

湖泊环境科学与工程技术研究进展探讨*

江和龙**, 王昌辉, 白雷雷, 韩超, 陈晓芳, 王春柳

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要: 湖泊环境与工程学科是近 10~20 年发展的、研究变化环境条件下湖泊水环境质量演变规律、互动机制、保护治理及和谐发展的一门交叉性的基础研究和应用研究学科。随着人类活动强度增加, 我国湖泊面临富营养化、蓝藻水华暴发与引发次生灾害及持久性和新兴污染等多类型或叠加复合的严峻环境问题, 迫切需要发展湖泊区域性的复合污染防控与治理技术体系, 服务于国家生态文明建设。本文首先简单介绍对湖泊环境与工程学科概念及内涵的认识, 然后较系统地阐述了国内外近 10 年来关于主要污染物在湖泊中环境行为的研究, 针对性地分析了主要由蓝藻水华暴发引发的次生灾害“湖泛”的发生原因及防控策略, 展示了以湖泊底泥为主的湖泊监测方法和技术研究进展, 总结和归纳了从入湖污染控制到内源污染治理的湖泊污染防控技术研发成果, 最后对湖泊环境与工程学科研究尺度向宏观与微观两极延伸及治理修复技术向生态/水利工程和智慧感知/大数据技术融合发展等方面进行了展望。

关键词: 湖泊; 环境; 污染; 治理; 修复

Advances and prospects in lake environment science and engineering: A review*

JIANG Helong**, WANG Changhui, BAI Leilei, HAN Chao, CHEN Xiaofang & WANG Chunliu

(*Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R. China*)

Abstract: Lake environment and engineering is an interdisciplinary basic research and applied research discipline, which is developed in recent 10–20 years, and studies the evolution law, interactive mechanism, protection and governance and harmonious development of lake water environment quality under changing environmental conditions. With the increasing intensity of human activities, lakes in China are faced with severe environmental problems such as eutrophication, cyanobacteria blooms and secondary disasters, and persistent and emerging pollution. It is urgent to develop regional integrated pollution prevention and control technology system for lake environment protection, to serve the national ecological civilization construction. This paper at first briefly introduces the concept and connotation of Lake Environment and Engineering; systematically describes the research on environmental behavior and reduction of major pollutants in lakes in recent 10 years around the world; analyzes the causes and control strategies of secondary disaster “black water” mainly caused by cyanobacteria bloom, and then shows the lake monitoring methods mainly based on lake sediment; summarizes the technical research development about lake pollution prevention and control. Finally, the paper looks forward to the extension of the research scale of lake environment and engineering to macro and micro dimensions, and the integration of ecological / hydraulic engineering and smart perception / big data technology.

Keywords: Lake; environment; pollution; treatment; remediation

湖泊作为一类重要的地表水环境资源, 是“山水林田湖草”生命共同体的有机组成部分, 在社会与环境发展过程中起着关键的作用, 可以有效地调节地表径流, 为灌溉、生活生产等提供水源, 且能够起到运输作用, 改善区域的生态环境^[1]。随着社会经济的发展和人类生产活动的增加, 部分湖泊系统所承纳的污染已远超其能承受的容量, 对湖泊生态环境状态产生了明显的不良影响。

* 2020-06-30 收稿; 2020-07-23 收修改稿。

国家自然科学基金项目 (51839011, 51679228, 51861125201) 和国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07204005) 联合资助。

** 通信作者; E-mail: hljiang@niglas.ac.cn.

目前中国湖泊的生态环境问题包括水量减少^[2]、水体富营养化^[3]、底泥淤积^[4]、西北湖泊盐化^[5]、湖滨带湿地系统退化^[6]、物种多样性减退^[7]等几大类。自1980s以来,国内外学者对我国湖泊污染问题展开了大量研究,主要涉及国内较大湖泊,如太湖^[8]、巢湖^[9]、鄱阳湖^[10]、洞庭湖^[11]、白洋淀^[12]、滇池^[13]、西北干旱半干旱地区湖泊^[14]以及青藏高原湖泊^[15]等。根据《2019年中国生态环境状况公告》,我国重要湖泊(水库)水质逐渐好转,I~Ⅲ类湖泊(水库)占69.1%,比2018年上升2.4%,但仍面临着以富营养化为主的环境问题。其中,国家重点治理的“三湖”(太湖、滇池、巢湖)营养盐浓度偏高/反弹、底质内源污染严重,蓝藻水华暴发问题尤为严重。

近年来,我国湖泊水体中复合污染的健康和生态风险不断增大,持久性有机/新兴污染物的毒理和健康风险已经成为亟待解决的重大环境安全问题。通过对长江中下游浅水湖泊水生态和水环境的调查,发现35个典型湖泊沉积物中多环芳烃(PAHs)和有机氯农药(OCPs)浓度分别达20.76~231.89 ng/g(DW)和8.14~85.31 ng/g(DW)^[16]。此外,重金属和抗生素、内分泌干扰物、藻毒素等新兴污染物也日益显现^[17-19]。有研究表明,蓝藻水华暴发时期,太湖水体中微囊藻毒素浓度为0.654 μg/L,藻细胞内甚至可达40.35 μg/L^[20],并且在藻毒素与多环芳烃非复合暴露下,水生生物对污染物的解毒能力降低,其复合毒性效应也更加明显^[21]。然而,对于湖泊区域性的复合污染防控与治理目前仍缺乏有效的控制方法和技术体系。

不断凸显的环境污染问题,特别是2007年6月突发无锡太湖的“水危机”事件,促使湖泊生态环境治理修复成为社会关注的热点问题,客观上推进了我国湖泊环境与工程学科的发展。湖泊环境与工程学科是研究变化条件下湖泊及流域水环境和水生态质量演变规律、互动机制、保护治理及和谐发展的一门交叉性的基础研究和应用研究学科。其主要研究水体中各类污染物的赋存形态、迁移转化、环境归趋和生态效应,建立污染物输移转化的数学模拟模型,研发控制污染和修复受污染水体的理论和方法等。通过运用环境科学、工程技术和有关学科的原理,整合污染治理、生态修复、功能恢复等技术方法,保护并合理利用湖泊自然资源,防治湖泊环境污染,实现湖泊环境质量改善的目的。

湖泊环境与工程学科具有突出的学科交叉特点,综合运用了湖沼学、环境化学、环境工程、生态工程、水利工程、环境水力学、水文学、地理学、毒理学、物质科学、材料科学、健康科学等多学科的基本理论和技术方法,形成了工程科学、生命科学、环境科学等相互融合的科学体系。例如,水环境中污染物输移转化过程和规律研究需要观测大量基础数据信息,不仅包括水质资料(污染物种类、浓度、特征等)、水文资料(流量、流速、水温等)、水生态资料(物种、群落结构、种群丰度等)及地形资料(地貌、地质、地形等),还包括各类数据的分析方法、观测方法、系统模拟方法及受损环境的修复技术等。

通过国家水体污染控制与治理科技重大专项等科研项目的支持,我国已经形成具有一定规模的专业化湖泊环境治理修复研究队伍,分布在中国科学院、部省属大学、生态环境和水利等行业研究机构。目前,对于小型湖泊治理修复已有不少成功案例,但对于中型和大型湖泊污染治理还面临许多技术挑战。本文主要依据“湖泊污染—湖泊灾害—污染监测—治理恢复”的主线,对近10年来在污染物环境行为、湖泛灾害过程、湖泊监测、湖泊环境修复方面的国内外研究进展进行综述,从而为我国湖泊环境与工程学科发展提供参考。

1 污染物在湖泊中的环境行为

湖泊环境中的污染物包括无机污染物和有机污染物,其中无机污染物主要为营养盐、重金属、纳米材料等,而有机污染物则包含持久有机污染物、新兴有机污染物等。湖泊污染物来源包括外源和内源。外源污染从点源和面源输入,而内源污染则指湖泊环境内部产生、和/或蓄积在沉积物中的氮磷营养盐、重金属、有机物等物质释放进入上覆水的现象。无机和有机污染物在湖泊环境中均经历复杂的物理、化学和生物过程,包括吸附、沉降、络合、氧化还原、降解、光解、吸收等,进而影响其迁移转化、自然消减及最终归趋。由于地理位置、区域气候、地质背景、湖盆形态、水文、水质、生物组成等自然因素的差异以及人为干扰的不同,湖泊呈现出差异性生态系统特征,其污染物的环境行为各不相同。同时,污染物本身生物化学特征的差异性也决定其在湖泊中的环境行为。以下就营养盐、重金属、有机污染物分别展开论述。

1.1 营养盐的循环过程

磷作为湖泊蓝藻生长的重要营养元素,被认为是浮游植物生长和水华发生的重要限制因子。水体中磷

浓度的增加通常会导致湖泊中浮游植物的种群组成向蓝藻演替. 湖泊系统中颗粒态磷占总磷的比例高, 部分呈悬浮颗粒态, 还有部分颗粒态磷和泥沙颗粒吸附后磷沉降到沉积物中. 风浪引起沉积物再悬浮后, 沉积物的磷会再次释放. 研究表明, 在淡水湖泊系统, 铁氧化物控制着沉积物中固态磷和间隙水中磷的含量并驱动沉积物的磷循环, 由此计算表层沉积物中铁/磷(重量比)能够预测沉积物对磷吸附能力的强弱. 沉积物氧化还原电位(Eh)及微生物还原过程对沉积物磷形态和释放有显著影响. 蓝藻水华衰亡沉降后, 其生物质分解增强沉积物中的铁还原过程, 而且会导致沉积物中的硫氧化转变为硫还原作用, 使得与铁吸附的磷释放, 同时引起沉积物中的铁磷和残渣磷向铝磷、钙磷和有机磷转化^[22]; 蓝藻生物分解初期, 沉积物二价铁和溶解态磷浓度呈现每日波动, 且有较高的一致性^[23]. 另外, 通过调查巢湖磷形态时空变化, 发现悬浮颗粒态磷在化学和生物作用下可以活化为生物可利用性磷, 从而供藻类生长, 蓝藻衰亡后磷又可循环利用^[24].

生物可利用氮是湖泊初级生产的重要营养来源, 与磷共同加剧了有害蓝藻水华暴发^[25]. 氮循环作为湖泊生态系统中最基本的元素循环之一, 包括反硝化作用、硝化作用、生物固氮等过程^[26-27]. 其中, 反硝化与生物固氮是调节氮库平衡的重要过程, 生物固氮一定程度上缓解了湖泊生态系统的氮损失^[28]. 在蓝藻水华多发的富营养湖泊中, 温度和硝酸盐共同调控泥-水界面处活跃的反硝化作用, 促使反硝化速率呈现明显的季节变化^[29]. 同时, 蓝藻水华又强烈影响湖泊中的氮循环过程, 蓝藻的降解以及硫还原过程也对硝酸盐还原过程(反硝化与硝酸盐异化成铵)具有重要作用^[30]. 湖泊内生物固氮过程主要包括上覆水体透光层中的自养固氮过程和沉积物中的异养固氮过程, 非固氮蓝藻(如微囊藻)的大量增殖显著压缩了固氮蓝藻及浮游植物的生态位^[31]. 蓝藻水华向沉积物输送的大量生物量为异养固氮提供了有利条件, 促使沉积物具有更高的生物固氮潜力^[32]. 此外, 富营养湖泊沉积物的生物固氮作用表现出与海洋环境完全不同的季节变化模式, 与蓝藻水华的季节性发生密切相关^[32-33]. 需要指出, 虽然氮、磷浓度升高会增加水华发生的风险, 但氮、磷浓度过高或过低并不利于蓝藻形成优势^[34]. 较低的氮磷比曾被认为是蓝藻水华形成的条件, 但也可能是蓝藻水华产生的结果^[35].

