

中国海洋大学教材建设基金资助

AQUACULTURE
ECOLOGY

水产养殖生态学

董双林 田相利 高勤峰 编著



科学出版社

中国海洋大学教材建设基金资助

水产养殖生态学

AQUACULTURE ECOLOGY

董双林 田相利 高勤峰 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是国内外第一部水产养殖生态学教材,反映了我国作为世界第一水产养殖大国为步入可持续发展之路而进行的系统性探索。我国水产养殖模式在世界上最为多样,遇到的和已研究的问题也最多,因此,本书对其他国家也有借鉴价值。本书在水产养殖生态学方面的特色主要表现为:研究对象的复杂性和多样性、研究对象的多功能性、服务于产业发展的应用性和学科交叉性。本书内容既考虑长远也关注当下,探讨增产、节能、减排三者综合效益的最大化,探讨在食物生产与环境保护间求得平衡或共赢的原理。

本书是水产养殖专业研究生教材,也可作为大专院校水产养殖专业教师和本科生教学和学习参考书,还可作为水产养殖、水生生物专业和环保工作人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

水产养殖生态学/董双林,田相利,高勤峰编著. —北京:科学出版社, 2017.2

ISBN 978-7-03-051734-0

I. ①水… II. ①董… ②田… ③高… III. ① 水产养殖—生态学 IV. ①S96

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第025619号

责任编辑:李秀伟 白雪 / 责任校对:彭涛

责任印制:张伟 / 封面设计:北京铭轩堂广告设计有限公司

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年2月第一版 开本:787×1092 1/16

2017年2月第一次印刷 印张:24 1/2

字数:580 000

定价:128.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

十多年前，世界水产学会前主席、2014 年度中国政府友谊奖获得者、比利时根特大学 Patrick Sorgeloos 教授来中国海洋大学参观访问，当他看到我们实验室的名称是“水产养殖生态学实验室 Laboratory of Aquaculture Ecology”时，吃惊地问我，“你们已经把水产养殖生态学作为一个学科加以研究了吗？”我回答，“是的。我们多年前就把它作为水产养殖的分支学科或方向加以研究了”。他对此给予了盛赞。

我们实验室于 1988 年由李德尚教授建立，原名是水产养殖生物学实验室，1998 年更为现用名，并开始为研究生开设“水产养殖生态学概论”课程。过去，我们多关注水产养殖生物的生长、产量等问题，而现在的水产养殖生态学还要从更宽的视野关注水产养殖与环境相互作用关系等。

水产养殖生态学是水产养殖学与生态学相结合的产物，属应用生态学范畴，是研究水生经济生物及其养殖生产活动与环境相互作用关系、养殖模式（系统）构建和管理的学问。其目标是为水产养殖业的可持续发展，即保护水域生态环境、合理利用资源和提高经济效益，奠定生态学理论基础。

水产养殖生态学的应用属性决定了其需要与时俱进，研究重点需应产业发展的需求而变化。20 世纪 80 年代，我的恩师李德尚教授曾研究水库施肥理论、水库鱼产力等问题，目的是提高水库鱼类养殖产量。但到了 80 年代末 90 年代初，随着我国水产养殖规模的迅速扩大，特别是网箱投饲养殖模式的推广，养殖污染开始受到关注，李先生又转而重点研究水库养鱼的负荷力等问题。近 20 年来，我们的实验室一直专注于池塘安全、清洁生产原理与模式研究。近几年，我们又开始关注生态集约化养殖和远海养殖等问题。

自从为研究生讲授“水产养殖生态学概论”课程以来，我一直在问自己一个问题：“50 年或 100 年后，我国水产养殖业会是一个什么样的格局？”在每一年给研究生讲绪论内容时，我也会问他们同样的问题。当然，我没有也不可能有什么“标准”答案，我的目的就是让同学们了解水产养殖业存在哪些本源性问题，启发他们挣脱既有框框的束缚，并在后续课程中思考解决问题的途径。

