Neue Folge*, 20: 60–69. https://doi.org/10.2312/ berichte_

dwkfm_20_60-69.

Sorgeloos, P., Bossuyt, E., Laviña, E., Baeza-Mesa, M. & Persoone, G. 1977. Decapsulation of *Artemia* cysts: A simple technique for the improvement of the use of brine shrimp in aquaculture. *Aquaculture*, 12(4): 311–315. https://doi.org/10.1016/0044-8486(77)90209-5.

Srivastava, A., Hamre, K., Stoss, J., Chakrabarti, R. & Tonheim, S.K. 2006. Protein content and amino acid composition of the live feed rotifer (*Brachionus plicatilis*): With emphasis on the water soluble fraction. *Aquaculture*, 254(1–4): 534–543. https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2005.11.014.

Stael, M., Sanggontanagit, T., Van Ballaer, E., Puwapanich, N., Tunsutapanich, A. & Lavens, P. 1995. Decapsulated cysts and *Artemia* flakes as alternative food sources for the culture of *Penaeus monodon* postlarvae. In: P. Lavens, E. Jaspers & I. Roelants, eds. *Larvi' 95*, *Book of Abstracts*, pp: 342–345. European Aquaculture Society, Special Publication No. 24, Ghent, Belgium.

Stults, V.J. 1974. *Nutritional value of brine shrimp cysts. Encysted eggs of Artemia salina*. Michigan State University, East Lansing, Michigan. Xerox University Microfilms, Ann Arbor, Michigan, 75-7262. Thesis. 110 pp.

Sui, L. 2000. Use of *Artemia* biomass in practical diets and decapsulated cysts as food source for common carp (*Cyprinus carpio* L.). Ghent University, Ghent, Belgium. MSc thesis.

Tanguay, J.A., Reyes, R.C. & Clegg, J.S. 2004. Habitat diversity and adaptation to environmental stress in encysted embryos of the crustacean *Artemia*. *Journal of Biosciences*, 29(4): 489–501. https://doi.org/10.1007/BF02712121.

Tonheim, S.K., Nordgreen, A., Høgøy, I., Hamre, K. & Rønnestad, I. 2007. *In vitro* digestibility of water-soluble and water-insoluble protein fractions of some common fish larval feeds and feed ingredients. *Aquaculture*, 262(2–4): 426–435. https://doi. org/10.1016/J.AQUACULTURE.2006.10.030.

Van Can Nhu, Dierckens, K., Thu Huong Nguyen, Mai Thien Tran & Sorgeloos, P. 2009. Can umbrella-stage *Artemia franciscana* substitute enriched rotifers for Cobia (*Rachycentron canadum*) fish larvae? *Aquaculture*, 289(1–2): 64–69. https://doi. org/10.1016/j.aquaculture.2009.01.014.

Vandekerkhove, B., Parmentier, L., Van Stappen, G., Grenier, S., Febvay, G., Rey, M. & de Clercq, P. 2009. *Artemia* cysts as an alternative food for the predatory bug *Macrolophus pygmaeus*. *Journal of Applied Entomology*, 133(2): 133–142. https://doi. org/10.1111/J.1439-0418.2008.01332.X.

Vanhaecke, P., Lavens, P. & Sorgeloos, P. 1983. International study on *Artemia*. XVII. Energy consumption in cysts and early larval stages of various geographical strains of *Artemia*. In: *Annales de la Société Royale Zoologique de Belgique*, pp. 155–164. Vol. 113, No. 2. https://users.ugent.be/~gstappen/WWW/pdf/Vanhaecke1983.pdf.

Vanhaecke, P., De Vrieze, L., Tackaert, W. & Sorgeloos, P. 1990. The use of decapsulated cysts of the brine shrimp *Artemia* as direct food for carp *Cyprinus carpio* L. larvae. *Journal*

of the World Aquaculture Society, 21(4): 257–262. https://doi.org/10.1111/J.1749-7345.1990.TB00537.X.

Van Wyk, P. & Scarpa, J. 1999. Water quality requirements and management. In: *Farming marine shrimp in recirculating freshwater systems*, pp. 141–161. https://scholar.google. com/scholar_lookup?title=Farming+marine+shrimp+in+recirculating+freshwater+syste ms&author=Van+Wyk%2C+P.&publication_year=1999.

Venkateswarlu, V., Seshaiah, P.V., Arun, P. & Behra, P.C. 2019. A study on water quality parameters in shrimp L. vannamei semi-intensive grow out culture farms in coastal districts of Andhra Pradesh, India. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 7.4: 394–399. https://www.fisheriesjournal.com/archives/2019/vol7issue4/PartF/7-4-64- 509.pdf.

Verreth, J., Storch, V. & Segner, H. 1987. A comparative study on the nutritional quality of decapsulated *Artemia* cysts, micro-encapsulated eng diets and enriched dry feeds for *Clarias gariepinus* (Burchell) larvae. *Aquaculture*, 63(1–4): 269–282. https://doi. org/10.1016/0044-8486(87)90078-0.

Walter, H.E., 1984. Proteinases: methods with haemoglobin, casein and azocoll as substrates. In: Bergmeyer, H.U. (Ed.), Methods of Enzymatic Analysis, Vol. 5. Verlag Chemie, Weinheim, Germany, pp. 270–277.

Warner, A.H., MacRae, T.H. & Bagshaw, J.C., eds. 1989. *Cell and molecular biology of Artemia development*. New York, Plenum Press. https://doi.org/10.1007/978-1-4757- 0004-6.

Warner, A.H., Perz, M.J., Osahan, J.K. & Zielinski, B.S. 1995. Potential role in development of the major cysteine protease in larvae of the brine shrimp *Artemia franciscana*. *Cell and Tissue Research*, 282(1): 21–31. https://doi.org/10.1007/BF00319129.

