



全国高校教材学术著作出版审定委员会审定

# 水产养殖学概论

主 编 蔡生力

副主编 黄旭雄 刘 红



海洋出版社

全国高校教材学术著作出版审定委员会审定

# 水产养殖学概论

主 编 蔡生力

副主编 黄旭雄 刘 红

海洋出版社

2015年·北京

图书在版编目 ( CIP ) 数据

水产养殖学概论 / 蔡生力主编. —北京: 海洋出版社, 2015.11

ISBN 978-7-5027-9235-0

I. ①水… II. ①蔡… III. ①水产养殖—教材  
IV. ①S96

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 214542 号

责任编辑: 苏 勤 常青青

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

北京画中画印刷有限公司印刷

2015 年 11 月第 1 版 2015 年 11 月北京第 1 次印刷

开本: 787mm × 1092mm 1/16 印张: 20

字数: 474 千字 定价: 52.00 元

发行部: 62132549 邮购部: 68038093

总编室: 62114335 编辑室: 62100038

海洋版图书印、装错误可随时退换

## 序

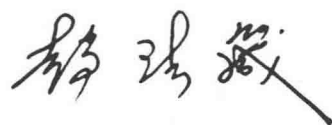
2012年，世界水产养殖产量已达9 000余万吨，产值超过1 400亿美元。自20世纪80年代以来，水产养殖浪潮席卷全球，兴起一波又一波的革命性浪潮，而中国在其中一直扮演着弄潮儿和领头羊的角色。1980—2000年的20年间，中国的水产养殖产量持续维持在一个高速增长期，几乎每5年翻一番。进入新世纪后仍以较高速度在增长，2012年养殖总产量达4 100万吨，占世界养殖总量的61.9%。在人类陆地开发接近极限的今天，海洋、湖泊将是为人类提供健康高质量食品的广阔天地。可以预言，水产养殖业将会吸引越来越大的人力、金融和技术投资，水产养殖这个曾经辉煌的朝阳产业，必将依旧辉煌、朝气蓬勃。

水产养殖学是一个在水生生物学、农学、海洋与湖沼、化学、动物和植物生理学、物理学、工程学、经济学，甚至法学和商学等不同学科基础上建立起来的应用性学科。在我国，从最初创立到现在已有近百年的历史，水产养殖学科在积极实践和发展中，融各个学科的理论、知识为一体，不断吸纳、兼并、包容、完善，形成了自身独立而又完整的学科理论体系，借助该体系，为我国培养了成千上万名从事水产养殖行业的教育家、科学家、技术人员和管理人员。据统计全国有47所高等院校开设了水产养殖专业，每年为国家培养几千名水产养殖学毕业生。

过去几十年中，我国各家出版社出版了众多有关水产养殖的教材、专著以及专为水产养殖专业学习的系列教材。这些教材有的涉及鱼类、甲壳类、贝类、藻类以及其他特种水产的养殖，有的专注生理学、生态学、水化学、营养学、水产病害等。这些专著、教材为培养水产养殖人才起到了主导作用。

蔡生力教授长期从事水产养殖教学、科研和生产工作，具有丰富的理论基础和实

践知识，在参考了上述有关水产养殖学专著、教材的基础上，归纳提炼、大胆创新，编写了《水产养殖学概论》。本书内容精练、水产理论体系完整、篇幅不长，但读来让人耳目一新。书中对于世界水产养殖发展历史叙述甚为详细、全面；有关水产养殖学基础内容简要而系统，对于传统鱼、虾、贝、藻的育苗养殖的叙述清楚、准确。本书无论是对于从事水产养殖的学生、科技人员还是相关企业家、工作人员都不失为一本很好的参考书。为此我向各位从事水产养殖的相关业者、在校学生以及对水产养殖感兴趣的读者推荐此书，相信你能从中收获良多。



中国工程院院士  
2015年3月

# 前 言

水产养殖是一个方兴未艾的产业，与之相适应的是水产养殖教育在世界各国，尤其是在我国也受到高度重视，据统计，我国有47所高等院校开设水产养殖专业，还有更多与之相关的中等专业教育和职业技术学校也在从事水产养殖学教育。