1.2 重金属的环境行为

湖泊系统中重金属主要储存在沉积物中^[36], 绝大部分以残渣态存在, 成为威胁湖泊生态系统健康的主要因素. 湖泊系统较长的水体停留时间、水位波动、季节性分层及含氧量变化等特征使沉积物中的重金属离子极易解吸再度进入水体. 对三峡库区消落带形态的扩散研究发现, 好氧环境有利于沉积物释放无机汞, 而厌氧和深水环境有利于甲基汞释放^[37]. 沉积物中重金属形态的转化可归纳为4个主要物理化学过程: 溶解-沉淀、离子交换与吸附、络合-离解和氧化还原作用. 这些过程主要受沉积物理化性质(如粒径、有机碳含量和铁锰氧化物等)、上覆水环境(pH值和Eh)以及生物因素(底栖动物和微生物等)影响^[38]. 特别地, 有机质作用下微生物对汞的甲基化过程得到大量研究^[39-40]. 此外, 采用吸收/荧光差分光谱分解模型解析底泥中藻源、草源有机质与重金属的界面作用特征, 发现草源有机质络合重金属的能力强于藻源有机质^[41].

重金属在沉积物-水界面的迁移是产生二次污染的关键过程. 除了间隙水和上覆水中重金属的浓度梯度, 沉积物-水界面重金属的扩散速率还与竞争吸附、酸度效应、氧化还原条件、温度效应及有机络合剂密切相关^[42]. 氧化还原电位对重金属迁移存在双向影响^[43]. 厌氧条件下:(1)淹水环境引发反硝化反应、铁锰氧化物和硫酸盐还原, 使pH值趋于中性, 间接导致酸性沉积物中游离子态重金属沉淀或碱性沉积物中吸附态重金属释放;(2)厌氧条件会引起铁锰氧化物、有机质、硫化物的形态或含量发生改变, 影响其与重金属离子的结合程度, 但厌氧条件也可以使重金属离子和硫化物产生沉淀, 且还原Cr、Hg等元素. 氧化条件下, 硫化物氧化形成硫酸盐促进了重金属释放; 但铁锰离子沉淀及其氧化物形态变化形成的具有强吸附力的无定形铁锰氧化物可重新吸附游离态金属离子. 然而, 目前湖泊中关于重金属污染的研究大多仍集中在总量特征、形态组成、生物有效性方法等方面, 而物理、化学、生物频繁相互作用使得各过程对重金属环境行为的影响极其复杂, 特别是微生物在复杂多相之间的作用机制(如铁氧化物-有机质-微生物联合)仍需采用更先进的手段进行研究.

重金属一旦进入湖泊生物体内, 不易被代谢、分解、排出体外. 水生生物富集重金属的机制包括被动吸收和主动吸收, 前者是重金属吸附到细胞表面, 与生物体活性和新陈代谢无关, 后者主要通过新陈代谢进入生物活体内^[44]. 相较而言, 被动吸收属于可逆吸附, 而主动吸收主要依靠共价键结合、表面沉淀、氧化还原

反应等,过程缓慢,且不可逆. 重金属的生物吸收与 pH 值、温度、离子强度及有机质密切相关. 特别地,溶解态有机质(DOM)可与藻类直接相互作用,增加重金属的吸附位点,并且 DOM 可影响细胞膜的通透性、离子运输通道和电化学性质. 目前,普遍认为分子量小于 3.5 kDa 的 DOM 容易穿透生物细胞膜,影响生物体对重金属的吸收^[45]. 此外,重金属价态也影响其生物吸收过程,有研究发现贝类对三价砷的吸收强于五价砷^[46]. 总体上,目前大多数研究关注重金属的生物吸收机制,而关于生物吸收对重金属在湖泊系统中的迁移及模拟研究有限.

1.3 有机污染物的环境行为

由于传统的污水处理工艺效果有限,多环芳烃、农药等持久性有机污染物和内分泌干扰物、药物等新兴污染物随氮、磷一同排入湖泊,虽然这类污染物在湖泊水体中浓度一般不高,但其生态环境风险受到广泛关注^[47]. 特别是淡水湖泊作为重要的水源地,其水体中的污染物很容易通过食物网和环境介质再次进入人和动物体内. 这些痕量的持久性有机污染物和新兴污染物(以下统称为痕量有机污染物,TOCs)在湖泊中的生消行为包括沉降、挥发、水解、络合、吸附、生物降解、光解、生物富集以及生物摄取等多个非线性过程. 除了陆源排放,大气沉降对湖泊系统中挥发性 TOCs 的输入已逐渐被证实. 有学者指出印度半岛大气长距离传送及孟加拉湾海洋暖流是青藏高原湖泊中 DDTs 的主要来源^[48],也有研究发现大气中 PM₁₀ 颗粒附载有相当浓度的内分泌干扰物^[49]. 在湖泊水体中,TOCs 也主要以悬浮颗粒结合态或沉积物吸附态存在^[50],固相浓度可达水相的 5~20 倍^[51]. 流速是限制污染物与颗粒物接触的主要因素,流速过高不利于 TOCs 与悬浮颗粒的结合. 与溶解态相比,结合态 TOCs 的迁移性更强,但生物降解和光解潜力可能降低^[52]. DOM 是湖泊水体中普遍存在的有机混合物,表面积更大,碳结构更密集,对污染物的亲和力也更强. 湖泊生源 DOM 能够通过氢键、 π - π 共轭键及电子作用力与内分泌干扰物发生络合,但结合力弱于陆源有机质^[53]. DOM 的络合作用改变了 TOCs 在沉积物界面的吸附分离,吸附架桥和竞争吸附可能造成相反的趋势^[54-55].

沉积物是 TOCs 在湖泊中的主要蓄积场所,固存特征取决于沉积物中腐殖质含量及分子大小^[56]. 此外,底栖动物的生物引灌可改变亲水性污染物的迁移,而疏水性污染物的分布与底栖动物对颗粒物的移动搬运有关. 生物扰动加快了沉积物中 TOCs 向生物体内的迁移和富集^[57]. 再悬浮是沉积物中污染物向上覆水扩散的重要过程^[58]. 也有研究发现水力扰动下再悬浮促进了沉积物中四溴双酚 A 的释放^[59],而沉积态向悬浮颗粒态的转变进一步加快了 TOCs 的迁移.

TOCs 在湖泊沉积物中可能发生非生物转化,与金属元素发生络合-氧化还原反应,其间产生活性氧自由基,从而降解 TOCs^[60]. 更重要的是,沉积物中丰富、功能各异的微生物群落能通过水解、氧化、还原和完全矿化将污染物转化为无机碳、氧、氮或氢,实现生物降解. 天然生物膜不同菌群之间存在密集的种间作用,对污染物具有很强的自适应和自组装特征^[61],而微生物群落的生长和活性与温度、营养、pH 值、流速等因素有关. 高温季节,微生物和生物膜活性升高,具有更强的 TOCs 降解能力^[51]. 作为蓝藻水华暴发的直接后果,湖泊底层溶解氧含量降低,导致微生物电子受体匮乏,TOCs 的厌氧降解速率普遍低于好氧降解^[62]. 硝酸根、硫酸根、三价铁等非氧电子受体对于 TOCs 的厌氧降解极其重要^[63]. 生物分解也与内生有机质激发效应和微生物代谢过程直接相关^[64],并具有酶依赖性. TOCs 分子需要以生物有效手段传输到微生物,通过细胞壁与酶反应点结合,由共存因子和辅酶调控酶促反应并释放转化产物^[51]. 有必要指出,湖泊环境中的 TOCs 浓度通常难以诱导生成酶和维持酶活性,更多是作为非生长基质以共代谢的方式降解,特别是高分子 TOCs 的降解^[65].

DOM 是湖泊水体中异养微生物群落最重要、最易利用的碳源. 与陆源 DOM 相比,生源 DOM 富含生物活性分子,容易被微生物利用^[66],不仅能够提高微生物生产力^[67],也可以增强天然生物膜的胞外聚合物(EPS)分泌、自适应性和代谢效率^[68]. 特别地,生源和陆源 DOM 对 TOCs 生物降解具有强烈的介导作用. 一方面,活性分子为微生物提供碳源和能量,促进 TOCs 的共代谢过程;另一方面,难降解分子对微生物体内的降解酶具有一定的激发作用,该机制在贫营养环境下更为显著^[69]. 除了代谢活性,微生物群落的种间作用及功能基因也与 DOM 有关. 有机质浓度较高时,复杂、多样的种间作用更有利于难降解污染物的分解^[61]. 厌氧条件下,DOM 自身的醌结构具有一定的氧化还原潜力,可作为电子穿梭体(氧化还原媒介),与三价铁(电子受体)共同调控 TOCs 的生物降解^[70]. 另外,DOM 也可以作为末端电子受体,协作微生物生长,促进污

染物的氧化^[71]. 相较而言, 陆源 DOM 的醌结构含量往往高于生源 DOM, 在厌氧降解过程中媒介作用更强. 湖泊环境中生源和陆源 DOM 组成不断变化, 需继续深入探究湖泊 DOM 的分子组成与微生物群落 TOCs 降解功能基因表达的耦合关系.

光化学降解是水体中 TOCs 的重要消亡途径. 直接、间接光解可破坏污染物中的共价键, 从而产生更易水解或被微生物利用的化合物. 能否直接光解往往取决于水深, 2 m 水深即可吸收大部分紫外线^[72]. 不过, 大部分有机污染物的反应量子产率很低, 更多地通过间接光解进行, 即光敏物质吸收光能, 产生大量的活性氧自由基 (RO·、HO·、¹O₂、O₂⁻等), 并将激发的能量传递给污染物. 常见的无机光敏剂有 NO₂⁻ 和 NO₃⁻, DOM 也是重要的有机光敏剂之一, 能显著促进污染物的光化学分解^[73]. 不过, DOM 也可能作为抗氧化剂与有机污染物结合, 降低光解率^[74]. 目前大部分研究关注于光化学降解速率和量子产率, 而关于光解机制和转化产物的研究较少. 事实上, 污染物的光解产物可能具有与母体相似或更高的生物毒性^[75]. 未来研究需要阐明污染物的自然光转化和生物降解的复合作用及过程中未知的降解产物及其形成, 并考虑产物的潜在环境毒性.

生物富集是 TOCs 对湖泊生态系统和人体健康构成危害的重要过程. 由于生物稀释作用, 夏季太湖水体中 TOCs 含量与藻类生物量呈显著负相关^[76]. 在吸收 TOCs 的同时, 浮游藻类可能会代谢部分, 并产生更多的 EPS 来抵抗 TOCs 的生物毒性^[77]. 同时, 胞外聚合物富含有机官能团, 可加快藻聚集体对 TOCs 的生物吸收速率^[78]. 低分子量、蛋白结合态的 TOCs 也更容易被水生生物摄取^[79]. TOCs 在湖泊生物体内的富集与其所处的营养级、脂肪含量、年龄和食物链长度呈正相关, 而生活在湖泊底层或沉积物的生物体内 TOCs 含量往往高于表层生物^[48]. 作为特殊的污染物, 抗性基因在湖泊生物网间的传播具有更大的危害潜力^[80], 由于水体停留时间较长, 抗性基因更容易储存和富集, 浓度更高^[81]. 未来需要关注湖泊环境中高频传播的抗性基因类型, 认知不同抗性基因传播的共性和个性, 以及湖泊环境条件对抗性基因传播的影响规律.

微塑料等人工纳米材料具有特殊的化学特性、环境行为及毒理效应, 也可作为 TOCs 的载体, 促进后者的长距离迁移及生物富集^[51]. 一方面, 微塑料自身会在一定条件下 (如光照、老化) 释放溴化阻燃剂等污染物^[82]; 另一方面, 微塑料对其他污染物有明显的载体作用, 吸附能力与粒径、老化程度有关^[83]. 特别地, 微塑料作为生物膜的载体, 对水体中污染物的迁移、转化具有直接作用. 有研究发现沉积物内微塑料表面附载的微生物对 DDTs 和 PAHs 具有很强的降解能力^[84]. 同时, 微塑料也是湖泊食物网中污染物转移的重要载体, 可加剧污染物在蠕虫体内的生物富集^[85]. 总体上, 湖泊作为多种水体重要的“汇”单元, 往往同时接纳了多种污染物, 未来需重点研究不同污染物之间的相互作用、复合效应及综合管控.

