

全国高等农业院校教材

全国高等农业院校教学指导委员会审定

养殖水域生态学

水产养殖学 水生生物学专业用

董双林 赵文 主编



中国农业出版社

全国高等农业院校教材
全国高等农业院校教学指导委员会审定

养殖水域生态学

董双林 赵文 主编

水产养殖学 水生生物学专业用

中国农业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

养殖水域生态学/董双林, 赵文主编. —北京: 中国农业出版社, 2004. 12
全国高等农业院校教材
ISBN 7-109-09142-2

I. 养... II. ①董...②赵... III. 水产养殖-生态学-高等学校-教材 IV. S917

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 129242 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区农展馆北路 2 号)

(邮政编码 100026)

出版人: 傅玉祥

责任编辑 叶 岚

中国农业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行
2004 年 12 月第 1 版 2004 年 12 月北京第 1 次印刷

开本: 850mm×1168mm 1/16 印张: 21

字数: 502 千字

定价: 29.80 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

内 容 简 介

本书以生态系统生态学为中心，系统阐述了养殖水域生态系统的结构与功能，突出生态学基础知识与水产养殖和水生生物学的密切联系。全书共分3篇11章，着重介绍了生态学基本理论，养殖水域生态系统的类型、能量流动、物质循环、天然生产力和环境保护以及一般的研究方法。

本书可作为高等学校水产养殖学、水生生物学专业教材，也可供水产养殖、环境科学、生态学等专业的科技人员使用。

主 编 董双林 (中国海洋大学)
赵 文 (大连水产学院)

参 编 田相利 (中国海洋大学)
张 玉 (内蒙古农业大学)
鲍传河 (安徽农业大学)
黄鹤忠 (苏州大学)
陆开宏 (宁波大学)

主 审 李德尚 (中国海洋大学)
何志辉 (大连水产学院)

前 言

本书是全国高等农业院校“十五”规划教材，在编写过程中贯彻了“起点高、目标清、内容新、形式活”的原则，体现了“培养具有创新精神、实践能力和创业魄力的高素质人才”的精神，保证和提高水产养殖学专业技术人才的培养目标，重点培养学生的学习能力、实践能力、创新能力和创业魄力，符合由浅入深、由单一到综合、由简单到复杂的认识规律，坚持继承与创新、辩证统一的科学发展观。《养殖水域生态学》是水产养殖专业的一门重要基础课。

本书共分3篇11章。第一篇是生态学基础知识，分4章，分别介绍了个体生态学、种群生态学、群落生态学和生态系统生态学的基本概念和基本原理，主要为学习后续内容奠定一些必备的生态学知识。第二篇是养殖水域生态学，分4章，介绍养殖水域生态系统的类型、主要特征、生态系统的物质循环与能量流动、养殖水域的天然生产力和养殖水域的保护等内容。在系统介绍养殖水域生态学知识的基础上还着力介绍水产养殖活动相关的一些生态学理论知识。第三篇是养殖水域生态学研究方法，分3章，主要介绍养殖水域基础生产力的测定方法、渔产力的研究方法、养殖水域生态系统的结构优化方法等。作为教材，每一章之后都列出了思考题，以帮助读者更好地了解本章的重点和加深理解。总之，本教材内容以养殖水域生态系统的结构和功能为重点，这符合当代生态学以生态系统生态学为核心的总趋势。

本书除了可作为高等学校水产养殖学、水生生物学专业的教材外，还可供水产养殖、水生生物学、环境保护等专业人员学习参考。

本书由董双林教授和赵文教授主编，共有6个高校参编。绪论、第四章由董双林执笔；第一章、第二章、第五章、第六章、第八章由赵文执笔；第九章、第十章、第十一章由田相利执笔；第三章由张玉和赵文执笔。第七章由鲍传河执笔；黄鹤忠编写了第八章的第二节，陆开宏编写了第五章湖泊生态系统部分。

中国海洋大学李德尚教授、大连水产学院何志辉教授在百忙之中对书稿进行了认真、仔细的审阅和修改，并提出很多建设性意见，在此谨向两位德高望重的老前辈致以最诚挚的谢意。

在本书编写过程中，得到各参编单位领导的大力支持；在统稿过程中，大连水产学院研究生徐宪仲同志做了大量校勘、编辑和绘图工作；中国海洋大学王芳博士对编写工作提供了大力支持，在此表示衷心的感谢。

