

太湖流域

生态系统结构分析及其演化研究

TAIHULIUYU SHENGTAIXITONGJIEGOUFENXI JIQI YANHUAYANJIU

陈 刚 徐恒力 孙自永 朱锦旗 贾晓青 陈 杰 编著

地 质 出 版 社

太湖流域生态系统结构分析 及其演化研究

陈 刚 徐恒力 孙自永 朱锦旗 贾晓青 陈 杰 编著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 简 介

太湖流域是我国经济最发达和城市化程度最高的地区之一。改革开放以来,该区经济高速发展,但其生态环境也在逐渐恶化,尤其是太湖水体的富营养化已经成为太湖流域生态环境恶化的最集中体现,严重影响当地的经济发展和社会稳定。

本书以系统科学的思想为指导,将太湖流域生态系统视为一个通过内部自组织过程适应外界环境变化的复杂系统,认为太湖水环境的恶化是整个流域生态系统结构人工化和负荷输入无序化导致系统功能紊乱的结果;从水、岩(土)、生等因子协同作用的角度,分析了陆地生态系统和水域生态系统的结构及其与植被净化功能的关联,探讨太湖水体富营养化产生的生态学原因;阐明了在人为活动影响下,太湖水域生态系统和陆地生态系统的演化规律和特点;从流域生态学的角度讨论了太湖自净功能的修复机理,针对太湖不同区域的具体情况,以源头治理、系统隔离、调整水域生态系统结构为原则,因地制宜地提出了改善太湖流域生态系统净化功能的途径和措施。

本书可供环境科学、生态地质学、流域生态学、湿地生态学等专业的本科生、研究生、相关专业技术人员及管理人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

太湖流域生态系统结构分析及其演化研究/陈刚等编
著. —北京:地质出版社, 2008. 12

ISBN 978-7-116-05930-6

I. 太… II. 陈… III. 太湖-流域-生态系统-研究
IV. X832

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 204645 号

责任编辑:王春庆 祁向雷

责任校对:关风云

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话:(010) 82324508 (邮购部); (010) 82324573 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zhs@ gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京地大彩印厂

开 本: 787 mm × 1092 mm ¹/₁₆

印 张: 8.5

字 数: 200 千字

印 数: 1—800 册

版 次: 2008 年 12 月北京第 1 版·第 1 次印刷

定 价: 38.00 元

书 号: ISBN 978-7-116-05930-6

(如对本书有建议或意见, 敬请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)

前 言

太湖流域位于我国江苏省南部、浙江省北部，包括上海市在内，总面积约 36500 km²，是长江三角洲的中心地带。流域内河汉密集成网，湖泊星罗棋布。其中太湖更以水域开阔驰名天下，是我国五大淡水湖之一。目前该流域不仅承载着近 4700 万的人口，以人口密度 928 人/km² 位于全国人口稠密区的前列，而且也是全国经济最发达，城市化进程最快的地区之一，国内生产总值占全国的 11%，财政收入所占比例则高达 14%，在我国社会经济体系中具有举足轻重的地位。

研究太湖流域，充分开发利用其水、土资源，保护历史悠久的自然文化景观历来是各级政府高度重视的问题。自 20 世纪 50、60 年代，国家投入了大量的人力、物力、财力为解决防洪排涝做了许多卓有成效的工作，特别是依照《太湖流域综合治理总体规划方案》实施的 10 大骨干水利工程，至今已取得了巨大的社会效益，极大地缓解了该流域的水患之虞。与此同时，中国科学院和江苏省各有关部门相继开展了水文、气象、地质、地理、水利、农业、经济、环境等各方面的基础调查工作，科学研究也取得了巨大的进展，《太湖》、《太湖流域经济发展·水环境·水灾害》、《太湖水环境演化过程与机理》等一大批标志性科研成果的完成，有力地支持了太湖流域的经济发展和环境保护事业，其中许多观点，以及长期积累的观测调查数据更为后续的科学研究的提供了宝贵的思路和资料基础。

最近几十年来，随着社会经济的快速发展，人为活动改造自然的力度不断增强，太湖流域环境问题日显突出，越来越严重的污染事件使得太湖沿岸地区的生活用水和工业用水发生严重困难，已严重影响了当地经济的发展和社会的稳定。事实上，从中央到地方各级政府也早已认识到了问题的严重性和紧迫性，为了解决水质污染、太湖富营养化引起的“水华”频繁暴发以及湖区景观衰退等生态环境问题，政府下定决心，投入了大量财力、人力，于 1998 年底采取了全流域污染达标排放行动。这一行动在短期内取得一定成效，太湖的营养负荷有所下降。值得注意的是，近年来的水质监测结果表明，富营养的问题又有所反弹，“零点行动”并未达到预期的效果。2007 年的太湖蓝藻水华爆发，使太湖沿岸的无锡市百万人断水长达一个月之久，这更加凸显了太湖污染问题的严重，治理任务的艰巨。

科学认知上的局限性和盲点也是目前治理效果不明显的重要原因。目前对太湖的研究，在思路忽视其整体性，将平原河网区和太湖人为地割裂开来各自独立研究，或将植被仅视为一种地理景观，忽视其在系统不同层次上物质、能量流动中的作用，基本上就水体论水体，当把水体富营养化看作一个水域生态问题后，各种措施基本上都是以水域生态系统为研究对象而展开。然而，水域生态系统本来就是和陆地生态系

