



农业重大科学研究成果专著

ECOLOGICAL FOUNDATION
OF INTEGRATED AQUACULTURE
IN CHINA

董双林◎著

中国综合水产养殖的 生态学基础



科学出版社

农业重大科学研究成果专著

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

中国综合水产养殖的生态学基础

Ecological Foundation of Integrated
Aquaculture in China

董双林 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是一部系统介绍我国综合水产养殖原理和技术的专著,是作者及其团队多年关于综合水产养殖研究工作的总结。作者系统地回顾了我国综合水产养殖的历史沿革,归纳了其依据的生态学原理和系统分类,系统地介绍了综合养殖系统中主养生物之一——对虾的养殖生态学和系统中常用工具生物如大型海藻、滤食性鱼类、滤食性贝类和刺参的相关养殖生态学,阐述了综合水产养殖结构的优化、综合养殖水体的生产力与养殖容量,展望了综合水产养殖在未来水产养殖业发展中的作用。本书内容新颖、系统,图文并茂,并进行了较为详尽的英文注释。

本书可作为大专院校水产养殖专业师生教学、学习参考书和水产养殖管理、科研和技术推广人员的工具书,也可作为水生生物学和水域环保工作人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

中国综合水产养殖的生态学基础 / 董双林著. —北京: 科学出版社, 2015.1

ISBN 978-7-03-042065-7

I. ①中… II. ①董… III. ①水产养殖—生态学—研究—中国 IV. ①S96

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 227420 号

责任编辑: 李秀伟 李 悦 高璐佳 / 责任校对: 彭 涛

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 铭轩堂设计公司

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 1 月第 一 版 开本: 787 × 1092 1/16

2015 年 1 月第一次印刷 印张: 23 插页 1

字数: 545 000

定价: 150.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

改革开放以来，中国水产养殖业发展取得了举世瞩目的成就，成为世界第一水产养殖大国、世界第一渔业大国，也是世界上唯一水产养殖产量超过捕捞产量的国家，即中国是通过人类活动干预提升水域生态系统食物供给功能并获得成功的国家。几十年来，水产养殖作为中国大农业的重要产业，不仅在保障市场供应、解决吃鱼难、促进农村产业结构调整、增加农民收入、优化国民膳食结构和保障食品安全等方面作出了重要贡献，同时新的研究还表明，其在促进渔业增长方式的转变、减排CO₂、缓解水域富营养化等方面也发挥着重要作用。而面对未来的发展和需求，如何促进水产养殖业实现持续发展、实现绿色低碳的发展已成为人们关注的新课题，养殖方式的新发展是其中重要的研究主题，以期对中国水产养殖业更好更快的发展作出新贡献。

综合水产养殖在中国有悠久的历史。明末清初兴起的“桑基鱼塘”是一种早期、有效的综合养殖方式。现代中国水产养殖业发展极大地推动了综合养殖方式的新探索，特别是始于20世纪90年代中期海水养殖系统的养殖容量的研究，使多种形式的多元养殖普遍应用于生产实践。2004年，加拿大Chopin和Taylor将多营养层次种类的养殖(Multi-trophic aquaculture)与综合养殖(Integrated aquaculture)合并，称之为多营养层次综合养殖(Integrated multi-trophic aquaculture, IMTA)，中国渔业科技工作者接受了这个术语，并从生态系统水平上探讨综合水产养殖，从综合生态系统多种服务功能(包括食物供给功能、气候调节功能和文化服务等)的层面上探讨最佳的养殖产出，从而使中国成为世界上该种养殖方式和技术应用最为广泛、类型最为多样、生产规模最大的国家。

《中国综合水产养殖的生态学基础》一书包括综合水产养殖的历史沿革、原理和系统的分类，重要养殖生物对虾及大型海藻、滤食性鱼类、滤食性贝类和刺参的养殖生态学，综合水产养殖结构的优化、生产力和养殖容量，综合水产养殖理念的现实意义等。该书结构合理，文笔流畅，图文并茂，是一部系统介绍中国海水和内陆水域综合水产养殖原理和技术的专著，期望它对推动我国水产养殖业可持续和绿色的新发展起到重要作用，对国际水产养殖业的发展也将产生影响。