水产养殖学是一个在水生生物学、农学、海洋与湖沼、化学、动物和植物生理学、物理学、工程学、经济学甚至法学和商学等不同学科基础上建立起来的应用性学科。在我国，水产养殖学从最初创立到现在已有近百年的历史，在积极实践和发展中，水产养殖学科融各个学科的理论、知识为一体，不断吸纳、兼并、包容、完善，形成了自身独立而又完整的学科理论体系。在过去几十年中，我国一些著名水产教育学家编撰了众多经典的专著和教材，如《鱼类增养殖学》(王武，2000)、《虾类健康养殖原理与技术》(王克行，2008)、《海水贝类养殖学》(王如才，2006)、《水产养殖生物学》(刘焕亮，2014)等。这些专著和教材为我国水产行业人才培养起到了主导作用，然而令人略感遗憾的是至今尚未有以“水产养殖学”命名的专著或教材问世。为此，我们在全面参考了国内外大量与水产养殖相关的专著、教材之后，将其归纳、提炼、创新编撰，并定名为《水产养殖学概论》。本书共分两篇，第一篇为“水产养殖学基础”，主要介绍与水产养殖相关的物理、化学、工程以及生物学知识，第二篇为“水产生物养殖”，重点叙述鱼、虾、贝、藻的育苗和养成。目的是希望此书除了能作为水产养殖专业学生的教材外，还能吸引与水产养殖相关的如水生生物学、海洋生物学专业的本科生、研究生的兴趣，同时也可以作为从事相关行业的技术人员、企业管理人员的参考书籍。

本书的第一章、第二章、第三章、第五章、第六章(第二节、第三节)、第八章、

第九章由蔡生力编撰，第四章、第六章（第一节）、第七章、第十章由黄旭雄编撰、第六章（第四节）、附录等由刘红编撰、整理。在本书编撰过程中，得到了上海海洋大学及水产与生命学院的大力支持和资金资助。承蒙赵法箴院士特为本书作序，李家乐、严兴洪、沈和定等教授对本书进行了审阅和修改，徐静珍老师帮助校稿，史杰、刘志轩等同学参与了部分图表的制作，在此深表感谢。

水产养殖科学技术日新月异，尽管本书编者期望能尽量吸收国内外最新的成果资料，但仍不免多有疏漏，留下许多遗憾，在此深表歉意，并欢迎各位专家同行批评指正。

蔡生力  
2015年2月25日

# 目 录

第一章 绪论	1
第一节 水产养殖学定义及相关学科	1
第二节 水产养殖发展历史	2
第三节 现代水产养殖业的发展	6
小结	16
第二章 水质	17
第一节 水的理化性质	17
第二节 水质指标	20
小结	27
第三章 养殖用水过滤和处理	28
第一节 过滤	28
第二节 消毒	36
第三节 充气	39
第四节 除气	42
小结	42
第四章 水产苗种培育设施	43
第一节 水产苗种场的选址及规划设计	43
第二节 育苗车间	45
第三节 供水系统	54
第四节 供电系统	57
第五节 供气系统	57



第六节 供热系统 .....	58
第七节 其他辅助设施 .....	59
小结 .....	61
<b>第五章 养殖模式</b> .....	<b>62</b>
第一节 开放系统 .....	62
第二节 半封闭系统 .....	67
第三节 全封闭系统 .....	72
第四节 非传统养殖系统 .....	74
小结 .....	77
<b>第六章 基础生物学概念</b> .....	<b>79</b>
第一节 营养与饵料 .....	79
第二节 病原 .....	110
第三节 养殖生态学 .....	118
第四节 遗传育种 .....	120
小结 .....	133
<b>第七章 藻类栽培</b> .....	<b>135</b>
第一节 藻类生物学概念 .....	135
第二节 海藻类苗种培育 .....	140
第三节 藻类栽培 .....	152
小结 .....	165
<b>第八章 贝类养殖</b> .....	<b>166</b>
第一节 贝类生物学概念 .....	166
第二节 贝类苗种培育 .....	168
第三节 贝类养成 .....	178
小结 .....	184
<b>第九章 甲壳动物养殖</b> .....	<b>185</b>
第一节 甲壳动物生物学概念 .....	185
第二节 甲壳动物苗种培育 .....	189
第三节 甲壳动物养殖 .....	202
小结 .....	216

