

受损水域生态系统恢复与重建研究*

许木启 黄玉瑶

(中国科学院动物研究所 北京 100080)

摘要 生态系统受到人为因素干扰和损害的后果已成为目前全球面临的日益突出的重大问题和人类社会共同关注的焦点,因而受损害生态系统的恢复与重建理论研究与技术应用愈加受到人们的重视。生态学理论在恢复与重建工作中应该而且可以发挥重要作用并且在实践过程中将得到检验和进一步发展。

介绍恢复生态学的定义,阐述恢复生态学研究的层次、对象与目标,强调了开展恢复生态学的研究能够加强和促进相关新兴学科、边缘和交叉学科的联系、渗透和发展。对国内外在受损害水域生态系统恢复与重建的研究概况和发展趋势进行了综述和展望。同时重点分析和讨论了我国内陆水体环境质量现状及其主要影响因素。在此基础上,根据我国的具体国情和内陆水体的环境特点,提出了开展受损害水域生态系统恢复与重建工作的基本指导思想和原则、研究内容与方法、技术策略与途径等措施和建议。

关键词: 水生生态系统, 损害, 生态恢复。

RESTORATION AND REESTABLISHMENT OF THE
DAMAGED ECOSYSTEM OF INLAND WATERS

Xu Muqi Huang Yuyao

(Institute of Zoology, Academic Sinica, Beijing, 100080, China)

Abstract Damage of natural environment due to anthropogenic effects and its consequence are increasingly becoming outstanding problems in the world. Rehabilitation and restoration of the damaged ecosystem have received much attention of human society at present. Restoration ecology represents an emerging synthesis of ecological theories and allows for the testing of ecological theories.

This paper gives a definition of restoration ecology, introduces its contents and objectives of research. It summarizes the investigations on ecological restoration of aquatic ecosystem and looks into the prospects for the developing trend of restoration ecology. Also it makes focal points to discuss the current situation and mainly affecting factors of the inland waters in China.

On the basis of the characteristics of inland waters and the conditions of China, several key objects of study and comprehensively technical approaches have been put forward to reestablish and restore the damaged aquatic ecosystem.

* 中国科学院“九五”重点资助项目(kz952-s1-110)。

收稿日期:1996-08-24,修改稿收到日期:1997-05-20。

Key words: aquatic ecosystem, damage, ecological restoration.

生态系统的相对稳定是人类赖以生存与发展的必要条件。维护与保持生态平衡,促进生态系统的良性循环和健康发展,是关系到人类前途和命运的重大课题。

自然生态系统是在长期的历史发展中形成的。组成一个生态系统的生命系统和非生命系统的各种因素之间是相互协调的,从而形成一个完整的生态单元。从外部加进或减少其中某一重要环节,使物质和能量的输入与输出发生改变,或超出它本身的自动调节能力,就可能使生态系统的微妙精巧平衡遭到破坏而引起严重的后果。

本世纪以来,特别是近 20a 来,随着科技的进步和社会生产力的提高,人类创造了前所未有的物质财富,加速推进了文明发展的进程。于此同时,人类正以前所未有的规模和强度影响环境,损害和改变自然生态系统,使全球生命支持系统的持续性受到严重的威胁。这主要体现在人们在寻求发展经济和开发享用自然资源的同时,采取短视行为,忽视了生态系统的支撑能力,一方面对有限的自然资源进行掠夺性的开采,另一方面又将生产过程的副产品(污染物)大量排放到自然环境中,使许多原本健康或一些本来就十分脆弱的生态系统急剧退化和受损,其中包括江河湖海污染严重、土地荒漠化、水土流失、森林面积减少、植被破坏、生物多样性丧失等等一系列生态灾难(ecological disaster),致使自然生态系统的健康或它的完整性(integrity)受到越来越大的损害。因此,恢复和重建受损害的生态系统是摆在全社会面前的紧迫任务,同时也给生态学理论的实践和发展提出了新的挑战。在这种背景条件下,80 年代发展起来的恢复生态学(restoration ecology)丰富了现代生态学的研究内容并且注入了新的活力^[1~4]。一方面,生态恢复(ecological restoration)研究为识别生态学概念的发展提供了强有力的工具,另一方面,恢复生态学为建立理论和应用生态学新的领域提供了机会^[1,2,5,6]。开展生态恢复工作不仅为解决目前日益严重的生态系统退化受损问题所需要,而且也是从事生态学基础研究的一项关键技术并且是最终检验生态学理论的终极检验(ultimate test)和酸性检验(acid test)^[7,8]。

Cairns 等将生态恢复的概念定义为:恢复被损害生态系统到接近于它受干扰前的自然状况的管理与操作过程,即重建该系统干扰前的结构与功能及有关的物理、化学和生物学特征^[4,9~11]。生态恢复概念的形成和提出,有着应用生态学背景,因此,恢复生态学既是理论科学又是应用科学。在一定意义上它又是一门生态工程学(ecological engineering)或者生物技术学(biotechnology),还有的学者根据这一学科的特点,称之为“综合生态学”(synthetic ecology)或者生态综合(ecological synthesis),这是因为它的研究对象是那些在自然灾害和人类活动干扰压力条件下受到破坏的自然生态系统的恢复和重建问题,其恢复和重建过程是由人工设计控制的,在生态系统层次上进行的十分复杂的综合过程^[1~4,12,13]。因此,生态恢复的研究和实践不仅能推动传统生态学(个体生态学、种群生态学和群落生态学等)和现代生态学(景观生态学、保护生态学和生态系统生态学等)的深入和创新,而且能加强和促进边缘和交叉学科(生物学、环境科学、潮沼学、地理学、地质学、工程学、经济学、管理学等)的联系渗透和发展^[4,5,7,8,13]。

淡水生态系统由江河、湖泊、湿地、水库、池塘等内陆特定水域组成。有许多学者将淡水生态系统与陆地生态系统和海洋生态系统并列为地球上的三大生态系统。作为生物圈的一个重要环节,淡水生态系统在连接陆地和海洋生态系统,进行物质循环和能量流动及调节全球气候中发挥着特殊作用。淡水资源是人类生存的基本要素。内陆水体不仅是人类生活与生产用水的主要来源,而且在渔业、航运、水利灌溉、发电、旅游和净化污染物质等方面给人类带来诸多利益。

目前全世界的水域生态系统正在受到严重地改变和损害,这种变化和破坏的程度显然大于历史上任何时期,而且受到损害的速率远远大于其自身的及人工的修复速率^[3]。水生环境的破坏必然会导致水生资源的损耗。这种破坏和损耗主要是由于人们对水生资源的管理和利用缺乏科学的认识而进行的随意开采和人为毁坏造成的。因此,延缓以至阻止水域生态系统受损进程,保持淡水资源持续健康发展已成为当今社会关注的焦点。在这方面,恢复生态学应该而且可以发挥重要的作用。假如没有对水域生态系统的恢复和重建计划充满激情并采取积极有效的行动,那么膨胀的人口及对水生环境不断产生的压力将来肯定会

