

中国海水养殖科技进展

海水养殖与碳汇渔业

HAISHUI YANGZHI YU
TANHUI YUYE

王清印 主编

 海洋出版社

S967-53

20131

中国海水养殖科技进展

海水养殖与碳汇渔业

王清印 主编



海洋出版社

2012 年 · 北京

内 容 简 介

本书是在2011年11月5—7日由中国水产学会海水养殖分会主办,上海海洋大学承办,中国水产科学研究院东海水产研究所、上海市水产研究所协办,在上海市召开的“2011年全国海水养殖学术研讨会”上发表的200多篇论文报告的基础上,经过筛选编辑而成。

全书共分七章。第一章 综述;第二章 遗传、育种及基础生物学;第三章 生态调控与苗种培育;第四章 健康养殖技术与模式;第五章 营养、代谢与消化生理;第六章 疾病预防、控制与免疫;第七章 养殖生态与环境。

本书可供高等院校、科研院所以及从事水产养殖工作的科技人员和管理工作者参考使用。

本书得到了上海市教育委员会重点学科建设项目海洋生物学(J50701)和水生生物学(S30701)的大力赞助,在此一并表示感谢。

图书在版编目(CIP)数据

海水养殖与碳汇渔业/王清印主编. —北京:
海洋出版社,2012.10

ISBN 978-7-5027-8342-6

I. ①海… II. ①王… III. ①海水养殖-文集
IV. ①S967-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第207105号

责任编辑:方菁

责任印制:赵麟苏

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路8号 邮编:100081

北京旺都印务有限公司印刷 新华书店北京发行所经销

2012年10月第1版 2012年10月第1次印刷

开本:787 mm×1092 mm 1/16 印张:38

字数:900千字 定价:98.00元

发行部:62132549 邮购部:68038093 总编室:62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

编委会名单

主 编:王清印

副主编:蔡生力 吴灶和 吴常文 常亚青 方建光 刘世禄

编 委:(以姓氏笔画为序)

丁兆坤	丁晓明	马 甦	方建光	王清印	王 波
王文琪	王长海	王印庚	王志成	王志勇	王勇强
王爱民	王德强	包振民	刘世禄	刘克奉	刘海金
刘雅丹	孙 忠	孙喜模	庄 平	朱永安	江世贵
吴灶和	吴常文	张利民	张志勇	张国范	张振奎
李文姬	李长青	杨建敏	陈 丹	陈 刚	胡超群
赵玉山	赵春龙	徐 皓	常亚青	曹杰英	阎斌伦
曾志南	董双林				

目次

第一章 综述	(1)
第一节 关于加快发展我国海水养殖业的战略思考	(1)
第二节 海水鱼类养殖在碳汇渔业中的地位和作用:从海洋鱼类生理到考古发现	(8)
第三节 基于低碳经济视角的广东省海洋经济发展模式研究	(14)
第四节 底栖微藻—刺参碳汇生物链对健康养殖的意义和作用	(21)
第五节 海水贝类养殖产量与碳汇量动态变化关系研究	(26)
第六节 我国水产拮抗芽孢杆菌的研究进展	(30)
第七节 鱼类补偿生长的研究进展	(36)
第八节 大型海藻种质保存的研究进展	(42)
第九节 水体悬浮物的生态损害分析与研究展望	(46)
第十节 微生态制剂在海水养殖中的应用—现状、问题和展望	(51)
第十一节 多环芳烃对水生动物抗氧化酶的影响、机理及防治研究进展	(54)
第十二节 舟山海水养殖业风险因素分析研究	(57)
第十三节 湛江凡纳滨对虾养殖现状及持续发展问题	(61)
第二章 遗传、育种及基础生物学	(67)
第一节 牙鲆主要经济性状的骨骼分析及其相关微卫星标记的研究	(67)
第二节 松江鲈鱼野生群体间遗传多样性的 RAPD 分析和 SCAR 标记的转化	(73)
第三节 <i>Ulva</i> 属绿藻的 ITS 区序列系统发育分析	(80)
第四节 罗氏沼虾 SSR 标记再开发及其影响因素初探	(87)
第五节 育珠贝和小片贝对马氏珠母贝珍珠颜色的影响分析	(96)
第六节 中华绒螯蟹延伸因子 EF-1 δ 基因全长 cDNA 克隆及表达	(99)
第七节 牙鲆生长抑素细胞的定位及其基因表达的分析	(106)
第八节 曼氏无针乌贼 β -肌动蛋白基因的 cDNA 全长克隆与序列分析	(111)