由于我们水平有限，不足之处在所难免，希望广大读者批评指正。

编 者

2004年11月

目 录

前言

绪论	1
复习思考题	9

第一篇 生态学基础知识

第一章 个体生态学	12
第一节 生态因子的分类及其基本作用规律	12
第二节 生态因子的生态作用及其生物适应	16
复习思考题	40
第二章 种群生态学	41
第一节 种群的概念	41
第二节 种群的结构	42
第三节 种群统计	45
第四节 种群中的种内关系	52
第五节 种群增长模型	54
第六节 种群数量变动及其生态对策	63
第七节 种群动态的调节机制	67
复习思考题	71
第三章 群落生态学	73
第一节 群落的基本概念和特征	73
第二节 群落的种间关系	75
第三节 群落的结构	82
复习思考题	95
第四章 生态系统生态学	96
第一节 生态系统生态学的概念和主要研究内容	96
第二节 生态系统的特征	97
第三节 生态系统的类型	104
第四节 生态系统的演化和演替	105
复习思考题	109

第二篇 养殖水域生态学

第五章 水域生态系统的类型和基本特征	112
第一节 水域生态系统特点	112
第二节 海洋生态系统	112
第三节 陆水生态系统	124
复习思考题	146
第六章 养殖水域生态系统的物质循环与能量流动	147
第一节 全球水循环	147
第二节 溶解氧的平衡与预报	148
第三节 主要营养物质的循环与平衡	151
第四节 有机质的循环与平衡	160
第五节 放射性核素及有毒物质循环	166
第六节 养殖水域生态系统的能量流动	169
第七节 粒径谱理论和微生物环	179
复习思考题	187
第七章 养殖水域生态系统的天然生产力	189
第一节 初级生产力	189
第二节 次级生产力	198
第三节 水体鱼产力	202
复习思考题	209
第八章 养殖水域生态系统的保护	211
第一节 水域富营养化	211
第二节 赤潮现象	216
第三节 水域污染	220
第四节 生态环境的全球变化	236
第五节 水域生态系统的生物多样性	242
第六节 渔业资源的管理	253
第七节 水生生物资源的保护	259
第八节 可持续发展	260
第九节 生物入侵	262
第十节 生态恢复	264
复习思考题	270

第三篇 养殖水域生态学的研究方法

第九章 水域基础生产力的测定	272
-----------------------------	-----

第一节 水域初级生产力的测定	272
第二节 次级生产力	280
第三节 细菌的数量和生产力	289
复习思考题	293
第十章 养殖水域鱼产力的研究方法	294
第一节 池塘等小型水体的鱼产力估计	294
第二节 水库、湖泊等大型水体鱼产力的评估	297
复习思考题	309
第十一章 养殖水域生态系统优化结构的研究方法	310
第一节 养殖水域生态系统优化结构研究的基础知识	310
第二节 养殖水域生态系统优化结构研究的主要方法	312
复习思考题	318
主要参考文献	319

绪 论

一、生态学的定义及发展

生态学 (ecology) 是研究生物与其环境之间相互关系的科学。首先使用“ecology”一词的学者是亨利·索瑞 (Henry Thoreau, 1858), 而生态学的定义是由德国的动物学家赫克尔 (Haeckel) 于 1866 年首次提出的, 他给的定义是生态学是研究生物与其有机及无机环境相互关系的科学。从此, 生态学被公认为生物学的一个分支学科。

随着科学技术的进步, 生态学的各个领域都得到了相应的发展, 一些生态学家根据自己所研究的领域和当时生态学的研究进展给生态学进行了新的定义。1909 年植物生态学家 Warming 提出植物生态学是研究影响植物生活的外在因子及其对植物结构、生命延续时间、分布和其他生物关系的影响。1954 年前苏联生态学家 Кацк аров 认为生态学是研究生物的形态、生理和行为上的适应性。1971 年美国生态学家 E.P.Odum 认为, 由于生态学特别注意到生物群体的生物学以及在陆地、海洋和湖泊中的功能过程, 应该把生态学定义为研究生态系统的结构与功能的科学。目前的生态学已不仅注重自然生态过程, 而且开始关注人类生态问题。最近, 国家自然科学基金委员会给生态学的定义为, 研究生物生存条件、生物及其群体与环境相互作用的过程及其规律的科学。其目的是指导人与生物圈 (即自然、资源与环境) 的协调发展。

生态学的发展大致经历了三次飞跃, 即个体生态学 (autecology) 向种群生态学 (population ecology) 的过渡、种群生态学向群落生态学 (community ecology) 的过渡和群落生态学向生态系统生态学 (ecosystem ecology) 的过渡。

