

DOI: 10.5846/stxb201606281269

王志强,崔爱花,缪建群,王海,黄国勤.淡水湖泊生态系统退化驱动因子及修复技术研究进展.生态学报,2017,37(18):6253-6264.

Wang Z Q, Cui A H, Miu J Q, Wang H, Huang G Q. Research progress on the driving factors of freshwater lake ecosystem degradation and associated restoration techniques. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(18): 6253-6264.

淡水湖泊生态系统退化驱动因子及修复技术研究进展

王志强¹, 崔爱花¹, 缪建群², 王海³, 黄国勤^{1,*}

1 江西农业大学生态科学研究中心, 南昌 330045

2 江西农业大学理学院, 南昌 330045

3 江西科技学院, 南昌 330098

摘要:目前我国多数淡水湖泊污染、退化问题非常严重,诸多修复技术也已初见成效。影响淡水湖泊生态系统退化的驱动因子众多,既有生物因素也有非生物因素,它们之间相互联系,相互作用,且作用机理错综复杂。首先介绍了淡水湖泊生态系统退化的含义及形式;其次,分析、总结了淡水湖泊生态系统退化的驱动因子,从退化的生态学完整性意义和退化修复的技术手段上看,淡水湖泊生态系统主要受物理、化学和生物三大驱动因子影响,且基本遵循“环境变化-驱动力-压力(阈值)-状态-响应”原理;再次,在厘清湖泊生态系统退化驱动原理的基础上,从淡水湖泊生态系统功能模块和湖泊生态系统修复实践经验总结的角度出发,构建了淡水湖泊生态系统修复模块技术体系,并就湖泊富营养化和湖滨湿地生态系统退化修复的技术进行了讨论和对比;最后,对淡水湖泊生态系统修复的环境变化驱动因子的作用机制、作用途径和修复技术的长效机制等方面进行了展望。

关键词:淡水湖泊;生态系统退化;驱动因子;修复技术;研究进展

Research progress on the driving factors of freshwater lake ecosystem degradation and associated restoration techniques

WANG Zhiqiang¹, CUI Aihua¹, MIU Jianqun², WANG Hai³, HUANG Guoqin^{1,*}

1 Ecological Science Research Center of Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

2 College of Science, Jiangxi Agriculture University, Nanchang 330045, China

3 College of Science and Technology Jiangxi, Nanchang 330098, China

Abstract: At present, most freshwater lakes in China are severely polluted and degraded. In this regard, we have achieved considerable initial success using a number of restoration techniques. There are many factors that affect the degradation of freshwater lake ecosystems, including both biotic and abiotic factors. These factors are interrelated and interact with each other, and thus causal mechanisms are complicated. In this paper, we initially introduce the meaning and degenerate forms of freshwater lake ecosystem degradation. We then summarize the factors driving the degradation of freshwater lake ecosystems. From the perspectives of ecological integrity and degradation restoration techniques, freshwater lake ecosystems are mainly affected by three types of driving factors (physical, chemical, and biological), which essentially follow the “environmental change-driving force-pressure (threshold)-state-response” principle. We then construct a technical system for a freshwater lake ecosystem restoration module, based on functional modules of freshwater lake ecological systems and practical experience of lake ecosystem restoration, to clarify the driving principle of lake ecosystem degradation, and subsequently discuss and compare degenerate restoration techniques in water eutrophication and freshwater lakeside wetland ecosystems. Finally, we present an outlook of the long-effect mechanism of remediation technology, and the future

基金项目:国家科技支撑计划项目(2012BAD14B14);江西省教育厅青年基金项目(JJ1412)

收稿日期:2016-06-28; **网络出版日期:**2017-04-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hgqjxauhq@sina.com

mechanisms of action and pathways of the driving factors of environmental change in freshwater lake ecological restoration.

Key Words: freshwater lake; ecosystem degradation; driving factor; repair technology; research progress

我国是世界上湖泊较多的国家之一,面积在 1km^2 以上的湖泊有 2759 个,其中约有 $1/3$ 是淡水湖泊,面积在 10km^2 以上的淡水湖泊有 63% 分布在长江中下游地区,该地区淡水湖泊具有面积大、湖滨带宽、水浅、换水周期短及人类经济社会活动干扰强度大等特点^[1-2]。20 世纪 50 年代初,鄱阳湖、洪湖、太湖和东湖都是我国典型的“草型”湖泊,湖泊受人类干扰较轻,水质处于贫营养状态,水草生长茂盛,浮游生物极少,水生植被种类繁多^[3-4]。但大规模围湖造田和超规模围网养殖^[5-7],直立驳岸、港口码头、河堤兴建^[8],旅游业的大力发展,围绕流域水渠网络体系集聚而来的化工、化纤和耗水型巨大工业落地生根^[9],土地的不合理开发利用及农田化肥农药的过量施用等人类经济社会活动^[10-11],造成了大量的污染物被直接排放到湖中,湖泊水体水质恶化、水生动植物急剧减少,湖泊、湖滨湿地生态系统结构扭曲^[12-13],生态资源物种的多样性减少甚至消失^[14-16]。

我国大多数淡水湖泊已经出现了不同程度的富营养化,富营养化是湖泊生态系统退化的表象特征之一,淡水湖泊生态系统退化是一个复杂的生命演化过程,不同演化发展阶段中有正、负反馈作用,它们相互影响、相互作用^[4,7-9]。淡水湖泊生态系统不仅是人类获取资源的宝库,而且还是一个重要的自然环境系统,具有调节气候、净化污染、保护生物多样性、自然资产价值和人文价值多种功能^[17]。因此,研究淡水湖泊生态系统的退化机理及其修复技术,对维护淡水湖泊生态系统的稳定和发挥其应有的功能具有重要意义。

1 淡水湖泊生态系统退化的内涵及退化形式

1.1 淡水湖泊生态系统退化的内涵

淡水湖泊生态系统退化是指淡水湖泊生态系统的一种逆向演变过程,是系统内在物质循环、信息传递、能量流动过程中某一环节存在脱节、累积、不协调,系统处于一种不稳定或失衡状态,逐步演变为另一种与之相适应的更低水平状态或过程,从而在一定程度上丧失了自身的调节功能和应有的系统活力。退化湖泊生态系统表现出抗人为和自然风险能力较弱、系统自身缓冲能力不强以及系统的敏感和脆弱性较大的特点^[6-7]。淡水湖泊生态系统退化也就是湖泊生态系统从稳态转换成低稳态的过程,或是多个低层稳态并存的状态,当外界各种干扰总和大于其某一稳态阈值时,系统将会发生不同稳态之间的跳跃变迁^[18],从高层稳态直接转变到低层稳态,这是一种突变退化,当然也存在缓慢退化的过程。

1.2 淡水湖泊生态系统的退化形式

淡水湖泊生态系统的退化、转换过程复杂,表现形式不一。主要表现形式有富营养化、湖滨湿地退化和生物资源多样性丧失。

1.2.1 富营养化

富营养化现象是淡水湖泊退化的最重要的形式之一^[19],淡水湖泊富营养化阶段转换存在一定阈值,阈值反应淡水湖泊生态系统发生状态变化的临界点^[20]。在实际富营养化界定中,因富营养化阈值临界点的核算方法不一,使得临界阈值存在微小差异^[21-22]。淡水湖泊富营养的出现是其超过某一阈值导致的,对于导致临界阈值的原因,有研究表明是有机物积累到一定程度后的必然结果^[23],但目前更多的研究表明是营养物质的输入而导致的突变性退化^[24-25]。湖泊富营养化实质上是湖泊生态系统长期在人为胁迫和短期强扰动下,湖泊由“草型”清水稳态向“藻型”浊水稳态转变的过程,是水体缓慢恶化或是突变的结果,是在一系列的外界环境变化胁迫下,湖泊生态系统为适应环境胁迫而呈现出系统逆向演变过程,是系统原有结构瓦解和功能丧失,也是系统朝着低层系统服务功能转变的过程^[26]。