降低人类目前和下一代的生活质量。为此,本文对国内外受损水域生态系统的恢复与重建工作进展及任务作一简要的叙述和讨论。

1 国内外研究概况与发展趋势

本世纪 60 年代以来,减缓和防止自然生态系统的退化萎缩,恢复重建受到损害的生态系统,越来越受到国际社会的广泛关注和重视。联合国科教文组织“人与生物圈计划(MAB)”的中心议题与宗旨,就是运用生态学的方法,研究人与环境的相互关系,特别是人类活动对生态系统的影响,以及在人类影响下资源的管理、利用与恢复^[14~16]。

早在 1975 年 3 月,在美国弗吉尼亚工学院(Virginia Polytechnic Institute and State University)召开了首次题为“受损生态系统的恢复”的国际会议。与会专家们专门讨论了受损生态系统的恢复和重建的许多重要的生态学问题,深入探讨了生态恢复过程中的原理、概念和特征,提出了对加速生态系统恢复和重建的初步设想、规划和展望^[17]。

近十多年来,恢复生态学引起日益广泛重视并得到迅速发展。1984 年 10 月在美国麦迪逊举行的恢复生态学学术研讨会上,来自美国和加拿大的 300 位生态学家向会议提供了 14 篇有关生态恢复的正式报告。1989 年 9 月在意大利 Siena 举行的第 5 次欧洲生态学研讨会上把生态系统的恢复作为本次会议讨论的主要议题之一。1994 年 8 月在英国曼彻斯特举行的“第六届国际生态学大会”上,代表们就包括恢复生态在内的 15 类现代生态学议题进行了广泛的学术交流。根据三大生态学期刊:Ecology, Oecologia, Oikos 在 1987~1991 年期间发表的论文中概念出现的频率和英国生态学会对会员的调查对生态学概念受重视的程度排序来分析,生态恢复被排列为最受重视的生态学概念之一^[18~20]。Lubchenko 等^[21]1991 年提出加速恢复生态学的研究作为当代十大生态学研究课题。美国生态学会的《持续生物圈倡议:一项生态学研究议程》和国际生态协会的《持续的生物圈:全球紧迫号令》以及 1992 年 6 月在巴西里约热内卢召开的联合国环境与发展会议通过的《21 世纪议程》,其核心内容和思想是旨在评价、减少、阻止、保护和修复全球生态系统的退化和损害,生境的改变、破碎和毁坏,促进自然资源的合理利用和可持续发展^[21~23]。

在水域环境保护特别在受损水域生态系统的恢复和重建方面,美国政府及有关部门引起了足够的重视,给予了极大的支持,做出了巨大的努力,取得了明显的效果。美国研究受损害湖泊的恢复计划主要是由联邦政府环境保护局 EPA 的 Clean Lake Program (CLP) 组织实施。从 1975 年开始,通过国会拨款支持 CLP 实行全国性的湖泊清洁计划,要求所有的点源污染都要按照 1972 年公布的清洁水法进行处理以控制污水的排放。从 1975 年到 1978 年,联邦政府拨款 3500 万美元作为支持湖泊恢复的研究工作和技术发展,包括湖泊营养状况分类研究,恢复计划实施的可行性研究及恢复项目实施的反应评价等。在 1976~1980 年财政年度里,6000 多万美元用在了湖泊分类和恢复项目的实施上。在 1981~1985 年的财政年度里,国会又增加了 3300 万美元的拨款作为 EPA 湖泊恢复计划的预算。从 1975 年至 1985 年 10a 间,CLP 的 313 个研究项目(分布在 47 个州)得到政府资助。1991 年美国国会再次为 CLP 拨款 800 万美元作为少数几个湖泊恢复计划的启动和维持经费^[24]。此外,生态恢复已成为国家努力的一个完整部分,政府其他各部门也为水域生态系统的恢复积极努力,相互配合。1988 年初,水科学和技术部(WSTB)讨论了这种可能性,即由国家研究委员会(NRC)汇编有关在水域生态系统恢复方面科学和技术方面的文献,这些综述性报告既包括成功的经验,也介绍失败的教训。1988 年夏,WSTB 组织了一个计划会议,讨论了国家研究委员会所进行的水域生态系统恢复的研究是否适宜,会议肯定了该委员会提供的项目评价和技术报告的积极意义。1989 年 NRC 委托隶属于水科学技术部的水域生态系统恢复委员会(CRAE)开展水域生态系统恢复情况和形势的总体评价,其中包括科学的、技术的、政策的和规章制度等诸多方面。水域生态系统恢复委员会由湖泊学、地质地理学、水生生物学、生态学、环境工程学、水化学、环境法律和政策、农业经济及土地利用计划等方面的专家组成。该委员会的主要任务为:①发展科学的、有用的恢复生态学定义;②选择制定恢复项目研究的标准;③评估恢复行动尝试的科学基础,项目执行情况,技术的应用、项目目标完成的程度;④验证成功恢复项目的共同因素,为今后的恢复努力提供标准和模式;⑤对各系统的信息和资料加以深入理解和总结,为必要的规章和政策做出总体的建议。这个委员会实施计划包括解决点源和非点源污染问题,阻止野生种

群和群落多样性的下降,恢复各种类型的生境其中优先恢复那些濒危种类的生境。计划实施的最终目标是保护和恢复河流、湖泊和湿地生态系统中物理、化学和生物的完整性,以改善和促进结构与功能的正常运转。在这种基础和背景下,国家研究委员会、环保局、农业部和水域生态系统恢复委员会分别于1990年和1991年提出了庞大的生态恢复计划,在2010年前恢复受损河流64万km,湖泊67万hm²,湿地400万hm²。联邦政府为密西西比河上游生态恢复拨出专项经费2亿美元(1986~1998年),在所安排的几百个生境建设和资源管理监测项目中,1990年已完成5个,35个正在进行当中,54个正在规划。虽然判断其整个恢复计划是否成功尚为时过早,但对于延缓和补救河流和盆地内某些生境的衰退发挥了重要作用。此外,由于河流生态恢复计划的实施,伊利诺伊(Illinois River)和Willamette River等河流的水质有了很大改善,曾经消失的鱼类又重新回到河中。在与湖泊相连接的湿地恢复研究方面,目前主要采取流域控制和湖内行动(in-lake action)相结合的途径。在这些过程中,许多恢复技术如废水处理、点源控制、土地处理、湿地处理、光化学处理、沉积物抽取与氧化、湖岸植被种植、生物操纵(biomanipulation)、生物控制及生物收获等技术被应用并已取得显著效果。Shapiro总结了美国24个湖泊应用生物操纵的成果,表明该项技术在改善湖泊水质方面是行之有效的。在多年湖沼学基础理论和应用技术研究的基础上,对美国伊利湖、密执安湖等五大湖受损害的水域生态系统的恢复与重建途径进行探索和规划,其中包括工程措施(污水分流隔离)、生物措施(水生植被恢复、重新引进土著鱼种,消除外来入侵种类及群落结构调整等)和行政管理措施,在五大湖的富营养化控制、难降解有毒污染物(DDT,PCB)等的去除、渔业资源的恢复和自然景观的重建等方面取得了显著的成果。华盛顿湖富营养化水质控制与改善方面取得了明显的效果,被视为湖泊生态恢复的范例。

