

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.5
第40卷 第5期

目次

2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律 张晗宇,程水源,姚森,王晓琦,张俊峰(1999)
餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征 王红丽,景盛翱,乔利平(2010)
泰山顶(1534 m)夏季气溶胶粒径分布特征 沈利娟,王红磊,银燕,陈魁,陈景华,施双双(2019)
郑州-新乡冬季PM_{2.5}中元素浓度特征及其源分析 闫广轩,张朴真,黄海燕,高雅,张靖雯,宋鑫,张佳羽,李怀刚,曹治国,姜继韶,樊静,王跃思,金彩霞(2027)
我国PM_{2.5}浓度分阶段改善目标情景分析 贺晋瑜,燕丽,王彦超,雷宇,汪旭颖(2036)
安阳市典型工业源PM_{2.5}排放特征及减排潜力估算 杜小申,燕丽,贺晋瑜,汪旭颖,王克,张瑞芹(2043)
郑州市典型工业炉窑细颗粒物排放特征及清单 赵庆炎,韩士杰,张轶舜,杨留明,张瑞芹,燕启社(2052)
2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性 乔月珍,陈凤,赵秋月,刘倩(2062)
兰州市化石燃料燃烧源排放VOCs的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势 刘镇,朱玉凡,郭文凯,刘晓,陈强(2069)
12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征 李双江,袁相洋,李琦,冯兆忠(2078)
我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布 黄丽,张心昱,袁国富,朱治林,唐新斋,孙晓敏(2086)
我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价 刘昔,王智,王学雷,李珍,杨超,厉恩华,位慧敏(2094)
我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价 范博,王晓南,黄云,李霖,高祥云,李雯雯,刘征涛(2101)
大连海域入海污染源中PFASs的赋存、输入通量和季节特征 陈虹,韩建波,张灿,程嘉熠(2115)
干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义 袁瑞丰,李宗省,蔡玉琴,邹海明(2122)
柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素 黄奇波,覃小群,刘朋雨,程瑞瑞,李腾芳(2132)
崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素 周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,覃小群,黄奇波,张连凯(2143)
三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析 秦延文,韩超南,郑丙辉,马迎群,杨晨晨,刘志超,张雷,赵艳民(2152)
三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力 黎睿,潘婵娟,汤显强,肖尚斌,李青云,杨文俊(2160)
不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素 李莹杰,王丽婧,李虹,欧阳美凤(2170)
巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源磷的响应及释放风险 李如忠,鲍琴,戴源(2178)
闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析 徐健,袁旭音,叶宏萌,张晓辉,周慧华,韩年(2186)
生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应 蒋倩文,刘锋,彭英湘,王华,姚燃,李红芳,罗冲,刘新亮,吴金水(2194)
太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估 张杰,郭西亚,曾野,邓建才(2202)
三峡水库支流汝溪河口水体汞的时空变化特征 马尉斌,陈秋禹,尹德良,孙涛,王永敏,王定勇(2211)
多功能型城市人工湿地水体汞分布特征及其量变分析 刘伟豪,王永敏,樊宇飞,吕东威,王定勇(2219)
不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征 樊宇飞,刘伟豪,孙涛,苑萌,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2226)
微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响 黄福义,杨凯,张子兴,苏建强,朱永官,张娟(2234)
上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析 吴杰,熊丽君,吴健,沙晨燕,唐浩,林匡飞,李大雁,沈城(2240)
异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系 王振方,张玮,杨丽,徐玉萍,赵凤斌,王丽卿(2249)
水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析 刘雪晴,黄廷林,李楠,杨尚业,李扬,徐进,王涵玥(2258)
绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应 毕业亮,吴诗敏,周思宁,吴尚华,宿辉,白志辉,徐圣君(2265)
紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能 伏芝萱,郭迎庆,楚文海(2271)
UV降解水溶液中拉法辛的影响因素及机制 吕娟,许志伟,王言(2278)
铝代水铁矿协同吸附砷的机制 黄博,郭朝晖,肖细元,彭驰,朱惠文,史磊,阳安迪(2287)
新型材料磁性氧化铁的除氯效能 方文侃,李小娣,方菁,吴德意(2295)
羧基改性阴极对微生物电合成系统产乙酸性能的影响机制 祁家欣,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(2302)
基于分区供氧与溶解氧调控的低C/N比污水短程硝化反硝化 吴春雷,荣懿,刘晓鹏,史会欣,章武首,金鹏康,马文伟(2310)
不同COD浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征 马艳红,赵智超,安芳娇,黄利,师晓娟,慕浩,陈永志(2317)
15℃SBBR短程硝化快速启动和稳定运行性能 孙艺齐,卞伟,李军,赵青,王文啸,梁东博,吴耀东(2326)
长期低聚磷条件对AO-SBR系统Accumulibacter代谢特性的影响 王少坡,李柱,赵乐丹,于静洁,赵明,郑胜达,孙力平(2333)
厌氧氨氧化颗粒污泥EPS及其对污泥表面特性的影响 杨明明,刘子涵,周杨,祁菁,赵凡,郭劲松,方芳(2341)
HN-AD菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液 刘向阳,张千,吴恒,李宸,唐健泓,封丽,肖芃颖,赵天涛(2349)
温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响 黄方玉,邓良伟,杨红男,杨含,肖友乾,王兰(2357)
城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异 秦文韬,张冰,孙晨翔,陈湛,文湘华(2368)
三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响 王娜,高婕,魏静,刘颖,庄绪光,庄国强(2375)
亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制 刘晋仙,李鑫,罗正明,王雪,暴家兵,柴宝峰(2382)
生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响 刘杰云,邱虎森,王聪,沈健林,吴金水(2394)
地膜覆盖和施氮对菜地CH₄排放的影响 倪雪,江长胜,陈世杰,李晓茜,石孝均,郝庆菊(2404)
亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响 王晓云,蔡焕杰,李亮,徐家屯,陈慧(2413)
不同施肥模式对热区晚稻田CH₄和N₂O排放的影响 田伟,伍延正,汤水荣,胡玉麟,赖倩倩,文冬妮,孟磊,吴川德(2426)
周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响 曾蔓蔓,慈思,樊晶晶,李江文,翁昊璐,李松(2435)
广西高镉异常区水田土壤Cd含量特征及生态风险评价 宋波,王佛鹏,周浪,吴勇,庞瑞,陈同斌(2443)
超富集植物藿香蓟(Ageratum conyzoides L.)对镉污染农田的修复潜力 张云霞,宋波,宾娟,周子阳,陈记玲,陈同斌(2453)
种植油菜麦评价多环芳烃污染土壤的农用风险 焦海华,郭佳佳,张婧旻,张晓霞,茹文明,白志辉(2460)
土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应 舒心,李艳,李锋,冯靖仪,沈嘉瑜,史舟(2471)
某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价 吕占禄,张金良,陆少游,邹天森,刘凯,张晗,谷亚亚(2483)