在该书即将问世之际，谨此表示热烈祝贺！

唐启升

中国科协副主席、中国工程院院士

2014年6月于青岛

前 言

综合水产养殖是相对于单种类养殖而言的一种养殖方式,它是多种生物养殖于同一水体中或多种生产活动有机结合的养殖方式。该养殖方式具有资源利用率高、环保、产品多样、防病等优点,因此,国际上普遍认为其是一种可持续的养殖模式。特别是在国际上对大西洋鲑网箱养殖和对虾池塘养殖责难声渐高的大背景下,倡导综合水产养殖理念、优化水产养殖结构就更具现实意义。长期、大规模地开展综合水产养殖也是我国水产养殖业持续高速发展,并成为世界第一水产养殖大国的重要原因之一。

我国是世界上开展综合水产养殖历史最悠久、经验最丰富、研究基础最好的国家,但迄今缺乏系统的理论整理、总结。虽然,2009年联合国粮食及农业组织(FAO)编辑出版了第520号渔业与水产养殖技术报告《综合海水养殖:全球综述》,但该报告称“由于资料可利用性问题”,其几乎没有反映我国的研究工作。鉴于此,基于作者及其团队30多年来在综合水产养殖基础理论、技术模式研究方面的工作积累,作者完成了本书。

2012年作者在综合水产养殖领域的研究和实践成果曾获国家科学技术进步奖二等奖。作者应邀在2012世界水产养殖大会做了“中国的综合水产养殖”综述报告,受到国际同行的高度赞扬,并激起了欧洲产业界的极大兴趣。

本书是国际上首部涵盖内陆水域和海水,并系统介绍综合水产养殖的专著。本书内容可为我国水产养殖生产技术的改进、增长方式的转变和可持续发展提供理论依据和技术借鉴,同时,本书中给出的大量数据还可为水产养殖生态系统建模提供大量、翔实的参数。鉴于本书对国际同行具有较高的借鉴或参考价值,作者对本书的图表尽可能进行了详尽的双语注释。

本书共分10章。第1章和第2章是对我国以往综合水产养殖经验、理论的分析 and 归纳。第3~9章系统地介绍了作者及其团队所取得的科研成果,其中,第3章介绍主养动物(即在综合水产养殖系统中提供主要产量或产值的动物)对虾的养殖生态学;第4~7章系统地介绍综合养殖中的工具生物(即在综合水产养殖系统中主要负责改善环境和提高物质利用率的生物)相关养殖生态学;第8章和第9章分别介绍综合水产养殖结构的优化原理和综合养殖水体生产力与养殖容量的研究成果。第10章分析我国水产养殖产业发展面临的问题,提出了借鉴我国综合水产养殖中包含的辩证思维解决当前问题的途径。

在此,我也想表达对中国海洋大学水产养殖生态学实验室的开创者、我的恩师李德

尚教授的深深敬意,是他把我领进了水产养殖生态学研究领域。本书的内容是在本实验室王芳教授、田相利教授、董云伟教授、马牲教授、高勤峰副教授和潘鲁青教授等协助下研究完成的,参加研究工作的还有数十位已毕业的硕士和博士研究生,他们的贡献从本书后面的参考文献中可见一斑,在此一并对他们表示衷心感谢!

几十年来,我们的研究工作得到了国家杰出青年科学基金、国家自然科学基金、国家重点基础研究发展计划(973 计划)、国家高技术研究发展计划(863 计划)、国家科技攻关(支撑)计划等国家科技计划项目(课题)的持续支持,在此,一并表示由衷的感谢!