统密不可分，不仅仅包括物质的迁移循环过程，如氮、磷物质的迁移、连续的水文过程等，还包括一些能量和信息的流动。所以，富营养化虽然是一个水域生态问题，但是其物质来源在陆地，不能隔离开两者之间的天然联系。同时，前人的研究主要是从生物学、生理学、毒理学、水化学或水动力学等单一学科角度开展的，研究者从自己的学科出发，对太湖水质的评价、底泥中的营养盐的释放与沉积、植被的演化、藻类的生理对策、风力驱动下的湖水动力场等单一问题或要素进行了比较深入的研究，但尚缺乏对这些单要素的综合和统一分析。

因此，目前针对治理太湖污染问题的研究迫切需要从系统科学的观点出发，将太湖流域生态系统视为一个整体，作为一个结构复杂、功能多样、不断演化的系统。除此之外，关于太湖环境问题产生的原因，也应立足更高层面上来审视，从表象上看太湖水环境的恶化是问题的焦点，而更深层次的本质则是整个流域生态系统结构人工化和负荷输入无序化导致系统功能紊乱的结果，属于系统结构性功能障碍。这种障碍是长期历史过程中人们片面追求个别服务功能最大化，忽视了各种自然因素协同、“平衡”阈值的限制所致。需要进一步强调的是，太湖流域生态系统属于开放的远离平衡态的非线性系统，在几千年人为活动的持续影响下，特别是最近几十年来，人为活动的强度和广度超过了历史上任何一个时期的情况下，太湖流域生态系统的演化是必然的，且是不可逆的过程。忽视这一基本事实，仅从人们的主观愿望出发，将水环境的治理目标设定为恢复或回归 20 世纪 50、60 年代的近自然状态，其实质是将该系统误认为具有可逆过程的近平衡态系统，其理论上的缺陷显而易见，在客观上也是无法实现的。所以，在系统理论指导下将研究成果集成统一，科学全面地认识太湖流域生态系统是制定经济 - 资源 - 环境三者协调发展规划的重要基础，具有重要的理论和现实意义。

正是基于以上考量，本书在综合前人研究成果的基础上，以系统科学的思想为指导，从水、生、岩（土）等生态因子协同作用的角度，分析陆地生态系统和水域生态系统的结构及其与植被净化功能的关联，探讨太湖富营养化产生的生态学原因；阐明在人为活动影响下，太湖水域生态系统演化的规律和特点；对现状条件下水体营养负荷承受能力进行评价；针对太湖不同区域具体情况，因地制宜地提出改善系统净化功能的途径和措施。

本书对以下关键问题提出了自己的观点：①太湖水系并无严格的上下游之分，周边河道皆可向太湖补充水量，也可接受太湖排出的水量，大部分河道无常年固定的流向。当太湖处于高水位期，水流由太湖排向周边水网，而在低水位期，河网地带的水流向太湖汇聚，构成了一个具有“辐合 - 辐散”特点的复杂水文系统。②由于太湖水流复杂、植被和生境条件具有较强的空间异质性，在开展水质或富营养化程度评价、制定太湖保护和修复目标等工作时应将其视为一个分布式参数系统来处理。③湿地结构是随着外界环境的变化而变化的，内部结构必须适应外界环境，才能达到功能的完善。当内部结构自组织过程无法适应外界环境的变化时，就会发生功能障碍，因此，必须采取一系列修复手段，来加快自组织过程的进程以适应环境。④由于氮、磷迁移循环过程和水文过程的连续性，本书从流域的角度讨论了太湖自净的功能修复机理，认为

从源头治理的角度出发，提高陆生植物对氮、磷的拦截和固定能力，减少陆源氮、磷物质的入湖量，同时提高水域部分高等水生植物的自净能力，“双管齐下”对太湖流域生态系统的功能障碍进行修复。

本书第一、二、五、九章由陈刚、贾晓青、陈杰执笔，第三、四、五章由朱锦旗执笔，第六、九章由孙自永执笔，第七章由徐恒力执笔，全书最后由陈刚和徐恒力统稿。在本书编写过程中，得到了中国地质大学（武汉）陈植华教授、万军伟教授、王增银教授以及中国地质大学（北京）沈照理教授的悉心帮助，江苏省地质调查研究院为本书的研究提供了资金和资料方面的支持，苏州市吴中区国土资源局的蒋靖局长、王平副局长等同志为野外调查提供了帮助，研究生罗晓娟、龚绪龙、牛望等参与了野外调查取样、室内测试和图件编制工作，在此一并致谢！

由于作者水平有限，书中难免有错误、疏漏或不当之处，恳请各位专家、同行批评指正。

目次

前 言

第一章 绪言 (1)

第一节 国内外研究现状及发展趋势 (1)

一、湿地富营养化研究进展 (1)

二、太湖水体富营养化的研究现状 (7)

三、发展趋势 (11)

第二节 研究目标、内容和思路 (13)

一、研究目标 (13)

二、研究内容 (13)

三、研究思路 (13)

第二章 研究区概况 (16)

第一节 自然地理特征 (16)

一、地势特点 (16)

二、气象水文 (16)

三、土壤 (18)

四、植被 (18)

第二节 地质与水文地质概述 (19)

一、区域地质 (19)

二、水文地质条件 (20)

第三章 太湖流域陆地生态系统结构分析 (22)

第一节 陆地生态系统的水平结构 (22)