生态学的早期发展阶段主要是个体生态学, 是以生理生态学为基础, 主要研究生物个体、物种与环境的相互关系, 生物个体对环境变化的反应和生物特定的形态和生理对环境适应的机制。种群生态学从 20 世纪 30 年代开始就成为生态学中的一个主要领域, 其主要研究种群的数量、分布, 种群与其栖息环境中非生物因素和其他生物种群的相互作用等。在种群层次上, 多度及其波动的决定因素、种群在空间上的分布格局是生态学家最感兴趣的问题。20 世纪 60 年代以前, 动物生态学的研究主流是种群生态学。

群落是栖息在同一地域的动物、植物和微生物组成的复合体。群落的研究始于 19 世纪, 到 20 世纪 70 年代出现了大量的定量分析 (如排序) 和模型模拟的研究工作。群落生态学是以生物群落为研究对象, 主要研究聚集在一定空间范围内的不同种生物与生物、生物个体之间的关系, 分析生物群落的组成、特征、结构、机能、分布、演替及群落的分类、排序等。多数生态学家目前感兴趣的是决定群落组成和结构的过程、群落的多样性与稳定性的关系等问题。

到 20 世纪 60 年代生态学研究发生了质的飞跃, 开始了以生态系统为中心的生态学研究, 开创了生态学研究的新时期。这一时期生态学与环境系统及生产应用相结合形成了海洋生态学、湖

泊生态学、草原生态学、森林生态学、土壤生态学、农业生态学、渔业生态学等分支。生态系统生态学是以生态系统为研究对象，主要研究生态系统的结构和功能、发展与演替，以及人为影响与调控机制等。系统生态学时期的研究特点是系统、综合、交叉和应用。20世纪60~80年代，国际上相继开展了《国际生物学计划》(IBP)、《人与生物圈计划》(MAB)和《国际地圈——生物圈计划》(IGBP)等全球性的合作研究项目。自20世纪90年代，生态学开始关注经济增长与环境保护的矛盾，寻求经济发展与环境保护的协调发展，标志着全球谋求可持续发展的新时代已经开始。德国生态学家H.Lieth(1992)将生态学概括为“人类生存的科学”，集中研究的问题包括：全球变化、生物多样性和可持续生态系统。

二、生态学的分支学科

生态学自产生起发展就极为迅速，同时由于与其他学科的渗透和新理论、新方法的引入、产生，使得众多分支学科不断派生出来。按照不同的划分方法其分支学科可划分为：

1. 按研究对象的组织层次划分 个体生态学、种群生态学、群落生态学、生态系统生态学、景观生态学等。
2. 按研究对象的生物分类划分 动物生态学、植物生态学、微生物生态学、人类生态学等。
3. 按群落栖息地划分 淡水生态学、海洋生态学、湿地生态学、草原生态学、森林生态学等。
4. 按交叉的学科划分 数学生态学、化学生态学、生理生态学、遗传生态学、经济生态学等。
5. 按照应用类型划分 污染生态学、渔业生态学、工业生态学、农业生态学、城市生态学、航天生态学、资源生态学等。
6. 按人类对生态系统的影响程度划分 自然生态系统、半自然生态系统和人工生态系统。
7. 按照其研究方法可划分 野外生态学、实验生态学和理论(数学)生态学。从生态学发展的历史来讲，野外的研究是基础，是第一性的；实验研究是分析因果关系的一种有用的补充手段，使研究结果具有可重复性；理论(数学)研究可用数学语言对生态现象进行高度抽象，并能对生态现象实施定量预测。

三、生态学的研究方法

生态学研究或实验方法有多种分类方法。Wilm(1952)将研究分为观察研究(observational studies)、受控的测定性研究(controlled experience studies)和受控实验(controlled experiments)三种类型；Hurlbert(1984)将实验分为测定性研究(mensurative experiments)和操纵性实验(manipulative experiments)两类。

理论生态学主要利用数学模型进行模拟研究，这里就不再介绍，感兴趣的读者请参阅有关著作。下面我们将生态学研究方法划分为观察性研究、测定性研究和受控性实验三类，并加以简要说明。

1. **观察性研究** 观察性研究主要用于野外种群研究。调查中常需要计数、测量所采集的样本,分析种群的数量分布、季节变化等。这种观察可能是随机的或系统的,采样限于一个地方和一次或一系列的地方和多次。观察经常依照一定的次序,采样的时间和地点主要依据过去的观察和经验确定。这种研究可以获得有意义的关于生态学时空分布的资料。