由于作者水平有限,书中一定存在不少瑕疵,恳请各位专家和广大读者批评、指正。

董双林

2014年2月于青岛

目 录

序 前言

第 1 章 综合水产养殖的历史沿革与原理	1
1.1 中国综合水产养殖的定义和历史沿革	1
1.1.1 综合水产养殖的定义	1
1.1.2 中国综合水产养殖的历史沿革	2
1.2 综合水产养殖的基本原理	4
1.2.1 养殖废物的资源化利用	4
1.2.2 通过互补机制稳定改善水质	5
1.2.3 养殖水体资源的充分利用	7
1.2.4 生态防病	9
1.2.5 其他原理	9
1.3 综合水产养殖中的辩证思维	10
第 2 章 综合水产养殖系统的分类	12
2.1 水产养殖系统的分类	12
2.1.1 水产养殖系统的传统分类	12
2.1.2 基于系统能量来源的分类	13
2.1.3 基于系统代谢特征的分类	15
2.1.4 基于生态限制因子的分类	15
2.2 综合水产养殖系统的分类	20
2.2.1 化学功能互补综合型	20
2.2.2 养殖种类综合型	22
2.2.3 系统综合型	24
第 3 章 主养动物——对虾养殖生态学	27
3.1 对虾对环境因子的适应性	28
3.1.1 对虾对温度的适应性	28
3.1.2 对虾对盐度的适应性	33
3.1.3 对虾对水环境中主要阳离子的适应性	35

3.1.4	对虾对光的适应性	45
3.1.5	去眼柄对凡纳滨对虾稚虾的影响	50
3.2	环境因子周期性波动对养殖对虾的影响	51
3.2.1	温度周期性波动对中国明对虾的影响	52
3.2.2	盐度周期性波动对中国明对虾的影响	58
3.2.3	水环境中 Ca^{2+} 浓度波动对凡纳滨对虾的影响	61
3.2.4	水环境 pH 波动对凡纳滨对虾的影响	64
3.2.5	光照周期性波动对凡纳滨对虾的影响	66
3.3	中国明对虾摄食生态学	70
3.3.1	半精养系统中天然饵料与人工饲料在对虾生长中的贡献	70
3.3.2	中国明对虾对饵料的选择性和利用	71
3.3.3	不同饵料对中国明对虾能量收支和身体生化组成的影响	73
3.3.4	摄食水平对中国明对虾生长和蜕壳的影响	74
3.3.5	中国明对虾的表观特殊动力作用	76
3.3.6	中国明对虾能量代谢与生长的关系	76
3.3.7	饵料种类和摄食水平对中国明对虾蜕壳的影响	80
3.4	中国明对虾继饥饿之后的补偿生长	82
3.4.1	饥饿时间对中国明对虾补偿生长的影响	84
3.4.2	限食水平对中国明对虾补偿生长的影响	87
3.4.3	温度对中国明对虾补偿生长的影响	88
3.4.4	投喂周期对中国明对虾补偿生长的影响	89
3.4.5	蛋白质限制对中国明对虾补偿生长的影响	91
第 4 章	工具生物之一——大型海藻养殖生态学	94
4.1	水域生态系统的生物操纵	94
4.2	光照、温度和盐度对大型海藻的影响	96
4.2.1	光照对大型海藻的影响	96
4.2.2	温度对大型海藻的影响	102
4.2.3	光照和温度对海藻影响中的相互作用	104
4.2.4	盐度和温度对海藻影响中的相互作用	108
4.3	大型海藻营养吸收动力学	110
4.3.1	大型海藻的营养需求	110
4.3.2	铁限制对大型海藻的影响	111
4.3.3	大型海藻对氮的吸收动力学	115
4.3.4	大型海藻对磷的吸收动力学	122
4.4	大型海藻对环境因子节律性变动的响应	126
4.4.1	温度日节律波动对海藻生长的影响	127