一、丘陵山区 (23)

二、高位平原区 (24)

三、低位平原区 (24)

第二节 陆地生态系统的垂向分层 (24)

一、地境分层的理论依据 (25)

二、地境层片的野外工作方法 (26)

三、地境层片的识别 (26)

四、地境层片分析的生态学意义 (29)

第三节 太湖流域陆地生态系统结构的综合分析 (30)

一、丘陵山区生态子系统	(30)
二、高位平原生态子系统	(33)
三、低位平原生态子系统	(35)
第四章 太湖流域陆地生态系统演化分析	(39)
第一节 土地利用格局的变化	(39)
一、各类土地面积的变化及其生态效应	(39)
二、土地用途的置换及生态学效应	(40)
第二节 水网格局的变化	(41)
一、水网格局的变迁	(41)
二、水网格局变化的生态学效应	(41)
第三节 营养物质输入量的剧增	(42)
一、肥料的过量使用	(43)
二、人工废弃物的增加	(43)
第五章 太湖水域生态系统结构分析	(45)
第一节 太湖水域生态系统的水平格局	(45)
一、水平格局的遥感解译	(45)
二、水平格局的基本特征	(47)
第二节 太湖水域生态系统垂向分层格局	(59)
一、第一层	(60)
二、第二层	(60)
三、第三层	(61)
四、第四层	(61)
第三节 太湖水域生态系统结构与功能的综合分析	(61)
一、太湖水域第Ⅰ生态子系统	(62)
二、太湖水域第Ⅱ生态子系统	(63)
三、太湖水域第Ⅲ生态子系统	(64)
四、太湖水域第Ⅳ生态子系统	(65)
五、太湖水域第Ⅴ生态子系统	(66)
第六章 太湖水域生态系统演化分析	(68)
第一节 太湖水域生态系统演化的社会经济背景	(68)
第二节 太湖水域各生态子系统的演变过程	(69)
一、第Ⅰ生态子系统	(71)
二、第Ⅱ生态子系统	(72)
三、第Ⅲ生态子系统	(74)
四、第Ⅳ生态子系统	(76)

五、第V生态子系统	(78)
第七章 太湖水域环境容量评价	(83)
第一节 生物在太湖流域氮、磷净化功能中的地位	(83)
第二节 太湖水域生态系统的环境容量评价	(85)
一、太湖水域生态系统环境容量的计算	(85)
二、太湖水域生态系统水生植物的净化效率	(88)
三、水生植物净化功能的动态变化及其原因	(89)
第三节 太湖水域生态系统氮、磷外源负荷的总量控制	(92)
一、2007 年氮、磷的环境容量	(93)
二、2007 年外源氮、磷负荷的控制量	(94)
三、氮、磷负荷分配的若干问题	(94)
第八章 太湖流域生态系统自净功能改善	(96)
第一节 陆地生态系统自净功能改善	(96)
一、丘陵山区系统自净功能改善	(96)
二、高位平原子系统自净功能改善	(97)
三、低位平原子系统自净功能改善	(100)
第二节 太湖流域水域生态系统自净功能改善	(101)
第九章 结论与建议	(105)
第一节 主要结论	(105)
一、太湖流域生态系统的结构分析	(105)
二、太湖流域生态系统的演化分析	(107)
三、太湖水域环境容量评价	(108)
第二节 建议	(109)
一、太湖流域陆地生态系统自净功能改善的建议	(109)
二、太湖流域水域生态系统自净功能改善的建议	(110)
三、建议进一步开展的工作	(110)
参考文献	(112)
图版一 不同时期太湖水域遥感影像假彩色合成图	
图版二 不同时期太湖水域植被分区	

第一章 绪 言

第一节 国内外研究现状及发展趋势

湿地生态系统在调节气候、涵养水源、蓄洪防旱、控制土壤侵蚀、净化环境、维持生物多样性和生态平衡等方面均具有十分重要的作用,被称为“自然之肾”(Edward et al., 1997)。但是,由于过去人们对湿地的认识不足以及大量人类活动干扰对湿地的破坏,已经造成了目前全球湿地功能普遍丧失或退化的现状(张永泽等, 2001; 李洪远等, 2005),为此也引起了大量科学工作者的重视,在国际上掀起了湿地恢复与重建的热潮,相关专著与论文大量涌现(Kentula, 1989; Kusler & Kentula, 1990; Sewell & Higgins, 1991; National Research Council, 1992; Kentula, 1993; Thunhorst, 1993; Galatowitsch & vander Valk, 1994; Wheeler & Shaw, 1995a; Wheeler, 1995; Quinty & Rochefort, 1997a; Hayes, 1998; Joyce & Wade, 1998; Malterer, 1998; Hey & Philippi, 1999; Streever, 1999; Zedler, 2000)。目前国际上湿地恢复的研究主要有两大中心:一是欧洲(含加拿大北部),主要研究以贫营养化为表现的退化沼泽(bog)的恢复问题,一是北美(含加拿大南部),主要以富营养化湿地的研究为主(Dornfield & Warhurst, 1988; Madsen, 1988; Holtslag & Stewart, 1998; Malterer & Johnson, 1998; Rubec & Thibault, 1998)。

目前,太湖流域生态系统的主要问题就是太湖及其周边水体的富营养化,主要表现为氮、磷的超量富集(秦伯强等, 2004),它是太湖流域生态系统对氮、磷的净化能力下降的集中表现。