2 “湖泛”次生灾害发生成因

由于人类活动, 我国长江中下游的浅水湖泊经历了从健康到富营养化的转变. 1980s 以前, 长江中下游的浅水湖泊水体质量普遍良好, 而 1980s 至今, 大部分湖泊呈现中营养以及富营养型, 部分湖泊甚至达到超重富营养型 (如巢湖、武汉东湖), 一些原本处于中营养型的湖泊 (如固城湖), 2000 年的指标检测显示已经达到中富营养型^[86]. 湖泊富营养化带来的突出生态环境问题就是蓝藻水华暴发, 造成水体透明度下降, 溶解氧变化剧烈, 藻毒素释放, 从而使水生生态系统和水体功能受到影响和破坏. 此外, 蓝藻水华引发的次生灾害同样受到广泛关注. “湖泛”通常是指浅水湖泊水体中 (包括沉积物) 富含有机物质, 在微生物的分解作用下, 大量消耗氧气, 进而发生厌氧分解, 在还原的条件下快速地释放出大量致黑 (或者其他颜色) 致臭物质, 导致水质恶化、湖泊生态系统结构和功能破坏乃至引发环境或者生态灾难的现象^[87-88]. 目前, 已经在国内外多个湖泊发现湖泛现象, 如意大利的 Garda 湖^[89]、印度尼西亚苏门答腊的 Siak 河^[90]、日本的霞浦湖以及美国的 Lower Mystic Big Pit 湖^[91]. 近 10 年, 我国太湖西北部水域湖泛现象频发, 这和蓝藻水华暴发有密切关系^[92]; 另外, 河北的白洋淀、安徽的巢湖、云南的滇池、湖北武汉的南湖等严重富营养化湖泊^[93-94], 以及部分河流和城市河道, 均出现过类似的“黑水”事件, 这些事件是我国湖泊生态环境进一步恶化的标志之一.

通过室内试验分离截留“湖泛”水体显黑颗粒物质, 发现它以生物质残体和悬浮沉积物颗粒为主^[95], 还原态铁、硫形式 (FeS) 是“湖泛”颗粒的主要组成. 同时, “湖泛”过程中持续释放的致臭性物质与挥发性有机硫化物 (VOSCs) 有关^[96].

湖泛的生消过程大致可分为4个阶段,即:生物量聚积阶段、(水体)耗氧缺氧阶段、(湖泛)暴发成灾阶段和(水体)复氧消退阶段^[88]。湖泛发生的物质基础主要包括外源和内源的耗氧性有机质。对于太湖不同阶段的蓝藻与湖泛的关系而言,发生湖泛的鲜藻聚积程度约在 $0.526\sim 0.790\text{ g/m}^2$ 之间^[97],而可发生湖泛的死藻聚积量仅需 0.250 g/m^2 ^[98],藻体聚积量越大,湖泛形成所需的聚积时间越短。同时,适宜的气象水文条件(光照、温度、风速、水体垂直热分层等)是湖泛的触发因素,经观测发现,湖泛多发生于盛夏持续的高温、闷热、晴好天气,尤其是降雨前期,降雨前气压较低,风速较小或微风,有利于蓝藻堆积^[99]。

另外,近期研究发现微生物在沉积物中厌氧消耗有机质生成的大量气体会导致沉积物膨胀现象的发生,而沉积物膨胀与“湖泛”现象有着密切的相关性。堆积在沉积物中的蓝藻中含有大量的淀粉、脂肪以及小分子蛋白质,可刺激微生物的厌氧消化作用,造成沉积物发生膨胀现象^[100],其间快速产生的气体改变了沉积物结构,最后大量气体混合着蛋白质和油脂快速释放出来,从而引起沉积物上涌。同时,沉积物膨胀以及气体的快速释放会造成再悬浮现象发生,导致湖泊水体透明度降低和光的透射度下降,不利于水生植被生长,提高底层沉积物的侵蚀速率^[101]。

目前,对于浅水湖泊中湖泛发生的机理性认识还有待完善,其发生通常具有随机性和突然性,这对监测和预警“湖泛”的发生造成了困难。结合卫星遥感技术^[102]和传感器^[103],可为“湖泛”发生提供预警信息。同时,联合沉积物疏浚技术对浅水湖泊“湖泛”进行治理^[104],可在一定程度上预防“湖泛”的发生。另外,范成新^[105]通过沉积物疏浚技术对湖泊内源污染物释放治理进行研究,发现虽然疏浚可以短期控制沉积物污染物释放,然而随后内源释放还是会增加,进而造成湖泊富营养化现象。进一步对湖泊疏浚技术进行优化研究发现,合理的疏浚可以有效地对“湖泛”现象进行提前控制^[106]。

3 湖泊环境监测技术与设备

湖泊环境监测作为水生态系统管理和污染防治的主要手段,具有不可替代的作用。目前,针对常规的湖泊水质参数监测已有较成熟和完善的技术方法和仪器设备。为满足湖泊环境所需的原位、实时、快速、宏观监测要求,遥感技术已逐渐应用于湖泊水体污染和生态环境的长期、大范围动态监测,特别是针对叶绿素、透明度、温室气体等生态环境指标的监测,在大数据技术、信息化技术、水生态环境管理方面发挥着重要作用。不过,对于湖泊系统关键环境过程及特异性重要参数的实时远程监测还很缺乏;相对而言,近年来关于湖泊沉积物的监测研究取得了较明显的进展。

沉积物是构成湖泊生态系统的重要组成部分。沉积物内部发生的诸如有机质降解、成岩、氧化还原、生物扰动等各种强烈的生物地球化学过程,终将显著影响水体生态系统状态变化,乃至其结构与功能响应^[107]。对沉积物有关信息开展准确监测是深入阐释上述过程的关键,将为环境管理机构正确决策提供依据。不同于湖泊水体监测的便捷性,沉积物处于湖泊底部,具有难观测性和高度时空异质性的特点。以往对湖泊沉积物相关物质监测大多依赖于主动采样方式,通过将沉积物脱离原位后,室内采用离心法、压榨法、化学提取法等方法与化学显色或大型仪器如高效液相/气相色谱、质谱仪、高纯锗 γ 谱仪等分析方法联用后,得到沉积物中特定物质含量。此类方法往往会对沉积物原始物理、化学及生物环境条件造成不同程度的破坏,导致获取的物质空间分布信息失真,很难全面阐释沉积物的地球化学过程与机制^[108-109]。

发展高灵敏度、原位、高分辨率沉积物监测技术已成为该领域的重要方向。目前已有越来越多的光、电、生物、化学传感技术如光纤电极、微电极系统、薄膜梯度平衡/扩散(DET/DGT)等成功研制并广泛应用于沉积物关键环境参数(如温度、pH值、溶解氧、氧化还原点位、电阻率)、生物膜、磷、重金属及部分有机指标的原位监测。此外,沉积物在垂向和水平空间上均具有非常明显的异质性,物质在微小尺度内呈现强烈的化学梯度分布和快速动态变化特征,且沉积物内部各种地球化学过程的发生是多物质共同作用的结果^[110-111]。近些年,随着监测技术方法发展,诸如微生物电化学技术、平面光电极(PO)、酶谱(Zymography)、DGT/DET与电脑密度成像(CID)/激光剥蚀-电感耦合质谱(LA-ICP-MS)联用、剖面成像仪等精细监测技术的快速兴起,极大地推动了沉积物过程和机理研究向深度拓展。另外,基于微生物胞外电子传递原理构建的多种新型微生物电化学方法,成功应用于沉积物中微生物活性、沉积物膨胀和溶解氧等相关信息的远程、实时高分辨率监测^[103,112-113]。

越来越多的学者利用 DGT-CID/LA-ICP-MS 技术同步监测沉积物微生物中磷-硫-重金属高度区域化的分布特征,并揭示其紧密关联的迁移释放机制^[114-117]。另外,近些年,少量学者已尝试将多种界面成像技术优化集成并用于沉积物微域(如水生植物根际、底栖动物洞穴、沉积物-水界面等)溶解氧、pH 值、活性磷、重金属等指标的二维、高分辨空间分布信息同步监测^[118-120]。由此可见,近 10 年,沉积物监测技术已逐步从操作繁琐的常规手段向简单高效的高精度手段,从常规分辨率尺度(毫米级)向高分辨率尺度(微米级),从单点获取向多维信息获取,从单指标监测向多指标同步监测方向发展。

4 湖泊治理修复技术

湖泊水环境改善是一个系统性工程,需要结合湖泊流域层面的点源和面源污染治理,实施湖泊地理单元本身的污染治理修复。湖泊污染和生态退化成因、作用方式和影响程度的变化范围不够明确使得受损湖泊生态修复工作十分复杂。湖泊污染治理需在充分诊断湖泊污染成因及问题的基础上作出决策,不同的湖泊修复技术与方法均不同,这与我国生态环境管理部门提出的“一湖一策”的理念相符合。具体而言,湖泊修复首先要建立修复目标,进而依据整体性原则、遵循自然规律原则、全局性原则的修复思路,建立系统修复方案。空间尺度上,可依次实施外源污染拦截、湖滨带修复,再延伸至湖泊内源污染修复^[121]。

湖泊修复技术开发的目标都是在保证性价比和生态安全的前提下,消除或最大程度地降低污染物对人类健康和生态环境的危害。各种技术对污染的有效控制或是基于降低污染物总量或是基于提高污染物稳定性来实现的。现有湖泊修复技术主要基于物理、化学、生物及生态手段,实现自净能力增强、湖泊生物调控、生境条件改善的目标,具体实施方式取决于湖泊的地理环境、污染程度和类型、污染修复目标、成本等。对于外源污染造成的湖泊污染问题,通常采取以拦截污染源入湖为主的控源截污、入湖湿地构建等措施;而对于内源污染问题造成的湖泊污染问题,则采取针对性较强的控藻、底泥疏浚及底泥钝化等措施。关于湖泊环境修复总体思路、入湖污染控制、内源污染控制、生态灾害防控及生态修复的相关内容已在专著《湖泊学》第 7 章^①中进行了系统阐述,下面主要就相关单项技术的发展进行重点综述。

4.1 前置库技术

为降低周边的农村生活污水、稻田排水等农业面源污染,减小地表径流对湖泊特别是水源地水质造成严重的危害,可以通过设置前置库(或滞留塘)作为过程削减技术,截留入湖泥沙,利用吸附、降解等方式净化污染物。目前对于前置库并无明确、统一的定义,一般为利用水库存在的从上游到下游的水质浓度变化梯度特点,将水库分为一个或若干个库与主库相连,通过对前置子库中污染物的净化,实现低污染水质溢流入库,以保证或改善主库水源的水质。

前置库技术在欧洲如德国应用较多,我国已应用于滇池、太湖等流域的面源污染控制和水库富营养化防治。早期的前置库主要通过调节来水的滞水时间达到沉降污染物及泥沙的作用,目前已经因地制宜地集成了利用水生植物、水生动物等生态修复技术,提出采用人工湿地、生物载体强化等工程技术与传统前置库系统进行组合,发挥物理拦截吸附及生物生态净化的协同作用,提升前置库对入湖氮、磷等营养盐净化效果。例如,引入潜流湿地的江苏省马山水源地复合型前置库在滞水时间为 1 天时,氮、磷、COD_C去除率分别可达 67.2%、68.2% 和 89.3%^[122]。此外,也可设计与前置库功能类似的旁路处理系统,建设污水处理工程类似单元,针对性净化入湖低污染水体;或通过建设旁路管道和水渠,使湖库上游高浊度或污染较重来水不进入湖库,以保障重要湖库水质^[123]。

4.2 湖滨带修复技术

湖滨带属于陆地和湖泊之间的过渡生态交错带,是湖泊系统中生物多样性丰富区、元素循环活跃区^[124]。湖滨带通过水-土壤(沉积物)-植物系统的拦截、滞留、沉积、吸附、吸收、降解等物理、化学和生物过程,既能够调节地表漫流和地表径流通过界面区的速度和形式,也可以调节风浪和水流等水力学条件,缓解风浪和水流的不利影响,控制水体和湖滨带的物质交换^[124-125]。

湖滨带是湖泊生态系统中重要的污染物截留与净化场所。在地形和水文过程等因子的作用下,矿物质、

① 沈吉等. 湖泊学. 北京:高等教育出版社,2020.