第十章 鱼类养殖·····	217
第一节 鱼类生物学概念·····	217
第二节 鱼类育苗·····	230
第三节 鱼类养殖·····	242
小结·····	251
主要参考文献·····	253
附 录·····	256
附录1 水质检测技术·····	256
附录2 生物饵料培养技术·····	292
附录3 人工饲料配方·····	306
附录4 4种人工海水配方·····	308
附录5 盐度与相对密度换算表（水的温度为17.5℃）·····	310

# 第一章 绪 论

## 第一节 水产养殖学定义及相关学科

### 一、定义

水产养殖学 (Aquaculture), 从英文词义看, 是由“水产的”“水生的”(aquatic) 和“养殖”(culture) 缩写而成的。因此早期的学者把水产养殖学定义为:“水生生物在人工控制或半控制条件下的养成”, 简称为“水下农业”, 其意义与“农学”(Agriculture) 一词最为接近。然而这一定义把水族馆展示的活体标本培养、实验室的实验动物培养以及居民为自身食用的小水体养殖都包括进了这一词的概念中, 显然不够合适。因此 Matthew Landau (1991) 提出了一个概念相对完整而又简洁的水产养殖学定义:“具商业目的的大规模的水生生物育苗或养成”。(The large scale husbandry or rearing of aquatic organism for commercial purpose)。这一表述也能很好地定义“淡水养殖学”“海水养殖学”或“鱼类养殖学”“甲壳动物养殖学”“贝类养殖学”“藻类养殖学”以及近几年兴起的“观赏鱼养殖学”等学科的内涵。

### 二、相关学科

水产养殖学属“水产学”一级学科下的二级学科, 可以说是一门独立学科。但从学科的内涵分析, 水产养殖学属于应用性学科, 是多门学科的综合。渗入到学科内部或与之有密切关系的学科有: 水生生物学、农学、海洋与湖沼、化学、动物和植物生理学、物理学、工程学、经济学甚至法学和商学等。作为应用性学科, 每一个从事水产养殖的企业家, 都会有遵循如下相似的企业规划和操作流程。

- (1) 经济效益分析;
- (2) 选择合适的养殖场所;
- (3) 购买或租赁养殖场地;
- (4) 养殖工程的设计、总体规划;
- (5) 养殖池、流水养殖设施的建造, 水泵、过滤池等配套设施及工人的雇佣;
- (6) 水处理: 包括养殖用水, 生活用水;
- (7) 亲体(种鱼、种虾等)的购买、培养。

## 第二节 水产养殖发展历史

### 一、古代

水产养殖历史最早可追溯到公元前2500年，古埃及人已开始了池塘养鱼，至今埃及的法老墓上还有壁画描绘古埃及人在池塘里捞取罗非鱼的场景。

在中国，关于池塘养鱼的最早文字记载是《诗·大雅·灵台》：“王在灵沼，於物鱼跃。”诗中记叙了商朝的周文王征集民工在现甘肃灵台建造灵沼，并在其中养鱼之事（公元前1135至前1122年）。传说周文王还亲自记录鲤鱼的生长和生活行为。春秋战国时期，越国范蠡在帮助越国吞灭吴国后，隐身在齐国以养鱼为生并致富，世人称之为“陶朱公”。范蠡撰写了国内外公认的世界最早的鱼类养殖专著《养鱼经》。现存的《养鱼经》约400余字，描述了鱼塘的建设、雌雄亲鱼的选择、搭配以及鲤鱼的繁殖和生长规律。并专门指出为什么要选择鲤鱼作为养殖对象，“所以养鲤者，鲤不相食，易长又贵也”。

汉朝（公元前202—公元220年）时，养殖池塘已经很大，据《史记》记载，一个池塘可出产千石鱼（合50~100 t）。鲤鱼养殖传到唐朝（618—907年）遭到了禁止，原因只是唐朝皇帝姓“李”，“李”和“鲤”同音。朝廷规定，百姓不得食用或养殖鲤鱼，捕到鲤鱼必须放生。这一禁令使得以前一直单一养殖鲤鱼的境况在唐朝发生了革命性的变革。唐朝人发现与鲤鱼相近的青鱼、草鱼和鲢、鳙鱼也是很好的养殖品种，而且将这几类鱼混合搭配在同一个池塘养殖会因为不同的食物结构和生活空间而收到意想不到的良好的养殖效果，这就是闻名中外的池塘“综合养殖”（Poly-culture），并一直延续至今。