欧洲一些国家开展了大量水域生态系统恢复研究工作,并取得明显成效。丹麦计划在近几年内分别降低湖泊氮和磷50%和80%。瑞典的Trummen湖80年代前接纳大量生活和工业污水,造成严重藻花、鱼类死亡。由于随后通过生态工程的综合治理,水质得到很大改善。洒生石灰的技术目前在欧洲酸化湖泊的恢复中应用十分普遍。近十年来,瑞典、挪威等国应用这种方法进行大量的实验研究,积累了丰富的经验和成功的经验,同时也总结了尚待解决的问题。英国应用生物操纵技术使伦敦附近水库一直保持低藻生物量和高的透明度,40~50年代泰晤士河被称为臭水河和死水河,1957~1958年连续两年对伦敦下游68km河段的鱼类调查,除发现一种耐污的黄鳝外,没有发现任何其他鱼类生存。60年代以后,英国政府投入大量财力对该河流进行大规模的综合治理,使河流重新充满生机。1967~1973年的调查,有68种鱼重返泰晤士河,后来超过90种,而且一年四季均可捕到这些鱼类。

目前,在发达国家,在淡水生态系统研究中,政府和科学家们的关注焦点已迅速从对内陆水体生物生产力的开发转移到水环境保护上来。恢复和重建受损水域生态系统的重要性已越来越被人们所认识并逐渐形成研究的热点。其总的发展趋势是政府加大经费支持的力度,在广泛利用科学家提供的调查分析资料基础上,政府有关决策部门作出统一的生态恢复规划,各行政管理部门(包括立法机构)密切配合和公众的广泛参与。在恢复计划的具体操作过程中,科学家和工程技术人员按照生态系统的恢复与重建原则,对水域生态系统的功能设计,生态恢复的操作程序、风险评价及恢复与重建的指标体系等对策与方法方面进行了系统全面的研究和具体规划。在方案实施过程中,应用并发展许多新的技术,采取点源控制(污水处理工程)、面源截留和终端治理(生态和生物措施)相结合的方法,把湖泊、河流和湿地的局部恢复扩大到整个流域恢复的范围,不但达到内环境结构和功能的调整和完善,而且最终在景观和生态系统水平上恢复其美学价值。

我国在对内陆水体的理论与方法的研究,特别是对其资源的开发和利用方面历史悠久。但是在开展水域生态系统的恢复与重建的科研工作则是近20a来的事情,在这方面,中国科学院、高等院校和环保科研单位做了一些具有显示度的工作。中国科学院水生生物研究所在对长江中下游典型浅水型湖泊,如武汉东湖、洪湖、保安湖等的生态系统特征、湖泊富营养化机理和其他影响因素分析、预测及调控对策、水域生产力的开发利用与湖泊生态环境优化管理等进行了长期的调查研究并积累了丰富的资料。其中某些湖泊恢复的生物学和生态学技术,如在东湖沉水植物的重建和生物操纵等正加以研究和利用。70年代,

中国科学院水生生物研究所在我国首次利用水域生态系统藻菌共生的氧化塘生态工程技术,使昔日污染严重的湖北鸭儿湖地区水相和陆相环境得到很大的改善,推动了我国水污染生态综合治理的研究工作^[41]。中国科学院南京地理与湖泊研究所、中国科学院生态环境研究中心对江苏太湖、安徽巢湖的富营养化形成与发展进行了系统的研究分析,进而提出富营养化防治措施,其中提出了流域控制规划和应用了多水塘系统净化技术^[42~49]。中国科学院动物研究所与天津市汉沽区环保部门利用沿海滩涂荒地修建污水库进而改造成多级人工可调控氧化塘,净化城市化工废水和生活污水,使蓟运河河口和渤海湾的生态环境状况得到改善,同时开展了污水综合利用的试验研究^[50~62]。中国科学院地理研究所、动物研究所和生态环境研究中心在对河北白洋淀生态系统特征进行深入细致的研究基础上,提出了白洋淀区域水污染控制、水域生态系统修复的综合技术方案,该项研究被列入《中国21世纪议程》首批优选项目^[53,54]。在过去十多年中,环境保护科研单位和大专院校开展了对我国湖泊(水库)和湿地的自然环境现状及其变化趋势(营养类型和功能特征)、生态系统退化的防治对策、资源的持续利用与发展方面的全面调查和系统研究,出版了不少专著^[63~68]。国务院环境委员会、国家环保局近期决定对淮河和太湖流域的污染进行综合治理,力争在2000年水质变清。中国政府1994年制定的“中国21世纪议程”中,把水污染控制和水域生态系统的保护和恢复作为我国的长期奋斗目标^[69]。

2 我国内陆水体环境质量现状及其影响因素分析

我国地域辽阔,河流众多,大小河川总长达42万km,流域面积在1000km²以上的河流有1500多条。我国又是一个多湖泊的国家,面积在1km²以上的天然湖泊有2800余个,总面积约为75600km²左右,其中大部分为浅水型湖泊^[40]。我国地跨温带、亚热带和热带,生境多样,气候温暖,自然地理条件优越,经济水产生物种类繁多,具有很高的生物生产力。据调查,仅淡水鱼类就有800余种,淡水鱼产量位居世界首位。湖泊和水库水产养殖业的发展对缓解我国动物蛋白供应紧张的局面,改变人们的食物结构起到了举足轻重的作用,已成为国民经济的一个重要组成部分。