当前，流行性疾病是对水产养殖业的最大威胁，众多专家正在投入大量精力从各方面研究病害防治问题。已故的雷霖霖院士在中国海洋大学作学术报告时曾说，“水产养殖的病害多半是养出来的！”我十分赞同雷先生的观点。试想，如果最开始在养殖水体发现得病的养殖生物时，我们不是试图去医治它，而是将它捞起并付之一炬，我们的产业现在可能是另外一种境况！我想，他那不是否认水产医学工作的作用，而是启发我们透过现象认识问题的逻辑性本源。疫苗是最后一道防线，消灭传染源、切断传播途径才应是第一道防线！我国水产养殖很多病害问题是管理问题和短期根除的经济承受能力问题。

其实，我们身边类似的逻辑性矛盾问题还很多。例如，专家预测，到 2030 年我国水产养殖还需增加 2000 万 t 的产量，而且这种增产主要得靠提高集约化程度来实现；但

是，随着集约化程度的提高，生产单位重量水产品的平均能耗也会迅速增加。我国政府已承诺，到 2030 年要使我国单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 60%~65%。我们如何才能同时实现增产、节能（低碳）两个目标呢？

水产养殖生态学的特色之一就是既考虑长远也关注当下。投饲养殖模式的根本出路是向离岸养殖甚或向远海发展，但这并不意味着我们现在就应放弃滩涂池塘养殖和工厂化养殖等，而是引导其向生态集约化发展，即在保护环境、促进经济社会发展的前提下，高效地生产安全的水产品。生态集约化追求的是增产、节能、减排三者综合效益的最大化，在食物生产（当下社会急需）与环境保护（未来可持续发展）间求得平衡。本书的内容有些是为解决现实问题而写，而另一些内容则是为思考未来发展而写。

本书共 13 章：第 1 章是绪论，介绍水产养殖生态学概念、发展、特色等内容；第 2 章至第 5 章和第 13 章是介绍养殖系统水平的宏观的或涉及长远发展的内容，包括养殖系统的结构与特征、养殖活动对环境的影响、养殖容量、养殖生产的生态足迹等；其余七章介绍养殖生态学具体问题，如养殖动物的生长、水质调控原理、综合养殖及其结构优化、阳光工厂化养殖原理、盐碱地渔业利用原理、生态防病等。

水产养殖生态学是一个发展很快的学科或研究方向，每天都有大量新知识产生、发表，就在即将向出版社提交书稿时，作者又看到一些新的值得推介给读者的研究成果。明年春天是李德尚先生九十华诞，作为送给先生寿辰的礼物，几位弟子编著了此书。由于时间关系，像池塘底质改良、有益微生物及其调控等内容没能写进本书，只好待再版时作补充了。

本书由王卫民教授和赵文教授审稿，张家松博士和闫冬春博士对第 12 章对虾白斑病生态防控原理提出了一些宝贵的修改意见，作者在此对他们表示由衷的感谢！

本书是以本实验室研究成果为核心编著的，一定会有一些国内外同行很好的学术研究成果没有编入。同时，由于作者水平有限，书中一定存在不少瑕疵甚或错误，敬请各位专家和广大读者批评、指正。

董双林

2016 年 8 月于青岛

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 水产养殖与水产养殖生态学	1
1.2 水产养殖生态学的形成和发展	2
1.3 我国水产养殖业面临的问题和可持续发展	5
1.3.1 我国水产养殖业的现状和发展趋势	5
1.3.2 我国水产养殖业发展面临的主要问题	9
1.3.3 先辈们的智慧及其启示	10
1.3.4 水产养殖业的健康发展	12
1.4 水产养殖生态学的研究方向和特色	16
1.4.1 水产养殖生态学的研究方向	17
1.4.2 水产养殖生态学的特色	17
第 2 章 水产养殖生态系统	22
2.1 水产养殖系统的分类	22
2.1.1 水产养殖系统的传统分类	22
2.1.2 基于系统能量来源的分类	23
2.1.3 基于系统代谢特征的分类	25
2.1.4 基于生态限制因子的分类	26
2.2 水产养殖生物的主要物理环境	30
2.2.1 水的物理特性	31
2.2.2 水体的光照	31
2.2.3 水体的温度	35
2.2.4 水体的含盐量	40
2.3 水产养殖生物的主要化学环境	43
2.3.1 溶解氧	43
2.3.2 pH 及其缓冲系统	49
2.3.3 氨与硫化氢	50
2.4 养殖水体间生态学差异	52
2.4.1 水库生态连续体	52
2.4.2 养殖水体的生态学差异	57
2.4.3 养殖水体的限制性营养元素和生态演替	58
2.5 水产养殖生态系统的生态金字塔	61