观察性研究在设计、实施、资料分析和解释中存在很大程度的主观性。为减少主观影响,该类研究更需很好地计划、仔细地实施和客观地评估。

2. **测定性研究** 测定性研究仅测定、测量所研究空间和时间上的一个或几个点,空间或时间是实验的“变量”或“处理”,对其也可进行显著性检验。该类实验一般不涉及外在因子对实验单元的影响,如果有的话则该“处理”间也是均一的。

例子:枫叶在湖泊 1m 和 10m 深处的分解速率比较。

我们想研究枫叶在湖泊 1m 和 10m 深处的分解速率是否有所不同。为此制作了 16 个小尼龙网袋,并在每一袋内放已知重量的枫叶,并将 8 个尼龙袋放在 1m 深处,另取 8 个袋子放在 10m 深处。一个月后取出,测定有机质损失率,并用统计学方法检验两处的分解速率的差异。本程序如期进行。

这样一个简单的研究之所以也可称其为“实验”,是因为这个研究程序有些“复杂”,通常干预或扰动了该系统。尽管我们采用了 2 个深度(或“处理”)和一个显著性检验,但我们仍然没有实施一个真正的受控实验,我们仅测定了该系统两点的特点和两者是否有实质性差异(处理效果)。

3. **受控实验** 受控实验是对自然的或所选的一组客体的自然条件、过程、关系的有意识操纵或施以两个或多个处理。测定性研究由一个处理组成(如上例),受控实验总包含 2 个或更多处理,并采用 1 个或多个对照。受控实验的标志性性质是不同的实验单元进行不同的处理,实验单元靠随机的方式指派。上例的实验单元不是枫树叶袋,准确地讲,枫树叶袋仅是测定装置,而 8 个物理性地点才是实验单元。实验单元或实验小区是实验材料的单元,材料是实验工作者施加处理的对象。所谓处理是指一种方法和步骤,它的效应是要度量的,并要与其他处理作比较。

受控实验有 4 个重要的性质或要素,即对照、重复、随机和散置。有些书中将对照、重复、随机视为实验设计的三要素,对于生态学实验,特别是大型现场实验,有时由于受多种条件限制,实验单元不可能很多,这时散置原则(即相同的处理不应聚集在一起)就显得十分必要。散置是随机原则的结果或在实验单元较少时的必要补充,因为随机方法在实验单元较少时常易出现相同处理聚集现象。有关详细内容可参见 Hurlbert (1984) 的论文。

四、养殖水域生态学

水域生态学或水生生物学是生态学的主要分支学科之一,是研究水体中生物与其生存环境之间相互作用关系的科学。本课程仅涉及与水产养殖密切相关水域的生态学,主要研究这些水域生态系统的结构与功能、养殖容量、生产力、人类生产和生活活动与水产养殖生产的相互作用等。需要指出的是,随着科学技术的发展和人们认识自然的深入和改造自然能力的提高,人们进行养殖生产活动的水域范围不断扩大,过去的一些非养殖水域现在已开始在其中进行养殖生产。同

样,现在一些认为不宜进行养殖生产的水域不久的将来也可能就成为养殖水域。例如,大型抗风浪网箱、养殖工船的应用已使海水养殖生产活动向海洋离岸水域推进了一大步。同时,可以预见,随着养殖品种的不断扩大大、养殖产品用途的不断拓展、价值的不断提升(如药用等),养殖水域的范围也还会大大拓展。

水域生态学是养殖水域生态学的基础。早在生态学还未作为一门学科正式建立起来的18世纪,许多动物学家和植物学家就已开始从事水生生物的分类与生活史研究。到了19世纪,随着工业革命的进程,一些渔业发达水域的渔业资源出现衰退的迹象,水域的污染也在局部水域初现端倪。为了合理的组织捕捞,人们开始研究鱼类的生殖、生长、发育、洄游、营养等问题。为了防止和解决污染问题,人们也开始应用水生生物的某些种类及其数量作为污染程度的指标,并采用生物学方法加速水的净化过程。进入20世纪后,水域生态学像其他生态学分支学科一样开始将研究的重点集中在种群、群落和系统生态学方面。水域生态学分支长期以来作为领头学科在引领生态学发展中起到了重要作用。Lindeman(1942)的水生生物营养动力学(trophodynamics)理论促进了生态系统定量研究的发展,目前人们关注的全球变化、生物多样性和可持续生态系统的研究等重大问题都与水域(海洋、淡水)生态系统密切相关。