《环境科学》征订启事(2018) 《环境科学》征稿简则(2042) 信息(2114, 2348, 2393)

水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析

刘雪晴, 黄廷林*, 李楠, 杨尚业, 李扬, 徐进, 王涵玥

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘要:以西安市李家河水库为研究对象,通过对水体理化因子和浮游植物的连续监测,对热分层期藻类垂向分布与温跃层厌氧成因进行了初步分析.结果表明:①6~9月,李家河水库水体稳定指数为2~10 m⁻¹,处于稳定热分层状态,水体溶解氧呈明显的垂向以及季节差异,pH、电导率均与溶解氧呈现相同的分层结构;②李家河水体的富营养状态诱导夏季藻类水华暴发;藻细胞密度垂向差异大,集中悬停于水深0~5 m区域内,最高为2.95×10⁸ cells·L⁻¹,叶绿素a含量最大为46.42 mg·m⁻³;高密度藻类在温跃层内堆积分解,水深5~24 m内出现较大面积的厌氧区,pH下降、电导率和高锰酸盐指数升高;③高密度藻类分解耗氧是夏季分层期温跃层厌氧形成的主要原因.

关键词:李家河水库;温跃层厌氧;热分层;水体富营养化;藻类水华

中图分类号:X171.1 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2019)05-2258-07 DOI:10.13227/j.hjkk.201809026

Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification

LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin*, LI Nan, YANG Shang-ye, LI Yang, XU Jin, WANG Han-yue

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The present study was completed at the Lijiahe Reservoir in Xi'an, northwest China. Based on persistent monitoring of the physical and chemical indexes, in addition to phytoplankton activity, the correlation between phytoplankton distribution and dissolved oxygen depletion in metalimnion were analyzed during the thermal stratification periods. The results showed that: ① During the summer stratification (from June to September), an obviously steady structure of dissolved oxygen, pH, as well as conductivity, was formed in a water column with RWCS/H indexes between 2 and 10 m⁻¹. ② The algal bloom was induced by the intense stratification with maximum biomass concentration of 2.95×10⁸ cells·L⁻¹ and chl. a of 46.42 mg·m⁻³. With a sharp density gradient due to thermal stratification, the decayed algae cells accumulated above the metalimnion and largely consumed the dissolved oxygen, which affected the pH, conductance, as well as the permanganate index. ③ Decomposition of high-density algae was, therefore, the main cause of metalimnion hypoxia during the summer stratification periods.

Key words: Lijiahe Reservoir; metalimnion hypoxia; thermal stratification; eutrophication; algal bloom

季节性热分层普遍发生于多数湖泊水库中,是引起水体溶解氧(DO)分布、底泥营养盐释放等各种理化过程变化的主要因素,对生物新陈代谢和物质分解过程起着重要作用^[1-3].受气候的影响,水深超过7 m的自然水体,除表面变温层和底部均温层外,水体中部会存在温度梯度较大的水层,即温跃层^[4].夏季气温升高引起表层水温上升会直接影响水体分层强度和温跃层深度,进而影响水体的其他生化过程^[5].

水体溶解氧浓度是表征湖库水质状态的重要指标,其与水温变化密切相关.缺氧及厌氧环境会对水质和生态系统产生许多直接和间接的不利影响^[6].目前,湖库水体季节性低氧成因受到越来越多的关注,水体稳定的热分层结构、有机物氧化降解、藻类暴发等因素都可能大量消耗水体溶解氧导致低氧区的形成. Jay等^[7]认为夏季水体热分层形成的密度跃层是底部水体缺氧的原因.欧阳潇然等^[8]的研究表明,溶解氧垂向分布不稳定主要受浮游植物、水体热分层的季节性变化影响.杨丽娜

等^[9]发现溶解氧含量与营养盐和有机污染物呈显著负相关.俞焰等^[10]分析了水体层化作用与浮游生物活动直接或间接影响千岛湖湖泊区低氧区的范围与程度.邱晓鹏等^[11]探讨了水库富营养化和热分层对溶解氧分布存在一定的耦合机制.对于分层性湖库,溶解氧和浮游植物季节性分布的研究对湖库水质保护具有重要意义.