目前,国内外相关的研究主要集中在如下几个方面。

一、湿地富营养化研究进展

富营养化(eutrophication)最初是在湖泊养分类型和演变研究中出现的,与之对应的是贫营养化(oligotrophic)。事实上就字面的解释而言,富营养化指的是湖泊中营养物质不断增多的过程,这在自然界中是一个很普遍的现象,因为湖泊是流域内相对的“汇”区,营养物质以水为载体向其中汇集。按照自然的发展规律,这一过程将是一个缓慢的历程,一般应以地质年代来计量。但是,随着经济高速发展以来,大量湖泊在几十年甚至是几年内就迅速从正常状态步入富营养状态,随之而来的是一系列生态问题,如鱼类大量死亡、水体透明度下降、水质恶化发臭等,因此,现在意义上的富营养化并非指的一种自然过程,而更多强调的是由于人为原因所造成的环境恶化现象。关于富营养化的定义很多,联合国环境规划署将其定义为“湖泊、水库、缓慢流动的河流以及某些近海水体中营养物质(一般指氮和磷的化合物)过量从而引起水质恶化、味觉和嗅觉变坏、溶解氧耗竭、透明度降低、渔业减产、死鱼、阻塞航道,对人和动物产生毒性”(UNEP)。有学

者认为富营养化是指水域生态系统中限制性营养盐的自然增加和人为增加及其引起生态系统的相应变化 (Smetacek, 1991)。

(一) 湿地富营养化成因研究

目前, 国内外对造成湿地水体富营养化成因的认识主要有两种: 一是营养物质富集理论; 一是食物链理论 (付春平等, 2005)。

我国主要以营养物质富集理论为水体富营养化成因分析及其治理的指导思想。它认为富营养化主要是由营养物质的过度富集造成的。当含氮和含磷化合物过多排入水体后, 破坏了原有的生态平衡, 引起了藻类的大量繁殖, 过多消耗水中的氧, 使鱼类、高等水生植物死亡, 它们的尸体腐烂又造成了水质污染。

根据这一理论, 造成富营养化的根本原因就是营养物质的超量排放。因此, 由此理论衍生出的富营养化成因分析就主要着眼在不同来源上, 将营养物质归纳为点源污染和面源污染 (卢进登等, 2002; 顾培等, 2005), 或内源污染和外源污染 (朱喜等, 2002; 杜桂森等, 2004), 还有的将成因归纳为不同的产生原因 (屠清瑛等, 1990; 许朋柱等, 2002; 王鹏, 2004; 秦伯强等, 2004): ①工业化和城市化进程的加快促使工业废水、生活污水排放量增大, 导致入河 (湖) 的污染量增加; ②农业生产方式的不合理使单位土地的化肥流失量增加; ③渔业养殖所带来的营养负荷日益增大; ④水土流失; ⑤废水污水治理能力不足; ⑥现行水质、水资源的管理体制不合理。

食物链理论由荷兰的马丁·肖顿博士提出 (计石祥等, 1998)。他认为自然水域中的水生食物链的破坏最终导致了富营养化的发生。在一个健康的自然水域中, 水中的营养物质为水藻提供了生长条件, 而浮游动物的捕食控制了水藻的生长, 同时又为鱼类提供了食物。当这一水生生物系统发挥正常功能时, 水体能保持清洁不受富营养化的困扰。而一旦浮游动物的捕食功能降低, 水藻生长量超过其被消耗量而失去平衡, 就会发生富营养化。因此, 该理论认为, 富营养化是由水生食物链被有机毒物或其他原因破坏造成, 营养物质不是简单决定富营养化的原因。

这两种理论的侧重点各有不同, 营养物质富集理论强调的是输入过度与系统响应之间的关系; 食物链理论虽然过于强调浮游动物在食物链中的作用而忽视高等水生植物与藻类之间的竞争关系, 使理论本身又失偏颇, 但是它侧重的却是系统内部结构破坏与系统响应之间的关系, 弥补了营养物质富集理论在这方面的不足, 相对于前者是有进步的。

近年来, 我国许多学者也开始意识到输入过度和系统本身的破坏两者是导致水体富营养化的共同原因 (门漱石等, 1995; 李杰君, 2001; 蔡履冰, 2003; 杨士建等, 2006)。具体来说, 就是尽管富营养化问题是由氮、磷营养盐的过量输入而引发的, 但不能将其简单地视为氮、磷物质在水体、生物和底泥间的物理、化学和生物的迁移转化过程。当富营养化发生时, 氮、磷营养盐的入湖就不仅仅是改变了水质, 而且改变了水生生物的生境条件, 由于高等水生植物与浮游藻类间存在着竞争排斥关系和它们对这种生境变化有着不同的响应, 进而使水生植物群落的结构发生改变。水生植物群落结构的改变不仅通过食物链向水生动物和微生物传递, 而且反过来作用于生境, 使其进一步改变。