宋朝（960—1279年）的鱼类养殖业已经相当发达，渔民对鱼类的食性，饲养方法尤其混养技术都有很多经验总结，《癸辛杂记》和《绍兴府志》等文献中有记述。宋朝已开始将野生鲫鱼进行驯化成为金鱼，在家居、庭院进行养殖用于观赏，在皇家宫廷和民间逐步流行，驯养野生金鱼被列为宋朝百项科技成果之一。

明朝（1368—1644年）的鱼类养殖业更为发达，养殖经验和技術得到了系统的总结，形成了专著如黄省曾的《养鱼经》和徐光启的《农政全书》。黄省曾（1496—1546年）的《养鱼经》又名《种鱼经》共三篇：一之种、二之法、三之江海诸品，分别阐述鱼种、鱼苗、养殖方法及鱼的种类。书中记述了鲟、鲈、鳊、鲴等19种鱼类。还特别讲述了河豚的毒性、鉴别和解毒之法。徐光启的《农政全书》是一部集天文、历法、物理、数学、水利、测量和农桑等的科学著作。全书共12篇60卷，其中第四十一卷专门论述养鱼。内容涉及池塘底质、水质要求，鱼种、鱼苗繁殖培育，草鱼、鲢鱼混养比例，密度以及鱼病防治等，是一部内容系统、论述独到的鱼类养殖著作。明末郑成功收复台湾后，在台湾开始养殖遮目鱼，受到台湾人民的欢迎，遮目鱼也因此被称为国姓鱼。

中国的养鱼技术大约在1700年前传到朝鲜，以后再传至日本。

古希腊著名哲学家亚里士多德（公元前384至前322年）也是公认的有史以来第一位海洋生物学家和生物学奠基人。他开创性地做了动物分类、动物繁殖、动物生活史等工作，记录了170多种海洋生物，其中特别指出鱼是用鳃呼吸的，鲸是哺乳动物等。他

在书中还提到了鲤鱼以及当时欧洲人也热心于养殖鲤鱼。罗马人在公元1世纪就开始在意大利沿岸建池塘养鱼，养殖品种除鲤鱼外，还有鲮鱼。据传早期罗马人的养鱼技术是腓尼基（Phoenicians）人和伊特拉斯坎（Etruscans）人从埃及传入的。到中世纪，亚得里亚海附近的潟湖和运河成为当时欧洲的水产养殖中心。法国从8世纪中叶开始利用盐池进行鳗鱼、鲮鱼和银汉鱼（sand smelt）的养殖。英国从15世纪初开始养殖鲤鱼。最初是将野生的鲤鱼养殖在人工开挖的池塘（stew-ponds）里暂养作为食物备用，以后逐步变为增养殖。这种养殖方式在欧洲流行很长一段时间。由于当时牛羊肉来源困难，因此鱼类蛋白就变得十分珍贵，以至于如果发现有人偷鱼，法庭甚至可以重判他死刑。德国人斯蒂芬·路德威格·雅各比（Stephen Ludwig Jacobi）于1741年建立了世界上最早的鱼类育苗厂，主要繁殖培育鳟鱼苗以供应当时日益兴旺的游钓业。雅各比把他的繁殖技术发表在《Hannoverschen》杂志上，可惜没有引起人们的注意。直到1842年他的鳟鱼繁殖技术被法国科斯特（Coste）教授等人再次发现才得以广泛传播。在捷克斯洛伐克，至今存有延续900年的养鱼池塘。波西米亚和马洛维亚最早的一些池塘可以追溯到10世纪和11世纪。到16世纪时，捷克斯洛伐克的鱼塘面积规模相当大，据估计约有120 000 hm<sup>2</sup>，位列世界各国之首。

夏威夷的水产养殖始于1000年，技术可能是从波利尼西亚传入的。养殖池塘一般建在海岸地带，通常都用石块切成，既牢固，面积也可以建得很大，主要养殖海水种类如遮目鱼、鲮鱼以及虾类。印度尼西亚是遮目鱼养殖大国，该国的遮目鱼养殖历史至少可以上溯到600年前，虽然现存的记录是在1821年由荷兰人所做的。