第九节	牙鲆肝脏抗菌肽-2 的基因序列和表达分析	(118)
第十节	鱼类杂交育种技术及其在石斑鱼类中的应用	(124)
第十一节	威海荣成海区鹿角菜野生群体 RAPD 分析	(131)
第十二节	大黄鱼亲子鉴定及亲本繁殖贡献率分析	(136)
第十三节	马氏珠母贝微卫星标记的开发及其遗传特性分析	(142)
第十四节	用 AFLP 方法筛选中华绒螯蟹性别相关标记	(148)
第十五节	星斑川鲷与鲆鲷鱼杂交的初步研究	(154)
第十六节	大弹涂鱼线粒体基因组全序列与系统进化分析	(157)
第十七节	厚壳贻贝 4 个群体遗传多样性的 ISSR 分析	(166)
第十八节	牙鲆胰岛素样生长因子结合蛋白 IGFBP-1 cDNA 全长的克隆及表达分析	(173)
第十九节	文蛤红壳色选育子代 2 种壳色群体生长与消化酶活性的比较	(182)
第二十节	红壳色文蛤 F_1 代养殖群体多样性分析	(186)
第二十一节	长蛸不同地理群体遗传多样性的 ISSR 分析	(191)
第二十二节	浙江四地桃花水母的 rDNA-ITS 序列分析	(197)
第二十三节	不同培养基对中华绒螯蟹血细胞原代培养的影响	(204)
第二十四节	栲江珧微卫星标记开发与筛选研究	(210)
第三章	生殖调控与苗种培育	(220)
第一节	七带石斑鱼繁殖生物学及人工繁育技术研究进展	(220)
第二节	几种小丑鱼人工繁育初步研究	(225)
第三节	云纹石斑鱼胚胎发育及仔、稚、幼鱼形态观察	(233)
第四节	绿鳍马面鲀早期发育的初步研究	(245)
第五节	条石鲷幼鱼的代谢率、排泄率及窒息点研究	(250)
第六节	Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、盐度对凡纳滨对虾存活、生长及虾体风味的影响	(255)
第七节	饥饿胁迫对曼氏无针乌贼幼体的影响	(263)
第八节	刺参优质苗种繁育及大规格苗种技术研究	(271)
第九节	吕四渔场海区大竹蛏的繁育与生长	(274)
第十节	缢蛏规模化苗种培育技术报告	(283)
第十一节	古蚶的生物学特性及工厂化育苗技术	(287)
第十二节	坛紫菜“申福 1 号”和“申福 2 号”的中试研究	(292)
第十三节	鼠尾藻切段离体培养、营养繁殖初步研究	(296)

第十四节	利用地下海水进行鼠尾藻幼苗培育初步研究	(304)
第四章	健康养殖技术与模式	(308)
第一节	我国滩涂养殖模式及存在的问题	(308)
第二节	野生花鳗种驯化养殖技术的初步研究	(311)
第三节	循环海水养鱼系统中 pH 调节技术研究	(313)
第四节	温度对羊栖菜生长的影响	(318)
第五节	文蛤红壳色选育子代形态分化及养殖效果比较	(324)
第六节	五种微藻及其密度对铜绿微囊藻生长的影响	(332)
第七节	Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、盐度对凡纳滨对虾存活、生长及风味的影响	(340)
第八节	朝鲜的大菱鲆引进和养殖	(348)
第五章	营养、代谢与消化生理	(351)
第一节	海参饲料的研究与发展	(351)
第二节	饥饿与再投喂及投喂频率对条石鲷幼鱼生长和消化酶活力的影响 ..	(354)
第三节	不同盐度时中华绒螯蟹雌性亲蟹血清渗透压、离子水平及鳃酶活性的 变化	(363)
第四节	饥饿胁迫对银鲷幼鱼侧囊组织学的影响	(367)
第五节	饲料中添加不同水平维生素 A 对大菱鲆亲鱼繁殖性能的影响	(374)
第六节	规格和饵料对中华绒螯蟹雌蟹可食部分含量和体成分的影响	(382)
第七节	马氏珠母贝代谢产物对羊栖菜生长的影响	(387)
第八节	冻藏过程中金枪鱼的质构和生化特性的研究	(395)
第九节	两种常见海水鱼高温贮存过程中挥发性盐基氮和生物胺含量变化 ..	(400)
第十节	低温条件下花蛤对蛋白核小球藻的摄食率和同化率的研究	(406)
第十一节	缺铁对奥尼罗非鱼幼鱼生长、血液指标及消化酶活性的影响	(410)
第十二节	贝类组织及细胞水平 Ca^{2+} 代谢差异分析	(418)
第十三节	舟山海域 3 种鱼类热值及含水量的研究	(426)
第十四节	镉对鱼肾的影响、机理及防治	(430)
第十五节	汞对水生动植物酶活性影响与机理研究的进展	(435)
第十六节	日本鬼鲉幼体发育过程中消化酶活性的变化	(438)
第十七节	台湾锯齿藻藻红蛋白提取纯化的初步研究	(442)
第十八节	不同对虾中多酚氧化酶的提取比较及在虾体分布研究	(447)