第3章	养殖池塘系统生物群落与食物网结构	64
3.1	养殖池塘的生物群落	64
3.1.1	生物群落的概念	64
3.1.2	生物群落结构的计算方法	65
3.1.3	水产养殖活动对生物群落结构的影响	66
3.2	水产养殖池塘的食物网结构	71
3.2.1	食物网的概念	71
3.2.2	食物网结构分析方法	72
3.2.3	水产养殖系统食物网结构	73
第4章	养殖水体的生产力与养殖容量	78
4.1	养殖水体生产力和养殖容量及其影响因素	78
4.1.1	养殖水体的生产力	79
4.1.2	养殖水体的养殖容量	79
4.1.3	影响生产力的因素	80
4.1.4	影响养殖容量的因素	83
4.2	养殖水体生产力评估	83
4.2.1	池塘养殖生产力评估	83
4.2.2	大型水体养殖生产力评估	87
4.3	水体养殖容量评估	94
4.3.1	海湾海带养殖容量评估	94
4.3.2	开放海域扇贝养殖容量评估	95
4.3.3	湖泊河蟹养殖容量评估	97
4.3.4	海水池塘对虾养殖容量评估	98
4.3.5	大水域养殖容量评估	101
第5章	水产养殖与环境的相互作用	104
5.1	水产养殖对水质的要求	104
5.2	外源污染物对水产养殖的影响	105
5.2.1	来源于农业和城市排污的营养物质	105
5.2.2	有害水华(赤潮)	106
5.2.3	油污染	107
5.2.4	重金属	107
5.2.5	杀虫剂和有机锡(TBT)	108
5.3	水产养殖对环境的负面影响	109
5.3.1	沉积作用及对水流的阻碍	109
5.3.2	富营养化	110
5.3.3	化学物质	112
5.3.4	外来物种入侵与养殖鱼类逃逸	115
5.3.5	红树林破坏	117

5.3.6	水产养殖与其他用途的矛盾	117
5.4	水产养殖与温室气体排放	117
5.4.1	水产养殖的直接能耗及碳排放	118
5.4.2	养殖生物捕获产生的碳输出	120
5.4.3	养殖水体对碳的封存	120
5.4.4	池塘水—气界面温室气体通量	123
5.4.5	碳汇渔业	125
第 6 章	水产养殖动物的生长	128
6.1	水生动物的生长模式	128
6.1.1	水生动物生长的特点和个体大小	128
6.1.2	水生动物的生长模型	130
6.2	温度对水产养殖动物生长的影响	133
6.2.1	水生动物对温度的适应性	134
6.2.2	水温对养殖动物生长的影响	135
6.3	含盐量对水产养殖动物生长的影响	139
6.3.1	水生动物对含盐量的适应性	139
6.3.2	含盐量对养殖动物生长的影响	141
6.4	光照对水产养殖动物生长的影响	143
6.4.1	水生动物对光照的适应性	143
6.4.2	光照对养殖动物生长的影响	145
6.5	刺参生长的个体变异	149
6.5.1	密度和规格对刺参个体生长变异的影响	149
6.5.2	单个体饲养条件下刺参的个体生长变异	152
6.5.3	物理接触对刺参个体生长变异的影响	154
6.6	周期性饥饿后水生动物的补偿生长	156
6.6.1	水生动物的补偿生长现象	156
6.6.2	水生动物补偿生长程度和变化特点	157
6.6.3	周期性饥饿后水生动物的补偿生长	158
6.6.4	影响补偿生长的因素	159
6.6.5	补偿生长的生理机制	166
6.6.6	补偿生长理论应用实践	166
第 7 章	环境因子周期性波动对水生生物的影响	168
7.1	温度周期性波动对水生生物生长的影响	168
7.1.1	温度日节律性波动对大型海藻的影响	169
7.1.2	温度周期性波动对水生动物的影响	170
7.2	盐度周期性波动对水生生物生长的影响	178
7.2.1	盐度周期性波动对大型海藻的影响	179
7.2.2	盐度周期性波动对水生动物的影响	179