水域生态学与养殖水域生态学并没有本质的区别,只是后者更关注水域生态系统中与渔业活动相关的生态学特征和过程,以及人类干预后发生的生态学过程。

我国是世界上开展水产养殖最早的国家,大约在3100多年前的殷朝就开始了池塘养鱼。至战国时代,养鱼已具有一定的规模,养殖技术也有很大提高。唐代出现了鱼类混养和稻田养鱼这些朴素的生态渔业方式(雷慧僧等,1981)。而生态学的出现则是近代的事情,如果以1866年德国动物学家E. Haeckel给出生态学的定义作为生态学形成的标志,其发展则仅有100多年的历史,但得益于西方工业革命的驱动,其发展速度十分迅猛。20世纪后半叶,出现了水产养殖与水域生态学的交叉,人们开始用生态学原理解释、总结我国传统鱼类养殖的实践活动,其代表作就是《中国淡水鱼类养殖学》(中国淡水养鱼经验总结委员会,1973)。与此同时以生态学原理指导水产养殖科学研究和实践的工作思路盛行起来。我国20世纪70~90年代中国科学院水生生物研究所开展的以初级生产力指导湖泊和水库放养和对渔业水域生态学的研究(王冀、梁彦龄,1981;刘建康,1990;刘建康,1995;梁彦龄、刘伙泉,1995)等都是这方面的经典之作。20世纪下半叶国际上在养殖水域生态学方面也做了大量的研究工作,如在水产养殖系统中腐屑和微生物生态学(Moriarty和Pullin,1987)、白鲢的食物问题(何志辉,1977,1987)、罗非鱼生物学(Pullin,1988)、养殖池塘水质管理(Boyd,1990)、水产养殖对环境的影响(Pillay,1992;董双林等,2000)等方面的研究深入而且系统。经过约半个世纪的发展,养殖水域生态学已逐步形成了自身具有鲜明特色的理论体系。一些教科书也纷纷问世(刘建康等,1999;何志辉,2000;何志辉和赵文,2001)。

养殖水域生态学除研究水体中生物与其生存环境之间相互作用关系这些水域生态学关注的一般性问题外,更注重下列一些领域的问题:

1. 养殖生物的个体生态学 主要涉及养殖动、植物各发育阶段最适的环境条件和养殖生物对环境变化的响应。其目标是为养殖管理技术的提高提供理论依据。该领域涉及内容广泛、学科交叉内容较多,养殖动物的生态学、生理生态学、植物的营养吸收动力学等都属此研究范畴。

2. **养殖水域环境的管理** 主要涉及养殖水体水质的调控原理。其目标是提供满足养殖生物最适生长的条件,提高养殖生物的生长率、成活率,提高养殖系统物质在循环过程中的有效积累。

3. **养殖水域系统生态学** 主要涉及养殖水域生态系统的结构和功能,如养殖结构优化原理、综合养殖系统中养殖生物间的互利机制、养殖系统功能参数(如生态学效率、生产力、负荷力等)的测定、调控等。这是水产养殖学与系统生态学的交叉内容,其目标是构建、维持高效、健全的养殖生态系统。

4. **养殖生产活动与养殖水域环境的相互作用** 对于海水养殖而言,主要研究养殖活动对近海生态环境的影响和近海环境因子及人类其他活动对养殖生产的影响。这是养殖生态学与环境科学的交叉内容,其目标是为海岸带的综合管理、合理利用和维护国家近海生态安全提供理论依据。

五、养殖水域生态学关注的热点问题

(一) 养殖水域自养型养殖系统与异养型养殖系统的平衡

国际上公认的比较成功的海水养殖产业可数在发达国家兴起的鲑鳟鱼类网箱养殖业和发展中国家兴起的对虾养殖业。以 Naylor 为首的美国、英国、瑞典和菲律宾等国的十位著名科学家联名在《SCIENCE》和《NATURE》杂志上撰文严厉地指出了这两个产业存在的问题:第一,低效率地以消耗大量的鱼粉等高蛋白商品、高价值原料为代价来维持高的鱼、虾生产量;第二,养殖过程中大量排出的营养物质和化学物质造成了沿岸的污染,在一定程度上干扰了沿岸生态系统的结构和功能。因此,这样的发展模式无助于解决人类的食物供应,而且有损于海洋生态环境。