除鱼类养殖外，贝类养殖的历史也很悠久。贝类是沿海居民十分喜爱又容易采集的食物，尤其是牡蛎，可能是无脊椎动物中最早被养殖的水产品种，从罗马皇帝时代就已开始进行。1235年，爱尔兰海员Patrick Walton在法国海边泥滩上打桩张网捕鸟时，发现了一个非常有趣的现象，木桩上附满了贻贝，而且附着在木桩上的贻贝比泥地上的长得快得多。这一偶然发现成就了后来法国日益兴旺的贻贝养殖产业化。300多年前的日本人应用类似的技术进行牡蛎增殖。1673年，Koroshiya发现牡蛎幼体可以附着在岩石或插在海滩的竹竿上生长，否则幼体将被海流冲到海底不知所踪。这一发现奠定了后来在日本盛行的浮筏养殖，并且由牡蛎等贝类养殖扩展到紫菜养殖。今天，紫菜是日本十分重要的海产品，它的养殖在16世纪末的广岛湾和17世纪末的东京湾就已经很盛行了。

## 二、19世纪和20世纪初的水产养殖

从18世纪中叶开始，欧洲的科学技术突飞猛进，从不同渠道和层面进入到水产养殖领域，极大地推动了水产养殖业的发展。

19世纪50年代，欧洲鱼类养殖技术已日臻成熟。1854年法国政府在Alsace投资建设了一座设施齐全鱼类养殖场。而此时的美国，水产养殖也在起步。1853年，克利夫兰和纽约Bloomfield开始兴建鱼类养殖场。1856年俄国的Vrassky发明了鱼卵“干法授精”技术，即将精子直接与卵子混合，中间不加水。这一干法授精技术大大增加了许多种鱼类的受精率。

1857年，加拿大首任渔业主管Richard Nettle成功孵化了大西洋鲑和美洲鲑，随之

又繁殖了溯河洄游鲑鳟鱼类如大鳞大马哈鱼和银大马哈鱼，这一技术很快就传到了美国南部。1864年，Seth Green在纽约成功创建了鲑鳟鱼育苗场，他改进了鲑鳟鱼产卵和授精技术，受精率提高了50%。1877年，这项技术又从北美传到了日本，之后从日本传向亚洲大陆。1927—1928年，俄罗斯在Teplovka湖和Ushkovskoye湖边建起了最早的鲑鳟鱼繁殖场。尽管这一时期世界各地都建有鲑鳟鱼繁殖场，然而当时的成功率一般都较低。直至1940年，人们对鱼类生理学、行为学以及饵料需求有了更深的了解之后，成功率才得到大幅度提高。

鱼类育苗场在早期的增值放流上也起了重要作用。从19世纪中叶起，美国的渔民就发现大西洋的渔获量在逐年减少，多数人认为这是由于过度捕捞造成的。因此有专家建议通过人工培育鱼苗进行放流可以补偿过度捕捞的资源。1871年，美国联邦政府首任渔业专员Spencer F. Baird领导实施了鱼类人工放流增值计划，首选目标是曾经资源丰富而近几十年不断衰退的美洲河鲱（shad）。项目组将人工培育的35 000尾鲱鱼从美国东海岸长途运输到以前没有鲱鱼资源的西海岸萨克拉门托河进行放流，其结果使该种类在这里首次形成了种群，并成为西部重要的经济鱼类。不久其他一些鱼类如鲱鱼（herring）、黑线鳕鱼（haddock）、绿鳕（pollack）的繁殖也相继取得成功。1885年，在马萨诸塞州的伍德霍尔建立了美国第一家商业化海洋鱼类育苗场，紧接着在Gloucester港和Boothbay港也建起了鱼类育苗场，专门繁殖鳕鱼（cod）及相近的种类。到1917年，这三家育苗场每年育苗达 $30 \times 10^9$ 尾，其中主要是绿鳕和比目鱼，其次是鳕鱼和绿线鳕。