我国内陆水体淡水资源总储量约为2.8亿m³,居世界第6位,但人均占有水量仅2400m³,相当于世界人均占有量的1/4,居世界第109位。中国已被列为全世界人均水资源13个贫水国家之一^[81]。另一方面,近40a来,随着人口的不断增长,工农业生产的迅速发展,水的供需矛盾越来越突出。尤其是由于国土资源的不合理开发,如森林的过度砍伐、植被的任意破坏造成的大量水土流失及其盲目地围湖造田等违背生态学基本原则的行为给淡水资源带来严重破坏。更为严重的是,近十几年来,随着人们日益增长的物质生活需要和大规模的生产活动所产生的大量工业废水和生活污水(大部分未经过净化处理)直接排入江河湖泊和海洋,污染了自然水体,加重了水的危机,引起水域生态系统一系列结构和功能的变化。目前淡水资源的缺乏和水域生态系统的损害已成为影响我国国民经济发展和人民生活质量的重要甚至是首要制约因素。根据多年来的监测和统计分析数据表明,我国内陆水域生态系统受损程度越来越严重,而且呈加重趋势。

2.1 废水排放量逐年增加

据1979年全国14个省市和1792个城镇的统计,全国每天排放的工业与生活废、污水约7210~7780万t,其中工业废水占81.2%。这些废水基本上未加处理直接排入江河。长江流域排放的废水量最大,每天约排放3000~4000万t,占全国总排放量的40%以上,而径流量仅为全国5.36%的黑龙江、辽河、海河流域承受的废水总量占全国总排放量的27.3%。按照近10a的资料报告和对未来几年的预测,我国废水排放总量呈上升趋势(表1)^[81~84]。

2.2 江河污染普遍

据近年来全国水域的环境质量监测调查统计,我国江河水体污染普遍^[82~85]。所调查的532条河流中有436条受到不同程度的污染,约占河流总数的82%。在流经全国42个大中城市的44条河流中有93%被污染,其中重污染和中污染占79%。全国七大河流流经15个主要城市河段中,有13条河段水质严重污染,氨氮、有机物及重金属污染程度较高。据1982年的调查资料,在监测的5万km总长的河段中,汞污染的河段占15.5%,酚污染的河段占25.1%,氨氮污染的河段占16.4%。其中严重污染不能用于灌溉的河段长12600km,占总长的23.3%。

表1 近年来全国废水、污水排放量

Table 1 Total amount of wastewater discharge in recent years in China (10⁴t/a)

年份 Years		1980	1985	1988	1992	1995	2000
排放总量 Amount of wastewater		234	341	368	430	450	500~550
工业废水 Industrial wastewater		165	236	268	310	320	370~400
生活污水 Domestic sewage		69	105	100	120	130	130~150

长江全长 6300 多 km,流域面积 180 万 km²。目前,长江干流每天接纳污水量近 3000 万 t,已查明的汞、铅、镉、砷、铬、酚、氰、氯、COD、氮、磷等主要污染物共 35 种。排入长江的废(污)水 90% 以上未经任何处理。黄河也没能逃避污染的厄运。调查资料表明,黄河许多河段河水中汞、铅、锌等重金属严重超标,有的超标达 90% 以上。据统计,1990 年黄河兰州以下至高村即接纳污水 32.5 亿 t。随着沿岸城镇与工业的发展,到 2000 年黄河将接纳污水 50 多亿 t,占天然径流量的 10% 左右。淮河污染由来已久,据统计,淮河流域近 50% 的河段已失去了使用价值,污染事故屡次发生,较大的事故近年来多达 160 余起。此外,上海的黄浦江和苏州河,京杭大运河,北京通惠河,济南子清河,南京秦淮河,山西汾河,辽宁浑河,太子河等污染都十分严重,有的实际上成了臭水河,死水河。

2.3 湖泊富营养化问题突出

湖泊富营养化的过程是湖泊退化衰老的表征。湖泊富营养化现象的发生,主要是由于工业有机废水和城镇生活污水的排放,使湖泊内氮、磷等营养物质大量增加引起藻类爆发性增长形成水花所致。如洞庭湖区现在工业污染源 2007 个,每年工业废水入湖量达 4.27 亿 t,致使湖水水质严重恶化^[66]。巢湖每年接纳工业污水 1.4 亿 t,生活污水 0.35 亿 t,污水处理率只有 2.5%,绝大部分城市污水未经处理而直接排入巢湖^[67]。目前,我国湖泊富营养化日趋严重。根据对全国 25 个大中型湖泊进行的调查,已趋富营养化的湖泊达 92%。按照国际上总氮(0.2mg/l)和总磷(0.02mg/l)浓度作为湖泊富营养化的评价指标,所调查的 25 个湖泊中,多数湖泊总氮浓度一般高出 5~12.5 倍,多数湖泊总磷浓度高出 10~50 倍^[65,66]。以河北白洋淀为例,30 多年来,有机污染物有逐年加重的趋势,其中化学需氧量、氨氮和总磷均超过三级地面水标准(表 2)。江苏太湖、云南滇池、武汉东湖等湖水中的 TN、TP 含量的年上升幅度也十分明显。由此可见,我国湖泊富营养化问题已十分突出。

表2 白洋淀区有机污染指标平均含量的年际变化(mg/L)

Table 2 Comparison of the concentrations of DO and pollutants from 1960's to 1990's in Baiyangdian Lake

参数 Parameters	年份 Year									三级地面水标准 Grade III for surface water
	1960	1975	1988	1989	1990	1991	1992	1993		
溶解氧 DO	7.8	6.5	4.07	8.23	7.57	7.02	7.37	5.61		≥5
化学需氧量 COD _{mn}	—	15.5	4.93	6.49	6.64	7.39	8.45	8.93		≤6
氨氮 NH ₄ -N	0	0.02	0.11	0.55	0.71	1.73	0.79	0.87		≤0.5
总磷 TP	0	0.04	0.03	0.06	0.09	0.07	0.13	0.14		≤0.05

2.4 湖泊(湿地)面积大幅度减少

除了水污染外,我国湖泊(湿地)环境正面临极度恶化局面的其他主要因素是来自以发展农业为目的的围湖造田及水土流失造成的河流淤塞等原因。40a 来,由于围垦和淤塞,湖泊数量和面积急剧减少和萎缩,许多湖泊已经消亡或正在消亡中。从 1950 年到 1980 年的 30a 间,全国在 1km² 以上的湖泊消失了 543 个,湖泊总面积减少了 1 万多 km²,超过我国五大淡水湖(鄱阳湖、洞庭湖、太湖、洪泽湖和巢湖)面积的总和。洞庭湖的面积缩小了 1659km²,鄱阳湖缩小了 1840km²。以素有千湖之省的湖北为例,50 年代的江汉湖

群有湖泊 1066 个,面积 8300km² 以上,减少到现在的 326 个,湖泊水面缩小近 5600km²,如今湖泊的数量和面积均不足 50 年代的 1/3。全国其他许多湖泊同样面临着沼泽化、陆地化、人为干扰的严重威胁^[65,56,68~71]。