1.2.2 湖滨带退化

湖滨带退化是淡水湖泊生态系统退化的又一形式。湖滨带作为陆地和湖泊之间的过渡带,是健康湖泊生

态系统不可缺少的有机组成部分,属于生态交错带的一种。湖滨带的空间结构在横向、纵向和轴向分布上都表现出明显的圈层结构特点,具有污染物截留与净化、捕集和抑制藻类、提高湖滨带的生物多样性、提供野生动植物栖息地、控制沉积和侵蚀、调蓄洪水等 6 大功能^[27]。但随着人口增加、工农商业的发展和人类不合理开发活动的加剧,尤其是湖滨带的围湖造田、沿湖滨带区域性养殖的超负荷发展及旅游业的过度开发等都加剧了湖滨带的退化,但退化的过程和程度各湖泊差异较大。概括起来主要有逐渐退化、间断不连续退化、跃变退化、突变退化和复合退化 5 种形式,淡水湖泊沿哪种模式退化,一方面主要依湖泊外界环境变化的特性和干扰强度而定^[7];另一方面依湖滨带的空间异质性而定^[28]。因此,在同一外界环境胁迫下,不同的湖滨带其退化的模式不同,其治理修复模式也不同。

1.2.3 生物多样性功能丧失

目前,我国五大湖区的淡水湖泊都在不同程度上出现了由“草型”向“藻型”湖泊转变的迹象,淡水湖泊的浮游生物增加,水生植被种类急剧减少,水生植物分布结构不平衡,优势种群也出现不同程度的演变替代。研究表明,过去的 200a 里,梁子湖泊的浮叶植物和挺水植物群落一直处于不断减少状态,沉水植物群落逐渐成为湖泊的主体群落,水生植物的多样性功能在逐步丧失^[4]。同样湖泊动物群落也出现同样的态势,但因湖泊差异而导致的动物群落多样性丧失的差异较大。对长江中下游地区四种不同类型(草型、天然养殖、施肥养殖以及城市湖泊)的 10 个湖泊的大型底栖动物群落结构和多样性进行研究表明^[29],不同类型湖泊底栖动物的密度、生物量、多样性及特征种类均存在显著差异。随着营养水平的增加,底栖动物群落逐渐被小个体的耐污种类所主导,底栖动物群落趋于简单化的演替趋势。另外作为具有强大初级生产力的附植生物群落(包括附着藻类)的大量出现,对淡水湖泊的生态系统合理结构和正常功能的发挥也产生了强大胁迫,作为水生动物重要的食物来源,这无疑大大减少了食物网的多样性^[30]。导致生物多样性功能丧失的原因众多^[31],既受动物群落自身内部演替的影响,也受外部环境因子、工农业、养殖业、城市化的快速发展和人类活动加剧的影响^[5-9],有生物因素也有非生物因素,各因素之间联系紧密,作用途径错综复杂。

淡水湖泊生态系统多样性功能的丧失主要是通过水生植被多样性减少、水生动物和藻类优势种单一等一种或多种情况同时发生而造成的。因此,有必要进一步研究淡水湖泊生态系统退化的驱动因子及影响机制。

2 淡水湖泊生态系统退化的驱动因子及其胁迫影响

淡水湖泊生态系统退化实质上是在自然和人为因素的外界扰动下而发生的功能退化,然而淡水湖泊生态系统退化的成因及驱动机制未能完全得到科学识别。因此,对淡水湖泊生态系统退化的生态驱动因子进行归纳分析,并探明这些驱动因子的作用机理,是修复退化淡水湖泊生态系统的必要前提。

2.1 驱动因子分析

淡水湖泊生态系统退化的生态驱动因子,根据生态因子的性质可分为生物因子和非生物因子两类。生物因子会对淡水湖泊生态系统的营养链级、生态位产生直接影响^[32-33],在较小空间、较短时间上引起生态系统的剧烈变化;而非生物因素(包括湖泊地理位置、连通性、湖区大小、外源性氮、磷等负荷的输入、气候变化、风浪、湖泊水位等)可以在较大时间、空间尺度上引起生态系统的缓慢变化。由于滇池特殊的地理位置和地形构造,因此,与太湖和巢湖相比,滇池的生态系统退化速度更快的原因也可见一斑^[34]。要厘清淡水湖泊生态系统退化的驱动因素,尤其要确定核心驱动因素,是我们进行淡水湖泊生态修复的基础。

而对驱动因子定性、定量分析,确定其核心(主导)驱动因子对淡水湖泊生态系统退化的影响备受争议。Schindler 对加拿大湖区的大规模实验显示,磷的输入量是湖泊退化的主要驱动因子^[35],据此,随后欧美大多数湖泊退化治理主要以“削减磷负荷量”为主要策略^[36-37],而低估了氮在水体富营养化中的作用,即使在保持水体磷盐输入量不变的前提下,通过对丹麦 35 个淡水湖泊研究时发现,氮与磷在水体富营养化的贡献上几乎具有同等地位^[38-39]。同时核心驱动因子也并非呈现单一特性,有时是多种生态驱动因子综合作用的结果,因子之间还可能存在传递性。有研究表明,星云湖枝角类群落结构显著退化主导驱动因子是湖泊生产力的变化

和富营养化综合作用的结果^[40],富营养化水平、水深等因子影响光照条件,而光照条件又是驱动湖泊生态系统功能恢复的核心因子^[41]。因此,首先需要对影响湖泊生态系统退化的核心因子进行考察、度量,是进行合理修复退化淡水湖泊生态系统的关键所在。

研究表明,物理、化学和生物完整性是指示、评价湖泊生态系统健康的关键,指标值的大小可以直接反应湖泊生态系统退化、变化的程度,也被广泛使用在湖泊健康修复评价中^[42-43]。淡水湖泊生态系统退化的驱动因子既有生物因子也有非生物因子,无论如何分类,何为核心因子,显然都是与人类文明的发展历史水平息息相关,但从淡水湖泊生态系统修复技术类别和健康湖泊评价的完整性的角度上分类,认为淡水湖泊生态系统退化的驱动因子主要有物理因子(围湖造田、直立岸堤、兴修水利、风浪暴雨、水文、地理区位、自然环境条件等)、化学因子(各类营养盐、有机物、重金盐、细菌等)和生物因子(微生物、鱼类、水生动植物等)三大类。因此,识别不同淡水湖泊生态系统退化的驱动因子,并厘清各驱动因子对淡水湖泊生态系统退化的作用机制、影响途径,可为修复退化淡水湖泊生态系统提供重要依据。

2.2 驱动因子对淡水湖泊生态系统的胁迫影响

根据前面的分析,本研究认为淡水湖泊生态系统退化的驱动因子可分为物理因子、化学因子和生物因子三大类,各驱动因子在淡水湖泊生态系统退化中扮演了不同的重要角色,虽然各种驱动因子影响淡水湖泊生态系统退化的作用机理和过程基本遵循“环境变化-驱动力-压力(阈值)-状态-响应”原理,但也存在一些差异,探明各因子的作用机理及影响机制,为我国湖泊生态退化修复提供思路^[44-45]。