(二) 湿地富营养化机制及其过程研究

近年来, 一些学者开始将湖泊生态系统多态理论应用于湿地富营养化的研究。所谓生

态系统的多稳态现象,是指在相同的外界环境条件下,生态系统有可能出现两种或多种不同的稳定状态(May, 1977)。根据多态理论,在贫营养阶段,水生高等植物和藻类的生长均受到营养缺乏的限制,湖水处在底泥沙质浑浊状态,或者称之为“原始混沌状态”。随着营养元素的逐渐积累,就有可能分化出两条演变途径:一条途径是沉水植物的不断发展抑制了浮游藻类,水生植物减弱了风浪强度及其对湖底的冲击,增强了湖泊的自净能力,污染物质可以通过沉积、生物转化、生物同化、生物产品收获等途径离开水体,湖水变清且营养水平上升比较缓慢,这种状态称为“水生高等植物占优势的清水状态”,简称为“草型清水状态”。另外一条途径是浮游藻类的不断增长抑制了沉水植物,沉积物的再悬浮作用比较强烈,增强了湖水的浑浊度,营养盐的生物输出和沉积输出减少,湖水营养水平上升比较迅速,这种状态称之为“浮游藻类占优势的浊水状态”,简称为“藻型浊水状态”(Meijer and Hospe, 1997)。无论是“原始混沌状态”、“草型清水状态”或“藻型浊水状态”,都是湖泊生态系统演化过程中可能出现的不同的宏观稳定态;无论是“原始混沌状态”→“草型清水状态”、“原始混沌状态”→“藻型浊水状态”,还是“草型清水状态”与“藻型浊水状态”间的相互转化,都是系统从一个宏观稳定态向另一个宏观稳定态的演化过程。

但必须指出的是,多态理论应用于湖泊富营养化机制探讨是欧洲一些湖泊学家在研究小型浅水湖泊的治理时引入的(Moss, 1990; Hosper, 1989),同时提出了杯中弹子模型(Scheffer, 1990),但是它没有考虑大型湖泊内部不同地段的差异,是在假定湖泊完全均质,内部各点的状态处处相同,将整个湖泊作为一个状态完全一致的集中式参数系统来处理,而系统的演化必然对应着这个“统一状态”的改变。正因如此,多态理论的适用对象是一些“小型浅水湖泊”。本文指出对于大型湖泊,湖中不同地段的生境条件、与外界环境的关联方式、所受的干扰强度(外源营养元素的输入量)差异极大,湖泊具有极强的异质性,不可能全湖都处于“草型清水”或“藻型浊水”状态,而是不同地带对应着多态理论中的不同状态,即多态理论所描述的“原始混沌”、“草型清水”和“藻型浊水”三种状态,还有后人补充的“泥沙型浊水状态”,在太湖水域中都同时存在。以系统理论来分析,太湖水生生态系统是由多个子系统组成的,这些子系统处于不同的宏观稳定态。当太湖水生生态系统发生演化时,并不一定是所有子系统的状态都在改变,可能只是其中的一个或多个子系统的宏观稳定态发生改变,也可能是子系统所占据的空间范围、相互间的配置关系发生了改变,从而引起整个生态系统结构和功能的改变。

目前不少学者从藻类的生理学特点出发(Westhuizen et al., 1985; Dokulil et al., 2000; 穆丽娜等, 2000),研究如何抑制由富营养化导致的藻类大爆发。但是在复杂的湿地生态系统中,藻类仅为其中一个小的组成部分,它的爆发往往同高等水生植物、浮游动物等密切相关,因此,仅仅从藻类的角度出发,考虑如何控制富营养化是远远不够的。基于藻类和高等水生植物都是利用光能进行光合作用的生产者这一考虑,所以,藻类与高等水生植物的生态学特点以及它们之间的竞争关系是研究湿地水体富营养化必须弄清楚的关键机制问题之一。

在某一水域,当浮游植物和高等植物任何一者占优势时,都能使生境条件向着有利于自身而不利对方的方向发展:①如果高等水生植物占据了适宜的生境,可以通过吸收水体中的营养盐分、增强底泥稳定性以防止内源污染、遮光等,从营养和光照条件方面来抑

制浮游藻类的繁衍，同时，有些物种如石菖蒲等都可以分泌抑藻毒素（何池全等，1999；李修岭等，2005；胡洪营等，2006；钱志萍等，2006；）；②如果氮、磷污染物使浮游藻类大量繁殖，则藻类通过遮盖水面、降低水体透明底、大量消耗溶解氧和分泌毒素等（李效宇等，1999），抑制高等水生植物的生长发育（尹黎燕等，2004），使其密度降低、分布范围减小、抑制藻类生长的功能降低，通过这种正反馈机制，为自身的繁衍进一步创造条件。

（三）湿地富营养化防治研究

自 20 世纪 60 年代以来，西方国家开始对富营养化湖泊的防治展开研究，提出了不少措施，随之而来的各发展中国家由于经济的发展也面临着类似的问题，我国在 80 年代改革开放以后，也相继开展了许多关于防治湿地富营养化的研究和实验。归纳起来这些措施主要有以下方面：

1. 减少外源性营养物质的输入

外源性营养物质主要指的是来自湖泊外界的营养物质，据调查外源性营养物质仍然是湖泊富营养化的主要原因（全为民等，2003；王鹏，2004；周怀东等，2005），因此，绝大多数富营养化湖泊治理时，控制外源性营养物质的输入都是作为防治措施的第一步，进一步说也是基础性的工作（彭近新等，1988；古滨河，2005）。一般来说，外源性营养物质按照污染来源，又分为点源和非点源。

（1）点源控制

点源主要包括工业废水、城镇生活污水、污水处理厂与固体废弃物处理场的出水以及流域其他固定排放源，相对于非点源营养物质负荷而言，点源营养物质具有明确的、相对固定的物质来源。20 世纪 60 年代中期，西方发达国家开始着手控制点源污染，目前，关于点源控制的技术也得到了长足发展。总体来说其控制技术的核心是“末端处理技术”——废水处理和实施总量控制，严格执行规定的排放标准。