营养物质、有机物质和有毒有害物质须穿过湖滨带才能进入湖泊水体,成为湖泊的污染物质。因此,湖滨带是湖泊生态系统中对陆源污染物的首要响应者^[126]。湖滨带生态系统通过过滤和截留大量的陆源污染物,进而通过化学和生物过程作用,将部分污染物进行净化分解。据报道,太湖冲山湖滨带生态修复后水域的营养盐和 COD_{Mn} 平均去除率可达 42%~65%,溶解氧基本维持在饱和状态^[127]。

4.3 湖泊水体流场操控技术

我国湖库目前主要面临富营养化问题,表层水体初级生产力高、蓝藻密度高,底层呈现季节性缺氧。对于较深的湖库,通过将底部和表层水体进行垂向交换,抑制表层水体浮游植物生长。例如,基于扬水筒改进而成的扬水曝气器通过直接充氧和混合充氧双重作用增加下层水体氧浓度,抑制底泥中污染物的释放,同时通过循环水流来混合上、下水层,使表层藻类迁移至低光照、低温、低溶解氧的中下部水体,进而有效降低分层水库中表层藻密度^[128]。另外,美国卡内基的科学家们提出利用水体向下流动方式进行湖泊或海洋中缺氧“死区”修复,也就是从水体表面泵入更多含氧的水分散到下部深处缺氧区^[129]。应用水动力学原理,通过改变水体平面流场,控制营养盐及藻类的输移扩散,并进一步限制光照、水温等生境要素,达到控藻的效果。作为一种表层流场控制方法,整流幕技术适合狭长性湖库流场调控,已在日本的 Terauchi 水库成功应用^[130]。

4.4 絮凝沉降技术

絮凝沉降是污水处理中的常用技术,在湖泊污染治理中也有应用。无机絮凝剂(如铁铝盐)、有机絮凝剂(壳聚糖)、黏土及改性黏土等都被尝试用于絮凝除藻^[131-132]。该技术的关键是絮凝过程中形成的絮体团在一定扰动作用下能快速沉降;需要注意的是絮凝沉降后藻类死亡可能会释放大量营养盐、有机物和藻毒素等,引发二次污染风险^[133]。同时,絮凝沉降技术不但能很好地降低封闭湖泊水体中磷的浓度^[134],而且对于湖泊突发的重金属污染有较好的防治效果。云南省 9 大高原湖泊之一的阳宗海在 2008 年 6 月突发砷污染事件后,采用水面喷洒絮凝剂(铁盐)的方法大规模去除湖水中的砷,大量被吸附的砷随铁盐沉淀到沉积物中。依据《2019 中国生态环境状况公报》,阳宗海全湖砷浓度均值低于 0.050 mg/L,各层沉积物都以残渣态砷为主,不易溶出,但是需要关注生态风险随时间推移的变化趋势^[135-136]。

4.5 蓝藻水华控制技术

水华是富营养化最常见的次生灾害,是国内外湖泊面临的主要环境问题之一。水华控制技术包括异位技术和原位技术。异位技术主要指“捞藻”,通过机械除藻,在异地进行处理处置。原位技术主要包括物理强化、化学强化、生物强化 3 类。其中物理强化技术以水动力控藻和超声波控藻为主,前者通过水力循环提升湖泊自净能力,抑制蓝藻暴发;后者通过超声波破坏藻类细胞结构,达到抑藻的目的。化学强化技术主要有黏土除藻技术、化学除藻剂等。近年来,具有代表性的技术是利用农业秸秆作为抗藻剂来控制水华^[137]。该技术原理包括秸秆提取液“对藻类细胞酶活性的改变”,及提取液中化感物质“对藻类光合作用的抑制”、“对藻细胞膜和形态的改变”以及“对藻细胞内基因表达的影响”。生物强化技术主要有生物操纵法、水生植物控藻技术和微生物控藻技术。目前,非经典生物操纵法已肯定了滤食性鱼类对藻类水华的控制效果。水生植物与藻类既竞争阳光和营养,也存在彼此分泌化学物质的相互影响。微生物能够通过直接接触溶藻和间接溶藻两种方式抑藻,其中溶藻细菌多为革兰氏阴性菌,而间接溶藻是细菌通过分泌蛋白质、多肽类和氨基酸等胞外物质或通过竞争氮、磷等营养而抑藻。基于“鱼藻共存”的生态控藻技术已在太湖、上海滴水湖等得到应用,取得了良好的效果^[138]。总体上,物理、化学方法大多数能从短期内抑制水华藻类生长,却难以从根本上解决水华问题,主要为临时应急处理方法。生物方法在作用过程中对水质或水体有改善作用,但存在生物污染物及作用时间相对较长等问题,在实际应用中,应从生态系统角度,有针对性地采取综合措施。

4.6 湖泊底泥污染修复技术

湖泊底泥是输入的外源污染的“汇”,也是上覆水体污染的“源”,底泥污染修复可分为异位和原位技术两大类。异位修复技术如疏浚是通过将湖内污染物移出,根据污染特征和周边场地情况,在异地选择相应技术进行修复处理;该方式可将大量污染物转移出湖泊^[139],但后续污染的高效处置及资源化利用技术还有待完善。原位修复技术是根据底泥的污染情况,直接对污染区域进行修复,根据技术原理可分为原位物化修复技术、原位生物修复技术和原位联合修复技术。

原位物化修复技术主要包括覆盖、钝化以及下层滞水带曝气等技术,其中:(1)原位覆盖技术是通过投

加各种材料至湖泊底泥,将污染沉积物与上覆水体进行物理性阻隔来降低底泥污染风险^[140]。不过,针对浅水湖泊或者强扰动水体的修复,大量材料的投加易对湖泊生态环境产生负面影响,且水力条件复杂时,覆盖层易被破坏。(2)原位钝化技术是通过投加活性材料,原位固定底泥中污染物以及去除水体中污染物,使污染物在底泥中钝化,降低污染风险^[140]。该技术主要适用于在自然条件下可被物化作用固定的污染物,如磷、金属和有毒有机物,目前关注较多的活性材料包括天然材料(如黏土、沸石、凹凸棒)、改性材料(如改性黏土、改性沸石)、化学药剂(如铁盐、铝、钙盐)、炭基材料(如活性炭和生物炭)、纳米材料(如纳米铁和纳米金属氧化物)、废弃物(如给水厂污泥)等^[141-143]。原位钝化技术适用性研究的重点是活性材料对污染物的固定能力和对湖泊的潜在生态影响^[141],应聚焦于钝化材料的研发,开发出多功能、复合型以及生态友好型的材料是未来的发展趋势和方向。(3)下层滞水带曝气技术是通过提高或维持水体底部的溶解氧来抑制底泥释放污染物^[144]。该技术的核心在于如何实现充分曝气冲氧,关键在于曝气系统的设置、曝气方式的选择等^[145]。该技术虽不适合相对较浅的热分层湖泊,但可有效抑制底泥释放磷、汞等污染物。针对不同类型的污染,3种技术已在国内外得到应用,如加拿大安大略湖、荷兰 De Kuil 湖、丹麦 Hald 湖等^[146-148]。

原位生物修复技术通过生物学原理或方法来实现对湖泊污染的原位控制,同时涉及降低污染物可移动性和减少污染物浓度,是有毒有机物污染控制的主导技术。主要包括自然衰减、微生物修复技术、植物修复技术和沉积物微生物燃料电池技术,其中:(1)自然衰减是指有毒有机物污染物在各种作用下(如降解、固定、稀释等)污染风险降低的过程^[139]。主要包括利用无污染底泥覆盖受污染底泥,以及有机污染物的生物有效性自然降低两个部分^[149]。(2)微生物修复技术可分为微生物强化技术和微生物投加技术,前者是根据污染物降解途径,有目的地改变环境条件,如调节溶解氧、投加电子受体/供体等,以强化本土微生物群落对污染物的降解^[149];后者是通过投加具有特定代谢能力的微生物,以丰富土著微生物群落,从而促进有毒有机物的降解^[139]。针对金属污染,生物强化和生物投加的目的与有机污染修复的类似,但作用机制存有差异^[150]。(3)沉积物微生物燃料电池技术也属于微生物修复技术,是将阴、阳极分别置于上覆水(好氧环境)和沉积物(厌氧环境)中,沉积物中产电微生物将可氧化底物产生的电子传递到阳极上,并在电位差的驱动下,通过导线向阴极转移,形成电流^[151]。沉积物燃料电池技术可被用于有毒有机物/金属污染修复^[152]。(4)植物修复技术指利用植物固定、去除或降解底泥中污染物;该技术适用于浅水湖泊,可用于有毒有机物和金属的污染控制^[153]。有毒有机物污染的修复涉及植物吸收、根际修复(降解或固定等)和植物降解3种机制,而金属污染修复主要涉及前两种机制^[150]。据报道,植物修复技术对印度 Nainital 湖的重金属控制具有显著作用^[154]。

为了提高湖泊污染控制的有效性,越来越多的研究者尝试将各种物化和生物技术联合进行应用。原位联合修复技术可分物化联合修复技术、物化-植物联合修复技术、物化-微生物联合修复技术、物化-沉积物微生物电化学联合修复技术、微生物-植物修复技术、植物-沉积物电化学修复技术等^[140,155]。联合修复技术已用于各种污染的控制(包括氮和磷)^[156-157],但在重金属和有毒有机污染修复中也较为常见^[140,155]。其主要原理有两种类型:一种是强化修复效率,增强污染物的去除或降解。例如植物修复-污染物活化联用去除沉积物重金属^[155]、沉积物微生物燃料电池技术-无定型氢氧化铁联用控制沉积物有毒有机物污染^[158]。另一种是在控制污染物生态风险的前提下,有效去除污染物。例如植物修复-污染物固定联用去除沉积物重金属^[155]、生物膜-活性炭联用控制沉积物有毒有机物污染^[153]。目前原位联合修复技术仍停留在小规模试验阶段,尚未得到广泛应用。需要指出的是,关于修复技术研究 with 湖泊本身类型结合考虑的案例不是很多,实际上湖泊地形地貌、面积、水深、湖流等湖泊物理特性应是选择修复技术的重要考虑因素。

5 展望

湖泊环境与工程学科经历了 1990s 的酝酿阶段,到 21 世纪初期,从零星的湖泊环境治理保护的研究工作与实践逐渐发展成为一门新兴学科。湖泊环境污染是人类面临的主要环境问题之一,由于湖泊系统尺度大、污染来源多、可控性差等特点,湖泊环境治理和生态修复要遵循生态工程和应用湖沼学的基本原则,在对湖泊生态问题进行科学诊断的基础上,也需要与环境科学、环境工程、环境水力学、水利工程、智慧感知等学科交叉融合。

环境科学的主要任务是研究在人类活动的影响下,环境质量的规律和环境变化对人类生存的影响,以及保护和改善环境质量的理论、技术和方法。湖泊环境科学研究尺度应向宏观与微观两极延伸,着重污染物的环境行为与消减过程的机理研究,为环境工程技术研发提供理论基础。环境工程学是一门运用环境科学、工程学和其他有关学科的理论和方法,研究保护和合理利用自然资源,控制和防治环境污染与生态破坏,进而改善环境质量,使人类得以健康和舒适地生存与发展的学科^[159]。自来水净化和污水治理方面的新技术、新方法不断涌现,而自然水体包括河湖水库的污染治理也逐渐成为环境工程学科关注的研究领域。控制环境污染不仅要采用单项治理技术,还应当采用经济、法律和管理等各种手段,与工程技术相结合的综合防治措施,对环境问题及其防治措施进行综合分析,以求得整体上的最佳效果和优化方案;另外,环境工程学建立的水污染化和生物治理的理论、方法及工艺对于湖泊环境治理同样具有借鉴指导作用。

在湖泊系统中,污染物环境行为如迁移扩散受水动力过程影响,而认识污染物在湖泊生态系统中的扩散输移过程是其防控治理的关键。经过几十年的发展,环境水质模型由早期的简单 SP 模型到现在的大型生态动力学模型,并且形成了多套大型商业软件,如 EFDC、Delft3D、WASP 等。利用环境水力学模型,结合水体污染物生化反应过程认识,分析污染物在湖泊中的时空差异变化特征是湖泊环境研究的重要方向,在环境影响评价、水质管理、水环境预测、环境修复等应用领域发挥着越来越重要的作用。

湖泊治理修复和水利工程关系密切,而传统水利正在向环境水利及生态水利转变。生态水利是生态系统和水利调控关系的基础和应用基础研究,主要涉及水利工程对生态系统产生影响的机理、机制和效应,受水利工程影响的生态(系统)修复或恢复方法,水利工程建设运行与生态系统安全健康协同的可持续发展模式。应用水利方法进行活水循环以及控制湖泊的水力停留时间,已被认为是改善湖泊环境质量及控制蓝藻过度生长的有效方法^[160]。对于有条件进行水位调控的湖泊,不同时段的水位调控将有助于提高湖滨带底质适生性、及沉水植物生长,从而可辅助于湖泊生态恢复进程^[161-162]。