4.4.2 盐度日节律波动对大型海藻生长的影响	129
4.4.3 节律性干出对海藻生长的影响	129
4.4.4 光照日节律波动对孔石莼生长的影响	131
4.5 大型海藻与微藻的相互作用	134
4.5.1 大型海藻与微藻的营养竞争	134
4.5.2 大型海藻对微藻的克生作用	138
第5章 工具生物之二——滤食性鱼类养殖生态学	144
5.1 滤食性鱼类的摄食能力	144
5.1.1 几种养殖的滤食性鱼类简介	145
5.1.2 滤食性鱼类摄食的数学表达	146
5.1.3 滤食性鱼类吸水量和对食粒的滤取效率	146
5.1.4 浮游动物对鱼类摄食的逃避	147
5.1.5 滤食性鱼类的摄食能力	148
5.1.6 滤食性鱼类的摄食节律	149
5.1.7 鲢、鳙对食粒的选择性	149
5.1.8 水体饵料组成对鲢、鳙食性的影响	150
5.1.9 水体中泥沙等微粒对鲢、鳙食性的影响	150
5.2 滤食性鲢呼吸与摄食的关系	152
5.2.1 低溶氧水平下鲢摄食与呼吸的关系	152
5.2.2 浮游植物密度对鲢呼吸与摄食的影响	157
5.2.3 不同粒径浮游植物对鲢摄食和呼吸的影响	161
5.2.4 饥饿对鲢摄食和呼吸的影响	162
5.3 滤食性鱼类放养对水质的影响	165
5.3.1 放养滤食性鱼类对浮游生物群落的影响	165
5.3.2 滤食性动物对养殖水体浮游细菌的影响	171
5.3.3 放养鲢对水体营养盐分布和物质循环格局的影响	172
5.4 养殖水体鲢、鳙群体生产量的估计	173
5.4.1 鲢、鳙的生长	173
5.4.2 放养水体鲢、鳙生产量的估算	174
5.4.3 放养水体鲢、鳙群体最大持续渔获量	177
第6章 工具生物之三——滤食性贝类养殖生态学	178
6.1 滤食性贝类的摄食	178
6.1.1 滤食性贝类滤食器官及滤食的数学表达	178
6.1.2 滤食性贝类的摄食	181
6.2 滤食性贝类的呼吸和排泄	186

6.2.1	海湾扇贝和太平洋牡蛎的呼吸与排泄	186
6.2.2	菲律宾蛤仔和栉孔扇贝的呼吸与排泄	188
6.2.3	温度和规格对缢蛏耗氧率和排氨率的影响	189
6.3	滤食性贝类对水质和底质的影响	189
6.3.1	太平洋牡蛎对养虾池塘水化学状况的影响	189
6.3.2	太平洋牡蛎对养虾池塘底质的影响	191
6.3.3	海湾扇贝对海水养殖池塘水质的影响	193
6.3.4	菲律宾蛤仔对海水池塘水质的影响	194
6.3.5	海湾扇贝、缢蛏、罗非鱼对养虾池塘浮游生物影响的比较	195
6.4	滤食性贝类代谢对浮游植物的增殖作用	197
第7章 工具生物之四——刺参养殖生态学		200
7.1	刺参养殖池塘的环境状况	201
7.1.1	刺参养殖池塘的理化状况	201
7.1.2	刺参养殖池塘的浮游植物	202
7.1.3	刺参养殖池塘中的沉降作用	204
7.1.4	刺参粗养池塘底泥-水界面营养盐与有机碳通量	206
7.1.5	温度和溶解氧对池塘沉积物-水界面营养盐通量的影响	208
7.1.6	刺参养殖池塘底泥的硝化和反硝化作用	209
7.2	刺参养殖对池塘底质的影响	210
7.3	温度、盐度和光照对刺参的影响	211
7.3.1	温度对刺参的影响	212
7.3.2	盐度对刺参的影响	217
7.3.3	光照对刺参的影响	219
7.4	刺参对不同参礁的趋向性	232
7.4.1	不同材料的人工参礁对刺参聚集行为的影响	233
7.4.2	不同颜色的人工参礁对刺参聚集行为和生长的影响	233
7.4.3	在水中培养不同时间的参礁对刺参聚集行为的影响	234
7.5	刺参生长的个体变异	235
7.5.1	密度和规格对刺参个体生长变异的影响	235
7.5.2	单个体饲养条件下刺参的个体生长变异	239
7.5.3	物理接触对刺参个体生长变异的影响	241
7.5.4	密度胁迫对刺参内分泌的影响	243
7.5.5	限定食物资源下密度对刺参个体生长的影响	245
7.6	环保型刺参饲料研究	248
7.6.1	黄土替代海泥的效果	248
7.6.2	鲜活硅藻替代鼠尾藻粉的效果	250
7.6.3	光照强度和浓缩方法对硅藻饵料效果的影响	253