2.2.1 物理驱动因子对淡水湖泊生态系统的胁迫影响

物理驱动因子对淡水湖泊生态系统退化的影响主要表现在:围湖造田、直立岸堤、兴修水利、风浪、暴雨、水文、地理区位、自然环境条件等外在环境的变化,从而导致湖泊的直接或间接的系统退化,但各驱动因子导致淡水湖泊生态系统退化的作用机理不尽相同。湖滨带内围湖造田造成了湖滨带面积大量萎缩及生物多样性急剧降低,湖滨带生态服务功能下降将导致湖泊生态系统逐渐退化^[29]。修建防洪岸堤、大堤和水力发电站等是通过阻断了水陆生态系统的物质循环、能量流动和信息传递,破坏了湖滨带原有生态系统结构的连续性和完整性,从而也造成了湖泊生态系统退化^[31]。

风浪、暴雨对淡水湖泊生态系统退化的影响机理主要表现为3个方面^[31]:(1)风浪对湖泊水生植被的机械性损伤;(2)风浪对湖滨带水质、底质的扰动而带来湖滨带水体透明度降低;(3)风浪对岸堤的淘蚀。由于风浪引起的浪淘蚀、潮流等在堤岸边要比湖心的破坏性作用要大^[46],风暴对湖泊的退化作用极具弹性^[47]。

在气候变暖趋势下,水文驱动因子变得极为敏感^[48],尤其是在人为调水工程的干扰下而将引起水文节律的改变,从而对沿途湖泊生态系统产生重大影响^[49-50],水文环境在一定程度上控制了生态环境系统的演化方向和生态结构与功能的转变^[51]。另外,湖泊低(高)水位时期、持续时间长短、快速波动的水情调整分配格局也将引起湖泊湿地退化、生物多样性锐减等退化问题^[52-53]。

2.2.2 化学驱动因子对淡水湖泊生态系统的胁迫影响

化学驱动因子导致淡水湖泊生态系统退化的作用机理,一方面是各类营养盐对淡水湖泊生态系统的胁迫影响而导致淡水湖泊富营养化,最终引起许多湖泊水生植被消亡或是覆盖度下降,使得许多原先以水生植物为主的“草型”湖泊转化为以浮游植物为主的“藻型”湖泊生态系统,淡水湖泊生态系统服务功能下降^[54-55],但是营养盐的输入是有阈值的,超过一定阈值时湖泊生态系统的功能几乎丧失。对丹麦204个湖泊夏季TN、TP含量的调查时发现,TN、TP浓度分别达到0.1mg/L和2mg/L时,湖泊中的水生植物的覆盖度几乎为零^[56],由于藻类对水生植物的抑制作用,因而对水生植物的影响TN大于TP^[57],并且富营养化程度越严重,水生植物生长受阻越大^[38,58]。另一方面营养盐的形态和浓度也对淡水湖泊的生态系统产生胁迫,较为典型的就硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)和铵态氮,随其浓度的升高,将对水生植物产生不利影响^[59-60]。湖泊富营养化与湖泊生态系统退化之间存在一定的演替机制,因为湖泊富营养化后导致一系列的生态系统异常响应,出现生物多样性减少,系统结构破坏,这将进一步导致湖泊富营养化,导致这种演替的原因可能是水生植物与浮游植物利用营养盐

的效率不同^[61]。

2.2.3 生物驱动因子对淡水湖泊生态系统的胁迫影响

生物驱动因子对淡水湖泊生态系统的胁迫影响主要来自于湖泊生物和动物两类,它们可以从两个层面对淡水湖泊生态系统产生胁迫影响,一方面是由于湖泊的外界环境发生缓慢或是激烈的变化而导致对淡水湖泊生物(水生生物和水生动物)的生长、发育和生存威胁的影响,迫使湖泊生物的生态系统功能出现自身缓慢或激烈退化。另一方面是淡水湖泊外来物种的入侵而引起的生态系统层次、系统内部的生物群落层次、生物属和种的层次结构和功能的变化而使得湖泊生态系统功能退化^[62-65]。

环境扰动对湖泊生态系统的影响则是多方面的,间接性的,淡水湖泊的外界环境对湖泊生物的影响,比如对水生植物的影响,主要通过风浪、光照、营养盐和其他可能影响因素,其作用途径类似于物理驱动因子对淡水湖泊生态系统的作用,但影响最大的是营养盐对水生植物的胁迫而导致水生植物自身生态系统功能的退化,如果营养盐超过了一定阈值,则将对淡水湖泊的水生植物造成毁灭性的退化。湖泊生态系统中草食性鱼的牧食、底栖性鱼类、浮游捕食性鱼类等扰动也都会成为生态系统退化的重要因素,通过调整鱼类种群结构,减少草食性鱼类,增加食肉性鱼类,减轻水草牧食,有利于水草繁殖生长^[58,66],提高湖泊生态系统功能。

外来物种入侵减少系统中生物多样性是淡水湖泊生态系统退化的主要驱动力之一^[67],生物入侵的途径主要有两种,一是自然入侵。即入侵物种随着气候变化,跟着风、水流、动物迁徙等侵入;二是人为引种。外来入侵物种对湖泊生态系统退化的作用机制主要是改变原有湖泊生态系统结构、层次和优势物种,入侵物种占据优势后对湖泊造成跳跃性突变退化^[64]。

3 淡水湖泊生态系统修复的基本原理

淡水湖泊生态系统修复是指在原有湖泊生态系统的基础上通过改变湖泊生态系统结构,使得其功能发生某一部分或某些部分变化来实现,也就是通过减轻环境要素的胁迫,通过“环境变化-驱动力-压力(阈值)-状态-响应”原理来传导,使得原淡水湖泊生态系统的功能获得部分或整体的恢复,乃至现有湖泊朝着“草型”湖泊方向发生根本性转变的复杂过程^[44-45]。也有研究表明,淡水湖泊水生生态系统修复是指通过一系列的自然或人工措施将已经退化的水生生态系统通过改变系统生态环境因子使其恢复或修复到原有生态系统服务水平,使得湖泊水生系统具有持续或更高的生态忍受性,从而减缓湖泊生态系统的退化时间和程度,以维持或改善湖泊生态系统自身的动态平衡^[58,69]。对淡水湖泊生态系统修复,不仅仅是对湖泊湖区生态系统本身的修复,对湖泊湿地系统、流域管理系统、入湖河口系统的修复也至关重要,修复采用的技术手段既有物理、化学措施,也有生物技术措施。不同的湖泊生态功能区和不同的湖泊生态环境,其湖泊生态系统修复的原理和措施不同。例如对淡水湖泊的湿地修复应遵循“控源截污+外源性生态拦截(带状、前置库和线状)+内源性生态萃取+湖泊流域管理”相结合的基于3种技术手段综合治理的基本原理^[5,33,69]。同时淡水湖泊生态系统修复也不是对系统整体全部的修复,而是对系统进行差异化、分区式的修复。例如滇池治理方案中提出“五区三步,南北并进,重点突破,治理与修复相结合”新策略和“南部优先恢复、北部控藻治污、西部自然保护和东部外围突破”的总体方案是典型体现^[34]。针对不同湖区的水质、水生生物和水文条件的差异,按照“修复生境条件-恢复水生植物-调控系统结构”的总体思路,提出了过水通道水文调控与生态修复、湿地自然保护区保育等综合措施修复湖泊退化生态系统^[70]。因此,退化淡水湖泊生态系统修复是在厘清湖泊退化的环境变化影响因子后,理解了退化驱动机制,针对湖泊系统不同区域,采取一系列物理、化学和生物生态技术措施,对淡水湖泊生态系统进行系统综合生态修复的复杂过程。