很多分层性湖库在夏季出现上部水体低氧或厌氧问题,然而,当前研究较多关注底部溶解氧的分布规律,对上部水体溶解氧变化规律的研究鲜见报道.当温跃层存在时,水体产生的密度差会使有机物和无机物在对应密度水深处堆积^[12].本文通过对水质和藻类指标的持续性监测,结合 Stokes 公式对藻类群体在静止水体中的垂向分布的计算,分析

收稿日期:2018-09-03;修订日期:2018-11-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51478378);国家重点研发计划项目(2016YFC0400706);陕西省重点研发计划项目(2018ZDXM-SF-029)

作者简介:刘雪晴(1993~),女,硕士研究生,主要研究方向为水处理与微污染控制,E-mail:18092487820@163.com

* 通信作者,E-mail:huangtinglin@xauat.edu.cn

了水华期间水体理化指标与藻类垂向分布特征,初步探讨了李家河水库夏季分层期微囊藻水华及上部水体厌氧成因,通过探明李家河水库水质动态变化规律,以期为后续水质原位改善研究提供有效的数据基础,也为水库管理部门应对水华暴发提供科学的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

李家河水库(33°51'N~34°08'N; 109°17'E~109°36'E)位于西安市蓝田县境内,2015年建成蓄水,是解决西安市东部用水紧张的骨干供水工程。属于峡谷型大水深水库,干流总长28.5 km,平均水深60 m。水库现状水质整体符合地表水Ⅲ类水质标准,氮磷含量阶段性超标、藻类高发等水质问题突出。

1.2 采样时间及采样点设置

本研究于2017年全年在李家河水库坝前深水区进行取样监测(图1),频率每周1次。自表层0.5 m至底泥以上0.5 m之间的水域分层取样,垂向间隔取5~10 m;现场采集的水样用聚乙烯瓶封装后立即运回实验室,一部分冷藏保存(4℃)用于总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数的测定。一部分现场加鲁哥试剂固定,用于藻类的计数与鉴定。

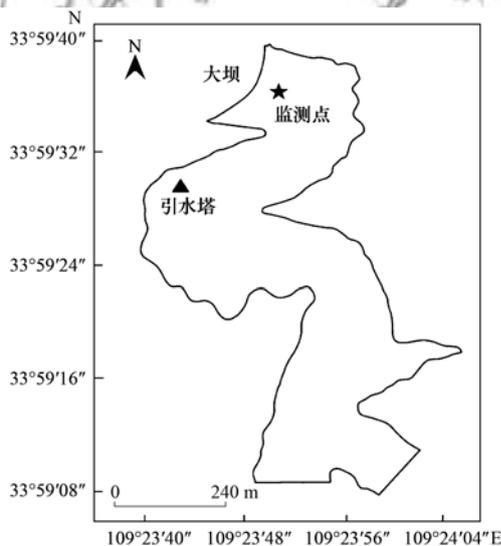


图1 李家河水库主库区及采样点示意

Fig. 1 Location of the Lijiahe Reservoir and sampling site

1.3 分析方法

1.3.1 样品分析方法

水温、水深、pH值、叶绿素a(Chl-a)、溶解氧(DO)等参数选用HACH Hydrolab-DS5X型多参数水质测定仪现场测定,垂向间隔为1 m; TN、TP、高锰酸盐指数采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光

度法、过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法、酸性滴定法测定^[13],指标检测均于48 h内完成。在显微镜(40×10倍)下对藻细胞进行计数,并根据文献[14]进行鉴定。

1.3.2 热分层稳定指数计算

RWCS/H指数^[15]可以有效评价热分层稳定水平,根据公式(1)计算:

$$RWCS/H = \frac{D_b - D_s}{(D_4 - D_5)H} \quad (1)$$

式中, D_b 和 D_s 分别为表层和底层水体密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; D_4 和 D_5 分别为4℃和5℃时纯水密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; H 为水深,m。

忽略水中泥沙的影响,水温($T, ^\circ\text{C}$)对应水体密度按公式(2)计算^[16]:

$$\rho_T = 1000 \left[1 - \frac{T + 288.9414}{508929.2(T + 68.12936)} \times (T - 3.9863)^2 \right] \quad (2)$$

式中, ρ_T 为水体密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; T 为水体温度, $^\circ\text{C}$ 。

1.3.3 静止水体中群体上浮/下沉运动

藻类群体在静止水体中上浮/下沉速度($V, \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),采用Stokes方程(3)计算^[17]:

$$V = \frac{dz}{dt} = \frac{gd^2(\rho_{col} - \rho_w)}{18\mu} \quad (3)$$

式中, g 为重力加速度,取 $9.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$; ρ_w 为水体密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; ρ_{col} 为藻类群体密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; d 为群体直径,m; μ 为水体黏滞系数, $\text{kg}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$ 。

微囊藻群体密度($\rho_{col}, \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)采用公式(4)计算^[18]:

$$\rho_{col} = \rho_{cell}n_{cell}(1 - n_{gas}) + \rho_{muc}(1 - n_{cell}) \quad (4)$$

式中, n_{cell} 为微囊藻群体中细胞所占比例,取20%; n_{gas} 为单细胞中伪空胞所占比例,取7%; ρ_{muc} 为微囊藻体内黏液密度,取 $998.7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[19]。

2 结果与分析

2.1 水体稳定指数

水库于4~12月存在明显的温度分层。3月中旬气温回升,库区表层水温随之升高,而下层水温增长缓慢,10 m处水体出现弱分层。4~6月热分层强度逐步加大。7~9月,水体上下层温差达到 21.8°C ,温度梯度增至 $1.5^\circ\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$,定义温度梯度大于 1°C 的水层为温跃层,水深5~28 m范围内,形成明显的温跃层,分层结构成熟。温跃层的存在影响垂向水层热量传递,底层水温扰动小,稳定在 6°C 左右。10月下旬气温下降,表层水体密度增大而下潜,水体垂向温差缩小,热分层开始削弱(图

2).