智慧感知和大数据技术对于湖泊系统的治理修复和长效管理具有重要的支撑作用,与大数据技术深度融合的湖泊信息化技术将促进湖泊生态环境智慧修复与管理更好、更快地发展。“智慧湖泊”是利用先进的技术和手段对湖泊进行实时监测,对湖泊物理、化学、水文、地质、生物、湖泊流域历史变迁,生态系统的自然演变规律等进行采集,建立湖泊的数据资源库。但目前“智慧湖泊”与湖泊治理修复尚未能有效衔接。以智慧感知实时监测湖泊水文、环境生态变化过程为基础,整合污染治理、生态修复、生态水利调控等技术方法于一体,预计将是湖泊修复及长效管理的发展趋势。

湖泊治理是一项长期工程。日本的霞浦湖治理耗时将近 40 年,仍处于富营养化状态,而德国的波登湖水质恢复历经 37 年。由于我国特殊的地理背景、人口结构及经济形态,我国湖泊面临着更强的人为活动压力,湖泊治理十分艰难,耗资巨大。未来在总结湖泊环境治理研究成果及修复工程实践的基础上,需按照污染物类别、污染程度、营养状态水平、流域土地利用强度、社会经济压力等指标,对湖泊状态进行分类,针对性地开展湖泊治理与保护工作。对于重污染湖泊,应强化治理修复,恢复生态功能;而对于良好湖泊,应坚持保护优先的原则,维持生态系统健康。

由于湖泊水体“汇”的特性,营养盐、重金属、有机污染等导致的复合污染给湖泊环境与工程技术研究带来了新的挑战,但目前湖泊环境研究的重视程度并不能满足湖泊污染日益严峻的需求。具体而言,污染物的环境行为研究大多数针对单一污染物在虚拟体系中的特定环境行为,难以适应湖泊复杂水体环境的现实需求;目前主要关注新兴污染物的分布及浓度,对其生消过程、毒性风险及防控技术认知不足;湖泊次生灾害与复合污染问题仍缺乏有效的防控策略、治理技术与设备;湖泊环境监测技术与设备的精度、准确度、时效仍有较大的进步空间;缺乏能解决实际湖泊治理修复需求的创新工程技术体系和装备;对湖泊及流域环境变化与关键过程模拟、控制的研究匮乏,缺乏系统、综合性的研究成果。未来在兼顾全面性、交叉性、独立性、应用性的前提下,针对湖泊地形地貌等自身特点,应重点研究变化环境条件下湖泊及流域水环境和水生态质量演变规律、污染物迁移转化过程、生态环境效应和污染控制理论和技术方法。既要利用多学科的知识、研究手段及工程技术,完善湖泊环境与工程技术理论体系,为湖泊环境改善提供技术与装备,也要为国家管理部门指定湖泊环境管理方面的法律、法规、政策及其他管理制度的制定提供坚实支撑。

6 参考文献

- [1] Yang GS, Ma RH, Zhang L *et al.* Lake status, major problems and protection strategy in China. *J Lake Sci*, 2010, **22**(6): 799-810. DOI: 10.18307/2010.0601. [杨桂山, 马荣华, 张路等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略. 湖泊科学, 2010, **22**(6): 799-810.]
- [2] Bai L, Zhang Q, Li XH. Review on variation characteristics and the key impact factors of lake water quantity. *International Journal Hydroelectric Energy*, 2010, **28**(3): 30-35. [白丽, 张奇, 李相虎. 湖泊水量变化关键影响因子研究综述. 水电能源科学, 2010, **28**(3): 30-35.]
- [3] Jin XC, Liu HL, Tu QY *et al.* eds. Eutrophication of lakes in China. Beijing: China Environment Science Press, 1990. [金相灿, 刘鸿亮, 屠清瑛等. 中国湖泊富营养化. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.]
- [4] Zhong JC, Fan CX. Advance in the study on the effectiveness and environmental impact of sediment dredging. *J Lake Sci*, 2007, **19**(1): 1-10. DOI: 10.18307/2007.0101. [钟继承, 范成新. 底泥疏浚效果及环境效应研究进展. 湖泊科学, 2007, **19**(1): 1-10.]
- [5] Sheng D, Li JF, Sun FF *et al.* Study on water-salt change of some inland lakes in arid areas and the control mechanism. *Arid Zone Research*, 2010, **27**(4): 529-535. [盛东, 李俊峰, 孙飞飞等. 干旱区内陆湖泊水盐变化及调控机理. 干旱区研究, 2010, **27**(4): 529-535.]
- [6] Jiang LJ, Hu XZ, Xu QJ *et al.* Analysis on the presentation and countermeasures of China lake aquatic-terrestrial ecotone ecological degradation. *Journal of Biology*, 2011, **28**(5): 65-69. [蒋丽佳, 胡小贞, 许秋瑾等. 湖滨带生态退化现状、原因分析及对策. 生物学杂志, 2011, **28**(5): 65-69.]
- [7] Cai YJ, Gong ZJ, Qin BQ. Community structure and diversity of macrozoobenthos in Lake Taihu, a large shallow eutrophic lake in China. *Biodiversity Science*, 2010, **18**(1): 50-59. [蔡永久, 龚志军, 秦伯强. 太湖大型底栖动物群落结构及多样性. 生物多样性, 2010, **18**(1): 50-59.]
- [8] Wang P, Lu SY, Wang DW *et al.* Nitrogen, phosphorous and organic matter spatial distribution characteristics and their pollution status evaluation of sediments nutrients in lakeside zones of Taihu Lake. *China Environmental Science*, 2012, **32**(4): 703-709. [王佩, 卢少勇, 王殿武等. 太湖湖滨带底泥氮、磷、有机质分布与污染评价. 中国环境科学, 2012, **32**(4): 703-709.]
- [9] Wu L, Liu GJ, Zhou CC *et al.* Spatio-temporal distribution and pollution evaluation of soluble heavy metals in Chaohu Lake. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 738-747. [吴蕾, 刘桂建, 周春财等. 巢湖水体可溶态重金属时空分布及污染评价. 环境科学, 2018, **39**(2): 738-747.]
- [10] Ouyang QL, Liu WL. Variation characteristics of water level in Poyang Lake over 50 years. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, **23**(11): 1545-1550. [欧阳千林, 刘卫林. 近 50 年鄱阳湖水位变化特征研究. 长江流域资源与环境, 2014, **23**(11): 1545-1550.]
- [11] Lai XJ, Jiang JH, Huang Q. Pattern of impoundment effects and influencing mechanism of Three Gorges Project on water regime of Lake Dongting. *J Lake Sci*, 2012, **24**(2): 178-184. DOI: 10.18307/2012.0202. [赖锡军, 姜加虎, 黄群. 三峡工程蓄水对洞庭湖水情的影响格局及其作用机制. 湖泊科学, 2012, **24**(2): 178-184.]
- [12] Zhang MM, Wu XQ. Changes in hydrological connectivity and spatial morphology of Baiyangdian wetland over the last 20 years. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(12): 4205-4213. [张梦嫫, 吴秀芹. 近 20 年白洋淀湿地水文连通性及空间形态演变. 生态学报, 2018, **38**(12): 4205-4213.]
- [13] Ma XH, Han XX, Jiang QL *et al.* Historical records and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons over the past 100 years in Dianchi Lake, a plateau lake in Southwest China. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2018, **75**(2): 187-198. DOI: 10.1007/s00244-018-0525-y.
- [14] Sun XL. Simulation of water quality improvement effect for lake in arid and semi-arid areas. *Environmental Science and Management*, 2016, **41**(7): 117-120. [孙晓丽. 干旱半干旱区湖泊水质改善效果模拟. 环境科学与管理, 2016, **41**(7): 117-120.]
- [15] Liu C, Zhu LP, Wang JB *et al.* Remote sensing-based estimation of lake water clarity on the Tibetan Plateau. *Progress in Geography*, 2017, **36**(5): 597-609. [刘翀, 朱立平, 王君波等. 基于 MODIS 的青藏高原湖泊透明度遥感反演. 地理科学进展, 2017, **36**(5): 597-609.]

- [16] Zhao ZH, Zhang L, Wu JL. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and organochlorine pesticides (OCPs) in sediments from lakes along the middle-lower reaches of the Yangtze River and the Huaihe River of China. *Limnology and Oceanography*, 2016, **61**(1): 47-60. DOI: 10.1002/lno.10197.
- [17] Niu Y, Jiang X, Wang K *et al.* Meta analysis of heavy metal pollution and sources in surface sediments of Lake Taihu, China. *Science of the Total Environment*, 2020, **700**: 134509. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134509.
- [18] Xu T, Zhao WT, Guo XP *et al.* Characteristics of antibiotics and antibiotic resistance genes in Qingcaosha Reservoir in Yangtze River Delta, China. *Environmental Sciences Europe*, 2020, **32**: 82. DOI: 10.1186/s12302-020-00357-y.
- [19] Zhou LJ, Zhang BB, Zhao YG *et al.* Occurrence, spatiotemporal distribution, and ecological risks of steroids in a large shallow Chinese lake, Lake Taihu. *Science of the Total Environment*, 2016, **557/558**: 68-79. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.03.059.
- [20] Xue QJ, Rediske RR, Gong ZJ *et al.* Spatio-temporal variation of microcystins and its relationship to biotic and abiotic factors in Hongze Lake, China. *Journal of Great Lakes Research*, 2018, **44**(2): 253-262. DOI: 10.1016/j.jglr.2017.12.004.
- [21] Wan X, Steinman AD, Shu XB *et al.* Combined toxic effects of microcystin-LR and phenanthrene on growth and antioxidant system of duckweed (*Lemna gibba* L.). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **185**: 109668. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2019.109668.
- [22] Chen M, Ye TR, Krumholz LR *et al.* Temperature and cyanobacterial bloom biomass influence phosphorous cycling in eutrophic lake sediments. *PLoS ONE*, 2014, **9**(3): e93130. DOI: 10.1371/journal.pone.0093130.
- [23] Chen MS, Ding SM, Chen X *et al.* Mechanisms driving phosphorus release during algal blooms based on hourly changes in iron and phosphorus concentrations in sediments. *Water Research*, 2018, **133**: 153-164. DOI: 10.1016/j.watres.2018.01.040.
- [24] Yang P, Yang CH, Yin HB. Dynamics of phosphorus composition in suspended particulate matter from a turbid eutrophic shallow lake (Lake Chaohu, China): Implications for phosphorus cycling and management. *Science of the Total Environment*, 2020, **741**: 140203. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140203.
- [25] Qin BQ, Zhou J, Elser JJ *et al.* Water depth underpins the relative roles and fates of nitrogen and phosphorus in lakes. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(6): 3191-3198. DOI: 10.1021/acs.est.9b05858.
- [26] Kuypers MMM, Marchant HK, Kartal B. The microbial nitrogen-cycling network. *Nature Reviews Microbiology*, 2018, **16**(5): 263-276. DOI: 10.1038/nrmicro.2018.9.
- [27] Li Y, Sun Y, Zhang HJ *et al.* The responses of bacterial community and N₂O emission to nitrogen input in lake sediment: Estrogen as a co-pollutant. *Environmental Research*, 2019, **179**: 108769. DOI: 10.1016/j.envres.2019.108769.
- [28] McCarthy MJ, Gardner WS, Lehmann MF *et al.* Benthic nitrogen regeneration, fixation, and denitrification in a temperate, eutrophic lake: Effects on the nitrogen budget and cyanobacteria blooms. *Limnology and Oceanography*, 2016, **61**(4): 1406-1423. DOI: 10.1002/lno.10306.
- [29] Zhong JC, Yu JH, Wang JJ *et al.* The co-regulation of nitrate and temperature on denitrification at the sediment-water interface in the algae-dominated ecosystem of Lake Taihu, China. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, **20**(4): 2277-2288. DOI: 10.1007/s11368-019-02558-2.
- [30] Jiang XY, Gao G, Zhang L *et al.* Denitrification and dissimilatory nitrate reduction to ammonium in freshwater lakes of the Eastern Plain, China: Influences of organic carbon and algal bloom. *Science of the Total Environment*, 2020, **710**: 136303. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.136303.
- [31] Qian HF, Lu T, Song H *et al.* Spatial variability of cyanobacteria and heterotrophic bacteria in Lake Taihu (China). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2017, **99**(3): 380-384. DOI: 10.1007/s00128-017-2149-8.
- [32] Yao XL, Zhang L, Zhang YL *et al.* Nitrogen fixation occurring in sediments: Contribution to the nitrogen budget of Lake Taihu, China. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2018, **123**(9): 2661-2674. DOI: 10.1029/2018jg004466.
- [33] Bertics VJ, Löscher CR, Salonen I *et al.* Occurrence of benthic microbial nitrogen fixation coupled to sulfate reduction in the seasonally hypoxic Eckernförde Bay, Baltic Sea. *Biogeosciences*, 2013, **10**(3): 1243-1258. DOI: 10.5194/bg-10-1243-2013.
- [34] Xu H, Chen J, Zhu GW *et al.* Effect of concentrations of phosphorus and nitrogen on the dominance of cyanobacteria. *J Lake Sci*, 2019, **31**(5): 1239-1247. DOI: 10.18307/2019.0518. [许海, 陈洁, 朱广伟等. 水体氮、磷营养盐水平对