4 湖泊生态系统修复技术

修复退化淡水湖泊生态系统是一项系统复杂的生态工程,其修复技术体系既有共性部分也有个性部分。因此本文站在淡水湖泊生态系统功能模块的角度和湖泊生态系统修复实践经验总结的基础上,构建了淡水湖

泊生态系统修复模块技术体系图(图1)。对退化的淡水湖泊生态系统进行修复时,首先要对其进行考察、诊断,确定湖泊退化的限制因子,根据湖泊修复的目标确定修复方案。其次,就是要确定退化淡水湖泊生态系统各功能模块中的退化因子,根据修复方案利用多方位的物理、化学、生物-生态技术进行综合系统性修复。

淡水湖泊生态系统修复的技术方法众多,目前许多淡水湖泊修复技术也取得较多成功,但采用的措施很难取得良好持久效果,也未形成统一的、规范化的指标和标准。因此我们必须采取多方位的物理、化学、生物-生态修复技术综合修复退化湖泊生态系统。下面分别就淡水湖泊生态系统退化的主要形式,归纳总结了物理、化学和生物-生态修复技术,以“综合治理、技术集成、统筹管理和长效运行”为基本原则,在退化淡水湖泊生态系统修复时,应根据湖泊的实际情况,采用适合的修复技术,可多种方法相互整合、优势互补,因地制宜地进行综合生态系统性修复,为我国退化淡水湖泊生态系统修复提供重要参考。

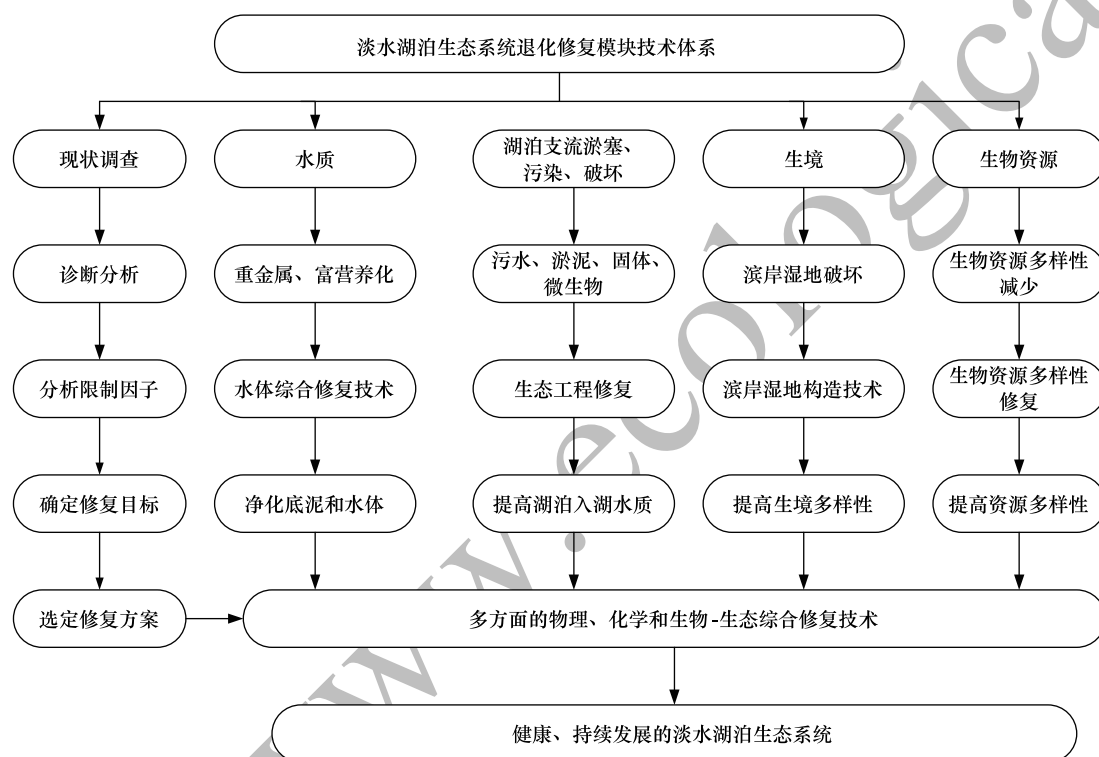


图1 淡水湖泊生态系统退化修复模块技术体系

Fig.1 Technical system for the restoration of ecosystem degradation in freshwater lake

4.1 富营养化修复

导致水体富营养化的氮、磷营养物质既有外源性输入又有内源性污染,解决富营养化问题是一项系统性复杂工程,去除藻类与控制其生长是富营养化水体修复与保护的重点。控制水体富营养化主要有湖泊湖区水体和湖泊流域水体的富营养化两方面,仅对湖泊本身富营养化修复难以根本修复,同时还应控制湖泊流域中流入湖泊的水质。因此,在归纳总结国内外对水体富营养化的控制技术的基础上,富营养化的修复技术主要可分为以下三方面。

4.1.1 物理方法技术

物理修复技术主要是利用物理工程的手段,改变湖泊生态系统的物理环境条件,进而达到修复湖泊生态系统的目的。物理修复是借助物理工程技术措施,清除底泥污染的一种方法,主要有疏浚^[71]、填沙、营养盐钝化、底层曝气、稀释冲刷^[72]、调节湖水氮磷比^[73]、覆盖底部沉积物及絮凝沉降^[74]等一系列措施,其中疏浚是最常见的方法。物理修复最大的优点是见效比较快。但这些技术只能治标而不治本。对湖泊流域水质的控制是控制湖泊富营养化的前提,在湖泊流域外源性污染物控制方面,主要集中在湖泊流域的生态系统工程治

理和建设上,主要有网格技术^[75]、前置库技术^[33]、流域河网水体生态修复工程^[76]、多级生态塘植物修复技术^[77]等多种工程措施,此类方法主要是通过多级“过滤”加强拦截和沉淀,增加流域无动力供养,同时配合适当的植物对流域的水域进行生态修复。

4.1.2 化学方法技术

化学方法修复富营养化湖泊主要从2个方面修复:(1)利用化学方法最大限度地控制水体中的营养盐的浓度,比如向湖区撒入石灰进行脱氮或是投入金属盐沉淀水中的磷^[78]。(2)通过投入化学药剂(如二氧化氯预氧化杀藻^[79]、注入硝酸钙控制技术^[80])给予杀藻或是通过控制生物菌剂增加水生植物对氮、磷的吸收能力。化学方法的即时效果最为明显,但容易造成湖泊水体的二次污染,且实施成本比较高,容易再次爆发“水华”现象,也是一种治标不治本的方法,常常作为一种辅助技术或应急控制技术。

4.1.3 生物-生态方法技术

生物-生态修复技术是对湖泊水生植被(挺水植物、浮水植物、沉水植物)和水生动物的修复、重构,通过一定的途径削减湖泊营养盐,以达到改变湖泊生态系统的结构及功能,使得退化淡水湖泊生态系统朝着草型湖泊转变。生物-生态修复技术主要体现在两方面:

首先是水生植物修复富营养化方面,主要方法有(1)组建、重建水生高等植物群落修复技术。通过利用大型浮叶类(荇菜、金银莲花、二角菱等)、沉水类(穗花狐尾藻、轮叶黑藻、微齿眼子菜、大茨藻等)、漂浮类(凤眼莲、紫萍、满江红等)和挺水类(荻 *M. sacchariflorus*、水菖蒲、灰化苔草等)水生植物修复退化淡水湖泊生态系统^[81],选用此法应根据湖泊特征和富营养化的程度,同时考虑水生高等植物的物种特征和繁殖方式的差异,因地制宜地选择,以构建合理的水生高等植物修复体系。(2)浮床修复技术。利用浮床陆生植物治理富营养化水体是一种新颖的技术路线。该技术是以水生植物群落为主体,以水体空间生态位和营养生态位为原则,是利用陆生生物根系的吸收、降解、富集营养盐,以削减水体中的氮、磷等污染负荷^[82],这种方法不会造成二次污染,具有易管理、效益好的优点。(3)以藻控藻和藻类资源化技术。水网藻的生长状况与富营养化水体中氮、磷含量之间高度正相关,表明水网藻对富营养化水体有巨大的净化潜力^[83]。由于浮游植物是初级生产力的主体,与其它水生高等植物相比,藻类最适宜在富营养化水环境中生长,同时借助藻类提取技术的开发应用,强化藻类资源化,届时此方法将有较好的前景,但技术和降低资源化成本是关键。(4)微生物控制技术。生物修复技术中可利用的生物包括微生物(细菌、真菌)、原生动物和高等动/植物等多种生物,其中微生物对水体中污染物的降解起主要作用。这类技术的使用效果明显、效益好,但可能会造成水体的第二次污染。这类技术的原理是利用复合微生物菌剂在生长过程中吸收 N、P 营养盐从而使藻类的生长受到竞争抑制,对藻类有广谱的抑制作用,对严重富营养化的湖泊效果更佳^[84],其优点是经济、快速和无二次污染。还可以针对受污染河流、湖泊等大水体的特点和治理技术工程实施的可行性,采用原位修复技术则更具经济和技术合理性。例如通过添加聚天冬氨酸,可以增加香根草对湖泊水体中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN 的吸收,对 TN 的去除效果最为明显,达 83.8%^[85],这类技术的使用效果明显、效益好,但可能会造成水体的第二次污染。

其次是水生动物、微生物修复富营养化方面,主要技术有(1)利用食藻类鱼类或浮游动物技术。投放食珠鱼类,即生物操纵技术或浮游动物来控制藻类。生物操纵主要是通过放养、喂养幼鱼类,吞食各类水藻。如 2001 年春季在巢湖投放一定量的各种食藻鱼,夏季时投放区域的污染程度明显减轻,水质得到了明显改善^[86]。采用大量培养轮虫、罗非鱼吃掉藻类并结合浮游生物滤清器使用,以达到灭藻的目的。这类方法易操作、无污染,经济效益好。(2)水生植物+放养鲢、鳙技术。该技术是通过鱼类结构调控来促进浮游动物大量增殖以抑制藻类生长,促进沉水植物恢复与发展,对藻类和营养盐有较好的修复^[87],适合山湖水系湖泊,经济效益好,但系统工程量大、种植水生植物长期效果难以显现。

4.2 湖滨湿地退化修复

湖滨湿地是陆地和湖泊水域之间的生态交错带,具有明显的边缘效应,拥有丰富的物质、养分和能量流动作用,在抵御洪水、调节径流、蓄洪抗旱、降解污染、调节气候、控制土壤侵蚀、滞淤造陆及美化环境等方面具有

其它系统不可替代的作用。但近些年来,由于缺乏合理的生态规划和人类活动的加剧,多数淡水湖泊的湖滨岸带出现了不同程度的退化,造成湖滨岸带生态系统功能退化,水生植物消失,生境片面化严重,水生态环境恶化。对湖滨岸带进行修复主要是根据湖滨岸带的构成和生态系统特征对其进行修复和重建。主要技术有物理工程和物理-生态生物工程技术两类,但更多的湖泊滨岸带修复实践证明,物理生物生态工程技术是主流生态修复技术。

4.2.1 湖岸(畔)景观带

湖岸(畔)景观带发挥着重要的生态服务功能和景观观赏功能,丰富的湖岸(畔)的植物有利于湖泊遮荫降温 and 稳固湖堤,缓和水体侵蚀,增加湖岸(畔)带的多样性。对湖滨岸型植物群落空间的生态构建修复模式主要可分为生物篱笆+消浪模式、植物浮床+消浪模式、生态混凝土护坡模式,前者是将水生植物栽种在容器中,用铁丝悬挂于柱桩上,随着植物生长逐渐将容器放入水底,适合植物移栽,生长迅速,对湖滨带修复构建有一定作用^[88],但此模式操作工程量大,湖岸引起的水深较深,适用植物类别少。同时湖滨、岸带风浪较大,大风浪拍打在石驳岸上引起的回浪将大部分的泥土带入湖心,水生植物缺土无法扎根而漂浮在水面上死亡。应用“植物浮床+消浪”模式是不改变驳岸现状,植物品种选择范围宽,对恢复水体生态系统有一定作用,但传统浮床形式,固定水深深度,植物品种选择仍较窄。水生植物通过生态混凝土护坡模式稳定覆盖,具有结构简单,抗风浪强度大,适用范围广等特点^[89],但此模式需改变原有驳岸形式,工程量大,经济效益低,且易造成二次污染。

4.2.2 湖滨湿地修复

湖滨湿地是水陆生态交错带的一种类型,是湖泊水生生态系统与陆地生态系统间的一个重要生态交错区。湖滨湿地修复是根据景观生态学原理,通过一定的生物、生态工程的技术与方法,依据人为设定的目标,使滨水带生态系统的结构、功能和生态学潜力尽可能地恢复到原有或更高的水平。湖滨湿地的生态修复,一般采取四步曲,即生境恢复、生物廊道恢复、景观格局美化、水岸生态系统结构与功能优化^[90](表1)。这些修复技术往往不是单一修复某一对象,也不是单纯的层次递进关系,有时常常是相互补充,相互促进,在具体的实践中往往是综合使用。典型的关键技术有:

表1 退化湖滨湿地植物群落的生态修复技术

Table 1 The ecological Restoration Technology in degradation of wetland plant communities

修复类型 Restoration types	修复对象 Restoration objects	技术体系 Technical system
生境修复 Habitat restoration	基底	基底修复技术 ^[91]
	驳岸	驳岸修复技术 ^[90]
	水文	水文修复技术 ^[92]
生物廊道修复 Biological corridor restoration	物种	水生植物净化、修复技术 ^[93]
	群落	种植结构优化配置、组建和修复技术 ^[94]
水岸景观修复 Waterfront landscape restoration	尺度格局	景观文化、景观设计技术、景观稳定性 ^[90,95]
水岸生态系统修复 Waterfront ecosystem restoration	结构与功能	系统结构及功能优化配置与调控、稳定化管理 ^[90]

(1)基底修复技术 根据湖泊现有地形,基于工程量最小化原则,结合湿地结构、功能和景观构建的需要对其进行基底改造和修复,以减轻内源污染,维护基底的稳定性,恢复入湖口水域面积,构建依据进水量和污染负荷的不同水深、不同水动力、水停留时间的地形基底,从入水口至出水口设置不同水文梯度的淹水区域而配置不同的水生植物,结合设计水深进行基底填挖以去除基底中富含污染物的底泥和淤泥。典型技术是深槽-浅滩序列技术和生态清淤技术^[91],前者侧重于创造急流、缓流等多种水流和适合不同生物发育和生长需求的条件,后者侧重于利用根系发达的固土植物的同时,以土工材料复合种植基、植被型生态混凝土、水泥生态种植基、土壤固化剂技术等方法进行生态护坡。

(2)驳岸修复技术^[90] 国外主要有生态型护岸技术,它是指恢复后的自然河岸或具有自然河岸“可渗透

性”的人工护岸,具有增强岸坡的稳定性、防止水土流失、成本小、工程量小、环境景观协调性好、适应性好等优点。而国内,以植被护岸结合,构造出工程结构对水岸生态系统冲击最小,同时创造动物栖息及植物生长所需的多样性生存生境。