7.6.4 投喂鲜活硅藻对池塘水质和刺参生长的影响	257
7.6.5 投喂鲜活硅藻对池塘物质收支的影响	262
第8章 综合水产养殖结构的优化	269
8.1 综合水产养殖结构优化的原理和方法	269
8.1.1 综合水产养殖结构优化的原理	269
8.1.2 综合水产养殖结构优化的方法	271
8.2 水库综合养殖结构的优化	273
8.3 淡水池塘综合养殖结构的优化	275
8.3.1 草鱼、鲢和凡纳滨对虾综合养殖结构优化	275
8.3.2 草鱼、鲢和鲤综合养殖结构优化	278
8.4 海水池塘对虾综合养殖结构的优化	282
8.4.1 海水池塘中国明对虾综合养殖结构的优化	282
8.4.2 海水池塘凡纳滨对虾综合养殖结构的优化	284
8.4.3 海水池塘对虾综合养殖的结构与效益比较	286
8.5 刺参池塘综合养殖结构优化	287
8.5.1 刺参与中国明对虾混养效果	287
8.5.2 刺参与栉孔扇贝混养的效果	288
8.5.3 刺参综合养殖的环境效应	288
8.6 池塘内环联养殖模式	290
8.6.1 同池混养模式与分池环联养殖模式的比较	290
8.6.2 对虾与罗非鱼池塘内环联养殖模式	292
8.6.3 内环联养殖模式中罗非鱼与对虾的结构优化	293
8.6.4 内环联养殖模式中罗非鱼对浮游生物的影响	295
第9章 综合养殖水体的生产力与养殖容量	300
9.1 养殖水域生产力和养殖容量及其影响因素	300
9.1.1 养殖水域的生产力	301
9.1.2 养殖水域的养殖容量	302
9.2 综合养殖池塘的生产力	303
9.3 综合养殖水域的养殖容量	307
9.3.1 水库对投饲网箱养鲤的养殖容量	308
9.3.2 海水池塘对虾养殖的养殖容量	310
第10章 综合水产养殖的现实意义	314
10.1 我国水产养殖业发展的趋势与面临的挑战	315
10.1.1 我国水产养殖业的现状与发展趋势	315

10.1.2 我国水产养殖业发展面临的挑战	317
10.2 我国水产养殖业的功能定位	318
10.2.1 水产养殖系统的基本功能	318
10.2.2 从国际粮食恐慌看水产养殖业的基本定位	319
10.2.3 水产养殖业中的“耗粮黑洞”	320
10.3 水产养殖集约化发展的生态经济学思考	321
10.3.1 水产养殖集约化是一把双刃剑	321
10.3.2 不同生物养殖系统的能值分析	322
10.3.3 刺参的不同养殖模式可持续性评估	323
10.3.4 不同刺参养殖系统的生命周期评价	325
10.4 我国水产养殖业的发展路径	329
10.5 综合养殖理念的现实意义	329
10.5.1 中西方对规模化生产活动的认识比较	329
10.5.2 陆基阳光工厂化养殖	331
10.5.3 开放海域的碳汇渔业与综合养殖	332
10.6 我国水产养殖业可持续发展的保障措施	333
10.6.1 发展理念和惯性思维的转变	333
10.6.2 管理体制保障	334
10.6.3 学科保障	335
10.6.4 法律保障	335
主要参考文献	336
索引	345
彩图	