- 蓝藻优势形成的影响. 湖泊科学, 2019, 31(5): 1239-1247.]
- [35] Xie LQ, Xie P, Li SX *et al.* The low TN:TP ratio, a cause or a result of *Microcystis* blooms? *Water Research*, 2003, 37(9): 2073-2080. DOI: 10.1016/s0043-1354(02)00532-8.
- [36] Li Z, Liu JJ, Chen HL *et al.* Water environment in the Tibetan Plateau: Heavy metal distribution analysis of surface sediments in the Yarlung Tsangpo River Basin. *Environmental Geochemistry and Health*, 2019. DOI: 10.1007/s10653-019-00409-0.
- [37] Zhu JS, Gao RX, Wang YM *et al.* The diffusion flux of mercury at water/sediment interface in water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir. *Earth and Environment*, 2018, 46(2): 164-172. [朱金山, 高润霞, 王永敏等. 三峡库区消落带沉积物-水界面汞的扩散特征. 地球与环境, 2018, 46(2): 164-172.]
- [38] Zhang Z, Zhang RY, Wang LY *et al.* Advances in the study of bioavailability of heavy metals in freshwater sediments. *Earth and Environment*, 2020, 48(3): 385-394. [张志, 张润宇, 王立英等. 淡水沉积物中重金属生物有效性的研究进展. 地球与环境, 2020, 48(3): 385-394.]
- [39] Bravo AG, Bouchet S, Tolu J *et al.* Molecular composition of organic matter controls methylmercury formation in boreal lakes. *Nature Communications*, 2017, 8: 14255. DOI: 10.1038/ncomms14255.
- [40] Mangal V, Stenzler BR, Poulain AJ *et al.* Aerobic and anaerobic bacterial mercury uptake is driven by algal organic matter composition and molecular weight. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(1): 157-165. DOI: 10.1021/acs.est.8b04909.
- [41] Xu HC, Yu GH, Yang LY *et al.* Combination of two-dimensional correlation spectroscopy and parallel factor analysis to characterize the binding of heavy metals with DOM in lake sediments. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 263: 412-421. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2013.09.042.
- [42] du Laing G, Rinklebe J, Vandecasteele B *et al.* Trace metal behaviour in estuarine and riverine floodplain soils and sediments; A review. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(13): 3972-3985. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2008.07.025.
- [43] Mao LC, Ye H. Influence of redox potential on heavy metal behavior in soils; A review. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(10): 1669-1676. [毛凌晨, 叶华. 氧化还原电位对土壤中重金属环境行为的影响研究进展. 环境科学研究, 2018, 31(10): 1669-1676.]
- [44] Monteiro CM, Castro PML, Malcata FX. Metal uptake by microalgae; Underlying mechanisms and practical applications. *Biotechnology Progress*, 2012, 28(2): 299-311. DOI: 10.1002/btpr.1504.
- [45] Wu FC, Jin XC, Zhang RY *et al.* Effects and significance of organic nitrogen and phosphorous in the lake aquatic environment. *J Lake Sci*, 2010, 22(1): 1-7. DOI: 10.18307/2010.0101. [吴丰昌, 金相灿, 张润宇等. 论有机氮磷在湖泊水环境中的作用和重要性. 湖泊科学, 2010, 22(1): 1-7.]
- [46] Chen LZ, Wang D, Cao RW *et al.* Bioaccumulation and biotransformation of inorganic arsenic in *Ruditapes philippinarum*. *Marine Science Bulletin*, 2017, 36(3): 326-332. [陈丽竹, 王丹, 曹瑞文等. 菲律宾蛤仔对三价和五价无机砷的富集转化规律. 海洋通报, 2017, 36(3): 326-332.]
- [47] Li Q, Xu X, Fang YY *et al.* The temporal changes of the concentration level of typical toxic organics in the river sediments around Beijing. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2018, 12(6): 8. DOI: 10.1007/s11783-018-1054-7.
- [48] Liu D, Tao YQ, Zhou WZ. Distribution and accumulation of persistent organic pollutants in aquatic organisms of Chinese lakes. *J Lake Sci*, 2018, 30(3): 581-596. DOI: 10.18307/2018.0301. [刘东红, 陶玉强, 周文佐. 持久性有机污染物在中国湖泊生物中分布与富集的研究进展. 湖泊科学, 2018, 30(3): 581-596.]
- [49] Salgueiro-González N, López de Alda MJ, Muniategui-Lorenzo S *et al.* Analysis and occurrence of endocrine-disrupting chemicals in airborne particles. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2015, 66: 45-52. DOI: 10.1016/j.trac.2014.11.006.
- [50] He Y, Wang QM, He W *et al.* The occurrence, composition and partitioning of phthalate esters (PAEs) in the water-suspended particulate matter (SPM) system of Lake Chaohu, China. *Science of the Total Environment*, 2019, 661: 285-293. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.161.
- [51] Wilkinson J, Hooda PS, Barker J *et al.* Occurrence, fate and transformation of emerging contaminants in water; An overarching review of the field. *Environmental Pollution*, 2017, 231: 954-970. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.08.032.
- [52] Gregg T, Prahl FG, Simoneit BRT. Suspended particulate matter transport of polycyclic aromatic hydrocarbons in the lower Columbia River and its estuary. *Limnology and Oceanography*, 2015, 60(6): 1935-1949. DOI: 10.1002/lno.10144.

- [53] Bai LL, Zhang Q, Wang CH *et al.* Effects of natural dissolved organic matter on the complexation and biodegradation of 17 α -ethinylestradiol in freshwater lakes. *Environmental Pollution*, 2019, **246**: 782-789. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.12.098.
- [54] Bai LL, Zhao Z, Wang CL *et al.* Multi-spectroscopic investigation on the complexation of tetracycline with dissolved organic matter derived from algae and macrophyte. *Chemosphere*, 2017, **187**: 421-429. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.08.112.
- [55] Bai LL, Cao CC, Wang CL *et al.* Roles of phytoplankton- and macrophyte-derived dissolved organic matter in sulfamethazine adsorption on goethite. *Environmental Pollution*, 2017, **230**: 87-95. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.06.032.
- [56] Liber Y, Mourier B, Marchand P *et al.* Past and recent state of sediment contamination by persistent organic pollutants (POPs) in the Rhône River: Overview of ecotoxicological implications. *Science of the Total Environment*, 2019, **646**: 1037-1046. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.340.
- [57] Zhang YW, Wang L, Sun HW *et al.* Impacts of loach bioturbation on the selective bioaccumulation of HBCDD diastereoisomers and enantiomers by mirror carp in a microcosm. *Chemosphere*, 2016, **163**: 471-479. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.08.065.
- [58] Peng SC, Huang YL, Zhu SG *et al.* Vertical distributions and sediment-water diffusion fluxes of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Chaohu Lake using an *in situ* passive sampler. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(2): 491-498. [彭书传, 黄亚龙, 朱曙光等. 基于原位被动采样技术研究巢湖沉积物和水体中 PAHs 的垂直分布及其界面交换. *环境科学学报*, 2019, **39**(2): 491-498.]
- [59] Cheng HM, Hua ZL. Effects of hydrodynamic disturbances and resuspension characteristics on the release of tetrabromobisphenol A from sediment. *Environmental Pollution*, 2016, **219**: 785-793. DOI: 10.1016/j.envpol.2016.07.055.
- [60] Wang H, Yao H, Sun PZ *et al.* Transformation of tetracycline antibiotics and Fe(II) and Fe(III) species induced by their complexation. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(1): 145-153. DOI: 10.1021/acs.est.5b03696.
- [61] Yan ZS, Hao Z, Wu HF *et al.* Co-occurrence patterns of the microbial community in polycyclic aromatic hydrocarbon-contaminated riverine sediments. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, **367**: 99-108. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.12.071.
- [62] Zhang C, Li Y, Wang C *et al.* Occurrence of endocrine disrupting compounds in aqueous environment and their bacterial degradation: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2016, **46**(1): 1-59. DOI: 10.1080/10643389.2015.1061881.
- [63] Martins M, Sanches S, Pereira IAC. Anaerobic biodegradation of pharmaceutical compounds: New insights into the pharmaceutical-degrading bacteria. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, **357**: 289-297. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.06.001.
- [64] Yan ZS, He YH, Cai HY *et al.* Interconnection of key microbial functional genes for enhanced benzo[a]pyrene biodegradation in sediments by microbial electrochemistry. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(15): 8519-8529. DOI: 10.1021/acs.est.7b00209.
- [65] Yan ZS, Jiang HL, Li XH *et al.* Accelerated removal of pyrene and benzo[a]pyrene in freshwater sediments with amendment of cyanobacteria-derived organic matter. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, **272**: 66-74. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2014.02.042.
- [66] Bai LL, Cao CC, Wang CH *et al.* Toward quantitative understanding of the bioavailability of dissolved organic matter in freshwater lake during cyanobacteria blooming. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(11): 6018-6026. DOI: 10.1021/acs.est.7b00826.
- [67] Hoikkala L, Tammert H, Lignell R *et al.* Autochthonous dissolved organic matter drives bacterial community composition during a bloom of filamentous cyanobacteria. *Frontiers in Marine Science*, 2016, **3**: 111. DOI:10.3389/fmars.2016.00111.
- [68] Decho AW, Gutierrez T. Microbial extracellular polymeric substances (EPSs) in ocean systems. *Frontiers in Microbiology*, 2017, **8**: 922. DOI:10.3389/fmicb.2017.00922.
- [69] Tan DT, Temme HR, Arnold WA *et al.* Estrone degradation: Does organic matter (quality), matter? *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(1): 498-503. DOI: 10.1021/es504424v.
- [70] Gu LP, Huang B, Lai CC *et al.* The microbial transformation of 17 β -estradiol in an anaerobic aqueous environment is mediated by changes in the biological properties of natural dissolved organic matter. *Science of the Total Environment*, 2018, **631**: 641-648. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.056.