同时期，欧洲也在进行类似的实践。1882年，挪威船长G. M. Dannevig在私人和政府的共同资助下建立了一家商业化鱼类育苗场，所培育的幼鱼主要用于补充挪威海湾鳕鱼资源。1916年，这家育苗场改变为完全由政府管理经营。Dannevig的育苗技术有较大的改进，与美国育苗场露天经营不同，他在室内建设很大的产卵池来收集卵，并且还发明了一个震动孵化器以增加卵的孵化率。挪威的育苗技术进步刺激了苏格兰政府于1883年在Dunbay海洋生物实验站也建成了一个鱼类育苗场，主要进行鲑鳕类育苗，并且还邀请了Dannevig担任技术顾问。1902年，Dannevig离开苏格兰来到了澳洲，他把鲑鳕鱼类亲鱼带到了澳洲，当地政府在新南威尔士Gunnamatta湾专门为Dannevig建设了一个育苗场。1906年，他已拥有几千尾鲑鳕类亲鱼，年培育幼鱼苗种 $2 \times 10^8$ 尾。在英国，经过著名科学家W. A. Herdman的不懈努力，也于1890年在利物浦等地建起了鱼类育苗场，主要繁殖培育鳕类和其他比目鱼。

对于欧、美各国不断兴起的通过育苗场培育鱼苗放流以增殖渔业资源的行动也招致了一些专家的质疑，“放流计划真的有助于渔业资源恢复吗？”带头提出挑战的是Kurt Dahl和J. Hjort，他们认为那些认为鱼苗放流后，鳕鱼捕获量增加的说法不过是那些育苗场想继续他们经营的宣传借口，市场上鳕鱼捕捞量统计数据上下波动有人为编造嫌疑。根据他们从1903—1906年的研究发现，挪威和其他国家在放流后渔业资源马上增加，是将一些幼鱼也统计进去了。尽管Dahl和Hjort的研究和质疑也并不令人信服，但是育苗场也没有强有力的研究数据进行反驳，因此鱼类育苗场的放流计划也逐渐失去了资助。美国的育苗放流仍然坚持了很长一段时间，直到1943年伍德霍尔育苗场被海军部门接管。Boothbay和Gloucester育苗场也分别于1950年和1952年关闭。显然政府部门觉得放流计划的资金投入并没有预期的那么好，增加的渔业收入补偿不了项目的投

入。欧洲各国也遭遇到同样的境遇，在第一次世界大战爆发后，这些育苗场纷纷关门或转为他用。

尽管大规模的鱼类繁殖放流项目停止了，但水产养殖科研工作仍在稳步前行。1920年，在美国新泽西州鳟鱼繁殖场，G. C. Embury 成功进行了促进鱼类生长和疾病防治的品种选育。1930年，意大利首次实现了遮目鱼的人工产卵。1932年，巴西人首先使用激素注射进行亲鱼催熟，这一技术一直沿用至今，成为刺激人工养殖条件下难以成熟的鱼类性腺发育的关键。20世纪30年代，水产科技工作者开始使用卤虫卵作为水产动物幼体饵料，由于卤虫卵个体小，孵化容易，营养价值高，非常适合作为鱼类早期幼体饵料，以后又被成功应用到甲壳动物育苗中。

罗非鱼养殖起始于1924年的肯尼亚，1937年发展到刚果。1939年在印度尼西亚的爪哇发现了来自非洲的野生罗非鱼自然群体，至于它究竟如何从非洲来到亚洲，至今仍是个谜。当时遮目鱼养殖在爪哇岛已经衰退，逐渐被罗非鱼取代。第二次世界大战期间，日本人占据该岛，将罗非鱼养殖从马来西亚扩展到亚洲大陆，并成为当地的重要养殖品种。