Contents

Preface

Foreword

1 History and principles of integrated aquaculture (INTAQ)	1
1.1 Definition and history of INTAQ in China.....	1
1.1.1 Definition of INTAQ.....	1
1.1.2 History of INTAQ in China.....	2
1.2 Principles of INTAQ.....	4
1.2.1 Waste reclamation.....	4
1.2.2 Water quality maintenance through complementary mechanism.....	5
1.2.3 Making full use of the resources in the waters.....	7
1.2.4 Diseases prevention ecologically.....	9
1.2.5 Others.....	9
1.3 Dialectical way of thinking in INTAQ.....	10
2 Classification of INTAQ systems	12
2.1 Classification of aquaculture systems.....	12
2.1.1 Traditional classification of aquaculture systems.....	12
2.1.2 Classification based on energy sources.....	13
2.1.3 Classification based on metabolic features.....	15
2.1.4 Classification based on ecological limiting factors.....	15
2.2 Classification of INTAQ systems.....	20
2.2.1 Complementary chemical functions integration.....	20
2.2.2 Species integration.....	22
2.2.3 Systems integration.....	24
3 Aquaculture ecology of main target species shrimp	27
3.1 Shrimp adaptability to environmental factors.....	28
3.1.1 Adaptability to water temperature.....	28
3.1.2 Adaptability to water salinity.....	33
3.1.3 Adaptability to main cations in water.....	35
3.1.4 Adaptability to light.....	45
3.1.5 Effects of eyestalk ablation on juvenile <i>L. vannamei</i>	50
3.2 Periodic fluctuation of environmental factors on shrimp.....	51
3.2.1 Periodic fluctuation of water temperature on <i>F. chinensis</i>	52
3.2.2 Periodic fluctuation of water salinity on <i>F. chinensis</i>	58
3.2.3 Periodic fluctuation of Ca ²⁺ concentration in water on <i>L. vannamei</i>	61
3.2.4 Periodic fluctuation of pH value in water on <i>L. vannamei</i>	64
3.2.5 Periodic fluctuation of photoperiod on <i>L. vannamei</i>	66
3.3 Feeding ecology of Chinese shrimp <i>F. chinensis</i>	70

3.3.1	Contribution of different carbon resources	70
3.3.2	Selection and utilization of the shrimp to various foods	71
3.3.3	Effects of various foods to energy budget	73
3.3.4	Effects of feeding levels on growth and molting	74
3.3.5	Specific dynamic action	76
3.3.6	Relationship of energy metabolism and growth	76
3.3.7	Effects of diets and feeding levels on growth and molting	80
3.4	Compensatory growth of Chinese shrimp after starvation	82
3.4.1	Effects of starvation time on compensatory growth	84
3.4.2	Effects of feeding level on compensatory growth	87
3.4.3	Effects of water temperature on compensatory growth	88
3.4.4	Effects of starvation-and-refeeding cycles on compensatory growth	89
3.4.5	Effects of protein limitation in diet on compensatory growth	91
4	Aquaculture ecology of macro-algae	94
4.1	Bio-manipulation of water ecosystems	94
4.2	Effects of light, temperature and salinity on macro-algae	96
4.2.1	Effects of light on macro-algae	96
4.2.2	Effects of temperature on macro-algae	102
4.2.3	Interaction between light and temperature on macro-algae	104
4.2.4	Interaction between temperature and salinity on macro-algae	108
4.3	Nutrient uptake kinetics of macro-algae	110
4.3.1	Nutrient requirement of macro-algae	110
4.3.2	Response of macro-algae to iron stress	111
4.3.3	Nitrogen uptake kinetics of macro-algae	115
4.3.4	Phosphorous uptake kinetics of macro-algae	122
4.4	Response of macro-algae to diel fluctuation of environmental factors	126
4.4.1	Effect of circadian rhythms of temperature	127
4.4.2	Effects of circadian rhythms of salinity	129
4.4.3	Effects of periodical emersion	129
4.4.4	Effects of circadian rhythms of light	131
4.5	Interaction between macro-algae and micro-algae	134
4.5.1	Nutrient competition between macro-algae and micro-algae	134
4.5.2	Allelopathic effects macro-algae on micro-algae	138
5	Aquaculture ecology of filter-feeding fish	144
5.1	Feeding capability of filter-feeding fish	144
5.1.1	Commercially important filter-feeders	145
5.1.2	Mathematical expression of filter-feeding fish's feeding	146
5.1.3	Suction volume and filtering efficiency	146
5.1.4	Escape capability of zooplankton to fish feeding	147
5.1.5	Feeding capability of filter-feeding fish	148
5.1.6	Daily rhythm of feeding of filter-feeder	149
5.1.7	Food selection of silver carp and bighead carp	149
5.1.8	Effects of plankton composition on the feeding habits of the carps	150
5.1.9	Effects of suspended sediments on the feeding habits of the carps	150
5.2	Relationship between respiration and feeding of silver carp	152