第六章 疾病预防、控制与免疫 (454)

第一节 枯草芽孢杆菌胞外产物对病原弧菌抑制作用的研究 (454)

第二节 我国渔药剂型使用现状及其在渔药安全使用技术中的价值 (463)

第三节 抗大田软海绵酸单克隆抗体的制备及免疫学特性分析 (468)

第四节 抗微囊藻毒素单克隆抗体的制备与分析鉴定 (472)

第五节 感染溶藻弧菌对日本鳊血清免疫相关酶活性及血细胞超微结构的影响
..... (479)

第六节 养殖区域水体的病原菌检测及防治 (485)

第七节 哈维氏弧菌生物被膜体外模型的建立及成膜特性研究 (487)

第八节 人工感染呼肠孤病毒对拟穴青蟹部分免疫因子的影响 (491)

第九节 中华绒螯蟹促性腺释放激素类似物的初步分离纯化与免疫鉴定 (499)

第十节 诺氟沙星在欧洲鳗鲡体内的药物代谢动力学研究 (504)

第十一节 “粉玉”体色瓯江彩鲤 MHC class II B 基因多态性及其与鱼体抗病力
关系的分析 (510)

第七章 养殖生态与环境 (517)

第一节 海洋环境生物修复技术研究与应用新进展 (517)

第二节 多种典型环境调控技术在刺参养殖池塘中的应用研究 (520)

第三节 背角无齿蚌碳收支和氮收支及生长效率的初步研究 (524)

第四节 螺羧蜚资源增殖与浒苔绿潮的防治 (528)

第五节 蜡样芽孢杆菌对养殖池水质净化研究 (532)

第六节 上海青浦养殖池塘生态系统游憩资源价值评估 (536)

第七节 可口革囊星虫与其栖息地底泥中的重金属含量及相关性分析 (544)

第八节 3 种蔬菜及栽培方式对虾池水体的净化效果 (551)

第九节 披山岛海区浮游动物种类组成及数量分布特点 (556)

第十节 贝类生态综合养殖池塘细菌种群多样性研究 (564)

第十一节 长江口碎波带轮虫群落特征季节变化 (570)

第十二节 应用大型底栖动物污染指数(MPI)评价黄河入海口潮间带环境质量
..... (579)

第十三节 温度对循环海水养鱼系统氮磷收支的影响 (586)

第一章 综 述

第一节 关于加快发展我国海水养殖业的战略思考

进入 21 世纪以来,世界水产养殖业得到快速发展,根据联合国粮农组织(FAO)统计,2006 年,世界海洋渔业总产量达到 1.4 亿吨,海洋渔业提供了全球 20% 的动物蛋白,产量基本稳定。2006 年以来,随着中国水产养殖业的快速发展,世界渔业结构发生了很大变化。世界水产养殖产量占世界总产量的比例跃升到 22.5%,捕捞占 77.5%,而我国已成为世界水产品生产第一大国,我国海水养殖产量约占世界产量的 70%。

一、我国海水养殖业发展现状

2010 年,我国水产品总产量达到 5 373 万吨,成为世界第一渔业大国。水产养殖总产量达到 3 828.84 万吨,占世界总产量的 70% 以上,全国人均水产品占有量达到 40.06 千克,居世界前列;水产品出口总量 333.88 万吨,总产值 138.28 亿美元,居大宗农产品首位(图 1-1 至图 1-3)。

作为世界主要渔业国家中唯一养殖产量超过捕捞产量的国家,我国成功实现了从以捕捞为主向以养殖为主的历史性转变。水产养殖业的发展,为改变我国和世界渔业生产增长方式和产业结构,保障国家食品安全,减排二氧化碳(10 年合计造林 500 万公顷,节省 400 亿元),渔民增产增收、扩大就业以及新农村建设等具有极为重要的战略意义(表 1-1)。