（2）非点源控制

美国清洁水法修正案（1997 年）将非点源污染定义为：污染物以广域的、分散的、微量的形式进入地表及地下水体。与点源污染相比，非点源污染时空范围更大，具有不确定性，其成分和产生的过程很复杂，因而防治十分困难（郑涛等，2005）。自上世纪 70 年代以来，国外对如何控制非点源污染进行了大量的研究，从非点源污染的产生规律、检测手段、控制方案以及综合管理等方面逐渐形成了一整套的体系（Carpenter et al., 1998）。我国于 20 世纪 80 年代早期开始，在一些重要的湖泊、河流设置研究基地，并取得了一定进展。（尹澄清等，1995；杨文龙等，1996；张毅敏等，2003；杨林章等，2005）。

（3）总量控制

环境总量控制简称总量控制，是指根据一个城市、地区或区域的自然环境和自净能力，依据环境质量标准，控制污染源的排放总量，把污染物负荷总量控制在自然的承载能力范围内（U. S. EPA, 1999）。20 世纪 60 年代日本和美国研究水质规划时，最早提出了环境污染总量控制的思想。这相比以前的单纯排污口控制显然是一个很大的进步，它主要是从量的角度，把水域看作为一个整体，根据水体功能要求和污染源的分布情况，预先推

算出达到该环境目标所允许的污染物最大排放量，然后通过优化计算确定分配到各污染源的排放量及其削减量，并确定治理措施，以达到改善水质、满足水环境质量标准的目的（梁博等，2005）。

美国的总量控制方法比较灵活，主要有季节总量控制和最大日负荷总量 TMDL（Total Maximum Daily Loads）。季节总量控制是为了适应水体不同季节不同用途对水质不同的标准要求，如一年中水生生物产卵期就实行了严格的溶解氧标准，而在其他时间就实行另一水质标准。美国有一些州还实行一种“变量总量控制”，它以河流实测的同化能力来变更允许排放量，而不同于根据历史资料以界定条件而得出固定的排污限量。

最大日负荷总量（TMDL）的定义最早由美国环保局 1972 年提出，即在满足水质标准情况下，水体能够接受的某种污染物的最大日负荷量。它包括点源污染和非点源污染之间的分配，同时还需要考虑安全临界和季节性变化（U. S. EPA, 1999）。以最大日负荷总量为技术核心的 TMDL 计划在美国得到广泛实施，控制成效显著。

我国的总量控制研究始于 20 世纪 70 年代，以制定松花江 BOD 总量控制标准为最早的探索和实践。接着在“六五”、“七五”、“八五”计划中相继开展了相关研究，在“九五”计划和 2010 年远景目标中，实施污染物排放总量控制被列为环境保护的重大举措。但是，我国的总量控制研究主要针对的是点源污染，不仅在水环境总量控制中没有包括非点源污染物部分，而且目前还没有任何制约非点源污染的相应政策（曹丽萍等，2004）。而且，目前我国的总量控制模型中还没有对引起水体富营养化的氮磷实施总量控制。

2. 减少内源性营养物质负荷

内源性营养物质负荷主要指的是在湖泊沉积物中富集的营养物质。现在越来越多的专家和学者认识到，湖底沉积物中堆积的大量污染物向水体释放是导致湖泊沉积物一个不可忽视的来源（孙亚敏等，2000；莫孝翠等，2003）。从近年来国内外研究结果和工程实践来看，对内源性营养物质负荷控制的措施主要有以下几方面。

（1）物理措施

底泥疏浚的目的主要是通过底泥的疏挖去除底泥中所含的污染物，清除污染水体的内源，减少底泥污染物向水体的释放。一般分为干湖疏浚和带水疏浚。

干湖疏浚是在水抽干情况下进行作业的，这种方式可以彻底清除上层污泥，并且施工精度高而且成本较常规挖泥船小，但是干湖疏浚一般只能应用于小型湖泊中。1998 年南京玄武湖采取了该方法对湖区 85% 的地方进行了湖底清淤，平均清淤 30 cm，施工精度 ± 5 cm，直接成本 40 元/ m^3 （李源，1998）。但是在疏浚后 7 个月，水体磷含量逐步升高，疏浚效果丧失（范成新等，2004）。

带水疏浚较干湖疏浚应用更广泛。我国的杭州西湖和无锡五里湖（罗清吉等，2003），以及日本的諏访湖（Ogiwara et al., 1995）、荷兰的 Kelemeer 湖、瑞典的 Trummen 湖（Sebetich et al., 1997）都是采取的此方法。但是我国的西湖、五里湖和日本的諏访湖在疏浚后，良好水质保持效果都不长，在较短时间内又恢复到疏浚前的水质状态。欧洲的湖泊底泥疏浚效果较好，但是其耗费资金却是巨大的，如荷兰的 Kelemeer 湖，350 hm^2 的湖区耗费了 1.1 亿美元。