7.3	周期性干出对大型海藻生长的影响	182
7.4	光照节律性波动对水生生物的影响	184
7.4.1	光照节律性波动对孔石莼的影响	184
7.4.2	光照节律性波动对对虾的影响	187
7.5	水环境中 Ca^{2+} 浓度波动对凡纳滨对虾的影响	189
7.6	水环境 pH 波动对凡纳滨对虾的影响	191
7.6.1	pH 变动幅度对凡纳滨对虾生长和能量收支的影响	191
7.6.2	pH 变动周期对凡纳滨对虾生长的影响	192
第 8 章	养殖水质的生物调控	194
8.1	水域生态系统的生物操纵	194
8.2	浮游植物的生产及其限制因子	197
8.2.1	浮游植物的光合作用和呼吸作用	197
8.2.2	影响浮游植物生长的主要理化因子	198
8.2.3	施肥池塘中浮游植物与渔产量的关系	201
8.2.4	养殖池塘中的浮游植物群落	202
8.3	大型海藻营养吸收动力学	204
8.3.1	大型海藻的营养需求	204
8.3.2	铁限制对大型海藻的影响	205
8.3.3	大型海藻对氮的吸收动力学	207
8.3.4	大型海藻对磷的吸收动力学	212
8.4	大型海藻与微藻的相互作用	217
8.4.1	大型海藻与微藻的营养竞争	217
8.4.2	大型海藻对微藻的克生作用	221
8.5	滤食性贝类和滤食性鱼类的摄食	224
8.5.1	滤食性贝类和滤食性鱼类摄食的数学表达	224
8.5.2	滤食性贝类和滤食性鱼类的摄食能力	227
8.5.3	滤食性鱼类的摄食节律和对食粒的选择性	233
8.5.4	滤食性鲢呼吸与摄食的关系	234
8.6	滤食性贝类的代谢及其对浮游植物的增殖作用	237
8.6.1	滤食性贝类的呼吸和排泄	237
8.6.2	滤食性贝类的代谢产物对浮游植物的增殖作用	239
8.7	滤食性贝类对水质和底质的影响	240
8.7.1	太平洋牡蛎对养虾池塘水化学状况的影响	240
8.7.2	太平洋牡蛎对养虾池塘底质的影响	242
8.7.3	海湾扇贝对养殖池塘水质的影响	243
8.7.4	菲律宾蛤仔对养殖池塘水质的影响	244
8.7.5	海湾扇贝、缢蛏、罗非鱼对养虾池塘浮游生物影响的比较	246
8.8	滤食性鱼类放养对水质的影响	247

8.8.1	放养滤食性鱼类对水质和浮游生物群落的影响	247
8.8.2	滤食性动物对养殖水体浮游细菌的影响	251
8.8.3	放养鲢对水体营养盐分布和物质循环格局的影响	252
第 9 章	综合水产养殖及其结构优化	254
9.1	中国综合水产养殖的定义和历史沿革	254
9.1.1	综合水产养殖的定义	254
9.1.2	中国综合水产养殖的历史沿革	255
9.2	综合水产养殖的基本原理	257
9.2.1	养殖废物的资源化利用	257
9.2.2	通过互补机制稳定改善水质	258
9.2.3	养殖水体资源的充分利用	260
9.2.4	生态防病	262
9.2.5	综合水产养殖中的辩证思维	262
9.3	综合水产养殖系统的分类	263
9.3.1	化学功能互补综合型	264
9.3.2	养殖种类综合型	265
9.3.3	系统综合型	267
9.4	综合水产养殖结构优化的原理和方法	269
9.4.1	综合水产养殖结构优化的原理	269
9.4.2	综合水产养殖结构优化的方法	271
9.5	水库综合养殖结构的优化	273
9.6	池塘综合养殖结构的优化	275
9.6.1	草鱼、鲢和鲤综合养殖结构优化	275
9.6.2	海水对虾池塘综合养殖结构的优化	278
第 10 章	阳光工厂化养殖原理	282
10.1	传统工厂化养殖模式	282
10.2	阳光工厂化养殖原理及模式	284
10.2.1	阳光工厂化养殖原理	284
10.2.2	阳光工厂化养殖模式	287
10.3	阳光工厂化养殖亟待完善的问题	293
10.3.1	阳光工厂化车间的光照与温度控制技术	294
10.3.2	适宜养殖种类及适宜配比的优化	294
10.3.3	不同水生植物混养方式的选择及混养装置的设计	294
10.3.4	阳光工厂化养殖机制研究	294
10.3.5	养殖管理的规范化	294
第 11 章	低洼盐碱地渔业利用的生态学基础	296
11.1	低洼盐碱地池塘水质和生物环境	297
11.1.1	低洼盐碱地的基塘系统	297
11.1.2	低洼盐碱地池塘的水质特点	298