Naylor 等人的分析是一针见血的,是客观的,但是,我们也不应该忽略某些水产养殖方式在延缓水体富营养化方面的贡献,如海藻养殖。我们可以从能量来源的角度将海水养殖系统分为自养型和异养型两类。两者是互补的系统,前者以太阳辐射能为驱动能源,利用水中的营养物(无机盐、浮游生物)生产产品(如海带养殖),它们的生产过程会减少水体的营养负荷,延缓水体富营养化过程;后者则主要以人工饲料为主要能量来源(如对虾和鲑鱼网箱养殖),养殖过程中向临近水域排放大量污染物质,加速了沿岸海域的富营养化过程。根据海洋的特点和各种海水养殖系统的特性,将滩涂和沿岸视为一体,将整个海湾或养殖水域视为一体,采用自养型养殖系统与异养型养殖系统的合理配合,就可减小水产养殖对海洋环境造成的负面影响。研究、确定两类养殖系统平衡关系是养殖水域生态学的重要课题。

(二) 滤食性贝类筏式养殖对近岸生态环境的影响

世界上很多地区都进行了大规模的贻贝或扇贝养殖,这些养殖会对环境产生双重影响。因此,有些学者认为其可减少水体的营养负荷、在一定程度上阻断局部 N 循环、延缓水域的富营养化。但是,也有些学者报道大规模养殖贻贝会加速物质循环、刺激初级生产、增加水体的浑浊度、造成养殖水域自身污染。

贝类养殖对环境影响的性质、程度与养殖种类、密度、养殖区形态和水文状况等有关。从宏观(既考虑养殖水域也考虑临近维持水域)上讲,海上贝类养殖过程放养小个体,收获大个体,

这种养殖是一个物质输出大于输入的活动，总体上减小了营养负荷。从养殖水域局部来看，滤食性贝类养殖像一排排有机颗粒“过滤器”，被过滤到的食粒一部分用于贝类的生长，一部分主要以氨的形式排泄到水中，更有相当的部分以生物性沉积的形式累积在养殖区下部。由于流出养殖区的水中携带的物质少于输入养殖区水中的物质，因而在养殖区物质和能量出现了聚集，产生了一个汇或称漏斗（sink），这就导致了养殖水域局部的自身污染。

滤食性贝类筏式养殖的双重性，就像一把双刃剑，用好了其可改善大环境质量；相反，其可造成水质恶化，影响养殖生产。贝藻间养理论上是一种有效地消除其弊端的方法，但定量化的研究亟待开展。

（三）集约化养殖与世界食物供应

世界水产业两个重要的发展趋势是，捕捞的鱼类营养层次越来越低，养殖的鱼类营养层次越来越高。近些年世界捕捞业由于资源的制约其上岸量一直在8 500万~9 500万 t之间波动，但是所捕捞的鱼类已悄然从高品位的肉食性鱼类向个体较小、营养层次较低的低品位鱼类转变。1989—1998年的10年间，世界鱼类养殖产量增加了45%，即从649万 t增加到943万 t。然而，随着水产养殖集约化养殖程度越来越高、养殖高营养层次的动物越来越多，单位养殖水产品消耗的商品饲料，特别是鱼粉量越来越多。根据1997年的渔业资料统计，世界捕捞的渔获物中有约1/3被制成鱼粉，其中有约1/2的鱼粉被加工成了养殖鱼、虾等的饲料（图0-1）。1997年世界水产养殖的鱼、虾、贝等的产量为2 900万 t，还有800万 t的海藻产量，但是其消耗了1 000万 t来自鱼粉的捕捞产量，因此水产养殖对人类食物供应的净贡献应该至少有1/3的折扣。

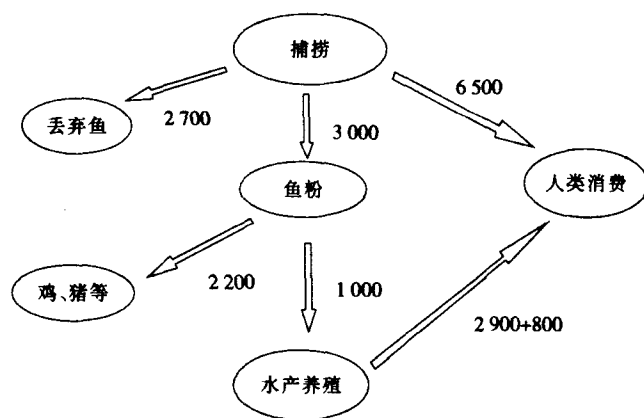


图 0-1 1997 年世界渔业的格局 (万 t)