Warner, A.H. & Matheson, C. 1998. Release of proteases from larvae of the brine shrimp *Artemia franciscana* and their potential role during the molting process. *Comparative Biochemistry and Physiology - B Biochemistry and Molecular Biology*, 119(2): 255–263. https://doi.org/10.1016/S0305-0491(97)00323-4.

附录1　盐度换算表

表A1　浓缩海水密度读数对应的不同盐度单位换算表

密度（克/毫升）	波美度（°Bé）	盐度（克/升）	密度（克/毫升）	波美度（°Bé）	盐度（克/升）
1.020	2.8	28.6	1.040	5.5	56.4
1.021	3.0		1.041	5.7	
1.022	3.1		1.042	5.8	
1.023	3.3		1.043	6.0	
1.024	3.4		1.044	6.1	
1.025	3.6		1.045	6.2	
1.026	3.7		1.046	6.4	
1.027	3.8		1.047	6.5	
1.028	4.0		1.048	6.7	
1.029	4.1		1.049	6.8	
1.030	4.2	42.4	1.050	6.9	70.6
1.031	4.4		1.051	7.0	
1.032	4.5		1.052	7.2	
1.033	4.7		1.053	7.3	
1.034	4.8		1.054	7.5	
1.035	4.9		1.055	7.6	
1.036	5.0		1.056	7.7	
1.037	5.1		1.057	7.9	
1.038	5.3		1.058	8.0	
1.039	5.4		1.059	8.1	

续表

密度（克/毫升）	波美度（°Bé）	盐度（克/升）	密度（克/毫升）	波美度（°Bé）	盐度（克/升）
1.060	8.2	84.9	1.090	11.9	128.6
1.061	8.4		1.091	12.0	
1.062	8.5		1.092	12.1	
1.063	8.7		1.093	12.3	
1.064	8.8		1.094	12.4	
1.065	8.9		1.095	12.5	
1.066	9.0		1.096	12.6	
1.067	9.2		1.097	12.7	
1.068	9.3		1.098	12.8	
1.069	9.4		1.099	13.0	
1.070	9.5	99.4	1.100	13.1	144
1.071	9.6		1.101	13.2	
1.072	9.7		1.102	13.4	
1.073	9.9		1.103	13.5	
1.074	10.0		1.104	13.6	
1.075	10.1		1.105	13.7	
1.076	10.2		1.106	13.8	
1.077	10.3		1.107	14.0	
1.078	10.5		1.108	14.2	
1.079	10.6		1.109	14.3	
1.080	10.7	114.1	1.110	14.4	159.5
1.081	10.8		1.111	14.5	
1.082	11.0		1.112	14.6	
1.083	11.1		1.113	14.7	
1.084	11.2		1.114	14.9	
1.085	11.3		1.115	15.0	
1.086	11.5		1.116	15.1	
1.087	11.6		1.117	15.2	
1.088	11.7		1.118	15.3	
1.089	11.8		1.119	15.4	

续表

密度（克/毫升）	波美度（°Bé）	盐度（克/升）	密度（克/毫升）	波美度（°Bé）	盐度（克/升）
1.120	15.5	175.1	1.150	18.8	222.1
1.121	15.6		1.151	19.0	
1.122	15.7		1.152	19.1	
1.123	15.8		1.153	19.2	
1.124	15.9		1.154	19.3	
1.125	16.0		1.155	19.4	
1.126	16.2		1.156	19.5	
1.127	16.3		1.157	19.6	
1.128	16.4		1.158	19.7	
1.129	16.5		1.159	19.8	
1.130	16.6	190.6	1.160	19.9	237.8
1.131	16.7		1.161	20.0	
1.132	16.8		1.162	20.2	
1.133	16.9		1.163	20.3	
1.134	17.0		1.164	20.4	
1.135	17.1		1.165	20.5	
1.136	17.3		1.166	20.6	
1.137	17.4		1.167	20.7	
1.138	17.5		1.168	20.8	
1.139	17.6		1.169	20.9	
1.140	17.7	206.3	1.170	21.0	253.7
1.141	17.8		1.171	21.1	
1.142	17.9		1.172	21.2	
1.143	18.0		1.173	21.3	
1.144	18.1		1.174	21.4	
1.145	18.2		1.175	21.5	
1.146	18.3		1.176	21.6	
1.147	18.5		1.177	21.7	
1.148	18.6		1.178	21.8	
1.149	18.7				

附录2　集约化卤虫养殖的投喂策略

第一周：

- T* < 15厘米：停止投喂或增加换水量
- 15厘米 < T < 20厘米：维持当前投喂比例
- T > 20厘米：提高投喂比例或人工补充饵料

第二周：

- T < 20厘米：停止投喂或增加换水量
- 20厘米 < T < 25厘米：维持当前投喂比例
- T > 25厘米：提高投喂比例或人工补充饵料

拟成虫阶段起：每日投饵量=每升水体10%的湿重生物量（WW）。湿重生物量（克/升）按以下方式测定：**

- 用筛网收集数升养殖水体，过筛获得卤虫
- 用自来水冲洗筛网上的卤虫
- 沥干水分后以吸水纸轻拭筛网底部
- 称量滤器重量：卤虫生物量（克/升）=（总重量−空滤器重量）/取水体积

注：*T=透明度（采用塞氏盘测定值）；**WW=活体湿重。

附录3　未脱壳卤虫卵的消毒

体积计算

消毒液由液态漂白剂即次氯酸钠（NaClO）溶液配制。以VWR化学公司生产的工业级产品为例，若为新鲜配制且标称有效氯含量为14% Cl_2，其实际活性通常为14% ～ 15%（*w*/*w*）。配制比例如下：

- 每升海水投加50 ～ 100克卤虫卵。
- 制备有效氯浓度为200微升/升或10 000微升/升的次氯酸钠溶液，可对市售NaClO水溶液（有效氯浓度不低于14%）进行稀释。溶液浓度越高所需处理时间越短。
- 计算示例：具体操作案例及详细计算参见Excel 1。