11.1.3	低洼盐碱地池塘的生物	299
11.2	养殖动物对盐碱的耐受性	300
11.2.1	pH对淡水养殖动物的影响	300
11.2.2	常见养殖动物对含盐量的耐受性	301
11.2.3	常见养殖动物对碱度的耐受性	302
11.3	水环境中阳盐离子对对虾生长的影响	303
11.3.1	对虾对水体 Na^+/K^+ 值的适应性	303
11.3.2	对虾对水体 Ca^{2+} 浓度的适应性	304
11.3.3	对虾对水体 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 值的适应性	305
11.4	低洼盐碱地养殖池塘水质调控	305
11.4.1	滤食性鱼类对盐碱池塘水质的影响及其调控	306
11.4.2	施 KCl 和 CaCl_2 对盐碱池塘水质的改良作用	309
11.4.3	施肥对盐碱池塘水质的改良作用	311
第 12 章	对虾白斑病生态防控原理	313
12.1	对虾 WSSV 的传播途径	313
12.1.1	WSSV 的易感动物和宿主	314
12.1.2	WSSV 的若干传播途径	314
12.2	对虾白斑病暴发与环境的关系	316
12.2.1	WSSV 致病性与养殖水体物理环境的关系	316
12.2.2	WSSV 致病性与养殖水体化学环境的关系	318
12.2.3	WSSV 致病性与养殖水体生物环境的关系	319
12.3	对虾白斑病的综合预防	320
12.3.1	养虾水体的前期处理	320
12.3.2	对虾养殖的综合防病措施	321
第 13 章	多维度视角下的水产养殖系统	326
13.1	水产养殖系统的能值分析	326
13.1.1	能值分析理论	328
13.1.2	能值分析的基本步骤和方法	331
13.1.3	我国三种刺参养殖模式可持续性评估	333
13.1.4	工厂化养殖大菱鲂和石斑鱼系统的能值分析	337
13.2	水产养殖系统生命周期评价分析	340
13.2.1	生命周期评价方法简介	341
13.2.2	刺参不同养殖系统的生命周期评价	343
13.2.3	LCA 在水产养殖系统可持续性分析中的作用	346
13.3	水产养殖系统的碳足迹分析	348
13.3.1	碳足迹的研究方法简介	348
13.3.2	三种刺参养殖系统碳足迹分析	349
	参考文献	352

Contents

Preface

1 Introduction	1
1.1 Aquaculture and aquaculture ecology	1
1.2 Origination and development of aquaculture ecology	2
1.3 Problems and healthy development of China's aquaculture industry	5
1.3.1 Status and trends of China's aquaculture development	5
1.3.2 Major problems facing of China's aquaculture development	9
1.3.3 Wisdom of Chinese ancestors enlightenment	10
1.3.4 Healthy development of China's aquaculture industry	12
1.4 Main research areas and characteristics of aquaculture ecology	16
1.4.1 Main research areas of aquaculture ecology	17
1.4.2 Characteristics of aquaculture ecology	17
2 Aquaculture ecosystems	22
2.1 Classification of aquaculture systems	22
2.1.1 Traditional classification of aquaculture systems	22
2.1.2 Classification based on energy sources	23
2.1.3 Classification based on metabolic features	25
2.1.4 Classification based on ecological limiting factors	26
2.2 Main physical environment of aquaculture organisms	30
2.2.1 Physical properties of water	31
2.2.2 Light in waters	31
2.2.3 Temperature of waters	35
2.2.4 Salt contents of waters	40
2.3 Main chemical environment of aquaculture organisms	43
2.3.1 Dissolved oxygen	43
2.3.2 pH and its buffer system in water	49
2.3.3 Ammonia and hydrogen sulfide	50
2.4 Ecological differences among aquaculture waters	52
2.4.1 Reservoir ecological continuum	52
2.4.2 Ecological differences among inland waters	57
2.4.3 Limiting nutrient elements and ecological succession in aquaculture waters	58
2.5 Ecological pyramids in aquaculture system	61
3 Biological community and food web structure of aquaculture pond systems	64
3.1 Biological community of aquaculture pond system	64
3.1.1 Concept of biological community	64
3.1.2 Calculation method of biological community structure	65