深水水库分层现象主要受水库当地气候、出/入流条件等变化的影响^[20]. 采用水体稳定指数 (RWCS/H) 大小对分层各时期进行划分^[15], RWCS/H 指数为 $2 \sim 10 \text{ m}^{-1}$ 表示稳定分层期 (图 3). RWCS/H 指数与当地气温季节性变化趋势一致, 气温差异是造成水库热分层的主要原因. 夏季水体稳定的分层结构对水中溶解氧分布影响较大, 且水库稳定的水环境使喜好在稳定水体中生长的藻类的繁殖更具优势.

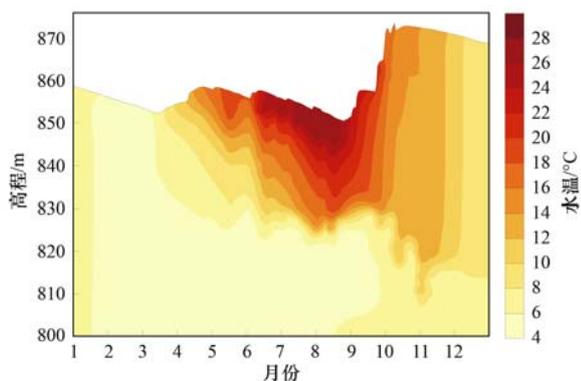


图 2 李家河水库水温垂向剖面变化

Fig. 2 Vertical profile of water temperature in the Lijiache Reservoir

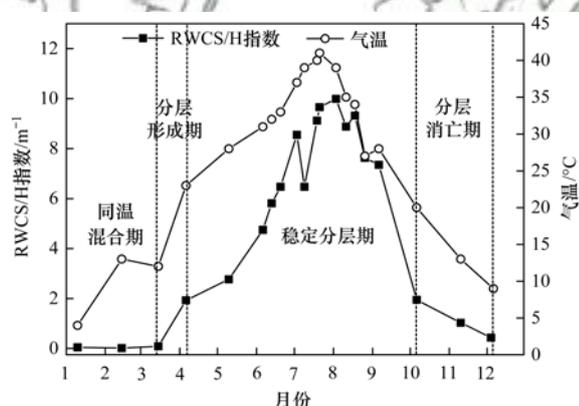


图 3 李家河水库热分层稳定指数和气温季节变化

Fig. 3 Seasonal variation of thermal stratification index and air temperature of the Lijiache Reservoir

2.2 溶解氧时空分布特征

水体分层后, 由于上下层水体缺乏交换, 会造成诸多水质问题, 最突出的是水中溶解氧的传递受到限制^[21]. 水体溶解氧呈现显著的季节性差异. 冬春季垂向整体溶解氧含量较高, 夏秋季含量低且存在垂直分层现象. 如图 4 所示, 春季, 水体热分层开始形成但强度仍较弱, 大气复氧充分, 故水体溶解氧水平整体较高 ($8 \sim 12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 进入夏季热分层期, 表层水体受光合作用影响大, 溶解氧浓度接近饱和值, 最高达 $12.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 6 月中旬, 2 m 以下水体溶解氧突变剧减, 7~8 月温跃层内部 $6.5 \sim$

22.4 m 水深范围溶解氧已降为 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 形成严格厌氧区, 并持续 2 个月. 温跃层以下溶解氧平均浓度为 $3 \sim 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 36 m 水深处溶解氧再次随水深降低, 至底部, 水体呈缺氧或厌氧状态. 10 月后, 气温降低, 分层结构逐步失稳破坏, 水体中上部溶解氧浓度恢复至较高水平 ($7 \sim 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

与其他季节相比, 夏季水体层化形成的密度跃层导致水体氧传质受阻, 使水体溶解氧浓度垂向分层. 而夏季浮游植物大量繁殖释放的氧气并未使上部水体溶解氧含量增加, 反而温跃层内部出现较大面积的厌氧区, 可能与藻类死亡分解过程消耗大量溶解氧有关. 受水体和沉积物耗氧作用影响, 分层期间底层水体一直处于缺氧或厌氧状态. 至冬季水体混合, 上层高浓度溶解氧水团下潜掺混, 复氧途径疏通, 整个水体再次进入好氧状态.

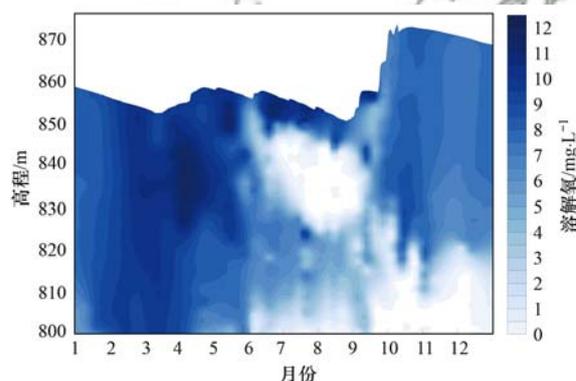


图 4 李家河水库溶解氧垂向剖面变化

Fig. 4 Vertical profile of dissolved oxygen in the Lijiache Reservoir

2.3 分层期叶绿素 a 与藻类的垂向分布

藻密度和叶绿素 a 含量是表征浮游植物种群特征的重要指标^[22]. 藻密度能较直观地表明水体中藻类数量及水华暴发强度^[23]. 7 月水体进入分层稳定期, 表层水体藻类大量增殖, 8 月中旬水体藻密度已高达 $2.95 \times 10^8 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$. 当水体叶绿素浓度大于 $10 \sim 10^2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 或藻密度大于 $50 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 认定水体为水华状态^[24], 李家河水库于 8 月初微囊藻水华正式形成.