网页链接：Excel 1　卤虫卵消毒处理，https://doi.org/10.4060/cd0313en

水合步骤



- 向罐体中注入经计量的海水。
- 加入卤虫卵。
- 通过开放管道大量曝气。
- 水合处理45分钟。

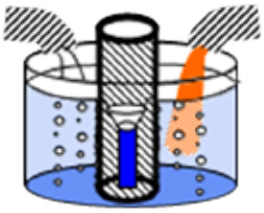
消毒步骤



- 加入经计量的次氯酸钠（NaClO）溶液。
- 消毒时间：在有效氯浓度200微升/升的溶液中浸泡处理20分钟，或在有效氯浓度10 000微升/升的溶液中处理1分钟。

冲洗步骤

- 将卤虫卵收集至浓缩冲洗器中。
- 用海水彻底冲洗卤虫卵。
- 此时卤虫卵即可进行孵化。



附录4　卤虫卵脱壳处理流程

溶液体积计算

脱壳溶液由液态漂白剂即次氯酸钠（NaClO）溶液配制（应提前配制）。以新出厂的VWR化学公司生产的工业级产品（标称有效氯含量14% Cl_2）为例，其实际活性通常为14% ～ 15%（*w*/*w*）。配制比例要求如下：

- 每千克卤虫卵需要0.5千克有效氯。
- 每千克卤虫卵需要0.33升30%氢氧化钠（NaOH工业级）溶液。
- 加入海水使最终溶液体积达到每千克卤虫卵14升。
- 计算示例：具体操作案例及详细计算参见Excel 2。

网页链接：Excel 2　卤虫卵脱壳计算表，https://doi.org/10.4060/cd0313en

水合步骤



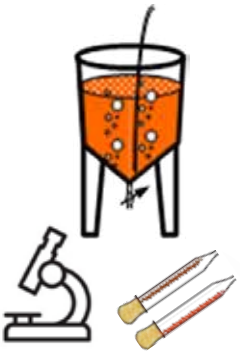
- 将海水按计算量注入水槽，水温20℃。
- 加入卤虫卵。
- 通过开放管道进行大量曝气。
- 水合时间：50 ～ 60分钟。

脱壳步骤



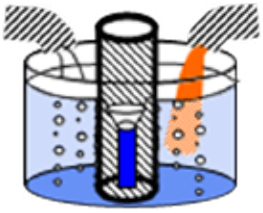
- 50 ～ 60分钟后加入氢氧化钠。
- 随后加入计算量的次氯酸钠。
- 最后按250 ～ 500微升/升添加消泡剂（建议预先将消泡剂溶于少量水后加入）。

脱壳过程监测



- 跟踪观察卤虫卵从棕色转为橙色的颜色变化：可通过移液管取样或体视显微镜进行观察。
- 当卤虫卵颜色由棕灰转为橙色且90%卵粒下沉时，表明脱壳完全。

洗涤与中和步骤



- 将卤虫卵收集至预先备有含硫代硫酸钠（$Na_2S_2O_3$）水体的浓缩洗涤器中，硫代硫酸钠添加量为每千克卵50克。
- 以每分钟约100%的水流量进行冲洗。
- 建议添加250 ～ 500微升/升消泡剂。
- 持续冲洗直至所有氯被中和，且出水澄清透明。
- 可通过将少量脱壳卵置于淀粉–碘指示剂（含淀粉、KI、H_2SO_4及水）中检测次氯酸盐残留。若试剂变蓝，则需继续冲洗与中和。

附录5　次氯酸盐溶液中有效氯的滴定测定法

原理

在pH≤8的条件下，有效氯能从碘化钾（KI）溶液中置换释放游离碘（I_2）。碘的浓度用硫代硫酸钠（$Na_2S_2O_3$）标准溶液滴定测定，以淀粉作为指示剂。以有效氯百分比表示次氯酸盐类漂白剂（含氯水溶液）的浓度单位，1克100%有效氯液的漂白能力相当于1克氯气。“有效氯”这一术语的提出，是因为大多数商业漂白剂含有大量以氯离子（Cl^-）形式存在的氯，而氯离子并不具备漂白能力。

试剂配置方法

0.1摩尔/升五水合硫代硫酸钠（$Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$）溶液：于1 000毫升容量瓶中，

- 加入五水合硫代硫酸钠24.8克；
- 加入蒸馏水定容至1升；
- 轻微振荡容量瓶至完全溶解。

10克/升淀粉溶液配制方法：于250毫升玻璃烧杯中，

- 加入蒸馏水100毫升；
- 加入淀粉0.5克；
- 放入磁力搅拌子，将烧杯置于磁力搅拌器上搅拌；
- 加热至沸腾直至淀粉完全溶解；
- 冷却至室温。

指示剂溶液配制方法：于250毫升锥形瓶中，

- 加入蒸馏水50毫升；
- 加入100%冰乙酸（CH_3COOH）5毫升；
- 加入碘化钾一茶匙；

- 加入次氯酸盐溶液样品1毫升。

活性氯滴定

- 用0.1摩尔/升五水合硫代硫酸钠溶液润洗滴定管并注满；
- 滴定过程需避光操作，将0.1摩尔/升硫代硫酸钠溶液从滴定管缓慢加入含指示剂的锥形瓶，直至碘的棕黄色完全消失；
- 加入1毫升淀粉溶液，此时溶液应显深蓝色；
- 通过滴定管逐滴加入硫代硫酸钠溶液，直至液体完全褪色呈透明状；
- 静置2分钟确认溶液未返蓝；若再次显色，则每次补加一滴硫代硫酸钠，直至溶液变为无色。