在很长一段时期，牡蛎一直是美国东北部新英格兰沿海居民的大宗水产品。但是当成体牡蛎不断被采集，牡蛎幼体数量也急剧减少。这并不仅仅是由于能够繁殖的亲体减少，更重要的是因为成体牡蛎采集后，贝壳不再回到海区，而成体贝壳是牡蛎幼体的最佳附着基，缺少贝壳，幼体无处附着，贝类资源势必衰退。为此当时的殖民政府曾禁止居民带走牡蛎贝壳，但效果不佳，1800年，这一带沿岸的牡蛎资源仍然衰退得很厉害。现代牡蛎养殖研究始于19世纪50年代法国的M. de Bon & M. Coste。1879年，美国约翰霍普金斯大学的威廉·布鲁克斯首次在实验室使牡蛎产卵，孵出幼体，但是，在很长一段时间内，科学家们始终未能将幼体培育成稚贝。其主要原因是当时还没有人工培育的牡蛎饵料。科学家试图将含有新鲜饵料的海水引进育苗池，可是，水一进来，贝类幼体就被冲走了，实验仍不成功。直到1920年，William Wells 和 Joseph Glancy 通过一套充气系统和离心设备才将牡蛎幼体成功培育至附着阶段。Victor Loosanoff，美国首任国家海洋渔业实验室（康涅狄格州Milford）主任与他的同事对牡蛎养殖做出了杰出的贡献，详细描述了大规模牡蛎养殖的工艺流程，牡蛎各阶段幼体的发育细节，以及如何人工诱导牡蛎产卵技术。

其他一些种类的贝类育苗和养殖研究也在同期展开。位于密西西比河爱荷华州的Fairport 渔业生物中心在20世纪初开始了淡水珍珠贝的生活史研究和养殖实验。1935年，日本的Saburo Murayama 通过人工授精的方式成功繁殖出了鲍的幼苗。1935年，T. Kinoshita 首次尝试采集自然海区扇贝幼体用于养殖。1943年，他成功地运用升温或调节水质酸碱度来刺激扇贝产卵。

人工培育浮游单细胞藻类投喂牡蛎等滤食性贝类的研究也经历了一个复杂艰难的过程。P. Miquel 最早在19世纪90年代开始在实验室培养了几种硅藻，很快他就发现培养藻类的水无论是采自湖泊、池塘还是海洋，都无法持续培养，除非在水中添加矿物质溶液。1943年，Foyn 发明了一种藻类培养基，其中含有矿物质溶液和土壤浸出液，这种培养基对许多藻类都有极佳的培养效果。20世纪40年代，来自中国的朱树屏领先发明了各种单细胞藻类培养基以及人工海水配方。藻类连续培养在20世纪初的捷克斯洛伐



克就开始尝试了，但该项技术一直到20世纪40年代，经过J. Monod, B. H. Ketchum & A. C. Redfield 等人的努力才逐步完善成熟。

龙虾也曾像鱼类一样作为资源增殖的对象，在美国大西洋沿岸进行放流。19世纪末、20世纪初，为了增殖龙虾资源，美国罗德岛渔业协会发明了一种海上浮动实验室，配备有许多小网箱，里面养殖龙虾幼苗，直到幼体发育到第四期，即将转入底栖生活时，将其放流。1934年日本的藤永原（Motosaku Fujinaga）首次人工成功培育出了日本对虾幼苗。他的工作一度因为第二次世界大战而停止，战后又得以继续，20世纪五六十年代，对虾育苗技术传到亚洲中国、东南亚以及美国，并很快得以推广和应用。20世纪40年代，法国的J. B. Panouse发现眼柄是甲壳动物的内分泌中心，切除眼柄可以诱导亲体成熟，这一技术被广泛应用于一些在人工控制条件下难以成熟的甲壳动物种类育苗，尤其是对虾，如斑节对虾、日本对虾、凡纳滨对虾等。

有关水产养殖最具传奇色彩的故事要数罗氏沼虾育苗了。20世纪50年代，来自中国的林绍文在任联合国粮农组织（FAO）渔业官员时，发现东南亚市场上销售的罗氏沼虾（俗称马来西亚大虾）很有养殖前途，就开始在马来西亚槟城进行育苗实验，一开始屡受挫折。从野外捕获亲虾、产卵到孵化都很顺利，可是幼体每每发育到第五六天时就全部死亡，连续几个月的实验都是同样的结果。他给幼体投喂各种食物诸如茶叶、鱼肉等，都不见效，最后把他夫人为他做的牛肉汤倒进育苗缸后，奇迹发生了，幼体竟然成活而且成功变态为仔虾。他忽然领悟到，是肉汤中的盐而非牛肉发挥了关键作用。因为罗氏沼虾如同河鳗、河蟹等降海产卵种类一样，终其一生基本都是在淡水中生活，但是在其早期幼体发育阶段，必须在海水中完成其生活史中的一个特殊阶段。林绍文这一发现为东南亚国家以及其他亚洲国家的罗氏沼虾大规模养殖做出了开拓性贡献。