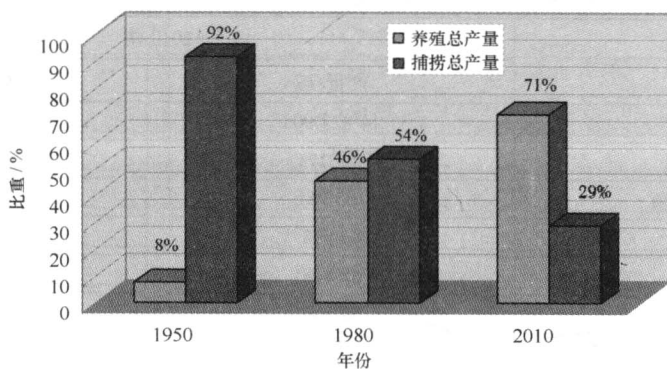


图 1-1 1950 年、1980 年和 2010 年我国水产养殖与捕捞产量比重

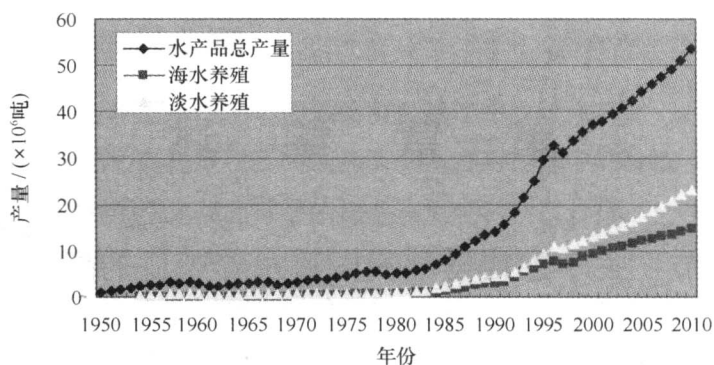


图 1-2 1950—2010 年我国水产养殖产量趋势

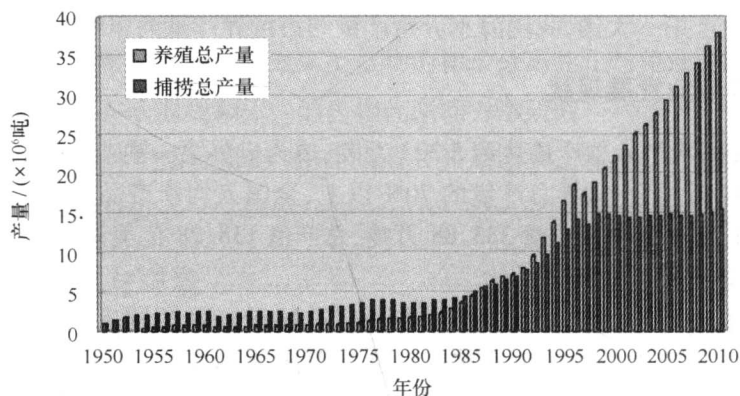


图 1-3 1950—2010 年我国水产养殖与捕捞总产量变化趋势

表 1-1 2010 年我国不同品种的海水养殖产量和面积

指标	2010 年	
	产量/吨	面积/公顷
合计	14 823 008	2 080 880
1. 鱼类	808 171	78 510
其中: 鲈鱼	105 951	
鲆鱼	84 978	
大黄鱼	85 808	
军曹鱼	36 356	
鲷鱼	16 787	
鲷鱼	45 012	
美国红鱼	52 243	
河鲀	17 111	
石斑鱼	49 360	

续表

指标	2010 年	
	产量/吨	面积/公顷
鳎鱼	5 372	
2. 甲壳类	1 061 096	310 779
虾	833 009	247 068
其中:凡纳滨对虾	608 267	133 076
斑节对虾	56 634	18 334
中国对虾	45 313	24 165
日本对虾	54 792	34 218
蟹	228 087	63 711
其中:梭子蟹	91 050	29 981
青蟹	115 829	26 983
3. 贝类	11 082 321	1 308 003
其中:牡蛎	3 642 829	116 622
鲍	56 511	15 422
螺	207 838	39 246
蚶	310 380	75 714
贻贝	702 157	43 346
江珧	30 955	1 827
扇贝	1 407 467	399 705
蛤	3 538 906	370 949
蛏	714 434	63 124
4. 藻类	1 541 322	120 204
其中:海带	883 602	40 029
裙带菜	109 133	8 445
紫菜	107 235	60 706
江蓠	114 722	5 838
麒麟菜	6 426	529
石花菜	120	7
羊栖菜	7 821	1 044
苔菜	1 115	157
5. 其他类	330 098	263 384
其中:海参	130 303	150 113
海胆	6 169 408(千克)	10 428
海水珍珠	15 781(千克)	5 408
海蜇	59 616	13 144