3.1.3	Effects of culture activities on biological community structure	66
3.2	Food web structure of aquaculture pond system	71
3.2.1	Concept of food web structure	71
3.2.2	Analysis method of food web structure	72
3.2.3	Research and application of food web structure in aquaculture system	73
4	Productivity and carrying capacity of aquaculture waters	78
4.1	Productivity and carrying capacity as well as their influence factors of aquaculture waters	78
4.1.1	Productivity of aquaculture waters	79
4.1.2	Carrying capacity of aquaculture waters	79
4.1.3	Influence factors on productivity	80
4.1.4	Influence factors on carrying capacity	83
4.2	Productivity evaluation of aquaculture waters	83
4.2.1	Productivity evaluation of aquaculture ponds	83
4.2.2	Productivity evaluation of large aquaculture waters	87
4.3	Carrying capacity evaluation of aquaculture waters	94
4.3.1	Carrying capacity evaluation of kelp in bay	94
4.3.2	Carrying capacity evaluation of scallop at open sea	95
4.3.3	Carrying capacity evaluation of mitten crab in lake	97
4.3.4	Carrying capacity evaluation of shrimp in mariculture pond	98
4.3.5	Carrying capacity evaluation of large aquaculture waters	101
5	Interactions between aquaculture and environment	104
5.1	Water quality requirements for aquaculture	104
5.2	Effects of exogenous pollutants on aquaculture	105
5.2.1	Nutrients from agriculture and urban sewage	105
5.2.2	Harmful algal blooms	106
5.2.3	Oil pollution	107
5.2.4	Heavy metals	107
5.2.5	Pesticides and TBT	108
5.3	Negative effects of aquaculture on environment	109
5.3.1	Sedimentation and obstruction of water flows	109
5.3.2	Eutrophication	110
5.3.3	Chemical residues	112
5.3.4	Alien species invasion and escape of farming fish	115
5.3.5	Mangrove destroy	117
5.3.6	Contradiction between aquaculture and other uses	117
5.4	Aquaculture and greenhouse gas emission	117
5.4.1	Direct energy consumption and carbon emission in aquaculture	118
5.4.2	Carbon output from aquaculture	120
5.4.3	Carbon sequestration in aquaculture waters	120
5.4.4	CO ₂ and CH ₄ fluxes at the water-air interface of aquaculture waters	123
5.4.5	Carbon sinking fisheries	125