藻密度垂向分布存在差异, 表层藻密度在 $(11.45 \sim 295.64) \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 中层在 $(3.08 \sim 15) \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 中部和底层较少, 藻类主要聚集在 $0 \sim 5 \text{ m}$ 水深范围内 (图 5). 分层期间, 表层水体叶绿素 a 含量较高, 在 $10.7 \sim 44.42 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 内, 峰值出现在 $2 \sim 5 \text{ m}$ 水深处, 与藻密度极值分布一致, 10 m 以下含量降低. 随着藻类自然演替沉降, 8 月份水深 $10 \sim 30 \text{ m}$ 内出现叶绿素 a 含量增加现象 (图 6). 李家河水库藻类群落呈现“冬春季硅藻为主, 夏秋季蓝藻占优”的季节演替特性,

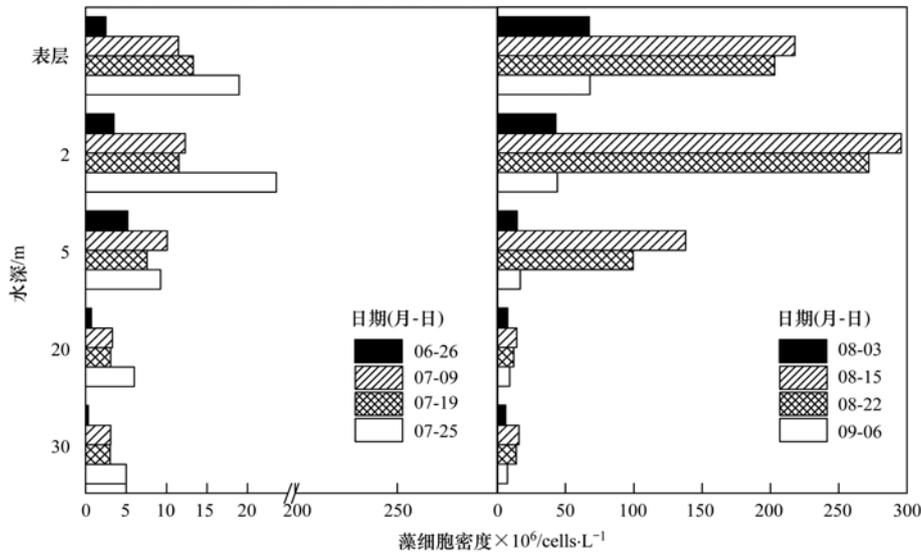


图5 李家河水库藻密度时空分布特性

Fig. 5 Temporal and spatial distribution characteristics of algae in the Lijiahe Reservoir

7~9月, 蓝藻迅速繁殖成为优势藻种, 其中微囊藻占蓝藻总数80%以上(图7).

2.4 水体理化因子空间特征

水库全年 TN 浓度在 2.0 mg·L⁻¹ 以上, 超过

《地表水环境质量标准(GB 3838-2002)》Ⅲ类水质标准限制. TP 大部分时段能满足地表水Ⅲ类水质标准. 热分层期, 底泥厌氧释磷, TP 平均浓度升高到 0.05 mg·L⁻¹ 以上(图8). 6月, 水深5m处高锰酸盐指数较大, 8月水深20m处出现积累(图9).

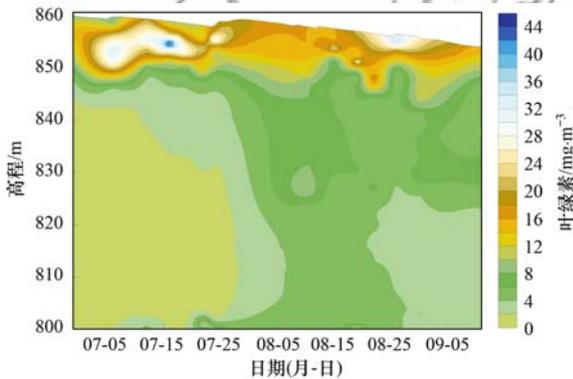


图6 李家河水库热分层期叶绿素垂向分布

Fig. 6 Vertical distribution of chlorophyll-a during stratification in the Lijiahe Reservoir

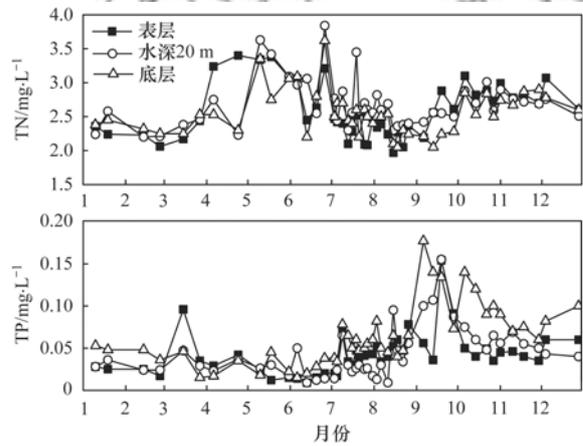


图8 李家河水库 TP、TN 浓度季节性变化

Fig. 8 Seasonal variation of total nitrogen and total phosphorus in the Lijiahe Reservoir

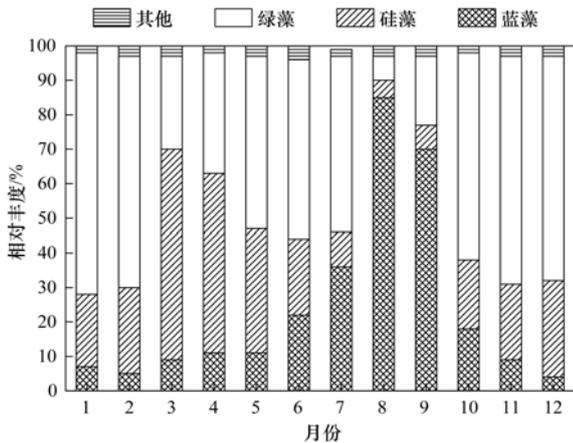


图7 李家河水库藻类相对丰度变化

Fig. 7 Variations of relative abundance of algae in the Lijiahe Reservoir

水体 pH 和电导率沿水深方向也存在分层现象(图10). 水华期间, 表层藻类光合作用大量吸收 CO₂ 造成水体 pH 值增大, pH 值在 8~10 之间, 表层水体呈弱碱性; 温跃层内 pH 急剧下降, 于 20 m 处降为最低; 7 月温跃层以下水体呈弱酸性, 8 月回升至弱碱性. 藻类死亡分解释放大量无机盐离子, 水深 2 m 处电导率急剧升高, 水深 10 m 处达到最大 260 μS·cm⁻¹; 温跃层内先缓慢降低再回升至稳定状态, 库底污染物厌氧释放导致电导率再次升高(图11).