从表 1-2 和图 1-4 中可以看出,海上养殖仍然占有海水养殖的最大份额,大概在 52% 左右,滩涂养殖占 37%,其他方式占 11%。

表 1-2 2010 年我国不同养殖水域的海水养殖产量和面积

分类		2010 年	
		产量/吨	面积/公顷
按水域分	海上	7 708 505	1 142 939
	滩涂	5 485 416	652 715
	其他	1 629 087	285 226
合计		14 823 008	2 080 880
养殖方式	池塘	1 978 317	413 838
	普通网箱/米 ²	324 882	17 222 380
	深水网箱/米 ³ (水体)	55 517	5 035 463
	筏式	4 033 368	347 190
	吊笼	868 094	98 902
	底播	4 019 421	848 182
	工厂化/米 ³ (水体)	114 594	12 612 010

说明:深水网箱和工厂化养殖面积不计入按水域分的面积中,但产量计入相应的水域中.

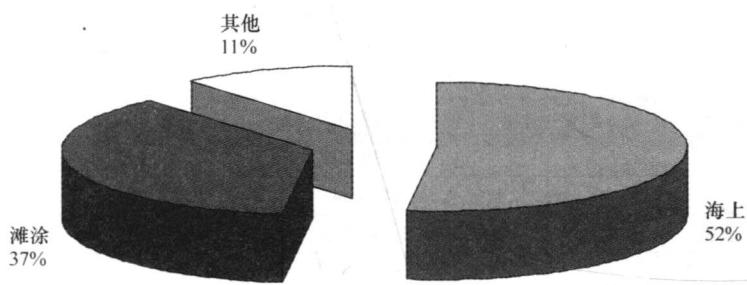


图 1-4 2010 年我国不同养殖水域的海水养殖产量

从表 1-3 和图 1-5 中可以看出,在全国临海地区中,山东仍然位列前茅,其次是福建、广东和辽宁,这四个省份在海水养殖产量上遥遥领先于其他地区。广西、浙江、江苏、河北、海南、天津等地区的海水养殖亟待发展。

表 1-3 2010 年全国各地区海水养殖产量(按水域分) 吨

地区	海水养殖产量	按养殖水域分		
		1. 海上	2. 滩涂	3. 其他
全国总计	14 823 008	7 708 505	5 485 416	1 629 087
天津	14 212			14 212
河北	329 308	258 476	54 344	16 488
辽宁	2 314 694	1 448 429	678 357	187 908

续表

地区	海水养殖产量	按养殖水域分		
		1. 海上	2. 滩涂	3. 其他
江苏	785 173	124 099	494 477	166 597
浙江	825 730	259 202	351 119	215 409
福建	3 038 990	1 787 212	1 049 056	202 722
山东	3 962 643	2 563 467	1 238 489	160 687
广东	2 490 688	982 809	1 072 516	435 363
广西	877 408	246 796	450 806	179 806
海南	184 162	38 015	96 252	49 895

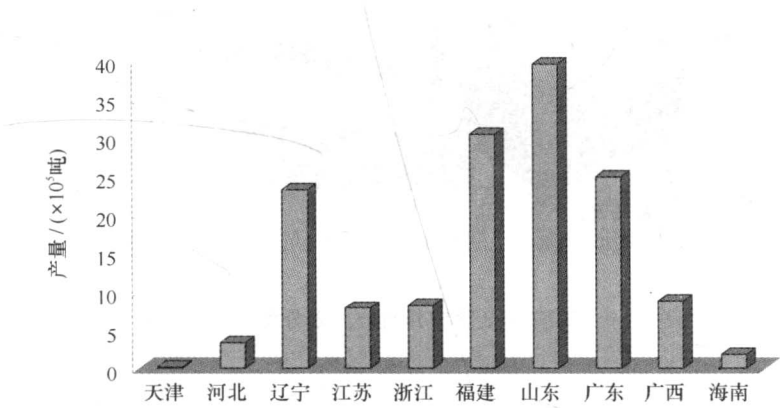


图 1-5 2010 年全国各地区海水养殖产量

从表 1-4 和图 1-6 中分析得知,筏式养殖和底播养殖仍然在养殖方式中占有绝对比重,池塘养殖经过近几年的发展,比重也得到了提高,工厂化和深水网箱是我们下一步海水养殖发展的重点。