- [71] Gu LP, Huang B, Xu ZX *et al.* Dissolved organic matter as a terminal electron acceptor in the microbial oxidation of steroid estrogen. *Environmental Pollution*, 2016, **218**: 26-33. DOI: 10.1016/j.envpol.2016.08.028.
- [72] Da browska D, Kot-Wasik A, Namieśnik J. The importance of degradation in the fate of selected organic compounds in the environment. Part II. Photodegradation and biodegradation. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2004, **13**(6): 617-626.
- [73] Niu XZ, Busetti F, Langsa M *et al.* Roles of singlet oxygen and dissolved organic matter in self-sensitized photo-oxidation of antibiotic norfloxacin under sunlight irradiation. *Water Research*, 2016, **106**: 214-222. DOI: 10.1016/j.watres.2016.10.002.
- [74] Remucal CK. The role of indirect photochemical degradation in the environmental fate of pesticides: A review. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2014, **16**(4): 628. DOI: 10.1039/c3em00549f.
- [75] Bergheim M, Gminski R, Spangenberg B *et al.* Recalcitrant pharmaceuticals in the aquatic environment: A comparative screening study of their occurrence, formation of phototransformation products and their *in vitro* toxicity. *Environmental Chemistry*, 2014, **11**(4): 431. DOI: 10.1071/en13218.
- [76] Jia YL, Chen QQ, Crawford SE *et al.* Cyanobacterial blooms act as sink and source of endocrine disruptors in the third largest freshwater lake in China. *Environmental Pollution*, 2019, **245**: 408-418. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.11.021.
- [77] Bai LL, Cao CC, Wang CH *et al.* Response of bloom-forming cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* to 17 β -estradiol at different nitrogen levels. *Chemosphere*, 2019, **219**: 174-182. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.11.214.
- [78] Bai LL, Xu HC, Wang CH *et al.* Extracellular polymeric substances facilitate the biosorption of phenanthrene on cyanobacteria *Microcystis aeruginosa*. *Chemosphere*, 2016, **162**: 172-180. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.07.063.
- [79] Lin H, Xia XH, Bi SQ *et al.* Quantifying bioavailability of pyrene associated with dissolved organic matter of various molecular weights to *Daphnia magna*. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52**(2): 644-653. DOI: 10.1021/acs.est.7b05520.
- [80] Martinez JL. Environmental pollution by antibiotics and by antibiotic resistance determinants. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(11): 2893-2902. DOI: 10.1016/j.envpol.2009.05.051.
- [81] Czekalski N, Sigdel R, Birtel J *et al.* Does human activity impact the natural antibiotic resistance background? Abundance of antibiotic resistance genes in 21 Swiss lakes. *Environment International*, 2015, **81**: 45-55. DOI: 10.1016/j.envint.2015.04.005.
- [82] Kwon JH, Chang S, Hong SH *et al.* Microplastics as a vector of hydrophobic contaminants; Importance of hydrophobic additives. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2017, **13**(3): 494-499. DOI: 10.1002/ieam.1906.
- [83] Fisner M, Majer A, Taniguchi S *et al.* Colour spectrum and resin-type determine the concentration and composition of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in plastic pellets. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, **122**(1/2): 323-330. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2017.06.072.
- [84] Wu CC, Bao LJ, Liu LY *et al.* Impact of polymer colonization on the fate of organic contaminants in sediment. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(18): 10555-10561. DOI: 10.1021/acs.est.7b03310.
- [85] Browne MA, Dissanayake A, Galloway TS *et al.* Ingested microscopic plastic translocates to the circulatory system of the mussel, *Mytilus edulis* (L.). *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(13): 5026-5031. DOI: 10.1021/es800249a.
- [86] Xue B, Yao SC, Wang SM *et al.* Enrichment of nutrients and analysis of its reason in sediments of different kinds of lakes at middle and lower Yangtze River basin. *Quaternary Sciences*, 2007, **27**(1): 122-127. [薛滨, 姚书春, 王苏民等. 长江中下游不同类型湖泊沉积物营养盐蓄积变化过程及其原因分析. 第四纪研究, 2007, **27**(1): 122-127.]
- [87] Lu GH, Ma Q. Analysis on the causes of forming black water cluster in Taihu Lake. *Advances in Water Science*, 2009, **20**(3): 438-442. [陆桂华, 马倩. 太湖水域“湖泛”及其成因研究. 水科学进展, 2009, **20**(3): 438-442.]
- [88] Fan CX. Progress and prospect in formation of black bloom in Lake Taihu: A review. *J Lake Sci*, 2015, **27**(4): 553-566. DOI: 10.18307/2015.0401. [范成新. 太湖湖泛形成研究进展与展望. 湖泊科学, 2015, **27**(4): 553-566.]
- [89] Pucciarelli S, Buonanno F, Pellegrini G *et al.* Biomonitoring of Lake Garda: Identification of ciliate species and symbiotic algae responsible for the “black-spot” bloom during the summer of 2004. *Environmental Research*, 2008, **107**(2): 194-200. DOI: 10.1016/j.envres.2008.02.001.
- [90] Rixen T, Baum A, Pohlmann T *et al.* The Siak, a tropical black water river in central Sumatra on the verge of anoxia. *Bio-*

- geochemistry*, 2008, **90**(2): 129-140. DOI: 10.1007/s10533-008-9239-y.
- [91] Stahl J. Black water and two peculiar types of stratification in an organically loaded strip-mine lake. *Water Research*, 1979, **13**(5): 467-471. DOI: 10.1016/0043-1354(79)90040-x.
- [92] Kong FX, Hu WP, Gu XH *et al.* On the cause of cyanophyta bloom and pollution in water intake area and emergency measures in Meiliang Bay, Lake Taihu in 2007. *J Lake Sci*, 2007, **19**(4): 357-358. DOI: 10.18307/2007.0401. [孔繁翔, 胡维平, 谷孝鸿等. 太湖梅梁湾 2007 年蓝藻水华形成及取水口污水团成因分析与应急措施建议. 湖泊科学, 2007, **19**(4): 357-358.]
- [93] Zhang JR, Zeng Y, Zhao YW. Threshold analysis of water blooms in Baiyangdian wetlands. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(8): 1744-1750. [张家瑞, 曾勇, 赵彦伟. 白洋淀湿地水华暴发阈值分析. 生态学杂志, 2011, **30**(8): 1744-1750.]
- [94] Liang ZY, Liu Y, Sheng H *et al.* Identification of water quality trends in Lake Dianchi using an integrated STL and RSI approach. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(3): 754-762. [梁中耀, 刘永, 盛虎等. 滇池水质时间序列变化趋势识别及特征分析. 环境科学, 2014, **34**(3): 754-762.]
- [95] Shen QS, Liu C, Zhou QL *et al.* Effects of physical and chemical characteristics of surface sediments in the formation of shallow lake algae-induced black bloom. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**(12): 2353-2360. DOI: 10.1016/s1001-0742(12)60325-8.
- [96] Lu X, Fan CX, He W *et al.* Sulfur-containing amino acid methionine as the precursor of volatile organic sulfur compounds in algae-induced black bloom. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**(1): 33-43. DOI: 10.1016/s1001-0742(12)60019-9.
- [97] Liu GF. Study on the influence of algal-derived lake flooding on water-interface material behavior in Taihu Lake sediments and its predictive control [Dissertation]. Nanjing: Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, 2009: 43-47, 50-53. [刘国锋. 藻源性湖泛对太湖沉积物水界面物质行为影响及预控研究[学位论文]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2009: 43-47, 50-53.]
- [98] Sun FF, Yin GP, Fan CX *et al.* Influences of alga accumulation and wastewater discharge on content of aqueous nutrients in Taihu Lake. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2010, **30**(5): 24-28. [孙飞飞, 尹桂平, 范成新等. 藻华聚积及污水入流对太湖上下层水体营养盐含量的影响. 水利水电科技进展, 2010, **30**(5): 24-28.]
- [99] Ji HT, Wu RR, Gong H *et al.* A brief analysis of lake flooding in the northwestern coastal waters of Taihu Lake in recent 10 years. *Technical Supervision in Water Resources*, 2020, (2): 287-294. [纪海婷, 吴荣荣, 龚慧等. 太湖西北部近岸水域近 10 年湖泛情况浅析. 水利技术监督, 2020, (2): 287-294.]
- [100] Zhou YL, Jiang HL, Cai HY. To prevent the occurrence of black water agglomerate through delaying decomposition of cyanobacterial bloom biomass by sediment microbial fuel cell. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, **287**: 7-15. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.01.036.
- [101] Wang CL, Yao ZB, Huang L *et al.* Reliance and effect of sediment bulking on the physicochemical properties of sediments in aquatic environments. *Science of the Total Environment*, 2020, **723**: 137872. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137872.
- [102] Wang GQ, Lee Z, Mouw C. Multi-spectral remote sensing of phytoplankton pigment absorption properties in cyanobacteria bloom waters: A regional example in the western basin of Lake Erie. *Remote Sensing*, 2017, **9**(12): 1309. DOI: 10.3390/rs9121309.
- [103] Wang CL, Jiang HL. Real-time monitoring of sediment bulking through a multi-anode sediment microbial fuel cell as reliable biosensor. *Science of the Total Environment*, 2019, **697**: 134009. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134009.
- [104] He W, Shang JG, Lu X *et al.* Effects of sludge dredging on the prevention and control of algae-caused black bloom in Taihu Lake, China. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**(3): 430-440. DOI: 10.1016/s1001-0742(12)60098-9.
- [105] Fan CX. Processes and mechanism of effects of sludge dredging on internal source release in lakes. *Chinese Science Bulletin*, 2004, **49**(17): 1853. DOI: 10.1360/03wd0657.
- [106] Liu C, Shen QS, Zhou QL *et al.* Precontrol of algae-induced black blooms through sediment dredging at appropriate depth in a typical eutrophic shallow lake. *Ecological Engineering*, 2015, **77**: 139-145. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2015.01.030.
- [107] Fan CX, Zhou YY, Wu QL eds. Interfacial processes and effects of lake sediments. Beijing: Science Press, 2013. [范成新, 周易勇, 吴庆龙. 湖泊沉积物界面过程与效应. 北京: 科学出版社, 2013.]

- [108] Davison W, Zhang H. *In situ* speciation measurements of trace components in natural waters using thin-film gels. *Nature*, 1994, **367**(6463): 546-548. DOI: 10.1038/367546a0.
- [109] Luo J, Wang XR, Zhang H *et al.* Theory and application of diffusive gradients in thin films in soils. *Journal of Agro-Environment Science: J Agro-Environ Sci*, 2011, **30**(2): 205-213. [罗军, 王晓蓉, 张昊等. 梯度扩散薄膜技术(DGT)的理论及其在环境中的应用 I: 工作原理、特性与在土壤中的应用. 农业环境科学学报, 2011, **30**(2): 205-213.]
- [110] Stockdale A, Davison W, Zhang H. Micro-scale biogeochemical heterogeneity in sediments: A review of available technology and observed evidence. *Earth-Science Reviews*, 2009, **92**(1/2): 81-97. DOI: 10.1016/j.earscirev.2008.11.003.
- [111] Santner J, Larsen M, Kreuzeder A *et al.* Two decades of chemical imaging of solutes in sediments and soils—a review. *Analytica Chimica Acta*, 2015, **878**: 9-42. DOI: 10.1016/j.aca.2015.02.006.
- [112] Wardman C, Nevin KP, Lovley DR. Real-time monitoring of subsurface microbial metabolism with graphite electrodes. *Frontiers in Microbiology*, 2014, **5**: 621. DOI:10.3389/fmicb.2014.00621.
- [113] Song N, Yan ZS, Xu HC *et al.* Development of a sediment microbial fuel cell-based biosensor for simultaneous online monitoring of dissolved oxygen concentrations along various depths in lake water. *Science of the Total Environment*, 2019, **673**: 272-280. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.032.
- [114] Pages A, Welsh DT, Teasdale PR *et al.* Diel fluctuations in solute distributions and biogeochemical cycling in a hypersaline microbial mat from Shark Bay, WA. *Marine Chemistry*, 2014, **167**: 102-112. DOI: 10.1016/j.marchem.2014.05.003.
- [115] Han C, Ding SM, Yao L *et al.* Dynamics of phosphorus-iron-sulfur at the sediment-water interface influenced by algae blooms decomposition. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, **300**: 329-337. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.07.009.
- [116] Guan DX, Williams PN, Luo J *et al.* Novel precipitated zirconia-based DGT technique for high-resolution imaging of oxyanions in waters and sediments. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(6): 3653-3661. DOI: 10.1021/es505424m.
- [117] Sun QQ, Chen JA, Wang JF *et al.* High resolution spatial distribution of phosphorus, iron and sulfur at the sediment-water interface of Aha Reservoir. *Environmental Science*, 2017, (7): 1-11. [孙清清, 陈敬安, 王敬富等. 阿哈水库沉积物-水界面磷、铁、硫高分辨空间分布特征. 环境科学, 2017, (7): 1-11.]
- [118] Stahl H, Warmken KW, Sochaczewski L *et al.* A combined sensor for simultaneous high resolution 2-D imaging of oxygen and trace metals fluxes. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2012, **10**(5): 389-401. DOI: 10.4319/lom.2012.10.389.
- [119] Han C, Ren JH, Wang ZD *et al.* A novel hybrid sensor for combined imaging of dissolved oxygen and labile phosphorus flux in sediment and water. *Water Research*, 2017, **108**: 179-188. DOI: 10.1016/j.watres.2016.10.075.
- [120] Hoefler C, Santner J, Borisov SM *et al.* Integrating chemical imaging of cationic trace metal solutes and pH into a single hydrogel layer. *Analytica Chimica Acta*, 2017, **950**: 88-97. DOI: 10.1016/j.aca.2016.11.004.
- [121] Tiehm A, Hollert H, Yin DQ *et al.* Tai Hu (China): Water quality and processes—From the source to the tap. *Science of the Total Environment*, 2020, **712**: 135559. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135559.
- [122] Bian B, Wu HS, Xu ZR *et al.* Eliminating non-point source pollution in a pre-dam complex system in the Tangma Reservoir, Jiangsu Province. *J Lake Sci*, 2013, **25**(3): 352-358. DOI: 10.18307/2013.0307. [边博, 吴海锁, 徐志荣等. 复合型前置库系统去除面源主要污染物的研究. 湖泊科学, 2013, **25**(3): 352-358.]
- [123] Yajima H, Choi J. Changes in phytoplankton biomass due to diversion of an inflow into the Urayama Reservoir. *Ecological Engineering*, 2013, **58**: 180-191. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.06.030.
- [124] Kalff J ed. *Limnology: inland water ecosystems*. New Jersey: Prentice Hall, 2002: 122-125.
- [125] Ye C, Li CH, Deng TT. Structures and ecological functions of lake littoral zones. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(2): 171-181. [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.]
- [126] Lobova TI, Barkhatov YV, Salamatina OV *et al.* Multiple antibiotic resistance of heterotrophic bacteria in the littoral zone of Lake Shira as an indicator of human impact on the ecosystem. *Microbiological Research*, 2008, **163**(2): 152-160. DOI: 10.1016/j.micres.2006.03.014.
- [127] Li JH, Shen ZH, Wu RH *et al.* Effects of ecological remediation project in the lakeside zone of Chongshan, Taihu Lake on eutrophic water environment. *Journal of Huaihai Institute of Technology: Natural Sciences Edition*, 2018, **27**(2): 86-92. [李婧慧, 沈振华, 吴荣华等. 太湖冲山湖滨带生态修复工程对富营养化水体的作用. 淮海工学院学报: 自然科学