计算

- 每毫升0.1摩尔/升五水合硫代硫酸钠相当于3.54毫克活性氯。

附录6　孵化罐体准备与卤虫卵孵化操作流程

为确保育苗场获得最佳的卤虫孵化效果，需遵循以下条件：

储存条件

将卤虫卵储存于干燥环境，温度保持4℃以下，高于4℃会降低产品质量。储存期间需严格密封包装，开封后应立即使用。

卵密度

建议孵化密度为2克卵/升。

水体盐度

盐度控制在25 ～ 30克/升范围内。

光照条件

整个孵化过程需保证最佳光照，水面照度至少维持2 000勒克斯。

水温控制

水温恒定在25 ～ 30℃时可实现最优孵化。

pH调节

全程保持pH 8.0 ～ 8.5，必要时添加溶解的碳酸氢钠（$NaHCO_3$）或碳酸钠（Na_2CO_3）。建议在孵化前半小时加入碳酸氢钠，投卵前即刻添加120毫克/升氢氧化钠（NaOH）溶液。通常孵化12小时后需二次补加120毫克/升氢氧化钠溶液。

孵化罐体准备

- 拆卸所有可移动部件（如管道），单独用肥皂清洗后浸入含氯溶液（有效氯150毫克/升）消毒；
- 冲洗后彻底刷洗池体；
- 重复含氯溶液消毒步骤；
- 充分冲洗后注入过滤海水，确保清除所有残留的卵和卵壳（注意出水口及阀门处前次孵化的残留物）；
- 孵化液消毒处理：使用10毫克/升有效氯轻微曝气约1小时；
- 添加8毫克/升硫代硫酸钠（$Na_2S_2O_3$）中和余氯。

孵化操作流程

- 监测水温；
- 开启强曝气系统（需保持剧烈扰动水体）；
- 初始水质确认：采集微生物检测样本（见附录11）；
- 称量所需卤虫卵重量；
- 开启孵化槽上方照明；
- 将卤虫卵投入孵化槽；
- 监测水体pH。

附录7　卤虫Ⅰ期无节幼体采收方法

- 覆盖孵化罐体顶部。
- 停止充气。
- 静置约10分钟使无节幼体与卵壳分离。

此时未孵化的卵下沉，无节幼体向罐底迁移，空卵壳则上浮至水面聚集。由于无节幼体具有趋光性，通过遮蔽孵化罐体上部（使用盖板）并将光源聚焦于透明锥底，可加速幼体在罐体下部的富集。

- 分离5 ～ 10分钟后，打开阀门收集幼体。为防止因缺氧导致的死亡，无节幼体在锥底滞留时间最长不超过5 ～ 10分钟。
  - 冲洗清除沉积于无节幼体下方的未孵化卵及杂质。
  - 采用细目网筛（＜150微米）收集无节幼体，网筛需全程浸没于水中以免对卤虫幼体造成机械损伤，推荐使用浓缩–冲洗装置（图版A7.1）。
  - 停止排水并保留上层卵壳于孵化罐中。



图版A7.1　实用浓缩–冲洗装置示例

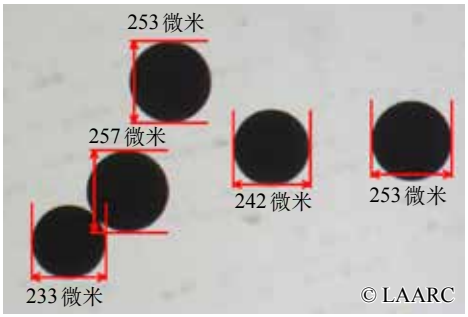
需用清洁的消毒海水彻底冲洗卤虫无节幼体，以去除甘油等孵化代谢产物及可能存在的污染物，以及以甘油为基质繁殖的弧菌。自动化系统的应用（如浓缩–冲洗装置）可显著简化商业生产流程，实现大批量无节幼体的快速采收及孵化液的完全净化，从而大幅降低人力与生产成本。

经清洁的消毒海水充分冲洗后，无节幼体可直接投喂水产动物幼体，或低温保存（见第3.1.8节），亦可转移至强化罐体中（见第3.1.7节）。

附录8　卤虫卵径、卵壳厚度、Ⅰ期无节幼体体长与干重的测定方法

未脱壳卤虫卵的卵径测定

- 将少量卤虫卵置于35克/升海水中，添加1%卢戈氏液（配方见下文），孵育2小时。
- 再次添加1%卢戈氏液。
- 人工测量时应使用配备校准目镜标尺的显微镜（图版A8.1），每个样品需随机测定至少100个充分水合的卤虫卵卵径。
- 计算平均值与标准差。



图版A8.1　未脱壳大盐湖卤虫品系的卵径

脱壳卤虫卵的卵径测定

- 将少量卤虫卵置于35克/升海水中预孵育1小时。
- 采用氢氧化钠（NaOH）和次氯酸钠（NaClO）进行脱壳处理，在显微镜下确认脱壳完全。
- 充分冲洗后转移至海水，添加1%卢戈氏液继续孵育1小时。
- 再次添加1%卢戈氏液。
- 人工测量时应用配备校准目镜标尺的显微镜，每个样品需随机测定至少100个充分水合的脱壳卤虫卵卵径。
- 计算平均值与标准差。

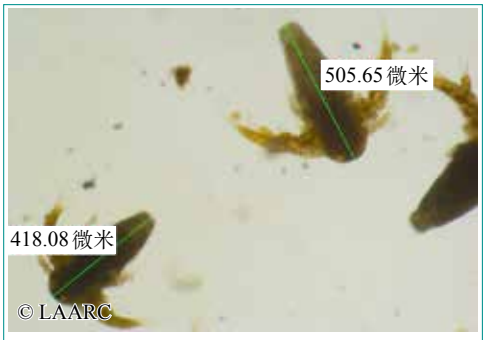
卵壳厚度计算

- 按公式计算卵壳厚度：

（未脱壳卵的平均卵径－脱壳卵的平均卵径）÷2

Ⅰ期无节幼体体长测定

- 在标准孵化条件下孵化卤虫卵（见附录6），22小时后收集幼体（确保最大比例幼体仍处于Ⅰ期），用卢戈氏液固定。
- 人工测量时，使用配备校准目镜标尺的显微镜（图版A8.2），测定至少100尾Ⅰ期无节幼体的体长。
- 计算平均值与标准差。