2.5 水域环境的破坏对生物资源的影响

在水生资源中,鱼类资源具有最大的经济价值,因此与人民生活关系最为密切。江河是鱼类最主要的回游通道和繁殖场所。湖泊和水库是获得鱼产品的天然基地,在我国渔业生产中占有举足轻重的地位。一方面由于水体受到污染,鱼类受害首当其冲,重则中毒或缺氧窒息死亡,轻则抑制生长或者破坏产卵场,影响繁殖,最终摧毁鱼类资源。另一方面,由于围垦、淤塞和水利工程等人为因素的严重干扰,导致生境的变化、破坏或消失,同样给鱼类带来灾难性的后果。无论污染还是其它环境条件的改变给水域生态系统带来的破坏,最直接的危害就是导致鱼类种类多样性减少,许多种类灭绝或濒临灭绝,一些经济鱼类或其它名特优水产动物的种群丰度下降,给水产业的发展带来沉重的打击^[66,72~76]。

据初步调查统计,我国现存的 800 多种淡水鱼类中,近百种濒临灭绝,其中分布于云南的异龙中鲤等 4 种鱼类已经灭绝;白鲟、中华鲟、胭脂鱼等种类已到灭绝边缘。长江中下游湖泊中原生活有百余种野生鱼类,现在一般仅有二、三十种,而且出现明显的小型化^[73,74]。据有关部门对我国 878 条河流的调查结果表明,在 92806km 河道中,已有 5322km 成为鱼虾绝灭的臭水死水河道。长江水系约有 300 种鱼类,其中许多是我国的经济鱼类。由于水质污染和水利枢纽的修建等环境因素的变化,导致鱼的产量大幅度下降。有名的长江鲢、鳙、草鱼的渔业资源处于严重衰退之中,80 年代的成鱼捕捞量不及 50 年代的 1/2,80 年代的鱼苗捕获量仅为 60 年代的 1/4^[75]。在以往,长江及支流嘉陵江盛产鳊鱼和清波鱼(中华倒刺鲃),但是随着江水水质的恶化,鱼的捕获量逐年锐减,目前的年均产量仅为 50 年代的 30%。有不少河段,以上两种鱼不见踪迹^[68]。四川沱江是长江上游的主要支流之一,过去沱江中捕获的鱼类不仅种类多,而且数量大。但近年来沿岸工厂密布,城镇集中,每年向沱江排放 4 亿 t 废水,使鱼类资源遭到破坏,数量明显下降,种类大为减少。其中达氏鲟、白鲟、鳊鱼、尖吻鲟、中华倒刺鲃、长吻鲃、鳊鱼、铜鱼、岩原鲤、胭脂鱼等种类在沱江已经绝迹。长江下游的重要支流黄浦江,上接淀山湖,下连长江口及东海,是多种回游性鱼类和蟹类的出入通道。由于江水受到严重污染,有时甚至形成了几十公里长的污染区,阻断了鱼类回游,使鳊鱼、河蟹、鲢、鳙、和鲚鱼等数量大大减少。松江四鳃鲈曾是黄浦江一大名产,目前已无踪影^[77]。

黄河水系接纳的废水与日俱增,局部河段的污染十分严重,破坏了鱼类赖以生存的环境。如河南境内的洛河和伊河,曾盛产鲂鱼和鲤鱼,历史上曾有“伊鲤洛鲂贵似牛羊”的美称,现在这里的鱼已基本绝迹。黄河兰州段由于受污染影响,目前的鱼类种类明显减少,与 60 年代初比较,已有 8 种鱼类消失^[77]。

东北图门江在历史上以盛产大马哈鱼著名,自本世纪 50 年代以来,产量逐年下降。特别是近年来由于污染影响,几近绝迹。事实上,图门以上河段,大麻哈鱼已绝迹多年。第二松花江是吉林省最大河流,过去水流清澈,饵料丰富,鱼类繁多。现在由于沿江 500 多个大、中、小型工矿企业、造纸印染业等每天向江中排入污水量约 400 万 t 左右,使水质明显恶化。尤其是中下游有的河段变成黑流翻滚,水面泡沫堆积,发出令人窒息的异味。由于污染严重,导致一些鱼类由常见种或优势种变成稀有种或达到绝灭边缘。明显的如青鱼、赤眼鳟、唇鲮、狗鱼、江鳕及鳙鱼等很少见到或已绝迹。另外,鲤鱼、白鲢、长春鳊、翘嘴红鲌、草鱼等经济鱼类的数量也急剧下降^[77]。

近 20 年来,洞庭湖水产资源日趋衰竭,据调查,原有的 114 种鱼类,已经灭绝 8 种,另有 15 种已成稀有种类。青、草、鲢、鳙四大家鱼单尾重量越来越小。甲鱼、乌龟、黄鳝、洞庭花鳅等特种水产动物,过去每年的产量可达 5000t,现降至不足 1000t^[66]。

据 1971 年以前的调查,武汉东湖共有鱼类 67 种,几十年来,由于富营养化加剧及江湖通路隔绝等影响因素,近年仅发现 38 种鱼类,鲢、短颌鲚、暗色东方鲀等 20 多种鱼类已基本绝迹^[76]。湖北最大的淡水湖洪湖,由于湖泊环境急剧恶化,生态系统明显退化,导致生物多样性下降和鱼类资源小型化。50 年代洪湖原有不少于 100 种鱼类,目前只剩下 31 种,天然鱼产量也由 50 年代的 10000t/a。下降到目前的 3000~4000t/a,减产 2/3 左右^[71]。

河北白洋淀是华北地区最大的淡水湖泊。历史上的白洋淀水域辽阔,水质优良、生物资源十分丰富,素

有“华北明珠”的美称。现在的白洋淀由于接纳大量来自保定市的工业废水和生活污水,加之水文条件的改变,蓄水量大为降低,湖泊对污染物的稀释能力下降,加速了白洋淀富营养化的进程,给渔业和其他水产品资源带来严重危害。根据30多年的调查分析结果,白洋淀鱼类组成发生很大变化。1958年有鱼类54种,1975年降到35种,目前仅发现24种,鳊鱼、银鱼、鳊鱼、马口鱼、鲢鱼、红鲢等鱼类已经绝迹。50年代和60年代初,淀区鱼、虾、毛蟹、贝类、鳖和水禽的天然年均产量为8400t,70年代降至1640t,80至90年代徘徊在1200~1500t左右^[77,78]。