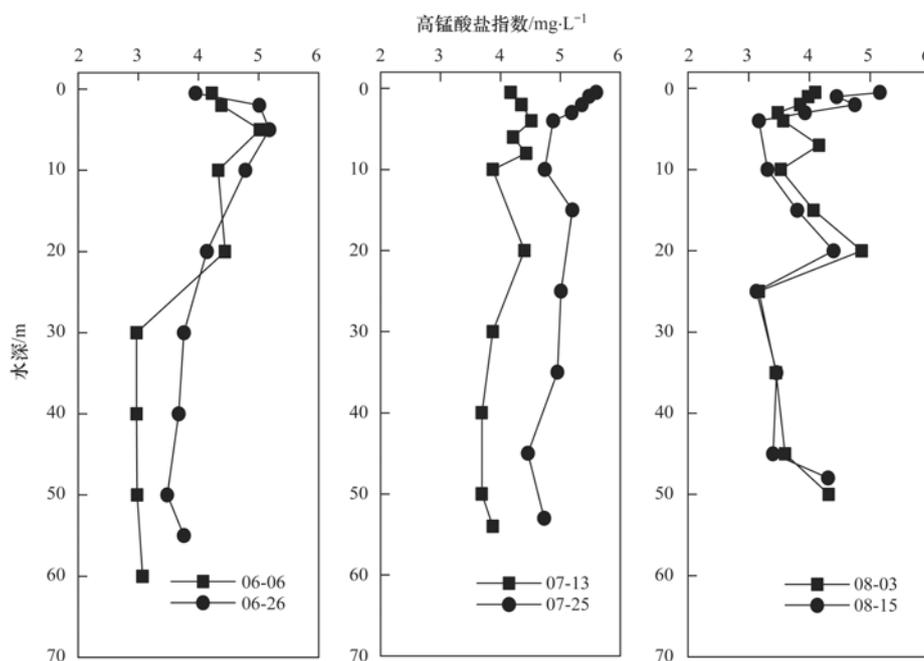


图9 李家河水库高锰酸盐指数垂向变化

Fig. 9 Vertical variation of permanganate index in the Lijiahe Reservoir

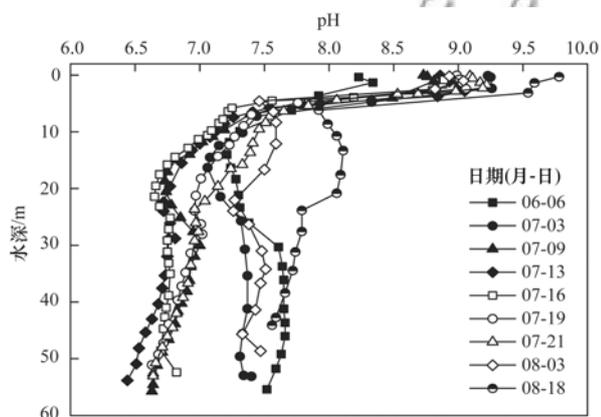


图10 李家河水库 pH 垂向分布

Fig. 10 Vertical distribution of pH in the Lijiahe Reservoir

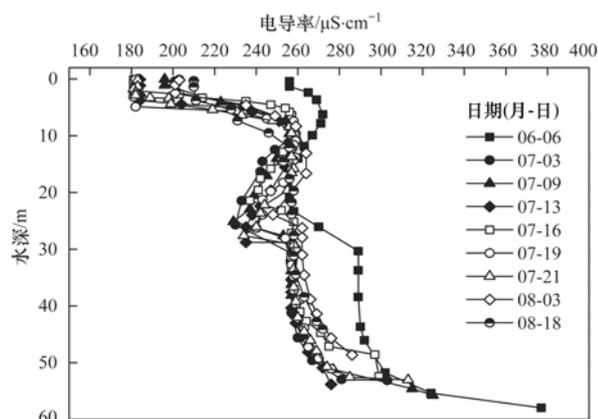


图11 李家河水库电导率垂向分布

Fig. 11 Vertical distribution of conductivity in the Lijiahe Reservoir

3 讨论

3.1 分层期水华暴发分析

营养盐达到藻类生长的最佳状态是水华发生的根本原因^[25]. 热分层期库区 TN 平均浓度 $2.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TP 浓度 $0.04 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 按照 OECD 的营养状态分类^[26], $\text{TV} = \text{TN}/2.7 \times \text{TP}/0.1 \approx 0.44 \geq 0.13$, 水库为富营养水体. EPA (美国环保署) 指出, 湖库的 TP 与 TN 浓度分别超过 $0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 与 $0.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时极可能发生蓝藻水华^[27]. 夏季李家河水库表层水温在 $24.50 \sim 29.63^\circ\text{C}$ 之间, 符合蓝藻生长的最适温度 ($25 \sim 35^\circ\text{C}$ ^[28]), 因而推测藻类水华暴发是高温诱发的结果.