### 第三节 现代水产养殖业的发展

过去的近半个世纪是水产养殖大发展的时代，世界五大洲多数国家都开展了水产养殖实践和研究。据统计，1987年，全球的水产养殖产量占总渔业产量的12.3%，并且以很高的年增长率在不断发展。表1-1是1985年和2012年世界主要水产养殖国家的主要养殖品种的年产量对比。

表1-1 世界重要水产养殖国家主要养殖种类年产量 (t)

国家	1985年			
	鱼类	甲壳类	贝类	其他
中国	2 392 800	54 000	1 120 000	1 689 400
日本	283 900		359 000	540 600
韩国	3 700		369 000	417 500
菲律宾	243 700		37 900	212 800
美国	195 200		128 000	30 000



续表

国家	2012年			
	鱼类	甲壳类	贝类	其他
中国	35 990 000	6 150 000	13 190 000	3 220 000
日本	284 000	1 600	346 000	1 100
韩国	90 000	2 800	373 000	17 700
菲律宾	672 000	73 000	46 000	
美国	207 000	45 000	167 000	

## 一、北美洲

加拿大的水产养殖已有100多年的历史，主要养殖鲑鳟鱼类。1988年鲑鱼产量为10 000 t。20世纪80年代，加拿大的水产养殖业增长趋势十分明显。以不列颠哥伦比亚为例，1982年仅有10家养鱼场，1986年就发展到82家，面积283 hm<sup>2</sup>，而1988年有178家，面积达984 hm<sup>2</sup>，而且这一趋势有增无减。加拿大养殖的贝类主要是牡蛎，东西两岸都有养殖。

美国的水产养殖业在过去的三四十年取得了长足的发展。美国每年人均水产品消费7 kg，对水产品的旺盛需求，促使了水产养殖技术研究和行业发展。政府、私营企业以及各类大学都对水产养殖的发展给予了很大的支持。其中鲑鱼、虹鳟、牡蛎、对虾、龙虾等种类深受美国市民喜爱，成为主要养殖对象，而一些世界普遍养殖的鲤鱼、罗非鱼在美国颇受冷落。虽然美国的水产养殖业取得了一定的发展，但许多业内人士认为，其发展速度没有达到应有的程度，其中可能有部分是技术原因，更多的是政治、经济、社会等因素，如果消除这些因素，美国水产养殖业会有更大的发展。

鲑鱼是美国最重要的水产养殖品种，其养殖池塘面积超过所有其他种类。进入20世纪80年代后，发展速度明显加快。1982年，养殖场为987家，而1988年迅速增加到2003家，面积57 730 hm<sup>2</sup>。鲑鱼主产地位于密西西比河两岸，仅18%的养殖场产出全国80%鲑鱼。1987年，全国各鲑鱼加工厂共收购养殖鲑鱼127 000 t。

美国鲑鳟鱼类的养殖仍以育苗放流为主。1982年仅在太平洋沿岸，就放流鲑鳟鱼苗 $62 \times 10^8$ 尾，其中40%~50%的鱼苗是由政府部门育苗场培育的。放流所增殖的渔业资源可以供市民游钓和捕捞。据哥伦比亚河的放流效益评估，用于放流育苗的投资收益比是1:4。政府部门利用出售游钓许可证征集的资金进行鲑鳟鱼类育苗放流进而支持游钓业。

游钓业的发达刺激了美国钓饵鱼养殖成为一个特殊水产行业。1987年，全国约有14 000家钓饵鱼场，年产12 200 t鱼饵。另一个特殊的水产行业是观赏鱼养殖，这是一个水族爱好者钟爱的行业，每年的交易额为2亿美元，从而催生了观赏鱼的育苗和养殖。仅佛罗里达州就有220家热带鱼养殖场。由于海洋野生资源的不足及进口来源受限，许多养殖场更多地进行人工育苗，尤其是从事比较容易培养的淡水热带鱼，虽然从观赏性和销售价格上比海水品种要低一些。