- 版, 2018, **27**(2): 86-92.]
- [128] Sun X, Li XL, Zhang MD *et al.* Comparison of water-lifting aerator type for algae inhibition in stratified source water reservoirs. *Ecological Engineering*, 2014, **73**: 624-634. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2014.09.124.
- [129] Koweek DA, García-Sánchez C, Brodrick PG *et al.* Evaluating hypoxia alleviation through induced downwelling. *Science of the Total Environment*, 2020, **719**: 137334. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137334.
- [130] Chuo MY, Ma J, Yang ZJ *et al.* Review on the application of curtain weirs to controlling algal blooms of reservoirs. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, **35**(10): 15-20. [啜明英, 马骏, 杨正健等. 整流幕在防控水库水华中的应用研究综述. 长江科学院院报, 2018, **35**(10): 15-20.]
- [131] Gallardo-Rodríguez JJ, Astuya-Villalón A, Llanos-Rivera A *et al.* A critical review on control methods for harmful algal blooms. *Reviews in Aquaculture*, 2019, **11**(3): 661-684. DOI: 10.1111/raq.12251.
- [132] Pan G, Miao XJ, Bi L *et al.* Modified local soil (MLS) technology for harmful algal bloom control, sediment remediation, and ecological restoration. *Water*, 2019, **11**(6): 1123. DOI: 10.3390/w11061123.
- [133] Mucci M, Noyma NP, de Magalhães L *et al.* Chitosan as coagulant on cyanobacteria in lake restoration management may cause rapid cell lysis. *Water Research*, 2017, **118**: 121-130. DOI: 10.1016/j.watres.2017.04.020.
- [134] Du SY, Yang CL, Li SY *et al.* Stability of phosphorus in sediments of Lake Yangzonghai. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2015, **9**(3): 1072-1078. [杜诗云, 杨常亮, 李世玉等. 阳宗海沉积物中磷的稳定性. 环境工程学报, 2015, **9**(3): 1072-1078.]
- [135] Li ZY, Yang CL, Li SY *et al.* Distribution and stability of arsenic in Yangzonghai sediments after arsenic pollution treatment. *Environmental Science & Technology*, 2015, **38**(2): 41-47. [李智圆, 杨常亮, 李世玉等. 砷污染治理后阳宗海沉积物砷的分布与稳定性. 环境科学与技术, 2015, **38**(2): 41-47.]
- [136] Cai YJ, Zhang EL, Liu EF *et al.* Spatio-temporal characteristics of heavy metal pollution and potential ecological risk in the sediments of Lake Yangzonghai, Yunnan Province. *J Lake Sci*, 2017, **29**(5): 1121-1133. DOI: 10.18307/2017.0510. [蔡艳洁, 张恩楼, 刘恩峰等. 云南阳宗海沉积物重金属污染时空特征及潜在生态风险. 湖泊科学, 2017, **29**(5): 1121-1133.]
- [137] Effiong K, Hu J, Xu CC *et al.* Sustainable utilization of agricultural straw for harmful algal blooms control: A review. *Journal of Renewable Materials*, 2020, **8**(5): 461-483. DOI: 10.32604/jrm.2020.09111.
- [138] Wang SB, Qu YF, Xu ZR. Algal bloom control in eutrophic lakes and reservoirs based on biomanipulation. *Water Resources Protection*, 2016, **32**(5): 1-4, 23. [王寿兵, 屈云芳, 徐紫然. 基于生物操纵的富营养化湖库蓝藻控制实践. 水资源保护, 2016, **32**(5): 1-4, 23.]
- [139] Perelo LW. Review: *In situ* and bioremediation of organic pollutants in aquatic sediments. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **177**(1/2/3): 81-89. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.12.090.
- [140] Peng WH, Li XM, Xiao ST *et al.* Review of remediation technologies for sediments contaminated by heavy metals. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, **18**(4): 1701-1719. DOI: 10.1007/s11368-018-1921-7.
- [141] Wang CH, Jiang HL. Chemicals used for *in situ* immobilization to reduce the internal phosphorus loading from lake sediments for eutrophication control. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2016, **46**(10): 947-997. DOI: 10.1080/10643389.2016.1200330.
- [142] Cai CY, Zhao MH, Yu Z *et al.* Utilization of nanomaterials for *in situ* remediation of heavy metal(loid) contaminated sediments: A review. *Science of the Total Environment*, 2019, **662**: 205-217. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.180.
- [143] Li F, Chen JJ, Hu X *et al.* Applications of carbonaceous adsorbents in the remediation of polycyclic aromatic hydrocarbon-contaminated sediments: A review. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **255**: 120263. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120263.
- [144] Bormans M, Maršálek B, Jančula D. Controlling internal phosphorus loading in lakes by physical methods to reduce cyanobacterial blooms: A review. *Aquatic Ecology*, 2016, **50**(3): 407-422. DOI: 10.1007/s10452-015-9564-x.
- [145] Preece EP, Moore BC, Skinner MM *et al.* A review of the biological and chemical effects of hypolimnetic oxygenation. *Lake and Reservoir Management*, 2019, **35**(3): 229-246. DOI: 10.1080/10402381.2019.1580325.
- [146] Zeman AJ, Patterson TS. Preliminary results of demonstration capping project in Hamilton harbour. *Water Quality Research Journal*, 1997, **32**(2): 439-452. DOI: 10.2166/wqj.1997.028.
- [147] Spears BM, Lüring M, Yasseri S *et al.* Lake responses following lanthanum-modified bentonite clay (Phoslock[®]) applica-

- tion; An analysis of water column lanthanum data from 16 case study lakes. *Water Research*, 2013, **47**(15): 5930-5942. DOI: 10.1016/j.watres.2013.07.016.
- [148] Liboriussen L, Søndergaard M, Jeppesen E *et al.* Effects of hypolimnetic oxygenation on water quality: Results from five Danish lakes. *Hydrobiologia*, 2009, **625**(1): 157-172. DOI: 10.1007/s10750-009-9705-0.
- [149] Gomes HI, Dias-Ferreira C, Ribeiro AB. Overview of *in situ* and *ex situ* remediation technologies for PCB-contaminated soils and sediments and obstacles for full-scale application. *Science of the Total Environment*, 2013, **445/446**: 237-260. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.11.098.
- [150] Haldar S, Ghosh A. Microbial and plant-assisted heavy metal remediation in aquatic ecosystems; A comprehensive review. *3 Biotech*, 2020, **10**(5): 205. DOI: 10.1007/s13205-020-02195-4.
- [151] Zhang H, Xu MY, Luo JZ *et al.* Microbial electron transfer processes in sediment microbial fuel cells. *Science in China: Technical Science*, 2019, **49**: 1461-1472. [章恒, 许玫英, 罗建中等. 沉积物微生物燃料电池中的微生物电子传递过程. *中国科学: 技术科学*, 2019, **49**: 1461-1472.]
- [152] Abbas SZ, Rafatullah M, Ismail N *et al.* A review on sediment microbial fuel cells as a new source of sustainable energy and heavy metal remediation: Mechanisms and future prospective. *International Journal of Energy Research*, 2017, **41**(9): 1242-1264. DOI: 10.1002/er.3706.
- [153] Jing R, Fusi S, Kjellerup BV. Remediation of polychlorinated biphenyls (PCBs) in contaminated soils and sediment: State of knowledge and perspectives. *Frontiers in Environmental Science*, 2018, **6**: 79. DOI: 10.3389/fenvs.2018.00079.
- [154] Ali MB, Tripathi RD, Rai UN *et al.* Physico-chemical characteristics and pollution level of Lake Nainital (U.P., India): Role of macrophytes and phytoplankton in biomonitoring and phytoremediation of toxic metal ions. *Chemosphere*, 1999, **39**(12): 2171-2182. DOI: 10.1016/S0045-6535(99)00096-X.
- [155] Zhang M, Wang XC, Yang L *et al.* Research on progress in combined remediation technologies of heavy metal polluted sediment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, **16**(24): 5098. DOI: 10.3390/ijer-ph16245098.
- [156] Yin HB, Zhu JC, Tang WY. Management of nitrogen and phosphorus internal loading from polluted river sediment using Phoslock[®] and modified zeolite with intensive tubificid oligochaetes bioturbation. *Chemical Engineering Journal*, 2018, **353**: 46-55. DOI: 10.1016/j.cej.2018.07.112.
- [157] Zhan YH, Wu XL, Lin JW *et al.* Combined use of calcium nitrate addition and anion exchange resin capping to control sedimentary phosphorus release and its nitrate-nitrogen releasing risk. *Science of the Total Environment*, 2019, **689**: 203-214. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.406.
- [158] Yan ZS, Song N, Cai HY *et al.* Enhanced degradation of phenanthrene and pyrene in freshwater sediments by combined employment of sediment microbial fuel cell and amorphous ferric hydroxide. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **199**: 217-225. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.10.087.
- [159] Jiang ZP, Yang HW eds. *Environmental engineering*. Beijing: Higher Education Press, 2017. [蒋展鹏, 杨宏伟. *环境工程学*. 北京: 高等教育出版社, 2017.]
- [160] Reynolds CS. The development of perceptions of aquatic eutrophication and its control. *Ecology Hydrobiology*, 2003, **3**(2): 149-163.
- [161] Liu Y, Guo HC, Zhou F *et al.* A role of water level fluctuation on aquatic vegetation in lakes. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(9): 3117-3126. [刘永, 郭怀成, 周丰等. 湖泊水位变动对水生植被的影响机理及其调控方法. *生态学报*, 2006, **26**(9): 3117-3126.]
- [162] Ding QZ, Liu XQ, Zhang XK. Impacts of water level fluctuations on substrate environments of lakeshore zone of the lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *J Lake Sci*, 2014, **26**(3): 340-348. DOI: 10.18307/2014.0302. [丁庆章, 刘学勤, 张晓可. 水位波动对长江中下游湖泊湖滨带底质环境的影响. *湖泊科学*, 2014, **26**(3): 340-348.]