图版A8.2　Ⅰ期无节幼体体长测量

Ⅰ期无节幼体个体干重（DW）测定方法

- 在标准孵化条件下孵化少量卤虫卵（见附录6）。
- 22小时后收集卤虫（确保绝大多数无节幼体仍处于Ⅰ期），用圆柱锥形管富集，并从底部持续充气。
- 精确测定圆柱锥形管中无节幼体密度（=*Y*个无节幼体/毫升）：使用微量移液器吸取3份250微升子样本，在体视镜下计数，取三次重复计数的平均值。
- 用布氏漏斗装置，将精确体积（=*Z*毫升）的无节幼体悬浮液过滤至预称重的玻璃微纤维滤膜（=*A*克）上（重复三次）。
- 计算过滤无节幼体总数：$N = Y \times Z$。
- 用0.5摩尔/升甲酸铵溶液（NH_4HCO_2）冲洗滤膜以去除盐分。
- 将滤膜置于103℃烘箱干燥4小时使甲酸铵挥发。
- 称量滤膜（=*B*克）。
- 计算单个Ⅰ期无节幼体干重（微克）：$(B - A) \times 10^6/N$。

具体算例详见Excel 3。

网络链接：Excel 3　卤虫无节幼体干重计算，https://doi.org/10.4060/cd0313en

注：卢戈氏液配制方法

溶液1：在玻璃烧杯中称取300克碘化钾（KI）与150克碘（I_2），加入600毫升蒸馏水，磁力搅拌至完全溶解。

溶液2：在玻璃烧杯中称取150克乙酸钠（CH_3COONa），加入1 500毫升蒸馏水，磁力搅拌至完全溶解。

将溶液1与溶液2混合，配制的卢戈氏液需避光保存于室温环境。

附录9　卤虫卵含水量测定方法

- 取3个铝箔杯称皮重，记为T_1、T_2、T_3。
- 各杯装入卤虫卵样本后称总重（皮重+湿样重），记为W_1、W_2、W_3。
- 计算样本质量：M_1、M_2、M_3。
- 将铝箔杯置于103℃烘箱干燥4小时。
- 测定烘干后总重（皮重+干样重），记为D_1、D_2、D_3。
- 按以下公式计算三组平行样本含水量：

$$\text{含水量}\ (\%) = \frac{(T + M - D)}{M} \times 100$$

- 按每克干重计算含水量：

$$\text{含水量}\ (\text{克}H_2O/\text{克干重}) = \frac{\dfrac{(T + M - D)}{M}}{1 - \left(\dfrac{(T + M - D)}{M}\right)} \times 100$$

- 计算三次重复的平均值和标准差。具体实例及计算参见Excel 4.1和4.2。

网页链接：

Excel 4.1　卤虫含水量测定（%），https://doi.org/10.4060/cd

Excel 4.2　卤虫含水量测定（克H_2O/克干重），https://doi.org/10.4060/cd

附录10　卤虫卵计数、孵化率、孵化效率及孵化速率的测定方法

为确保卤虫卵的质量控制，所有操作需在标准条件下进行（见图版A10.1）：

- 优先选用圆柱锥形管或锥形管（如英霍夫锥形管）或锥形量筒进行检测，每组实验设置三个重复。
- 精确称取2克卤虫卵，置于1 000毫升盐度为32克/升海水中孵化。
- 保持持续光照（＞2 000勒克斯）。
- 恒温28℃。
- 底部持续通气使卵保持悬浮状态（通气量不宜过强以防泡沫产生，保持溶解氧＞2毫克/升）。
- 维持pH 8.0 ～ 8.5。



图版A10.1　卤虫卵孵化质量控制实验装置

卤虫卵计数

- 孵化2小时后（此时卵完全水合），用微量移液器从每个孵化管中取6份250微升子样本。
- 将子样本移入小瓶，滴加数滴卢戈氏液固定（卢戈氏液配制方法见附录8）。
- 在体式显微镜下计数每个锥形管（6份子样本）中卵的数量，计算单管平均值。
- 根据3个锥形管的计数值计算总平均值和标准差：

$$卵数=\frac{(卵\times4\times1\,000)}{2}\text{ 或卵数}=卵\times2\,000$$

（=计数值 × 换算系数2 000）

具体案例及计算公式参见Excel 5。

网页链接：Excel 5　卤虫卵计数，https://doi.org/10.4060/cd0313en

孵化率（H%）与孵化效率（HEff）测定步骤：

- 孵化24小时后，从每个孵化管中取6份250微升的子样本。
- 用微量移液器取各子样本于小瓶中，滴加数滴卢戈氏液固定无节幼体。
- 每个孵化管（6份子样本）需在显微镜下计数无节幼体并计算均值；同步计数伞状幼体并计算其均值（见图版A10.2）。
- 向各瓶滴加次氯酸钠（NaClO）溶液对未孵化卵进行脱壳处理，并溶解空卵壳。
- 每个孵化管需计数未孵化胚胎（橙色）并计算均值。
- 孵化率计算公式：

$$H\,\%=\left(\frac{幼体}{幼体+伞状幼体+胚胎}\right)\times100$$

$$H+\,\%=\left(\frac{幼体+伞状幼体}{幼体+伞状幼体+胚胎}\right)\times100$$

- 孵化效率计算：

$$HEff=\frac{幼体\times4\times1\,000\text{毫升}}{2\text{克}}\text{ 或 }EEff=幼体\times2\,000$$

$$HEff+=\frac{(幼体+伞状幼体)\times4\times1\,000\text{毫升}}{2\text{克}}$$



图版A10.2　伞状幼体（a）与Ⅰ期无节幼体（b）

完整卵与空壳卵比率

- 根据孵化率和孵化效率，计算每克卤虫卵样品中的完整卵数量：

$$\text{完整卵} = (\text{孵化效率} / \text{孵化百分比}) \times 100$$

- 根据每克完整卵数及卵计数，计算完整卵百分比与空壳百分比：

$$\text{完整卵百分比 (\%)} = (\text{完整卵} / \text{卵数}) \times 100$$

$$\text{空壳百分比 (\%)} = 100 - \text{完整卵百分比}$$

孵化率

- 孵化8小时后开始取样并计算孵化效率（遵循上述步骤）。
- 持续取样/计数操作，直至孵化效率均值连续3小时保持稳定。
- 将每小时均值表示为最大孵化效率的百分数。
- 绘制孵化曲线，T_{10}、T_{90}及其他T值可从图中推算得出。
- 简化流程可设定每3小时或更长时间取样一次。