3 我国水域生态系统恢复与重建的基本思路与建议

3.1 基本思路

水域生态系统的退化和损害的主要原因是人类活动干扰的结果,其内在实质是系统结构的紊乱和功能的减弱与破坏,而在外在表现上则是生物多样性的下降或丧失以及自然景观的衰退。受损水域生态系统恢复和重建最重要的理论基础是生态演替。因为水域生态系统的自愈(self-healing)能力极强(如污染物的同化作用等),由于生态演替的作用,只要克服或消除自然的或人为的(特别是后者)干扰压力,并且在人类的参与下,创造积极有序的管理方式和措施,那么大多数情况下,受损害的水域生态系统是能够得以恢复和重建^[4,15,28,79]。所谓生态恢复,就是恢复生态系统的结构与功能特征。水域生态系统恢复的目的就是要再现一个自然的、能自我维持和调节的生态系统,使其与它所在的自然景观形成一个完整的统一体。一般说来,要将受损害的水域生态系统的结构和功能完全恢复到受损前的早期状态是非常困难的,但是,只要依据生态学基本原理,深入开展恢复生态学的理论和方法的研究,采取相应的技术对策,那么使其最大限度地恢复到接近受损前的水平,调整和改善结构与功能实现该系统顺向生态演替的目标,这是非常可能的。

在我国开展水域生态系统恢复与重建的工作必须符合中国国情,西方发达国家先进的经验和技術可以借鉴,但不能完全照搬。无论从我国的人口压力、生产规模与方式、经济和财政实力还是从自然环境类型、水域生态系统的特性等诸多方面都存在较大差异。仅以湖泊为例,我国的湖泊多属浅水性湖泊,气候温和,具有多种多样的生物资源和很高的生物生产力。湖泊是目前我国淡水水产养殖业发展的主要场所。单从环境维护的观点出发而弃鱼保湖,这在当前既不现实,也不可能。北美和西欧国家的许多湖泊为深水分层冷水性湖泊,其功能主要用于储水、垂钓、运动娱乐,很少涉及水产养殖,因此西方发达国家对湖泊水域生态系统的维护和修复把景观质量优劣作为恢复程度的主要评判标准。因此,要研究我国浅水性暖水性湖泊生态系统的结构功能特点,建立符合我国国情的湖泊生态系统指标体系和相应的恢复技术途径是非常必要的。

相对别的水体来讲,湖泊的修复是最近的事情^[6]。就污染而言,湖泊的治理与其它流水水体的治理有明显的不同,适用于其它水体(如泰晤士河)的治理方法可能不适用于治理受污染的湖泊^[80]。湖泊的治理要比河流复杂得多。因为去除河流的污染物很多情况下只需切断污染源,然后经过流水水体的稀释及其它的自净作用就可以达到修复的功效,而作为静水水体的湖泊,其自净作用与河流比较就弱得多,仅仅切断污染源是远远不够的,因为水体尤其是底泥中的毒物很难自行消除。我国湖泊生态系统受损害与退化现象是普遍的和严重的。湖泊在我国国民经济建设和人民生活中具有重要的作用,对受损害湖泊生态系统恢复与重建的理论研究和技术途径的探讨具有明显的重要性和迫切性。

我国湖泊生态系统恢复应采取湖外环境建设与湖内环境治理相结合,重建与利用相结合、工程建设与行政管理相结合、理化技术与生态工程相结合的原则,多种技术与措施并举进行系统整治。我国财力有限,特别要考虑采用投入少、见效快和具有转化再生能力的生态工程技术途径。白洋淀水污染控制规划体现了综合整治的例证。白洋淀水域生态系统的恢复技术方案包括:①点污染源控制(保定市建成2个日处理8万t的二级污水处理厂);②污水深度处理(农田灌溉及土地处理系统和氧化塘或氧化沟生态净化工程);③面源截流净化工程(芦苇湿地处理工程);④湖(淀)区生物调控技术(优化养殖模式、生物操纵技术、新型生物净化剂的开发应用等)。以上综合技术的应用对白洋淀水域生态系统的恢复与重建,促进当地环境保护与经济的持续发展将发挥重要作用。

3.2 建议研究内容

根据以上所述,笔者提出若干湖泊生态系统恢复与重建的研究工作建议:

(1)方法学研究 参考国外经验,分析国内湖泊以往研究资料,建立一套适合我国国情的湖泊恢复生态学研究方法和技术。

(2)湖泊功能类型划分及其相应的评价指标体系研究 我国湖泊众多,且具有不同的功能,有的以旅游为主,有的作为饮用水源,有的侧重水产养殖,有的兼有多种功能。根据不同的功能制定不同的评价指标和标准,采取不同的恢复措施。在此基础上选择代表性退化湖泊生态系统进行修复研究,实施相应的技术对策,以期取得成效和经验。

(3)湖泊净化功能与环境容量研究 受到城镇污水污染的湖泊含有多种有机化学物质,研究重要污染物在湖泊中的迁转行为、微生物和其他水生生物的净化功能,估计湖泊环境容量,可为湖泊生态系统恢复与重建提供重要依据。

(4)浅水湖泊 N、P 负荷、循环途径与富营养化的关系研究 N、P 为湖泊富营养化的主要影响因素,又是生物生产力的物质基础。研究湖泊 N、P 的负荷量、来源、迁转途径及与生物系统、湖泊形态和运行机制之间的相互作用,是湖泊富营养化控制的重要基础。

(5)水产养殖与水域环境质量之间的相互关系及优化养殖模式研究 湖泊水体为水产养殖提供了条件。但过度的水产养殖给湖泊水域环境造成危害,反过来限制水产业的发展。根据湖泊的生产能力和环境质量要求,研究合理的水产养殖负荷及提高负荷的途径,维持水产养殖与水域环境质量协调持续发展,是我国湖泊生态系统恢复与重建的重要内容。

(6)湖泊生态系统恢复生态工程途径研究 外环境治理与控制,包括流域内植树造林控制水土流失、湖区周边植被恢复、污染源控制(包括各种点源和面源污染生物控制技术);内环境治理与控制,包括水生植被恢复与重建、生物操纵技术、土著物种的重新引入等。特别注意外环境建设与内环境治理结合、生态工程技术与水量调节、淤泥清理利用等工程措施的结合。

(7)湖泊生态系统恢复的评价指标与评价方法研究 根据我国国情和湖泊生态系统的结构与功能指标体系,应用生态风险评价技术,对修复后的湖泊生态系统的状况及其发展趋势进行定量评估,为湖泊生态系统的科学管理提供依据。

4 结论

4.1 人类的生产活动和生活活动已在大范围地改变着自然环境。当前,随着人口的迅速增加、资源的过度开发和环境的急剧变化,引起一系列尖锐的生态问题,给人类的生存环境造成严重的破坏,日益受到全社会的关注。作为地球三大生态系统之一的淡水生态系统,在支撑人类社会的生存与发展上发挥着十分重要的作用。然而,由于人为活动的种种干扰作用加强,内陆水域生态系统被损害程度日益严重,导致系统的结构和功能受到破坏,发生逆向生态演替或恶性循环,直接给社会的经济发展和人们的生活环境带来严重的影响。