(3)水文修复技术^[92] 水文的退化都是由于湖泊不合理的开发利用和人类活动加剧造成的,对水文进行修复需要考虑各利益的既得利益,利用植物与水文动力学的关系,对水文条件进行模拟性修复,此法修复的效果难以短期显现。

(4)水生植物净化技术^[93] 包括动态和静态条件下单一物种及多种植物配植,利用植物在生长过程中吸收、同化氮、磷等植物必需的多种元素,净化污染物浓度较高的污水,但滨水带不同种类水生植物适合的生态位不同,其净化效果也不同。

(5)植物群落结构配置与组建技术 植物群落的配置应以滨岸湿地带曾经出现过的某营养水平阶段下植物群落的结构为样板,以生态修复和经济效益为原则,适当地引入有特殊用途、适应能力强、生态效益好的物种,配置多种、高效、稳定的植物群落。不同种类的应用特点和不同水体环境中的生态配置模式构建,主要包括两个方面的内容:水平空间的配置和垂直空间的配置修复^[94],但在实践过程中往往是两者相互结合、相互渗透。

(6)水岸景观修复技术 该类技术主要是综合生态性和景观性特点,从横向、纵向和深度三个维度,考虑生物的组成、结构、类群、动态、生态等自然特性,提高水岸景观的多样性,以充分发挥水岸景观的生态和景观功能^[90,95]。

(7)水岸生态系统修复技术。修复受损或退化的湖泊水岸生态系统,实际上是湖岸上的改进和构建,即修复生态系统结构的因子。可以通过恢复和重建后的岸坡植被对水陆生态系统间的物流、能流、信息流和生物流,起到廊道、过滤器和屏障的作用,发挥控制水土流失、保护水岸,增加动植物物种种源,提高生物多样性和生态系统生产力,调节微气候和美化环境等诸多功能,但其系统工程复杂,长期效果难以即时显现^[90]。

5 结论与展望

5.1 结论

本文系统总结了我国淡水湖泊生态系统退化的驱动因子,主要有生物因子和非生物因子。此外分析了驱动因子导致淡水湖泊生态系统退化的作用机理,认为淡水湖泊退化基本遵循“环境变化-驱动力-压力(阈值)-状态-响应”原理,这也与人类活动发展历程密切相关。欲对淡水湖泊生态系统修复,应在厘清、理解湖泊生态退化的驱动因子、驱动原理基础上,根据淡水湖泊生态系统结构功能和修复实践,构建了退化湖泊生态系统修复的技术体系。同时本文重点就退化的湖泊富营养化和湖滨湿地生态系统,归纳总结了国内外所采取的有针对性采取物理、化学和生物生态修复技术。虽然目前这些技术已取得了较多成功,但其修复技术的长期、稳定作用并未得到有效发挥。

5.2 展望

淡水湖泊生态系统修复是个复杂的整体系统性工程,湖泊内外环境驱动因子对修复技术的响应机制及湖泊生态系统退化修复技术长效机制、效果等研究目前还不是十分明确,需要进一步研究。概括起来主要有 3 方面:

(1)修复作用机理研究

在具体淡水湖泊生态系统中,应考虑目前湖泊生态系统退化所处的状态和湖泊特性,分析研究导致湖泊生态系统退化的主导驱动因子有哪些,这些主导因子受哪些环境因素的影响,其影响作用机制是什么,导致其湖泊生态系统退化的阈值有多大,湖泊生态系统有哪些相应响应,响应原理和机制又是什么,这些都是未来研究重点。

(2)模型模拟定量研究

利用物理工程和生物生态工程等模拟技术,对淡水湖泊驱动退化的原理进行大尺度的空间和时间模拟,对影响淡水湖泊生态系统退化的因子进行环境因素控制实验,摸索控制淡水湖泊生态系统退化的作用机理和措施,并给予系统定量评价,为淡水湖泊生态系统修复提供借鉴。

(3) 修复路径研究

目前退化淡水湖泊的修复治理大致按照“控源截污+外源性生态拦截(带状、前置库和线状)+内源性生态萃取+湖泊流域管理”总体思路和框架,但对于某些具体的修复措施和技术的搭配组合规律还不明朗,综合使用的长效机制和持续效果研究不深,尤其是物理措施和生物-生态修复技术的匹配策略、搭配技术、搭配修复后的持续性、适应性及稳定性等有待深入研究。

参考文献(References):

- [1] 王苏民,窦鸿身.中国湖泊志.北京:科学出版社,1998.
- [2] 范成新,王春霞.长江中下游湖泊环境地球化学与富营养化.北京:科学出版社,2007:463-463.
- [3] 成小英,李世杰.长江中下游典型湖泊富营养化演变过程及其特征分析.科学通报,2006,51(7):848-855.
- [4] 张清慧,董旭辉,姚敏,陈诗越,羊向东.沉积硅藻揭示的历史时期水生植被信息——以梁子湖为例.水生生物学报,2014,38(6):1024-1032.
- [5] 王宁,盛连喜,张雪花,孟丹,王媛.二龙湖生态系统退化及生态工程修复分析.东北师大学报:自然科学版,2004,36(4):122-127.
- [6] 叶春,李春华,王博,张娟,张磊.洪泽湖健康水生态系统构建方案探讨.湖泊科学,2011,23(5):725-730.
- [7] 叶春,李春华,吴蕾,杨文娟.湖滨带生态退化及其与人类活动的相互作用.环境科学研究,2015,28(3):401-407.
- [8] 付贵萍,朱闻博,王燕,吴同启,黄奕龙.南宁市八尺江水生态修复工程规划.中国农村水利水电,2008,(7):24-26.
- [9] 濮培民,李正魁,成小英,濮江平.优化湖泊流域水环境的对策与关键技术——从物质循环及平衡观点看.生态学报,2009,29(9):5088-5097.
- [10] 葛绪广,王国祥.洪泽湖面临的生态环境问题及其成因.人民长江,2008,39(1):28-30.
- [11] 刘园园,陈光杰,施海彬,陈小林,卢慧斌,段立曾,张虎才,张文翔.星云湖硅藻群落响应近现代人类活动与气候变化的过程.生态学报,2016,36(10):3063-3073.
- [12] 李惠梅,张雄,张俊峰,张安录,杨海镇.自然资源保护对参与者多维福祉的影响——以黄河源头玛多牧民为例.生态学报,2014,34(22):6767-6777.
- [13] 李广宇,陈爽,余成,王肖惠.长三角地区植被退化的空间格局及影响因素分析.长江流域资源与环境,2015,24(4):572-577.
- [14] 余中元,李波,张新时.湖泊流域社会生态系统脆弱性及其驱动机制分析——以滇池为例.农业现代化研究,2014,35(3):329-334.
- [15] 赫晓慧,郑东东,郭恒亮,马国军.郑州黄河湿地自然保护区植物物种多样性对人类活动的响应.湿地科学,2014,12(4):459-463.
- [16] 周葆华,尹剑,金宝石,朱磊.30年来武昌湖湿地退化过程与原因.地理学报,2014,69(11):1697-1706.
- [17] 王伟,陆健健.三垌湿地生态系统服务功能及其价值.生态学报,2005,03:404-407,657-657.
- [18] 冯剑丰,王洪礼,朱琳.生态系统多稳态研究进展.生态环境学报,2009,18(4):1553-1559.
- [19] Scheffer M, Bakema A H, Wortelboer F G. MEGAPLANT: a simulation model of the dynamics of submerged plants. Aquatic Botany, 1993, 45(4): 341-356.
- [20] 于鲁冀,吕晓燕,宋思远,梁静,王小青.河流水生态修复阈值界定指标体系初步构建.生态环境学报,2013,22(1):170-175.
- [21] 李玉照,刘永,赵磊,邹锐,王翠榆,郭怀成.浅水湖泊生态系统稳态转换的阈值判定方法.生态学报,2013,33(11):3280-3290.
- [22] 陈小华,李小平,王菲菲,陈无歧,刘晓臣.苏南地区湖泊群的富营养化状态比较及指标阈值判定分析.生态学报,2014,34(2):390-399.
- [23] Lindeman R L. The trophic-dynamic aspect of ecology. Bulletin of Mathematical Biology, 1991, 53(1/2): 167-191.
- [24] 黄正.我国淡水湖泊源水、饮用水的致突变性及对策.环境与健康杂志,1996,13(4):187-188.
- [25] 郭娅,于革.长江中下游典型湖泊营养盐历史变化模拟.湖泊科学,2016,28(4):875-886.
- [26] 赵磊,刘永,李玉照,朱翔,邹锐.湖泊生态系统稳态转换理论与驱动因子研究进展.生态环境学报,2014,23(10):1697-1707.
- [27] 叶春,李春华,邓婷婷.论湖滨带的结构与生态功能.环境科学研究,2015,28(2):171-181.
- [28] 李英杰,金相灿,胡社荣,胡小贞,年跃刚.湖滨带类型划分研究.环境科学与技术,2008,31(7):21-24.
- [29] 蔡永久,姜加虎,张路,陈宇炜,龚志军.长江中下游湖泊大型底栖动物群落结构及多样性.湖泊科学,2010,22(6):811-819.
- [30] 纪海婷,谢杰,周恒杰,冷欣,郭璇,安树青.沉水植物附植生物群落生态学研究进展.湖泊科学,2013,25(2):163-170.
- [31] 蔡永久,姜加虎,张路,陈宇炜,龚志军.长江中下游湖群大型底栖动物群落结构及影响因素.生态学报,2013,33(16):4985-4999.
- [32] 肖小雨,龙婉婉,柳正威,王仁女,黄艳红,贺根和.吉安地区典型景观湖泊浮游植物群落特征及其与水环境因子的关系.生态学杂志,2016,