实操案例及详细计算见Excel 7。

网页链接：Excel 7　卤虫卵孵化率与孵化同步性，https://doi.org/10.4060/cd0313en

附录 11　卤虫孵化液或孵化无节幼体细菌载量的测定

卤虫孵化液样本制备

- 用无菌移液管从 1 升卤虫孵化液中吸取 20 毫升子样本，立即用 40 微米无菌细胞滤网过滤去除颗粒物。
- 将滤液收集于无菌小瓶中，此即 10^0 倍稀释液。
- 尽快进行后续操作，避免滤液在室温下静置导致细菌数量快速变化。若无法立即处理，需将滤液保存于 4 ℃环境，并于数小时内完成操作。
- 后续步骤需在无菌条件下操作，即在层流超净工作台或酒精灯火焰旁进行。
- 制备滤液的 10 倍梯度稀释系列：
  - 用无菌移液管吸取 1 毫升滤液，加入含 9 毫升无菌海水的试管中，混匀后即为 10^{-1} 稀释液；
  - 换用新无菌移液管，从 10^{-1} 稀释液试管中取 1 毫升加入第二支含 9 毫升无菌海水的试管，混匀后即为 10^{-2} 稀释液；
  - 重复该过程直至获得 10^{-3}、10^{-4}、10^{-5}、…等目标稀释度。目标稀释度 10^{-X} 应使琼脂平板生长菌落数介于 30 ～ 300 个：少于 30 个菌落不符合统计学要求，超过 300 个菌落则难以区分单个菌落形成单位（CFU）；
  - 最后额外制备 $10^{-(X+1)}$ 稀释液；
  - 初次实验时需制备充足的梯度稀释液，目标稀释度需依据多次平板涂布结果确定。
- 将稀释液进行琼脂平板涂布（见下文：稀释样本在琼脂平板上的涂布操作）。

卤虫无节幼体样本的制备

- 取约1升卤虫孵化液，按3.1.6节方法分离无节幼体与未孵化卵/空卵壳。所有接触孵化液或无节幼体的工具必须无菌。
- 将收集的无节幼体用1升无菌海水在消毒筛网上轻柔冲洗，随后转移至盛有消毒海水的洁净1升容器中。
- 用无菌海水定容至1升，轻柔充气。
- 使用无菌移液管从1升容器中精确量取100毫升悬液，转移至40微米无菌细胞筛。应确保100毫升悬液中所有无节幼体均被滤至细胞筛上，此步骤至关重要。
- 后续操作需在层流超净台内进行，或紧邻点燃的酒精灯旁完成。
- 用10毫升无菌海水冲洗细胞筛上的无节幼体3次，随后用洁净纸巾吸干筛网底部残液。
- 将细胞筛倒置于50毫升无菌离心管（若后续使用匀浆机）或无菌均质袋（若后续使用拍打式均质器）上方，用10毫升无菌移液管精确量取10毫升无菌海水冲洗筛网底部，使全部无节幼体转移至容器中。
- 按以下方式分别使用实验室匀浆机（如Ultra Turrax匀浆器）或拍打式均质器对离心管或均质袋内的卤虫无节幼体进行匀浆处理。
- 使用实验室匀浆机前，须对匀浆头进行清洁。准备3个可浸没匀浆头的洁净塑料管，依次加入：
  - 管1：无菌海水
  - 管2：乙醇
  - 管3：消毒清洁液
    - 将消毒清洁液与搅拌器混合数秒，用洁净纸巾擦干搅拌器。用乙醇混合搅拌数秒，再用洁净纸巾擦干。用海水混合搅拌数秒，之后以洁净纸巾擦干搅拌器。
    - 当需要处理多个卤虫样品时，每处理完一个样品需重复上述清洁流程。
- 使用组织研磨仪时无需特殊清洁步骤。
- 将无节幼体置于无菌小瓶中，用研磨仪高速混匀；或置于无菌均质袋中高速均质，直至悬液中仅存残渣且无完整卤虫无节幼体。此卤虫无节幼体碎片悬液即为10^0倍稀释液。
- 后续操作应尽快进行，避免悬液在室温下静置，因细菌数量可能快速变化。若无法立即处理样本，需4℃保存并尽快分析。
- 将卤虫无节幼体残渣悬液进行10倍梯度稀释：

- 使用无菌移液管，将1毫升卤虫无节幼体残渣悬浮液转移至装有9毫升无菌海水的无菌试管中。密封试管并混匀，此即为10^{-1}稀释液。
- 随后用另一支无菌移液管，将1毫升10^{-1}稀释度的试管溶液转移至盛有9毫升无菌海水的第二支试管中。密封第二支试管并混匀，此即为10^{-2}稀释液。
- 重复该操作依次制备10^{-3}、10^{-4}、10^{-5}等梯度稀释液，直至达到目标稀释度10^{-X}（该稀释度应使琼脂平板培养后菌落数介于30 ～ 300）。
- 最后再制备一个$10^{-(X+1)}$稀释液。
- 初次平板接种时因未知目标稀释度，需制备足量梯度稀释液。经数次琼脂平板培养后可确定目标稀释度。