表 1-4 2010 年全国各地区海水养殖产量(按养殖方式分) 吨

地区	海水养殖产量	养殖方式						
		1. 池塘	2. 普通网箱	3. 深水网箱	4. 筏式	5. 吊笼	6. 底播	7. 工厂化
全国总计	14 823 008	1 978 317	324 882	55 517	4 033 368	868 094	4 019 421	114 594
天津	14 212	11 810						2 402
河北	329 308	35 275			239 360		21 690	6 984
辽宁	2 314 694	168 899	1 690	1 928	642 136	26 506	984 962	24 270
江苏	785 173	284 866		20	111 865		380 322	8 100
浙江	825 730	219 115	23 874	2 642	196 430	880	265 722	65

续表

地区	海水养殖 产量	养殖方式						
		1. 池塘	2. 普通网箱	3. 深水网箱	4. 筏式	5. 吊笼	6. 底播	7. 工厂化
福建	3 038 990	230 918	145 417	6 296	1 054 749	77 737	297 534	8 095
山东	3 962 643	275 214	28 683	24 232	1 332 036	634 149	1 415 658	58 736
广东	2 490 688	456 640	100 603	7 618	251 875	126 833	450 472	3 648
广西	877 408	182 879	11 046	1 115	204 917	1 947	194 232	
海南	184 162	112 701	13 569	11 666		42	8 829	2 294

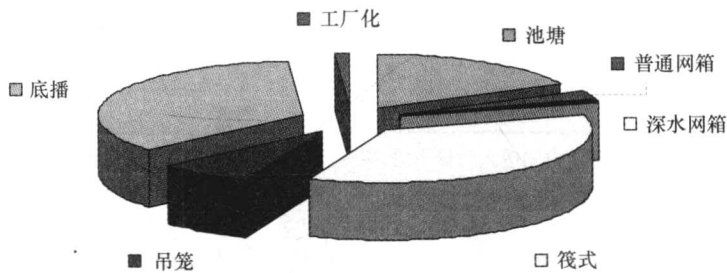


图 1-6 2010 年全国按养殖方式划分海水养殖产量

二、目前我国海水养殖业存在的主要问题与挑战

尽管我国水产养殖业发展很快,但仍面临不少问题与挑战。一是养殖空间受到严重挤压,因城乡发展,内陆水面、浅海滩涂可养水面大幅减少,15 米等深线以外的深水养殖受到技术和资金等限制。二是陆源污染构成重大威胁,病害种类达到 200 多种,每年因病害和水域污染直接经济损失 100 亿元以上。三是科技创新、支撑能力不强,水养殖品种遗传改良率仅为 16%,良种覆盖率不足 50%。四是质量安全与市场监管问题堪忧。五是养殖基础设施落后,中、低产池塘改造迫在眉睫。六是人工配合饲料仅占 43%,主要饲料蛋白源 70% 以上进口。七是水产品加工率仅为 15%,与发达国家 80% 的水平差距明显,影响了水产养殖业的健康可持续发展(表 1-5)。

表 1-5 2010 年我国水产养殖损失情况

指标		2010 年
		损失量/吨
水产品损失	1 700 476 万元	2 052 416. 30
台风、洪涝	874 503 万元	1 111 144. 59

续表

指标		2010 年
		损失量/吨
病害	295 040 万元	322 044. 77
干旱	126 560 万元	122 067. 17
污染	122 579 万元	132 957. 82
其他	281 794 万元	364 201. 95
(台风、洪涝)损毁渔业设施		465 623. 42
其中:池塘	162 656/公顷	234 400. 94
网箱(鱼排)	1 477 603/箱	82 795. 74
围栏	573 515/千米	13 802. 16

三、发展对策与建议

(一)发展思路

发展我国的水产养殖业,应实现水产养殖由粗放型向规模化转型,构建低碳、生态系统水平的水产养殖业,以建设现代水产科技创新体系为起点,以解决水产养殖业长远发展的重大基础问题和主要技术瓶颈为重点,以优化科技创新和成果推广转化为支撑。

(二)发展重点

1. 加快发展低碳高效型的生态化水产养殖业

发展我国的水产养殖业,应加快构建水产养殖良种培育技术体系,提高主导养殖对象良种覆盖率,构建高效健康养殖与管理技术体系,提高集约化养殖水平、装备设施节能减排水平、资源要素高效利用水平,构建水产养殖病害监控与预防技术体系,提高水产病害生态型综合防治能力,有效降低化药使用率和养殖病害损失率。强化产业支撑体系建设,建立长效养殖生态补偿机制。