4.2 水域生态系统具有一定的抵御和调节自然和人类干扰的能力。只要干扰因素能得到控制并采取相应的改善措施,退化或受损害的水域生态系统正常的结构与功能就可以恢复到接近干扰前的水平。欧美发达国家十分重视退化水域生态系统恢复与整治研究,并投入大量财力进行恢复与治理工作,在水域生态系统的维持、恢复、增加景观多样性方面已取得显著成绩。

4.3 在退化生态系统的恢复过程中,生态学发挥了重要作用,也为生态学开辟了一个新的研究领域,恢复生态学丰富了生态学的理论和实践内容,同时也给生态学的发展提供了新的机遇和挑战,发展十分迅速。我国自然生态系统破坏与退化现象十分普遍,内陆水域生态系统的退化情况尤其严重。忽视退化或受损生态系统恢复工作,随后将导致物种或生态类型的灭绝和消失,甚至导致永久的生态破坏,人类将为自己的生存环境付出更加高昂的代价。因此,生态学家应该更多地投入到生态系统的恢复和重建的实践中去。生态恢复和重建研究不但为生态学家提供了更大更开放的实验场所,而且也是最终检验生态学理论的标准。

4.4 我国地理位置、气候特点、生物区系以及经济基础不同,应根据我国国情制定适当的水域生态系统恢复与重建策略、指标体系和技术途径。同时,生态恢复与重建是一个涉及面很广的综合性课题,需要在有关

政府部门的支持领导下,多学科、多部门协调行动,生态恢复工作才能取得成效并持续协调发展下去。

$\frac{1}{4}$

参考文献

- 1 Cairns J Jr. *Restoration Ecology*. The New Frontier-Rehabilitating Damaged Ecosystem, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1988, 1, 1~11
- 2 Jordan W R, Gilpin M E and Aber J D. *Restoration Ecology*. a synthetic approach to ecological research. Cambridge University Press, 1987. 1~34
- 3 U S National Research Council. *Restoration of Aquatic Ecosystems*. Nat Acad Press Washington D C. 1992, 1~552
- 4 Cairns J Jr. The status of the theoretical and applied science of restoration ecology. *The Environmental Professional*, 1991, 13, 186~194
- 5 Bradshaw A D. The reconstruction of ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 1983, 20, 1~17
- 6 Cairns J Jr. Ecosystem health through ecological restoration, barriers and opportunities. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1994, 3, 5~14
- 7 Bradshaw A D. Restoration: An Acid Test for Ecology. In Jordan, W R et al (eds). *Restoration Ecology*. Cambridge University, U. K. 1987, 23~29
- 8 Ewel J J. Restoration is the ultimate test of ecology theory. In *Restoration Ecology*, Cambridge University Press, U. K. 1987, 31~33
- 9 Cairns J Jr. *The recovery process in damaged ecosystems*. Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, Michigan. 1980. 1~160
- 10 Magnuson J J, Regier H A et al. To rehabilitate and restore Great Lakes ecosystems. in *the recovery process in damaged ecosystems*. Ann Arbor Science Publishers, Michigan. 1980. 95~111
- 11 Lewis R R III. Wetlands restorations, creation, and enhancement technology. *The status of Science*, Vol. I EPA. US. Environmental Protection Agency, Washington, D. C. 1989. 101~187
- 12 Reversa O (ed). *Terrestrial and Aquatic Ecosystems, Perturbation and Recovery*, Chichester, Ellis Horwood, 1991. 1~200
- 13 徐嵩龄. 采矿地的生态重建恢复生态学, 持续发展与生态学. 陈昌笃、王祖望主编. 北京, 科学出版社, 1993. 145~150
- 14 马世骏. 展望 90 年代的生态学, 现代生态学透视. 马世骏主编. 北京, 科学出版社, 1990. 1~4
- 15 康乐. 生态系统的恢复与重建, 现代生态学透视. 马世骏主编. 北京, 科学出版社, 1990. 300~308
- 16 陈昌笃. 生态学与持续发展, 持续发展与生态学. 陈昌笃、王祖望主编. 北京, 中国科学技术出版社, 1993. 3~7
- 17 Cairns J Jr, Dickson K L. and Herricks E E. (ed). *Recovery and restoration of damaged ecosystems*. Univ. Press of Virginia, Charlottesville, 1977. 1~80
- 18 Cherrett J M. Key concepts, the results of a survey of our member's opinions. In, J M Cherretted. *Ecological Concepts, the Contribution of Ecology to an Understanding of the Natural World*. Blackwell Scientific Oxford, England, 1989. 1~150
- 19 Stiling P. What do Ecologists do? *Bulletin of the Ecological Society of America*. 1994, 75(2), 116~121
- 20 董全, 李晓军. 面向 21 世纪的西方生态学, 走向 21 世纪的中国生态学——中国生态学会第五届全国会员代表大会暨学术讨论会论文集. 北京, 中国科学技术出版社, 1995. 63~70
- 21 Lubchenko J D et al. The Sustainable Biosphere Initiative, An ecological Research Agenda. *Ecology*. 1991, 72(2), 371~412
- 22 Huntley et al. Sustainable Biosphere, The Global imperation. *Ecology International*, 1991, 20, (special issue), 5~14
- 23 国家科委社会发展司. 联合国环境与发展会议文件汇编. 北京, 中国环境科学出版社, 1992. 1~287
- 24 Sparks R. The Upper Mississippi River, *Restoration of Aquatic Ecosystems*. Nat. Acad. Press. Washington, D. C. 1992. 406~411
- 25 Sparks R. The Illinois River-floodplain Ecosystem, *Restoration of Aquatic Ecosystems*. Nat. Acad. Press. Washington, D. C. 1992. 433~455
- 26 Berger J Jr. Restoring Attributes of the Willamette River. *Restoration of Aquatic Ecosystems*. Nat. Acad. Press.