5.2.1	The relationship between respiration and feeding at low dissolved oxygen	152
5.2.2	Effects of phytoplankton biomass on respiration and feeding	157
5.2.3	Effects of phytoplankton size on respiration and feeding	161
5.2.4	Effects of starvation on respiration and feeding	162
5.3	Effects of filter-feeder stocking on water quality	165
5.3.1	Effects of silver and bighead carp stocking on plankton community	165
5.3.2	Effects of filter-feeder stocking on planktonic bacteria	171
5.3.3	Effects of silver carp stocking on nutrient distribution and material circulation	172
5.4	Estimation of silver carp and bighead carp production in aquaculture waters	173
5.4.1	Growth of silver carp and bighead carp	173
5.4.2	Estimation of silver carp and bighead carp production	174
5.4.3	Maximum sustainable yield of stocking the carps in reservoir	177
6	Aquaculture ecology of filter-feeding molluscs	178
6.1	Feeding of filter-feeding molluscs	178
6.1.1	Mathematical expression of filter-feeding molluscs	178
6.1.2	Feeding of filter-feeding molluscs	181
6.2	Respiration and excretion of filter-feeding molluscs	186
6.2.1	Respiration and excretion of <i>Argopecten irradians</i> and <i>Crassostrea gigas</i>	186
6.2.2	Respiration and excretion of <i>Ruditapes philippinarum</i> and <i>Chlamys farreri</i>	188
6.2.3	Effects of water temperature and body size on O ₂ consumption and NH ₃ excretion of <i>Sinonovacula constricta</i>	189
6.3	Effects of filter-feeding molluscs on water quality and sediment quality	189
6.3.1	Effects of <i>C. gigas</i> on water chemical condition of shrimp farming pond	189
6.3.2	Effects of <i>C. gigas</i> on sediment quality of shrimp farming pond	191
6.3.3	Effects of <i>Argopecten irradians</i> on water quality of mariculture pond	193
6.3.4	Effects of <i>Ruditapes philippinarum</i> on water quality of mariculture pond	194
6.3.5	Comparison of effects of <i>Argopecten irradians</i> , <i>Sinonovacula constricta</i> and tilapia on plankton of mariculture pond	195
6.4	Multiplication effect of phytoplankton caused by filter-feeding molluscs excretion	197
7	Aquaculture ecology of sea cucumber <i>Apostichopus japonicus</i>	200
7.1	Environment conditions in sea cucumber culture pond	201
7.1.1	Physical and chemical conditions in sea cucumber culture pond	201
7.1.2	Phytoplankton in sea cucumber culture pond	202
7.1.3	Sedimentation in sea cucumber culture pond	204
7.1.4	Sediment-water fluxes of nutrients and dissolved organic carbon in extensive sea cucumber culture pond	206
7.1.5	Effects of water temperature and DO on sediment-water fluxes of nutrients	208
7.1.6	Nitrification and denitrification in sea cucumber culture pond	209
7.2	Effects of sea cucumber on sediment quality of pond	210
7.3	Effects of water temperature, salinity and light on sea cucumber	211
7.3.1	Effects of water temperature on sea cucumber	212
7.3.2	Effects of salinity on sea cucumber	217
7.3.3	Effects of light on sea cucumber	219
7.4	Effects of different artificial shelters on sea cucumber behavior	232