计算用于平板接种的无节幼体采样原液（1升容器）中的无节幼体密度：

- 使用1 000微升移液器从1升容器中取1毫升样本，确保移液枪头开口足够大以便吸取卤虫无节幼体。
- 将样品转移至预先置有计数网格并覆盖薄层海水的培养皿中。
- 重复上述步骤10次，制备10个含卤虫无节幼体的培养皿。
- 向每个培养皿加入数滴卢戈氏液以固定并染色卤虫无节幼体。
- 统计每个培养皿中的卤虫无节幼体数量。
- 取10个培养皿的平均值，计算1升容器中卤虫无节幼体的平均密度（卤虫数/毫升）。
- 将该数值乘以100，获得卤虫无节幼体残渣悬浮液中的卤虫总数（卤虫数/卤虫无节幼体残渣悬浮液）。此数值用于计算卤虫无节幼体的细菌载量（见下文“细菌载量计算”）。
- 卤虫数/卤虫无节幼体残渣悬浮液=卤虫数/毫升 ×100毫升。

在琼脂平板上涂布稀释样品

- 稀释样本的涂布操作需在无菌条件下进行，在层流罩中操作或紧邻点燃的酒精灯旁完成。
- 将卤虫孵化液或卤虫无节幼体残渣悬浮液的各梯度稀释液分别涂布于琼脂培养基（通常为海洋琼脂或TCBS琼脂）表面：
  - 取2支无菌塑料Drigalski刮板，或取2支金属Drigalski刮板浸入乙醇中。
  - 若使用金属刮板，需在酒精灯火焰上灼烧2秒至乙醇挥发完毕。待金属刮板冷却后即为无菌状态，在平板涂布样本前请勿触碰刮板表面。

- 涡旋振荡最高稀释度样本（即稀释倍数最大者），使用无菌移液枪头吸取100微升，置于标记为“$10^{-(x+1)}$，A”的新鲜琼脂平板上。更换无菌枪头后同法操作，将第二份样本加至标记为“$10^{-(x+1)}$，B”的平行平板。此二者构成重复样本。
- 按上述步骤处理所有待涂布稀释度，最终获得如下琼脂平板组，每板均含100微升稀释样本：
  - $10^{-(X+1)}$，A与$10^{-(X+1)}$，B
  - 10^{-X}，A与10^{-X}，B
  - $10^{-(X-1)}$，A与$10^{-(X-1)}$，B
  - $10^{-(X-2)}$，A与$10^{-(X-2)}$，B
  - ……
  - 10^{0}，A与10^{0}，B
- 当目标稀释度可根据经验确定时，仅需接种以下平板（每板100微升）：$10^{-(X+1)}$、10^{-X}、$10^{-(X-1)}$。
- 取稀释度最高的$10^{-(X+1)}$号“A”平板，使用无菌Drigalski刮板。
- 将100微升样品均匀涂布于平板表面，操作时Drigalski刮板需按从左至右、自下而上的轨迹移动。随后短暂开盖晾干，重新盖合平板。
- 继续处理次高稀释度10^{-X}的“A”平板，重复上述涂布操作。期间无需对刮板进行消毒。
- 对所有“A”平板按稀释度从高到低的顺序重复此流程。
- 随后使用另一把Drigalski刮板，对重复组“B”平板重复前三步操作。
- 全部平板涂布完成后，用封口膜密封，倒置于28 ～ 30℃培养箱中孵育48小时。

菌落形成单位（CFU）计数方法

- 培养24小时后，首次对各平板菌落进行计数并记录。已计数的菌落需在平皿盖或底部用标记笔标注。完成首次计数后，将平板倒置于28 ～ 30℃条件下继续培养24小时。经过额外24小时培养（累计48小时培养）后，统计24 ～ 48小时内新增的菌落数，与24小时计数结果相加获得CFU总数。
- 每平板菌落数小于30或大于300者不纳入细菌载量计算。低于30菌落因统计学意义不足，视为无效数据；超过300菌落则因难以清晰区分单个CFU而被排除。
- 重叠生长且无明确独立核心的菌落按1个菌落计数。
- 使用TCBS琼脂时，须同时计数绿色与黄色菌落。

计算细菌载量

- 在计算细菌载量前，需检查同一稀释度的“A”平板与“B”平板的菌落数是否相近（处于相同数量级）。若不符合，则表明操作流程存在误差，所得结果不可靠。
- 卤虫孵化液中的细菌载量（CFU/毫升孵化液）按以下公式计算：

$$\text{CFU/毫升} = Z/V_{tot}$$

式中：

Z为培养48小时后所有稀释梯度和平行平板上计数的菌落总数；

V_{tot}为所有平板接种样品体积总和（毫升）。

V_{tot}计算公式为：

$$V_{tot} = n \times V \times (d_1 + d_2 + \cdots + d_{X+1})$$

式中：

n为每个稀释度的重复平板数=2（平板A与平板B）；

V为每平板接种样本体积（毫升）=0.1毫升；

$d_1+d_2+\cdots+d_{X+1}$为平板上接种样本的稀释度（10^0稀释度时$d=1$，10^{-1}稀释度时$d=0.1$，10^{-2}稀释度时$d=0.01$，依此类推，直至$10^{-(X+1)}$稀释度时$d=0.00\cdots01$）；

- 若10^0倍稀释平板的菌落数少于30个，则结果表示为＜300 CFU/毫升。
- 若最高稀释度$10^{-(X+1)}$平板的菌落数超过300个，则结果表示为＞$3.0\times10^{(X+3)}$CFU/毫升。
- 计算卤虫无节幼体的细菌负载量时，需先计算卤虫无节幼体残渣悬浮液的细菌负载量（“CFU/毫升卤虫无节幼体残渣悬浮液”）。其计算方法与卤虫孵化液细菌负载量完全相同，但需采用接种（稀释）卤虫无节幼体残渣悬浮液的平板菌落计数数据，最终获得“CFU/毫升卤虫无节幼体残渣悬浮液”的数值。
- 通过以下分步公式计算单个卤虫无节幼体的细菌负载量（CFU/无节幼体）：