这种措施一般应用于水深较小的小型湖泊，主要方法是在湖泊底部安装曝气装置，定期或不定期的采取人为活动使湖底深层曝气而补充氧，主要目的是使水—底泥界面的表面

尽量不出现厌氧层，保持有氧状态，以抑制底泥中磷向水体释放。

但是该方法的受限条件多，耗费资金大，所以，目前在湖泊富营养化防治中，只有荷兰和英国的一些国家应用，效果也较好（彭近新等，1988），我国于1999年在红枫桥水库开展了大型曝气系统的示范工程（周怀东等，2005）。

针对相对封闭的浅水型湖泊，在外源负荷相对控制的前提下，国内外许多湖泊以引水工程来防治湖泊富营养化。其目的是增加湖水的流速，加快湖水的交换，同时对含营养物质较高的湖水起到一定的稀释作用。我国在这方面的工程实践开展得较早。

南京玄武湖的引水工程六十年代初就已经竣工投入使用，每年劳动节和国庆节左右进行间断性的提水冲污。引水后溶解氧升高比较明显，但是高锰酸钾指数、总氮和总磷指标却比引水前要高出许多（张丹宁，1996），说明富营养化现状在引水后不仅没有得到改善，反而有加剧的趋势。

在“水华”爆发的高峰期，水体藻类严重堆积，为了能有效清除湖面浮藻，必须采用机械除藻的方法，将大量藻类移出水体生态系统，以避免对水体生态系统造成进一步的伤害。传统的方法就是直接用收藻船来收集藻类（陈静等，1999）。

现在一些学者开始研究用超声波的空化效应抑制自然水体中藻类的生长（Lee et al. , 2001）。超声波对藻类的即时去除是应用超声波的机械效应，即超声波在媒质中产生的高压爆破、射流、冲击波等效应对藻类的细胞结构特别是气胞结构引起的强烈破坏（王波等，2005）。这种方法反应速度快，对水体不造成其他负影响，但是目前主要还是应用在饮用水的生产过程中，如水厂，还较少应用到自然水体中去。

（2）化学措施

向水体中投放化学药品，利用铁盐、铝盐等其他盐类与水中无机磷酸盐的化学反应，如吸附或絮凝作用，使水中的磷得以沉淀从而控制水体富营养化。但是有研究指出，沉淀下来的含磷化合物有可能在还原环境中重新活化，成为潜在的污染源（周怀东等，2005）。

目前，国内外普遍采用絮凝、抑制、杀藻和综合等方法进行化学除藻（边归国，2004）。化学药品可以快速杀死藻类，但是死亡藻类所产生的二次污染及化学药品的生物富集和生物放大对整个生态系统的负面影响较大，而且长期使用还会产生抗药性。所以一般除应急以外，化学药品不推荐使用。

（3）生物措施

“生物操纵”（biomanipulation）概念最早由Shapiro等人于1975年提出（Shapiro et al. , 1975），也就是以改善水质为目的的湖泊水生生物群落管理。20世纪80年代开始，欧美各国在富营养化湖泊的治理中，开始尝试采用以改变鱼类组成（即改变其多度）的生物操纵来调整湖泊营养结构和促进水质的恢复（宋国君等，2003；刘春光等，2004）。生物操纵包括许多不同方法克服生物限制，以加强对浮游植物的控制，其中归纳起来主要有两种：“经典”生物操纵和“非经典”生物操纵。

“经典”生物操纵是建立在认识“凶猛鱼类—食浮游生物鱼类—浮游动物—浮游植物”这一水域生态系统食物链的基础之上（McQueen et al. , 1986）。认为只要放养凶猛鱼类，就可以控制食浮游生物鱼类的生物量，进而促进浮游动物的种类和数量，那么就可以相应地加强浮游动物对浮游植物的牧食压力，同时也可以降低食浮游生物鱼类在捕食底栖

动物时所引起的对底泥的搅动，减少底泥中营养物质的再悬浮。

“非经典”生物操纵（刘建康，1999）是由我国学者在研究武汉东湖的具体问题时产生的。这种方法认识到食物链的复杂性，因此，针对东湖的主要藻类——微囊藻，直接放养将其作为食物的滤食性鱼类（鲢、鳙），通过鱼类的直接牧食以减少藻类的生物量，从而达到控制湖泊藻类的目的。在东湖 28 km² 的试验区内，通过 16 年的检验，证明这种方法是成功的（刘建康等，2003；崔福义等，2004）。现在还有一些学者开始做实验研究直接放养浮游动物及其对藻类的控制作用（韩士群等，2006）。

高等水生植物在湿地生态系统中的地位和作用始终是第一位的，它的破坏往往导致生态系统的失衡，甚至崩溃，因此，有许多学者尝试从高等水生植被的恢复着手，来控制富营养化和抑制藻类爆发。

高等水生植物对控制富营养化的贡献主要表现在大量吸收营养物质、抑制底泥营养物质的溶出、与藻类的竞争关系这三大方面。国内外许多试验都已经证实了高等水生植物对富营养化控制的作用。苦草、狐尾藻、伊乐藻等沉水植物对总氮和总磷的吸收率可达 75% 和 85% 以上（宋福等，1997）。在太湖水面放养的 1 hm² 凤眼莲，在 7~8 月间，每天增长 5~7 t，可分别提取水中的氮约 8~11 kg，磷 1.3~1.8 kg（濮培民等实验小组，1993）。还有国内外的学者研究，凤眼莲、水花生、水浮萍、满江红等水生植物都对不同的藻类存在着克制作用（杨清心，1996）。