随着捕捞渔获物中低品位、小规格鱼类的增加，其用于制作鱼粉的量可能也会增加，随着养殖种类营养层次的提高，消耗的鱼粉和鱼油量也会增加，这样的怪圈将使水产业对人类食物的供应量越来越少。因此，增加水产业对人类食物贡献的问题已成为渔业资源学和生态学共同面临的重大研究课题。仅从增大水产养殖对人类食物贡献的角度讲，水产养殖应该注意扩大低营养层次动物的养殖、减少饲料中鱼粉和鱼油的用量、发展对天然饵料利用率高的综合养殖。为做好这些工作，有大量的基础理论和关键技术需要研究。

(四) 海水养殖与近海环境的相互作用

1. 海洋污染对水产养殖的影响 进行海水养殖的水域本身具有一定生物的、化学的和物理的自净能力,但当排污量超过这一能力时水体就可能出现污染现象。对近海生态系统和海水养殖影响较大的污染物有生活污水、化肥、杀虫剂、石油、重金属,还可包括有害藻华等。

(1) 有机物、营养物。近海水域中相当一部分营养物质来自城镇、工业和农业活动。在墨西哥,近岸水域的氮和磷负荷分别有 74% 和 68% 来自农业。瑞典近岸水域的氮和磷负荷则分别有 40% 和 25% (不计大气沉降部分) 来自农业。显然,发展中国家农业来源的营养物质所占比例较发达国家的要大。大气沉降的氮主要来自汽车尾气等,其在近海氮来源中十分重要。在发达国家的夏季,大气氮输入量与河流氮的输入量属同一数量级,但这方面可参考的资料甚少。人类活动造成的营养物积累可加速水域的富营养化进程,对海水养殖产生影响。人类活动带来的氮输入增加可刺激藻类过度生长,浮游植物小型化,食物网向微生物食物环主导的系统演变,上述这些变化都不利于贝类的养殖生产。水质恶化带来的另一严重问题是暴发性疾病的频繁发生。

(2) 有害水华。海洋微藻是滤食性贝类以及一些经济鱼、虾和蟹幼体的重要饵料,因此,一般情况下浮游藻类的大量繁殖(又称水华)对海水养殖和捕捞业是有利的。但在某些情况下,水华有危害作用,造成海水养殖、捕捞业的经济损失,甚至对人体健康产生影响,这时的水华又称赤潮、有害水华或有害赤潮等。时常产生水华的微藻约有 300 种,但仅有 40 种左右可产生烈性毒素,并通过贝类或鱼类影响人体健康。有害水华一般通过三种途径影响海水养殖或人体健康,即大量消耗水体的溶解氧气、产生毒素和损伤鱼鳃。20 世纪 90 年代仅我国就年均发生有害赤潮 23 次,严重危害海水养殖业和渔业资源。仅 1998 年发生在渤海的一次大规模有害赤潮就造成直接经济损失约 5 亿元。

(3) 石油。人类的许多生产活动特别是采油平台、炼油厂以及油轮事故将大量的油污排入近海。这些油污有的吸附在沉积物的表面、有的溶解或分散在水中、有的浮在水面,它们对海洋生态系统的影响途径和程度也有所不同。最近的调查表明,如果沉积物中油的浓度超过 10mg/kg 沉积物干重就会对海洋生物产生明显的影响,如敏感种的数量减少、机会种增加、生物多样性下降。如果浓度超过 100mg/kg 就会出现中度甚至严重污染。

(4) 重金属等。另外,重金属、残留农药以及有机锡(TBT)污染也对海水养殖造成一定的危害,很多物质对海洋生物不仅有直接的危害还可沿食物链积累。世界很多养殖水域的重金属、残留农药含量超标,有些地区养殖生物体内残留量也超过了卫生标准,对人类健康构成威胁。

2. 水产养殖对近岸生态环境的影响

(1) 营养物的排放。据报道,1987 年芬兰的海水养殖向沿岸排放了 952t 氮和 14t 磷,占芬兰同期向沿岸排放氮和磷量的 2% 和 4%。挪威海水养殖排放氮和磷占其排放总量的 8% 和 14%。1996 年墨西哥对虾养殖产量为 13 764t,养虾过程中氮和磷排放量占人类活动向海洋总排放氮和磷量的 1.5% 和 0.9%。与其他人类活动向海洋的排污量相比,目前海水养殖的排污量虽然并不算大,但有时在局部地区的影响却很大,例如,挪威一些海湾海水养殖的营养物排放量占总排放量的 40%,这些排放的营养物和有机物可对沿岸生态环境产生明显的影响。