为计算卤虫无节幼体残渣悬浮液中的细菌载量，采用以下公式：

$$\text{CFU}_{ArtSus} = \text{CFU/毫升卤虫无节幼体残渣悬浮液} = Z/V_{tot}$$

式中：

Z为所有稀释梯度和平板重复培养48小时后计数的菌落总数；

V_{tot}为所有平板接种样本体积总和（毫升）。

附录12　国际卤虫水产养殖联盟

四十余年前，一项关于卤虫物种与品系的跨学科研究——国际卤虫研究计划，奠定了鱼类与甲壳类水产养殖产业重要发展的知识基础。该研究促成了首部《卤虫手册》的出版（Sorgeloos等，1986）及多期地方培训课程的开展，由此推动了大量新型卤虫资源的鉴定，卤虫卵在育苗场的应用范围显著扩大。

如今，卤虫支撑着全球1 000万吨高价值水产养殖产品的生产。全球每年消耗卤虫卵3 500 ～ 4 000吨，其中近90%仍依赖天然盐湖的采收。然而，这些盐湖正持续面临人类活动与气候变化的威胁。为确保水产苗种生产的稳定供应，亟须开拓替代性卤虫卵的可持续供给渠道。

国际卤虫水产养殖联盟（International *Artemia* Aquaculture Consortium，IAAC）是由亚太水产养殖中心联盟发起的新倡议，目前已汇聚来自30余个国家的46所高校及研发机构。联盟致力于为水产养殖产业提供可持续供给的卤虫资源，并推动卤虫前沿知识的探索，重点开拓以下领域的发展新机遇：

- 卤虫生物多样性及其盐湖栖息地保护；
- 采用科学规范与操作指南，实现野生资源的可持续采收；
- 探索亚洲和非洲的季节性小型盐场中盐和卤虫联合生产的社会经济机遇，拓展从业者的额外收入来源；
- 开展气候变化对卤虫生产影响的专项研究；
- 深入开展卤虫基础生物学研究（包括孤雌生殖与滞育机制、脂质代谢等）；
- 通过品系筛选与选择育种，开发卤虫的新应用领域；
- 推动卤虫的规模化养殖与集约化鱼类/甲壳类水产养殖系统的整合；
- 将卤虫成虫作为高价值蛋白原料纳入当地膳食体系；
- 推广优化利用指南，并配套开展培训与技术服务；
- 制定卤虫卵产品认证规范，涵盖物种、品系、地理来源、理想孵化率获取条件及可持续采收规程等要素。

2022年，第十一届粮农组织渔业委员会（COFI）水产养殖分委会（SCA）在罗马召开，会议正式确认了国际卤虫水产养殖联盟（IAAC）在技术开发和天然卤虫资源可持续管理方面的积极作用。2023年，第十二届COFI-SCA在墨西哥埃莫西约（Hermosillo）举行，进一步建议制定野生卤虫资源可持续采收实践规程与卤虫卵产品认证标准，同时推进生物多样性保护行动。

有关国际卤虫水产养殖联盟（IAAC）的更多信息，包括其活动动态、成员构成、指导委员会和顾问委员会等详情，请访问联盟官方网站：www.artemia.info



国际卤虫水产养殖联盟（IAAC）于2019年11月在吉隆坡召开的水产养殖会议上构想成立。左起依次为：Meezanur Rahman、Yeong Yik Sung、隋丽英、Patrick Sorgeloos、Gilbert Van Stappen和Nguyen Van Hoa。

参考文献：

Sorgeloos, P., Lavens, P., Léger, Ph., Tackaert, W. & Versichele, P. 1986. *Manual for the culture and use of brine shrimp Artemia in aquaculture*. State University of Ghent, Belgium, 319 pp.

图书在版编目（CIP）数据

卤虫生产与使用手册 / 联合国粮食及农业组织编著；隋丽英译. -- 北京：中国农业出版社，2026. 10.
（FAO中文出版计划项目丛书）. -- ISBN 978-7-109-35032-8

Ⅰ. S963.21-62

中国国家版本馆CIP数据核字第2026K76U55号

著作权合同登记号：图字01-2026-1314号

卤虫生产与使用手册
LUCHONG SHENGCHAN YU SHIYONG SHOUCE

中国农业出版社出版
地址：北京市朝阳区麦子店街18号楼
邮编：100125
责任编辑：郑　君
版式设计：王　晨　　责任校对：张雯婷
印刷：北京印刷集团有限责任公司
版次：2026年10月第1版
印次：2026年10月北京第1次印刷
发行：新华书店北京发行所
开本：700mm × 1000mm　1/16
印张：14
字数：267千字
定价：138.00元

版权所有・侵权必究
凡购买本社图书，如有印装质量问题，我社负责调换。
服务电话：010-59195127（教材） 010-59195115（非教材）

卤虫生产与使用手册

本手册简明介绍了卤虫生物学和水产养殖市场上使用的重要天然卤虫卵资源的基本信息，系统阐述了池塘和罐体系统中卤虫生产的基本原则与操作流程，提供了卤虫作为重要水产生物饵料的最新应用指南和方法。书中附有插图、表格和实用工作表，便于读者准确理解与实际操作。本书是从事卤虫相关工作人员的必备参考书。

封面设计：田　雨

欢迎登录中国农业出版社网站：http://www.ccap.com.cn
欢迎拨打中国农业出版社读者服务部热线：010-59195115
购书敬请关注中国农业出版社天猫旗舰店：
中国农业出版社官方微信号
乡村振兴分社投稿邮箱：1377642004@qq.com

ISBN 978-7-109-35032-8

定价：138.00元