- Washington, D. C. 1992. 433~455
- 27 Shapiro J. Biomanipulation, The next Phase-Making it stable. *Hydrobiologia*, 1990, **200/201**, 13~27
 - 28 Magnuson J J *et al.* To Rehabilitate and Restore Great Lakes Ecosystems, *The Recovery Process in Damaged Ecosystems*. Ann Arbor Science Publishers INC, Ann Arbor, Mich. 1980. 95~110
 - 29 Hartig J H and Thomas R L. Development of Plans to restore degraded areas in the Great lakes. *Environ. Manage.*, 1988, **12**, 327~347
 - 30 Schelske C L, Carpenter S R, Lake Michigan, *Restoration of Aquatic Ecosystems*. Nat. Acad. Press. Washington, D. C. 1992. 380~392
 - 31 Edmondson W T. Recovery of Lake Washington from eutrophication, *In Recovery and Restoration of damaged ecosystems*. University Press of Virginia, Charlottesville. 1977. 102~109
 - 32 Lehman J T. Control of eutrophication in Lake Washington. *In Ecological knowledge and Environmental Problem Solving*. National Academy Press, Washington, D. C. 1986. 301~306
 - 33 Kronvang B *et al.* Nationwide monitoring of nutrients and their ecological effects, state of the Danish aquatic environment. *Ambio*, 1993, **22**, 4
 - 34 Bjork S. Redevelopment of lake ecosystem—A case study approach. *Ambio*, 1988, **17**, 90~98
 - 35 Lessmark O and Thormelof E. Liming in Sweden. *Water, Air, Soil Pollut.*, 1986, 809~815
 - 36 Brown D J A, Howells G D. Loch fleet. A research watershed liming project. *Water, Soil Pollut.*, 1988, **41**, 25~42
 - 37 Duncan A. A review, Limnological management and biomanipulation in the London reservoirs. *Hydrobiologia*, 1990, **200/201**, 541~548
 - 38 Gameson A L H and Wheeler A. Restoration and Recovery of the Thames estuary, *In Recovery and Restoration of Damaged Ecosystem*. University Press of Virginia, Charlottesville. 1977. 72~101
 - 39 Doxat J. The living Thames, *the restoration of a great tidal river*. Hutchinson Benham. London, England, 1977. 30~34
 - 40 刘建康主编. 东湖生态学研究(一). 北京, 科学出版社, 1990
 - 41 刘建康主编. 东湖生态学研究(二). 北京, 科学出版社, 1995
 - 42 梁彦龄, 刘伏泉主编. 草型湖泊资源、环境与渔业生态学管理(一). 北京, 科学出版社, 1995
 - 43 中国科学院水生生物研究所洪湖课题组主编. 洪湖水体生物生产力综合开发及湖泊生态环境优化研究. 北京, 海洋出版社, 1991
 - 44 倪乐意, 李纯厚, 黄祥飞. 在富营养型水体中重建沉水植被研究, 东湖生态学研究(二). 刘建康主编. 北京, 科学出版社, 1995. 302~310
 - 45 阮景荣, 陈受忠, 俞家禄. 富营养中型生态系统的生物操纵治理, 东湖生态系统研究(二). 刘建康主编. 北京, 科学出版社, 1995. 392~402
 - 46 张甬元, 陈锡涛等. 鸭儿湖污染治理研究. 水生生物集刊, 1983, **7**(1), 113~124
 - 47 顾丁锡. 二十年来太湖生态环境状况的若干变化. 上海师范学院学报(环境保护专辑)1983, 50~59
 - 48 屠清瑛等. 巢湖——富营养研究. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1990
 - 49 Yin Chenqing and H. Bernhardt (ed). Ecological effects of pollution in Chaohu Lake, China, *Journal of Environmental sciences (China)-Special Issue*, 1992, **4**(2), 123
 - 50 黄玉珊. 汉沽污水库净化能力的初步研究. 全国水生生态及环境微生物学会论文集. 北京, 科学出版社, 1984, 72~93
 - 51 赵忠亮. 汉沽污水库养鱼试验研究. 生态学报, 1986, **6**(2), 171~177
 - 52 赵忠亮. 用染汞鲫鱼饲养水貂的试验研究. 动物学杂志, 1989, **24**(4), 22~26
 - 53 章 申, 唐以剑等. 白洋淀区域水污染控制研究(第一集), 北京, 科学出版社, 1995
 - 54 黄玉珊. 白洋淀水域生态系统的退化与修复, 见: 章申等主编, 白洋淀区域水污染控制研究, 北京, 科学出版社, 1995. 229~235
 - 55 王洪道. 中国湖泊资源. 北京, 科学出版社, 1989
 - 56 金相灿等. 中国湖泊富营养化. 北京, 中国环境科学出版社, 1990

- 57 陆健健. 中国湿地. 上海: 华东师范大学出版社, 1990
- 58 陈宜瑜主编. 中国湿地研究. 长春: 吉林科学技术出版社, 1995
- 59 中国 21 世纪议程——中国 21 世纪人口、环境与发展白皮书. 北京: 中国环境科学出版社, 1992
- 60 刘建康, 何碧梧主编. 中国淡水鱼类养殖学. 北京: 科学出版社, 1990. 1~30
- 61 钮茂生. 中国的水. 人民日报 1996. 3 月 22 日, 第 10 版
- 62 曾北危. 我国水资源问题. 环境科学丛刊, 1982, 3(4): 42~49
- 63 鲍强. 中国水污染防治政策目标和技术选择. 环境科学进展, 1993, 1(1): 1~23
- 64 刘永懋. 中国水污染防治的发展战略研究. 中国环境科学, 1993, 13(5): 323~326
- 65 贾敬儒. 我国渔业水域污染现状防治及对策. 淡水渔业, 1988, 146: 28~31
- 66 肖太山, 刘名贵. 救救洞庭湖水资源. 人民日报 1995. 7 月 10 日, 第 9 版
- 67 王大齐, 胡思金. 巢湖生态系统之优化. 中国环境科学, 1994, 14(3): 177~180
- 68 张家玉. 湖泊围垦的生态经济效益分析. 海洋与湖沼, 1987, 6(5): 48~53
- 69 顾丁锡, 舒金华. 湖泊水污染预测及其防治规划方法. 北京: 中国环境科学出版社, 1988
- 70 施成熙主编. 中国湖泊概论. 北京: 科学出版社, 1989
- 71 夏宜珍. 全球变化与淡水生态系统. 全球变化与生态系统. 张新时, 陆仲康主编. 上海: 上海科学技术出版社, 1994. 54~56
- 72 陈宜瑜. 淡水生态系统中的若干生物多样性问题. 生物科学信息, 1990, 2(5): 197~200
- 73 黄玉珊. 我国水产业的持续发展问题. 持续发展与生态学. 陈昌笃, 王祖望主编. 北京: 中国科学技术出版社, 1993. 105~108
- 74 许木启. 水体污染对水生生物多样性的影响. 科学对社会的影响, 1995, 4: 5~13
- 75 谢平. 淡水生态系统中生物多样性面临的威胁. 科学对社会的影响, 1995, 4: 15~23
- 76 乐佩琦. 中国濒危淡水鱼类至危成因分析. 湖泊科学, 1995, 7(3): 271~276
- 77 许木启, 庞苏娟. 水体污染的生态效应. 动物学集刊, 1995, 12: 346~350
- 78 黄玉珊. 白洋淀鱼类资源变化及影响因素分析. 动物学集刊, 1993, 10: 33~41
- 79 许木启, 黄玉珊. 生态平衡的破坏与重建. 环境保护, 1981, 220~221
- 80 Baker L A, wein E B S. Review of Lake Management In Minnesots. *Lake Reservoir Management*, 1989, 5: 1~10