- 35(4):934-941.
- [33] 秦伯强,王小冬,汤祥明,冯胜,张运林.太湖富营养化与蓝藻水华引起的饮用水危机——原因与对策.地球科学进展,2007,22(9):896-906.
- [34] 李根保,李林,潘珉,谢志才,李宗逊,肖邦定,刘贵华,陈静,宋立荣.滇池生态系统退化成因、格局特征与分区分步恢复策略.湖泊科学,2014,26(4):485-496.
- [35] Schindler D W, Hecky R E. Eutrophication——more nitrogen data needed. *Science*, 2009, 324(5928):721-722.
- [36] Marsden M W. Lake restoration by reducing external phosphorus loading——the influence of sediment phosphorus release *Freshwater Biology*, 1989, 21(2):139-162.
- [37] Jeppesen E, Meerhoff M, Jacobsen B A, Hansen R S, Sondergaard M, Jensen J R, Lauridsen T L, Mazzeo N, Branco C W C. Restoration of shallow lakes by nutrient control and biomanipulation—the successful strategy varies with lake size and climate. *Hydrobiologia*, 2007, 581(1):269-285.
- [38] Jeppesen E, Sondergaard M, Jensen J P, Havens K E, Anneville O, Carvalho L, Coveney M F, Deneke R, Dokulil M T, Foy B, Gerdeaux D, Hampton S E, Hilt S, Kangur K, Köhler J, Lammens E H H R, Lauridsen T L, Manca M, Miracle M R, Moss B, Nöges P, Persson G, Phillips G, Portielje R, Romo S, Schelske C L, Straile D, Tatrai I, Willén E, Winder M. Lake responses to reduced nutrient loading——an analysis of contemporary long-term data from 35 case studies *Freshwater Biology*, 2005, 50(10):1747-1771.
- [39] Schindler D W, Hecky R E, Findlay D L, Stainton M P, Parker B R, Paterson M J, Beaty K G, Lyng M, Kasian S E M. Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input——results of a 37-year whole-ecosystem experiment *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(32):11254-11258.
- [40] 施海彬,陈光杰,刘园园,卢慧斌,陈小林,段立曾,张虎才.星洲湖枝角类群落变化的长期特征与驱动因素.生态学杂志,2015,34(9):2464-2473.
- [41] 秦伯强,张运林,高光,朱广伟,龚志军,董百丽.湖泊生态恢复的关键因子分析.地理科学进展,2014,33(7):918-924.
- [42] 黄琪,高俊峰,张艳会,闫人华,王雁,蔡永久.长江中下游四大淡水湖生态系统完整性评价.生态学报,2016,36(1):118-126.
- [43] 张艳会,杨桂山,万荣荣.湖泊水生态系统健康评价指标研究.资源科学,2014,36(6):1306-1315.
- [44] Zhang J S, Gao J Q. Lake ecological security assessment based on SSWSSC framework from 2005 to 2013 in an interior lake basin, China. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 74(2):888-904.
- [45] Wang H, Long H L, Li X B, Yu F. Evaluation of changes in ecological security in China's Qinghai Lake Basin from 2000 to 2013 and the relationship to land use and climate change. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(2):341-354.
- [46] 申秋实,邵世光,王兆德,张雷,胡海燕,范成新.风浪条件下太湖藻源性“湖泛”的消退及其水体恢复进程.科学通报,2012,57(12):1060-1066.
- [47] Carle M V, Sasser C E. Productivity and resilience——long-term trends and storm-driven fluctuations in the plant community of the Accreting Wax Lake. *Delta Estuaries and Coasts*, 2016, 39(2):406-422.
- [48] 张全发,苏荣辉,江明喜,李思悦.南水北调工程及其生态安全——优先研究领域.长江流域资源与环境,2007,16(2):217-221.
- [49] 刘春兰,谢高地,肖玉.气候变化对白洋淀湿地的影响.长江流域资源与环境,2007,16(2):245-250.
- [50] Zhuang W. Eco-environmental impact of inter-basin water transfer projects: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(13):12867-12879.
- [51] 赵顺阳,王文科,乔冈,王文明.艾比湖流域生态环境质量评价.干旱区资源与环境,2007,21(5):63-67.
- [52] 邓志民,张翔,罗蔚,肖洋,潘国艳,陈龙.鄱阳湖湿地苔草对水位变化的响应.应用基础与工程科学学报,2014,22(5):865-876.
- [53] Dai X, Wan R R, Yang G S, Wang X L, Xu L G. Responses of wetland vegetation in Poyang Lake, China to water-level fluctuations. *Hydrobiologia*, 2016, 773(1):35-47.
- [54] Wang S R, Meng W, Jin X C, Zheng B H, Zhang L, Xi H Y. Ecological security problems of the major key lakes in China. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(5):3825-3837.
- [55] Sand-Jensen K, Riis T, Vestergaard O, Larsen S E. Macrophyte decline in Danish lakes and streams over the past 100 years. *Journal of Ecology*, 2000, 88(6):1030-1040.
- [56] Sagrario M A G, Jeppesen E, Gomà J, Søndergaard M, Jensen J P, Lauridsen T, Landkildehus F. Does high nitrogen loading prevent clear-water conditions in shallow lakes at moderately high phosphorus concentrations? *Freshwater Biology*, 2005, 50(1):27-41.
- [57] 曹金玲,许其功,席北斗,李小平,杨柳燕,江立文,魏自民,吴献花.我国湖泊富营养化效应区域差异性分析.环境科学,2012,33(6):1777-1783.
- [58] 秦伯强.湖泊生态恢复的基本原理与实现.生态学报,2007,27(11):4848-4858.
- [59] Irfanullah H M, Moss B. Factors influencing the return of submerged plants to a clear-water, shallow temperate lake. *Aquatic Botany*, 2004, 80(3):177-191.