6 Growth of aquaculture animals	128
6.1 Growth patterns of aquatic animals.....	128
6.1.1 Growth characteristics and individual size of aquatic animals.....	128
6.1.2 Growth model of aquatic animals.....	130
6.2 Effects of temperature on the growth of aquaculture animals.....	133
6.2.1 Adaptability of aquatic animals to temperature.....	134
6.2.2 Effects of temperature on the growth of aquaculture animals.....	135
6.3 Effects of salt contents on the growth of aquaculture animals.....	139
6.3.1 Adaptability of aquatic animals to salt contents.....	139
6.3.2 Effects of salt contents on the growth of aquaculture animals.....	141
6.4 Effects of light on the growth of aquaculture animals.....	143
6.4.1 Adaptability of aquatic animals to light.....	143
6.4.2 Effects of light on the growth of aquaculture animals.....	145
6.5 Individual variation in weight of sea cucumber.....	149
6.5.1 Effect of density and size on growth variation.....	149
6.5.2 Growth variation of sea cucumber housed individually.....	152
6.5.3 Effect of physical contact of the individual on growth variation.....	154
6.6 Compensatory growth of aquatic animals after periodic starvation.....	156
6.6.1 Compensatory growth phenomenon of aquatic animals.....	156
6.6.2 Degree and characteristics of growth compensatory of aquatic animals.....	157
6.6.3 Compensatory growth of aquatic animals after periodic starvation.....	158
6.6.4 Factors affecting compensatory growth.....	159
6.6.5 Physiological mechanism of compensatory growth.....	166
6.6.6 Application practice of compensatory growth theory.....	166
7 Effects of cyclical fluctuation of environmental factors on aquatic organisms	168
7.1 Effects of circadian rhythms of temperature on growth of aquatic organisms.....	168
7.1.1 Effects of circadian rhythms of temperature on macro-algae.....	169
7.1.2 Effects of circadian rhythms of temperature on aquatic animals.....	170
7.2 Effects of circadian rhythms of salinity on growth of aquatic organisms.....	178
7.2.1 Effects of circadian rhythms of salinity on macro-algae.....	179
7.2.2 Effects of circadian rhythms of salinity on aquatic animals.....	179
7.3 Effects of periodical emersion on growth of macro-algae.....	182
7.4 Effects of circadian rhythms of light on growth of aquatic organisms.....	184
7.4.1 Effects of circadian rhythms of light on <i>Ulva</i>	184
7.4.2 Effects of circadian rhythms of light on shrimp.....	187
7.5 Effects of fluctuation of Ca^{2+} concentration in water on shrimp.....	189
7.6 Effects of pH fluctuation of water on shrimp.....	191
7.6.1 Effects of fluctuation range of water pH on growth and energy budget.....	191
7.6.2 Effects of circadian rhythms of water pH on growth.....	192
8 Biological control of water quality in aquaculture	194
8.1 Biomanipulation of water ecosystems.....	194

8.2	Production of phytoplankton and its limiting factors	197
8.2.1	Photosynthesis of phytoplankton	197
8.2.2	Main physical and chemical factors affecting the growth of phytoplankton	198
8.3.3	Relationship between phytoplankton and fish yield in fertilization ponds	201
8.4.4	Phytoplankton community in aquaculture ponds	202
8.3	Nutrient uptake kinetics of macro-algae	204
8.3.1	Nutrient requirement of macro-algae	204
8.3.2	Response of macro-algae to iron stress	205
8.3.3	Nitrogen uptake kinetics of macro-algae	207
8.3.4	Phosphorous uptake kinetics of macro-algae	212
8.4	Interaction between macro-algae and micro-algae	217
8.4.1	Nutrient competition between macro-algae and micro-algae	217
8.4.2	Allelopathic effects macro-algae on micro-algae	221
8.5	Feeding of filter-feeding fish and bivalves	224
8.5.1	Mathematical expression of filter-feeding fish and bivalves	224
8.5.2	Feeding capacity of filter-feeding fish and bivalves	227
8.5.3	Feeding rhythm and food selection of filter-feeding fish	233
8.5.4	Relationship between respiration and feeding of silver carp	234
8.6	Metabolism of bivalves and its effect on phytoplankton multiplication	237
8.6.1	Respiration and excretion of bivalves	237
8.6.2	Phytoplankton multiplication caused by bivalve excretion	239
8.7	Effects of bivalves on water quality and sediment quality	240
8.7.1	Effects of <i>Crassostrea gigas</i> on water chemical condition of shrimp farming pond	240
8.7.2	Effects of <i>Crassostrea gigas</i> on sediment quality of shrimp farming pond	242
8.7.3	Effects of <i>Argopecten irradians</i> on water quality of mariculture pond	243
8.7.4	Effects of <i>Ruditapes philippinarum</i> on water quality of mariculture pond	244
8.7.5	Comparison of effects of <i>Argopecten irradians</i> , <i>Sinonovacula constricta</i> and tilapia on plankton of mariculture pond	246
8.8	Effects of filter-feeding fish on water quality	247
8.8.1	Effects of fish stocking on water quality and plankton community	247
8.8.2	Effects of fish stocking on planktonic bacteria	251
8.8.3	Effects of fish stocking on nutrient distribution and material circulation	252
9	Structure optimization of integrated aquaculture	254
9.1	Definition and history of INTAQ in China	254
9.1.1	Definition of INTAQ	254
9.1.2	History of INTAQ in China	255
9.2	Principles of INTAQ	257
9.2.1	Waste reclamation	257
9.2.2	Water quality maintenance through complementary mechanism	258
9.2.3	Making full use of the resources in the waters	260
9.2.4	Diseases prevention ecologically	262