(2) 化学药物。现在海水养殖中使用多种化学药物,主要用于治病、清除敌害生物、消毒和抑制污损生物。仅 1987 年一年挪威的水产养殖业就使用了 48.5t 的抗生素类药物,现在情况大

有好转。我国虽未见报道具体数量，但估计化学药物使用量会相当惊人。Gowen (1992) 发现在 5 个养鱼网箱的下面，底泥的四环素残留量为 $2.0\sim 6.3\mu\text{g/g}$ ，并可持续达 7 个月。海水养殖中使用的治疗药物、消毒剂和防腐剂已成为直接影响海洋环境的重要因子。

(3) 养殖鱼类的逃逸。20 世纪 90 年代环北大西洋国家养殖大西洋鲑的产量已超过 $40\times 10^4\text{t}$ ，养殖鱼类的逃逸对野生种群的潜在影响已引起这些国家的重视。据报道，在挪威沿海 1989—1996 年捕获的大西洋鲑中有 34%~54% 是养殖逃逸的鲑鱼，在峡湾捕获鲑鱼中养殖逃逸的鱼占 10%~21%。苏格兰、北爱尔兰、加拿大和美国在野生种群中也检出养殖逃逸的鲑鱼。1994 年芬迪 (Fundy) 湾 (加拿大) 逃逸的大西洋鲑估计为 2 万~4 万尾，这一数量大于同年该海湾野生鲑鱼自然回归的数量。海水养殖逃逸的鱼类可能在疾病的传播、野生群体遗传组成的改变等方面产生副作用。在亚洲，当养殖的幼虾发生流行病时，很多养殖场的做法是连虾带水一同排入海中了之，这也可能会给野生种群带来危害。

(4) 红树林的破坏。红树林是热带、亚热带沿海地区重要的湿地景观，是国际上生物多样性保护等关注的热点之一，但由于受养虾业的高额利润驱使，大面积的红树林湿地被改造成了养虾池塘，特别是菲律宾、泰国和厄瓜多尔更甚。菲律宾有约 50% 的红树林已被改造成养半咸水鱼和养虾池。红树林是很多重要的经济鱼类、甲壳类和贝类的产卵和索饵场所，另外红树林地区是营养物的汇，陆地上排来的营养在此处积聚、消解、过滤。丧失了红树林就会丧失由它维持的捕捞产量，并使污染物积累、土壤酸化。

鉴于一些水产养殖方式对水域环境造成很大的破坏，Naylor 等学者建议世贸组织 (WTO) 在世界贸易中制定新的规则，即不仅要看水产养殖品的品质，还要关注它们生产过程的负面影响，对于妨碍环境可持续性的产品要严加限制。

我国水产养殖产量居世界第一，为国民经济建设和改善人民生活水平做出了重要贡献。但很多地区由于受局部、暂时的利益驱使和对养殖与环境关系研究的薄弱，使得近十几年来一些地区的海水养殖业的发展带有很大的盲目性、破坏性，自身的生存正受到威胁。对虾病害流行、个别海域网箱养鱼自身污染严重、造成严重的经济损失就是例证。加强养殖与环境关系的研究，使海水养殖业尽快步入可持续发展的轨道势在必行。

海水养殖与近岸环境的相互作用是多学科交叉研究的问题，应该成为我国水产科学 21 世纪初研究的重点。越来越多的国家认识到良好的沿岸生态环境是支撑海水养殖业可持续发展的前提，海水养殖业的未来发展也应该与维护国家生态安全、国家食品安全的目标相一致。

(五) 走向统一的大系统

自然生态系统的结构和功能可用能量的贮存、转换效率等表达，而水产养殖系统是人工干预下形成的半人工生态系统或生态经济系统，仅用传统的能量单位很难准确表达其功能和特征。著名生态学家 H. T. Odum 提出了一个新的科学概念——能值 (emergy)，用以统一定量研究生态系统和生态经济系统的功能和特征。能值的概念与能量不同，其是指某一类别的能量包含的另一类别能量的数量。任何资源、产品形成过程中直接或间接利用的各种能量的总量，即为其所具有的能值。因为各种能量均始于太阳能，因此实际应用时通常以太阳能值 (solar emergy) 度量各种不同类别能量的能值，单位为太阳能焦耳 (solar emjoules, 缩写为 sej)，也称能元。形成每单位某种能量所需要的另一种能量的量称为能值转换率，单位为太阳能焦耳/焦耳 (或克)。