- [60] Cao T, Ni L Y, Xie P. Acute biochemical responses of a submersed macrophyte, *Potamogeton crispus* L., to high ammonium in an aquarium experiment. *Journal of Freshwater Ecology*, 2004, 19(2): 279-284.
- [61] 秦伯强, 高光, 朱广伟, 张运林, 宋玉芝, 汤祥明, 许海, 邓建明. 湖泊富营养化及其生态系统响应. *科学通报*, 2013, 58(10): 855-864.
- [62] 魏辅文, 聂永刚, 苗海霞, 路浩, 胡义波. 生物多样性丧失机制研究进展. *科学通报*, 2014, 59(6): 430-437.
- [63] 吴昊, 丁建清. 入侵生态学最新研究动态. *科学通报*, 2014, 59(6): 438-448.
- [64] 任颖, 何萍, 侯利萍. 海河流域河流沿岸带入侵植物等级与分布特征. *环境科学研究*, 2015, 28(9): 1430-1438.
- [65] 胡振鹏, 葛刚, 刘成林. 鄱阳湖湿地植被退化原因分析及其预警. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(3): 381-386.
- [66] 孙健, 贺锋, 张义, 刘碧云, 周巧红, 吴振斌. 草鱼对不同种类沉水植物的摄食研究. *水生生物学报*, 2015, 39(5): 997-1002.
- [67] Ramírez-Herrejón J P, Mercado-Silva N, Balart E F, Moncayo-Estrada R, Mar-Silva V, Caraveo-Patiño J. Environmental degradation in a eutrophic shallow lake is not simply due to abundance of non-native *Cyprinus carpio*. *Environmental Management*, 2015, 56(3): 603-617.
- [68] Allan R J. What is aquatic ecosystem restoration?. *Water Quality Research Journal of Canada*, 1997, 32(2): 229-234.
- [69] 翁白莎, 严登华, 赵志轩, 张诚, 王刚. 人工湿地系统在湖泊生态修复中的作用. *生态学杂志*, 2010, 29(12): 2514-2520.
- [70] 夏少霞, 于秀波, 刘宇, 贾亦飞, 张广帅. 鄱阳湖湿地现状问题与未来趋势. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(7): 1103-1111.
- [71] 毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 曾庆飞, 谷先坤, 李旭光. 太湖东部不同类型湖区底泥疏浚的生态效应. *湖泊科学*, 2014, 26(3): 385-392.
- [72] 元星, 许强, 余斌, 董秀军, 尹国龙. 汶川震区文家沟泥石流治理工程效果分析. *地质科技情报*, 2016, 35(1): 161-165.
- [73] 聂泽宇, 梁新强, 邢波, 叶玉适, 钱铁超, 余昱威, 边金云, 顾佳涛, 刘瑾, 陈英旭. 基于氮磷比解析太湖苕溪水体营养现状及应对策略. *生态学报*, 2012, 32(1): 48-55.
- [74] 何静, 吕志刚, 彭嘉培. 絮凝沉降法在河湖底泥处理中对水质的影响. *环境科技*, 2009, 22(2): 46-47, 50-50.
- [75] 边博, 夏明芳, 王志良, 尤本胜, 逢勇, 常闻捷, 王伟霞, 蔡安娟. 太湖流域重污染区主要水污染物总量控制. *湖泊科学*, 2012, 24(3): 327-333.
- [76] 陈永高, 张瑞斌. 太湖流域河网水体生态修复工程及其效果. *水土保持通报*, 2015, 35(6): 192-195.
- [77] 张小龙, 王晓昌, 刘言正, 田伟, 于文海. 多级生态塘植物修复技术用于富营养化水体修复. *中国给水排水*, 2015, 31(4): 95-98.
- [78] 赵胜男, 李畅游, 史小红, 张汉蒙, 王爽. 乌梁素海沉积物重金属生物活性及环境污染评估. *生态环境学报*, 2013, 22(3): 481-489.
- [79] 李绍秀, 夏文琴, 赵德骏, 袁秀丽, 王志红, 李冬梅, 谢葆红. 亚铁盐对二氧化氯杀藻副产物亚硝酸盐去除的研究. *环境科学与技术*, 2012, 35(12): 104-107, 113-113.
- [80] 寇丹丹, 张义, 黄发明, 夏世斌, 吴振斌. 水体沉积物磷控制技术. *环境科学与技术*, 2012, 35(10): 81-85.
- [81] 张萌, 刘足根, 李雄清, 祝国荣, 徐军, 李中强. 长江中下游浅水湖泊水生植被生态修复种的筛选与应用研究. *生态科学*, 2014, 33(2): 344-352.
- [82] 付小平, 余珊, 黄敏华, 麦伟文. 佛山市河涌水环境治理修复技术研究与实践. *环境工程*, 2016, 34(S1): 138-141.
- [83] 林秋奇, 王朝晖, 杞桑, 韩博平. 水网藻 (*Hydrodictyon reticulatum*) 治理水体富营养化的可行性研究. *生态学报*, 2001, 21(5): 814-819.
- [84] 吴定心, 杨文静, 柯雪佳, 张东晓, 李程亮, 梁运祥. 利用复合微生物菌剂控制水华的治理工程试验. *环境科学与技术*, 2010, 33(7): 150-154.
- [85] 许丽, 穆巴拉克·艾则孜, 蔡海芸, 黄梦媛, 黄光团. PASP 对香根草修复富营养化水体的影响. *中国给水排水*, 2012, 28(23): 90-92.
- [86] 李如忠. 巢湖水环境生态修复探讨. *合肥工业大学学报: 社会科学版*, 2002, 16(5): 130-133.
- [87] 朱浩, 张拥军, 裴恩乐, 刘兴国, 夏述忠. 大莲湖生态修复工程对浮游植物群落结构的影响. *环境工程学报*, 2011, 5(10): 2391-2395.
- [88] 李伟, 程玉. 一种建立水生植物生物篱笆的方法: 中国, CN1425616A 2003-06-25.
- [89] 吴义锋, 吕锡武, 王新刚, 陈杨辉. 4 种生态混凝土护坡护砌方式的生态特性研究. *安全与环境工程*, 2007, 14(1): 9-12, 23-23.
- [90] 张饮江, 金晶, 董悦, 方淑波, 段婷, 翟斯凡, 陈立婧, 张曼曼. 退化滨水景观带植物群落生态修复技术研究进展. *生态环境学报*, 2012, 21(7): 1366-1374.
- [91] 陈静, 赵祥华, 和丽萍. 湖泊陡岸带生态建设基底修复工程技术. *环境科学与技术*, 2007, 30(5): 21-23.
- [92] 陈云峰, 张彦辉, 郑西强. 巢湖崩岸湖滨基质-水文-生物一体化修复. *生态学报*, 2012, 32(9): 2960-2964.
- [93] 王雁, 黄佳聪, 闫人华, 高俊峰. 湖泊湿地的水质净化效应——以太湖三山湿地为例. *湖泊科学*, 2016, 28(1): 124-131.
- [94] 叶春. 退化湖滨带水生植物恢复技术及工程示范研究. 上海: 上海交通大学, 2007: 1-5, 9-16.
- [95] 王向荣, 林箐. “泉城”的水岸复兴——济南大明湖及护城河沿岸景观规划. *中国园林*, 2008, (12): 33-38.