2. 加快发展引领消费型的高值化水产加工业

发展我国的水产养殖业,应加快构建水产品循环利用技术体系,实现“资源→产品→废弃物→资源”型的循环利用构建水产品冷链技术体系,建立节能、健康的大宗养殖产品冷链物流,构建功能食品创制技术体系,提高水产加工业的技术含量和附加值,构建水产品质量控制与安全保障技术体系,实现水产品流通过程的品质动态全程监测跟踪与溯源。

3. 加快建立现代化水产养殖发展支撑体系

发展我国的水产养殖业,应加快建立水产养殖管理体系,水产品质量安全保障体系,渔业科技创新体系技术服务与推广体系,以及渔业信息化工程体系。以发展现代水产养殖工程技术和构建生态系统水平的水产养殖模式为重点,积极发展优良品种的培育与繁育技术及其产业化,生态健康养殖技术及其产业化,主要养殖品种的陆基工厂化养殖技术及其产业化,新饲料蛋白源开发、饲料添加剂以及水产饲料加工机械及其产业化,深水网

箱养殖技术与产业化,设施养殖与装备制造技术及其产业化,工厂化精准养殖控制技术以及废水资源再利用技术与装备,水产养殖产品精深加工技术与设备制造产业化示范等建设。最终实现世界水产养殖强国的目标。

(三) 条件保障

1. 建立现代水产养殖工程技术体系

包括:水产良种工程,生态健康养殖工程,安全绿色饲料工程,养殖设施与装备工程,产品精深加工技术与装备工程,水产养殖疾病防控工程,标准化池塘改造等基础设施工程。

2. 建立水生生物资源养护工程技术体系

包括:增殖放流工程,水利工程过鱼设施工程,人工鱼礁示范工程,海洋牧场示范工程,渔业资源养护与增殖技术研究平台建设,数字渔业研发平台建设等。

(四) 政策建议

发展我国的水产养殖业,应进一步优化水产养殖规划,要像保护基本农田耕地一样确保水产养殖水域面积。加快水产原良种体系建设,全面实施良种补贴政策,加强水产养殖执法能力建设,提高产业服务水平,完善科技创新体系,促进水产养殖可持续发展,建立水产质量可追溯制度,提高应对突发事件处置能力。全面实施养殖装备提升工程,推进养殖设施标准化改造,强化产业支撑体系建设,建立长效养殖生态补偿机制,同时,要建立一套完善的优惠政策和措施,确保我国水产养殖业的健康可持续发展。(参考文献略)

刘世禄 王建坤

(中国水产科学研究院黄海水产研究所,山东 青岛 266071)

第二节 海水鱼类养殖在碳汇渔业中的地位和作用: 从海洋鱼类生理到考古发现

海洋生态系统中的各类生物在海洋碳汇功能中起着巨大的作用。目前已确定的拥有海洋碳汇功能的生物类群或生态系统主要包括浮游生物、大型藻类、贝类、红树林和珊瑚礁生态系统等。它们通过生物钙化活动,利用海水中的 Ca^{2+} 和碳酸氢根 (HCO_3^-) 生成 CaCO_3 (碳酸盐,主要以文石和方解石晶体的形式存在),其反应式为 $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- \leftrightarrow \text{CaCO}_3 \downarrow + \text{CO}_2 \uparrow + \text{H}_2\text{O}$,这一过程就是海洋中的碳酸盐反向泵。浅海的贝类和藻类养殖活动直接或间接地使用了大量的海洋碳,提高了浅海生态系统吸收大气 CO_2 的能力。

在海洋食物网处于较高营养层次的海洋硬骨鱼类也是海洋固碳系统中的重要一环。1991年, Walsh 在鲆鱼的肠道中观察到亚稳态的方解石,并推测如果所有鱼类都具有产生“肠道岩石”的功能,则鱼类在海洋无机碳循环中将起到十分重要的作用。1996

年, Wilson 等通过虹鳟饥饿试验证实, 由肠道分泌的碳酸盐晶体是海水鱼类自身渗透调节的副产物。最近, Wilson 等根据全球海洋硬骨鱼类的生物及碳酸盐排泄率, 推算出了全球海洋鱼类碳酸盐岩的年产量, 并指出海洋鱼类对海洋碳循环有着重要的影响。因此, 本文主要介绍海洋鱼类的渗透调节机理, 阐述其渗透调节过程中产生的碳酸盐微晶体的特征, 并对海水鱼类养殖在碳汇渔业中的作用和地位进行了讨论。