9.2.5	Dialectical way of thinking in INTAQ	262
9.3	Classification of INTAQ systems	263
9.3.1	Complementary chemical functions integration	264
9.3.2	Species integration	265
9.3.3	Systems integration	267
9.4	Ecological rationales and methods for structure optimization of INTAQ	269
9.4.1	Ecological rationales for structure optimization of INTAQ	269
9.4.2	Methods for structure optimization of INTAQ	271
9.5	Structure optimization of INTAQ in reservoir	273
9.6	Structure optimization of INTAQ in ponds	275
9.6.1	Structure optimization of integration of grass carp, silver carp and common carp	275
9.6.2	Structure optimization of shrimp INTAQ ponds	278
10	Principles of industrialized solar aquaculture systems (INSAS)	282
10.1	Traditional models of industrialized fish culture systems	282
10.2	Principles and model of INSAS	284
10.2.1	Principles of INSAS	284
10.2.2	Model of INSAS	287
10.3	Aspects need to be improved in INSAS	293
10.3.1	Illumination and temperature control technic in INSAS workshop	294
10.3.2	Suitable culture species and proportion optimization	294
10.3.3	Selection of polyculture pattern and design of polyculture device for different aquatic plants	294
10.3.4	Study on the mechanism of INSAS	294
10.3.5	Standardization of aquaculture management	294
11	Ecological basis of aquaculture in low-lying saline alkaline land	296
11.1	Pond water quality and biological environment of low-lying saline alkaline land	297
11.1.1	Pond based system in low-lying saline alkaline land	297
11.1.2	Water quality of pond in low-lying saline alkaline land	298
11.1.3	Organisms of pond in low-lying saline alkaline land	299
11.2	Tolerance of aquaculture animals to saline alkaline	300
11.2.1	Effects of pH on freshwater culture species	300
11.2.2	Tolerance of popular culture animals to salt contents	301
11.2.3	Tolerance of popular culture animals to alkaline	302
11.3	Effects of salt ions in water environment on shrimp growth	303
11.3.1	Adaptability of shrimp to Na^+/K^+ in water	303
11.3.2	Adaptability of shrimp to Ca^{2+} concentration in water	304
11.3.3	Adaptability of shrimp to $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ in water	305
11.4	Pond water quality control in low lying saline alkali land	305
11.4.1	Effects of filter feeding fish on water quality of saline alkaline ponds and its regulation	306

11.4.2	Effects of applying KCl and CaCl ₂ on water quality of saline alkaline ponds	309
11.4.3	Effects of Fertilization on water quality in saline alkaline ponds	311
12	Principles of ecological prevention and control of white spot disease of shrimp	313
12.1	Infection pathway of WSSV in shrimp	313
12.1.1	Hosts of WSSV	314
12.1.2	Several infection pathway of WSSV	314
12.2	Relationship between the outbreak of white spot disease and the environment	316
12.2.1	Relationship between WSSV pathogenicity and physical environment	316
12.2.2	Relationship between WSSV pathogenicity and chemical environment	318
12.2.3	Relationship between WSSV pathogenicity and biological environment	319
12.3	Comprehensive prevention of white spot disease	320
12.3.1	Preliminary treatment of pond water for shrimp farming	320
12.3.2	Comprehensive measures for prevention of shrimp diseases	321
13	Aquaculture systems from multi perspectives of view	326
13.1	Emergy analysis of aquaculture systems	326
13.1.1	Emergy analysis theory	328
13.1.2	Basic steps and methods of emergy analysis	331
13.1.3	Sustainability evaluation of three aquaculture systems of sea cucumber	333
13.1.4	Emergy analysis of intensive aquaculture systems for turbot and grouper	337
13.2	Life Cycle Assessment of aquaculture systems	340
13.2.1	Introduction Life Cycle Assessment	341
13.2.2	LCA of different aquaculture system of sea cucumber	343
13.2.3	The role of LCA in the sustainability analysis of aquaculture systems	346
13.3	Carbon footprint analysis of aquaculture system	348
13.3.1	Introduction to the research methods of carbon footprint	348
13.3.2	Carbon footprint analysis of three aquaculture system of sea cucumber	349
	References	352