我国学者开始尝试水生植被的重建和恢复实验研究，先后在武汉东湖的水果湖、汤林湖和后湖三个示范区进行实验，并取得了一定的成效。如：莲（*Nelumbo nucifera*）、芦苇（*Phragmites communis*）、菱（*Trapa* sp.）和苦草（*Vallisneria* sp.）在三个示范区均恢复成功。

但是这些实验均是停留在物种恢复的层次上面，主要是从生物的角度去考虑高等水生植被的恢复，而没有从生态系统结构、功能的角度，结合生境去综合考虑高等水生植被恢复对于水体富营养化防治的作用。

二、太湖水体富营养化的研究现状

（一）太湖流域生态系统的特点

从系统科学和生态学的角度来看，太湖流域系统具有如下特点：①是一个自然-人工复合系统；②物质迁移过程复杂；③为一分布参数系统，其氮、磷污染物的空间分布具有分带性，不同水域富营养化发展速度不均。

1. 太湖流域生态系统是一个自然-人工复合系统

太湖流域具有悠久的开发历史。据史书记载，东周秦汉时期，太湖流域就已开始兴建农田水利工程，至两宋时期，太湖流域已成为全国农业发展程度最高的地方，有“苏湖熟，天下足”的说法，并且人口密集、商贸发达，被誉为“上有天堂，下有苏杭”。

20 世纪 80 年代以来，开发力度更大。目前太湖流域是中国人口密集区和土地高度集约化利用地区，土地面积只占全国的 0.38%，人口和国民生产总值分别占到全国城市的 4.2% 和 11%，表明该流域土地开发强度远远超过全国平均水平。耕地垦殖指数高达 30.6%，为全国平均水平（9.9%）的 3 倍；农业集约化程度高，化肥消费量占全国的

1.3%，粮食产量占全国的3%，是高投入、高产出区；乡镇企业蓬勃发展，城镇人口数量增加，土地利用结构发生了巨大的变化，建设用地在各种土地利用中的比重不断增长，居民点、独立工矿用地、交通用地及旅游占用了大量土地；渔业养殖的规模也较大，主要分布在东太湖地区，养殖面积达2833 hm²。

由于长期的开发利用，太湖流域生态系统已深深地打上了人类活动的烙印，是一个典型的人工-自然耦合系统。农田、建设用地、林地、草地、水体等土地利用类型的格局在很大程度上决定了系统的空间结构，并影响着系统中物质（水分、养分等）的传输过程和系统的功能。如太湖湖岸总长405 km，在天然情况下，大部分地段并不是水陆截然分开，而是形成一条水陆交错带，其中高等植被繁茂，物种丰富，就像一张滤膜，对进出的营养物质或污染物起着净化作用。但目前，由于环湖大堤等防洪工程的修建，湖岸的天然状况已经改变，如江苏省辖区内湖岸线总长334.36 km，其中约217 km的地段都筑有环湖大堤。环湖大堤使水陆截然分开，原有的植被缓冲带消亡，陆源污染物直接入湖，加大了水体的负荷。

2. 太湖流域生态系统物质迁移过程复杂

太湖水系并无严格的上下游之分，周边河道皆可向太湖补充水量，也可接受太湖排出的水量，大部分河道无常年固定的流向。当太湖处于高水位期，水流由太湖排向周边水网；而太湖在低水位期，河网地带的水流向太湖汇聚，构成了一个具有“辐合-辐散”特点的复杂水文系统。

作为泥沙和养分等物质的载体，水流的这种“吞吐”特性使水陆间物质交换过程非常复杂，物质的源和汇及运移方向经常变换。当四周水流沿河道和坡面向太湖辐合时，周边陆地为物质的源区，太湖水域为其汇区；当太湖水流向四周辐散时，太湖就成了物质的源区，周边河网则成了汇区。因此，既不能简单地将太湖西部的丘陵区视为整个流域物质的源区，也不能将流域内产生的所有污染物质都算作太湖的负荷。

作为营养物质载体的水流在湖中的运移过程也十分复杂。除汛期受重力流控制外，太湖湖流以风生流为主，水流在湖内不是从西向东作简单的推进式运动，而是以多种相嵌套的风生环流为主，边界处还有反复的“吞吐”过程。这导致营养盐在湖中的迁移途径十分复杂、滞留时间较长。

在营养物质随水流迁移过程中，由于物理、化学作用，特别是高等水生植物的吸收固定作用，导致湖中不同地段水体营养盐浓度各异。在集中排污点附近，水体中氮、磷浓度较高，为多污带；随着水流迁移，水体中氮、磷浓度降低，进入中污带；在太湖出口附近，水体氮、磷浓度进一步降低，形成寡污带。如近40年来，由于污染物排放强度较高，梅梁湾一带氮、磷营养盐浓度持续增高，但在太湖水流主要出口处的太浦河中，氮、磷浓度虽有所增加，但其幅度要远小于前者。

3. 太湖流域生态系统是分布参数系统

太湖水体的营养状况呈现出较明显的空间分带性，从西北侧向东南侧富营养程度依次变低。以1997年夏季为例，太湖西北侧的竺山湾富营养程度最高，为重富营养；从竺山湾向东南，至拖山—焦山一线的水域为富营养；再向东南，拖山—焦山一线与漫山岛—平台山—大雷山一线之间的水域为中-富营养，太湖南部的长兜港一带也为中-富营养；其余水域皆为中营养。从浮游植物生物量来看，历年来也以五里湖最高，东太湖最低。