7.4.1	Effects of different materials of artificial shelters on sea cucumber	233
7.4.2	Effects of artificial shelter colors on sea cucumber	233
7.4.3	Effects of incubation time of artificial shelters on sea cucumber	234
7.5	Individual variation in growth of sea cucumber	235
7.5.1	Effects of stocking density and size on the individual variation in growth	235
7.5.2	Individual variation in growth of sea cucumber housed individually	239
7.5.3	Effects of physical isolation on individual variation in growth	241
7.5.4	Effects of stocking density on endocrine performance of sea cucumber	243
7.5.5	Effects of stocking density on individual variation in growth under food limitation	245
7.6	Environmental friendly feed for sea cucumber	248
7.6.1	Effects of yellow soil substituting for sea mud	248
7.6.2	Effects of fresh diatom substituting for macroalgae powder	250
7.6.3	Effects of light intensity and concentration method on diatom efficiency as feed	253
7.6.4	Effects of delivering fresh diatom on water quality and growth of sea cucumber	257
7.6.5	Effects of delivering fresh diatom on martial budget of pond	262
8	Structure optimization of integrated aquaculture	269
8.1	Ecological rationales and methods for structure optimization of integrated aquaculture	269
8.1.1	Ecological rationales for structure optimization of integrated aquaculture	269
8.1.2	Methods for structure optimization of integrated aquaculture	271
8.2	Structure optimization of integrated aquaculture in reservoir	273
8.3	Structure optimization of integrated aquaculture in fresh water pond	275
8.3.1	Structure optimization of integration of grass carp, silver carp and shrimp	275
8.3.2	Structure optimization of integration of grass carp, silver carp and common carp	278
8.4	Structure optimization of integrated aquaculture in sea water pond	282
8.4.1	Structure optimization of integrated aquaculture for <i>Fenneropenaeus chinensis</i>	282
8.4.2	Structure optimization of integrated aquaculture for <i>Litopenaeus vannamei</i>	284
8.4.3	Optimized structure and efficiencies of shrimp integrated aquaculture in ponds	286
8.5	Structure optimization of sea cucumber integrated aquaculture in pond	287
8.5.1	Effects of integration of sea cucumber and shrimp	287
8.5.2	Effects of integration of sea cucumber and scallop	288
8.5.3	Environmental effects of sea cucumber integrated aquaculture	288
8.6	Inner partitioned polyculture model	290
8.6.1	Comparative studies between inner partitioned and partitioned polyculture models	290
8.6.2	Inner partitioned polyculture of shrimp and tilapia in pond	292
8.6.3	Structure optimization of inner partitioned polyculture of shrimp and tilapia	293
8.6.4	Effects of tilapia on plankton community in inner partitioned polyculture pond	295
9	Productivity and carrying capacity of integrated aquaculture waters	300
9.1	Productivity and carrying capacity of aquaculture waters	300
9.1.1	Productivity of aquaculture waters	301
9.1.2	Carrying capacity of aquaculture waters	302
9.2	Productivity of integrated aquaculture pond	303
9.3	Carrying capacity of integrated aquaculture waters	307
9.3.1	Carrying capacity of reservoir for fish net culture	308
9.3.2	Carrying capacity of sea water pond for shrimp farming	310

10 Realistic significance of integrated aquaculture	314
10.1 Status and constrains of aquaculture development in China.....	315
10.1.1 Status and trends of aquaculture development.....	315
10.1.2 Constrains of aquaculture development.....	317
10.2 Functions of Chinese aquaculture.....	318
10.2.1 Basic functions of aquaculture systems.....	318
10.2.2 Basic functions of aquaculture from international food shortage of view.....	319
10.2.3 “Food trap” in aquaculture.....	320
10.3 Ponder over aquaculture intensification eco-economically.....	321
10.3.1 Aquaculture intensification – a double-edged sword.....	321
10.3.2 Emergy analysis of different species aquaculture systems.....	322
10.3.3 Sustainability evaluation of different systems for sea cucumber farming based on emergy theory.....	323
10.3.4 Life cycle assessment of different systems for sea cucumber farming.....	325
10.4 Development path of Chinese aquaculture.....	329
10.5 Realistic significance of dialectical thought in aquaculture.....	329
10.5.1 Comparison between eastern and western in the attitudes of scale production.....	329
10.5.2 Land-based Indoor Solar Aquaculture Systems (LISAS).....	331
10.5.3 Carbon sequestration mariculture in open seas.....	332
10.6 Safeguard measures for sustainable development of aquaculture.....	333
10.6.1 Changes of development ideas.....	333
10.6.2 Safeguards of management regimes.....	334
10.6.3 Safeguards of disciplines.....	335
10.6.4 Safeguards of laws and regulation.....	335
References	336
Index	345
Plate	