一、海洋硬骨鱼类渗透压调节及固碳机制

海洋硬骨鱼类体液渗透压低于海水渗透压, 因此为了避免盐离子的不断渗入和水的流失, 海洋硬骨鱼类必须吞饮大量海水维持机体渗透压。在吞饮海水的同时, Na^+ 、 Cl^- 、少量 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等可通过肠的吸收作用进入鱼体内, Na^+ 和 Cl^- 通过鳃内的氯细胞排出, 少量 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 经肾脏由尿液排出; 大部分 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 在肠道中与肠道分泌的 HCO_3^- 形成碳酸盐沉淀随粪便排出。海洋硬骨鱼类肠腔内碳酸盐沉积物的形成, 降低了肠腔内海水的渗透压, 进而为肠上皮细胞水分的吸收提供了重要的渗透梯度, 同时还可以减少肠道 Ca^{2+} 的吸收, 防止肾结石的形成。肠道形成的碳酸盐经肠道黏液包裹后由非结晶状态变为结晶状态, 然后随粪便排出体外, 而包裹碳酸盐晶体的有机黏液基质在海水中很快被降解, 碳酸盐晶体进入海水, 沉淀后成为碳酸盐岩泥。

海水硬骨鱼类肠道碳酸盐沉淀的形成与肠细胞膜上离子转运和水的吸收密切相关。肠细胞膜上存在多种离子转运体, 如 $\text{Na}^+ - \text{K}^+ - \text{ATPase}$ (NKA)、 $\text{Na}^+ - \text{K}^+ - 2\text{Cl}^-$ (NKCC)、 $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ 、 Cl^-/Na^+ (NCC)、 Na^+/H^+ (NHE)、 $\text{Na}^+/\text{HCO}_3^-$ (NBC) 和 H^+ - 泵等, 这些转运体调控肠细胞膜内、外的各种离子和水的进出, 进而维持机体酸碱平衡和鱼类肠道碳酸盐沉淀的形成(图 1-7)。海水硬骨鱼类肠道通过跨细胞途径或旁细胞途径吸收水, 水的吸收动力来源于 $\text{Na}^+ - \text{K}^+ - \text{ATPase}$ 提供的能量。除此之外还涉及 3 个转运过程: HCO_3^- 分泌、 CaCO_3 沉淀形成、 H^+ 的转运。与贝藻类等海洋生物的生物钙化相比, 海洋硬骨鱼类钙化反应中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 来源于海水, 但 HCO_3^- 由肠道分泌。肠道分泌的 HCO_3^- 主要来源于两个方面: 一是肠细胞外 HCO_3^- 通过肠细胞基底外侧膜上的 $\text{Na}^+/\text{HCO}_3^-$ 同向转运体 (NBCl) 进入肠上皮细胞。如: NBCl 在海湾豹鲂鱼 (*Opsanus beta*) 肠道基底外侧膜上高水平表达, 且随着盐度的升高其表达量升高。二是肠细胞内 CO_2 水合形成 H_2CO_3 , H_2CO_3 在碳酸酐酶的作用下解离为 HCO_3^- 和 H^+ 。肠上皮细胞内的 HCO_3^- 进一步通过细胞侧膜上的 $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ (slc26a6) 转运体分泌进入肠腔^[17]。海水鱼类肠道中 HCO_3^- 分泌量的来源因鱼的种类而异。日本鳗鲡肠道分泌的 HCO_3^- 主要来源于细胞外 HCO_3^- , 欧洲川鲈 (*Platichthys flesus*)、海湾豹鲂鱼 (*Opsanus beta*)^[20]、泥虾虎鱼 (*Gillichthys mirabilis*) 和虹鳟 (*Oncorhynchus mykiss*) 肠道分泌的 HCO_3^- 则主要来源于机体代谢的产生的 CO_2 。海鲈 (*Sparus auratus*) 肠道分泌的 HCO_3^- 中细胞内和细胞外的 HCO_3^- 所占比例相似, 均约 50%。肠细胞内 CO_2 水合解离后产生的 H^+ 通过肠细胞膜上的 Na^+/H^+ 转运体 (NHE2 或 NHE3) 或 H^+ - ATPase 进入肠腔。在肠细胞膜上膜结合碳酸酐酶 (CAIV) 的作用下, H^+ 可中和部分肠腔中的 HCO_3^- 形成 CO_2 , 这一过程可使肠腔中 pH 值升高和生成 CO_3^{2-} , 进而形成碳酸盐沉淀。