热分层期微囊藻的快速增长对藻类的大规模聚集起了重要作用. 其内含伪空胞而具备自悬浮机制, 较之其他藻类在分层水库中更具竞争优势^[29]; 深水湖泊水体紊动小, 微囊藻群体其通过自身上浮/下沉运动, 最终共同集中于群体密度与水体密度相同水深 $2 \sim 4 \text{ m}$ 处. 藻类群体在高水温诱发下上浮、繁殖并聚集在表层水体, 是夏季水华的物质前提, 水华是适宜的水温、光照、稳定的水力条件和充足的营养盐等共同作用的结果.

3.2 温跃层厌氧与浮游生物关系

水体溶解氧浓度是由藻类光合作用的释氧与其衰亡分解的耗氧来决定的^[30], 在高密度藻类堆积条件下, 易发生溶解氧下降情况. 堆积藻类死亡耗氧的同时, 高密度藻类覆盖水体表面限制了水体复

氧能力。

水华暴发期, 上层水体藻密度高达 $2.95 \times 10^8 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$, 水体产生的密度差使有机物和无机物在温跃层内堆积。实测微囊藻直径主要为 $100 \mu\text{m}$ 左右, 经计算颗粒密度为 $1010 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右。藻类群体从表层水体进入水深 28 m 过程中, 水温从 28°C 降至 6°C , 水体密度增加 $3.7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 据 Stokes 定律, 藻类颗粒物沉降速度从 $0.4 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 降至 $0.3 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ [31]。沉降速度的下降使高密度藻类堆积在温跃层内部, 水深 $10 \sim 30 \text{ m}$ 区域内叶绿素含量升高。藻类在适宜环境中快速增长, 在其大规模堆积后, 将在短时间内大量裂解消亡[32]。高密度藻类经历短暂的好氧降解后, 水体溶解氧迅速下降, 12 h 内进入厌氧状态[33]。藻类分解导致水体有机物浓度增加, 水深 20 m 处高锰酸盐指数增大。厌氧分解初期, 藻细胞有机质含量高, 释放大量的有机酸, 水体 pH 下降; 有机氮降解速率比有机碳化合物慢, 随着有机氮降解 NH_4^+ 释放, 水体 pH 有所回升[34], 温跃层水体 pH 从 7 月到 8 月期间由弱酸性回升至弱碱性。高密度藻类死亡降解消耗大量溶解氧后水体进入厌氧状态, 水体酸碱度、电导率改变, 有机物含量升高, 将威胁水库水质。

表层至水深 10 m 范围内的藻类群体形成厚密聚集物, 阻碍光线进入下层水体, 大气复氧不足且光合效率降低。分层期形成的密度跃层, 使上下层水体氧传质受限, 水体溶解氧被大量消耗却得不到新的补给, 加之浮游生物呼吸耗氧作用, 温跃层内溶解氧不断亏损至厌氧状态。高密度藻类堆积耗氧分解是温跃层厌氧的主要原因, 水体层化的物理性质与上述化学、生物过程直接或间接决定了厌氧区的范围、程度和持续时间。

4 结论

(1) 李家河水库夏季水体存在明显的热分层现象。溶解氧及氮磷营养盐等存在明显的季节性变化特征, 总氮存在全年超过地表水环境质量标准所规定的 III 类水质标准限制的问题, 总磷存在热分层时期超标的问题。夏季稳定的分层结构、适宜的水温、充足的营养盐等是藻类水华暴发的主要原因。

(2) 水体热分层和高密度藻类死亡分解耗氧是造成水体厌氧的主要原因。藻类群体大量繁殖并聚集在水体表层至水深 10 m 范围内, 水深 2 m 处藻密度高达 $2.95 \times 10^8 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$ 。水华发生后, 短时间内高密度藻类死亡沉降, 水体分层产生密度差使藻类悬停堆积在温跃层内部。藻类残体等耗氧有机物的氧化分解大量消耗水中溶解氧, 随后进入厌氧降

解阶段。 10 m 以下水深大气复氧不足, 水体分层性质使上下层水体氧传质受阻, 导致夏季热分层稳定期温跃层内部出现大面积厌氧区。

(3) 李家河水库总氮超标, 夏季藻类暴发, 寻求合适的生物脱氮技术以及原位控藻技术是当前水库管理部门亟需解决的问题。

参考文献:

- [1] Zhang Y L, Wu Z X, Liu M L, *et al.* Thermal structure and response to long-term climatic changes in Lake Qiandaohu, a deep subtropical reservoir in China [J]. *Limnology and Oceanography*, 2014, **59**(4): 1193-1202.
- [2] 吴志旭, 刘明亮, 兰佳, 等. 新安江水库(千岛湖)湖泊区夏季热分层期间垂向理化及浮游植物特征[J]. *湖泊科学*, 2012, **24**(3): 460-465.
Wu Z X, Liu M L, Lan J, *et al.* Vertical distribution of phytoplankton and physico-chemical characteristics in the lacustrine zone of Xin'anjiang Reservoir (Lake Qiandao) in subtropic China during summer stratification[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, **24**(3): 460-465.
- [3] 张运林, 陈伟民, 杨顶田, 等. 天目湖热力学状况的监测与分析[J]. *水科学进展*, 2004, **15**(1): 61-67.
Zhang Y L, Chen W M, Yang D T, *et al.* Monitoring and analysis of thermodynamics in Tianmuhu Lake[J]. *Advances in Water Science*, 2004, **15**(1): 61-67.
- [4] Marcé R, Moreno-Ostos E, García-Barcina J M, *et al.* Tailoring dam structures to water quality predictions in new reservoir projects: Assisting decision-making using numerical modeling [J]. *Journal of Environmental Management*, 2010, **91**(6): 1255-1267.
- [5] Wagner C, Adrian R. Consequences of changes in thermal regime for plankton diversity and trait composition in a polymictic lake: a matter of temporal scale[J]. *Freshwater Biology*, 2011, **56**(10): 1949-1961.
- [6] 成晓奕, 李慧赞, 戴淑君. 天目湖沙河水库溶解氧分层的季节变化及其对水环境影响的模拟[J]. *湖泊科学*, 2013, **25**(6): 818-826.
Cheng X Y, Li H Y, Dai S J. Modeling of seasonal vertical variation of dissolved oxygen and its impacts on water environment in Shahe reservoir within Tianmuhu reservoir[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2013, **25**(6): 818-826.
- [7] Jay D, Bowman M. The physical oceanography and water quality of New York Harbor and western Long Island Sound[J]. *Marine Sciences Research*, 1975, **23**: 75-77.
- [8] 欧阳潇然, 赵巧华, 魏瀛珠. 基于 FVCOM 的太湖梅梁湾夏季水温、溶解氧模拟及其影响机制初探[J]. *湖泊科学*, 2013, **25**(4): 478-488.
Ouyang X R, Zhao Q H, Wei Y Z. A preliminary exploration of dissolved oxygen based on FVCOM in Meiliang Bay, Lake Taihu and its influence mechanism [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2013, **25**(4): 478-488.
- [9] 杨丽娜, 李正炎, 张学庆. 大辽河近入海河段水体溶解氧分布特征及低氧成因的初步分析[J]. *环境科学*, 2011, **32**(1): 51-57.
Yang L N, Li Z Y, Zhang X Q. Distribution characteristics of dissolved oxygen and mechanism of hypoxia in the upper estuarine zone of the Daliaohe river[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(1): 51-57.
- [10] 俞焰, 刘德富, 杨正健, 等. 千岛湖溶解氧与浮游植物垂向

- 分层特征及其影响因素[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1393-1402.
- Yu Y, Liu D F, Yang Z J, *et al.* Vertical stratification characteristics of dissolved oxygen and phytoplankton in Thousand-Island Lake and Their Influencing[J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1393-1402.
- [11] 邱晓鹏, 黄廷林, 曾明正. 溶解氧对湖库热分层和富营养化的响应——以枣庄周村水库为例[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(5): 1547-1553.
- Qiu X P, Huang T L, Zeng M Z. Responses of dissolved oxygen on thermal stratification and eutrophication in lakes and reservoirs—An example in Zhoucun Reservoir in Zaozhuang city [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(5): 1547-1553.
- [12] Boehrer B, Schultze M. Stratification of lakes [J]. Reviews of Geophysics, 2008, **46**(2): RG2005.
- [13] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学, 2002.
- [14] 胡鸿, 魏印心. 中国淡水藻类-系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006
- [15] 曾康, 黄廷林, 马卫星, 等. 暴雨径流对分层水库水质的影响[J]. 环境工程学报, 2016, **10**(9): 4979-4986.
- Zeng K, Huang T L, Ma W X, *et al.* Impact of storm runoff on water quality of one stratified reservoir [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, **10**(9): 4979-4986.
- [16] Lawson R, Anderson M A. Stratification and mixing in Lake Elsinore, California: An assessment of axial flow pumps for improving water quality in a shallow eutrophic lake [J]. Water Research, 2007, **41**(19): 4457-4467.
- [17] Rabouille S, Salençon M J, Thébault M J. Functional analysis of *Microcystis* vertical migration: A dynamic model as a prospecting tool: I-Processes analysis [J]. Ecological Modelling, 2005, **188**(2-4): 386-403.
- [18] Medrano E A, Uittenbogaard R E, Pires L M D, *et al.* Coupling hydrodynamics and buoyancy regulation in *Microcystis aeruginosa* for its vertical distribution in lakes [J]. Ecological Modelling, 2013, **248**: 41-56.
- [19] Reynolds C S, Jaworski G H M, Cmiech H A, *et al.* On the annual cycle of the blue-green alga *Microcystis Aeruginosa* Kütz. Emend. Elenkin [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences, 1981, **293**(1068): 419-477.
- [20] Zhang Y L, Wu Z X, Liu M L, *et al.* Dissolved oxygen stratification and response to thermal structure and long-term climate change in a large and deep subtropical reservoir (Lake Qiandaohu, China) [J]. Water Research, 2015, **75**: 249-258.
- [21] 邱二生. 黑河水库水质及藻类监测和水体分层研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
- [22] 何剑波. 千岛湖水温、溶解氧及叶绿素 a 垂向特征研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2014.
- [23] 郑建军, 钟成华, 邓春光. 试论水华的定义[J]. 水资源保护, 2006, **22**(5): 45-47, 80.
- Zheng J J, Zhong C H, Deng C G. Discussion on definition of algal bloom [J]. Water Resources Protection, 2006, **22**(5): 45-47, 80.
- [24] Qin B Q, Li W, Zhu G W, *et al.* Cyanobacterial bloom management through integrated monitoring and forecasting in large shallow eutrophic Lake Taihu (China) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, **287**: 356-363.
- [25] 王培丽. 从水动力和营养角度探讨汉江硅藻水华发生机制的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
- [26] 乐文健. 汾河水库突发臭味污染的应急处理研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
- [27] 许海, 朱广伟, 秦伯强, 等. 氮磷比对水华蓝藻优势形成的影响[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(10): 1676-1683.
- Xu H, Zhu G W, Qin B Q, *et al.* Influence of nitrogen-phosphorus ratio on dominance of bloom-forming cyanobacteria (*Microcystis aeruginosa*) [J]. China Environmental Science, 2011, **31**(10): 1676-1683.
- [28] 高月香. 水文气象因子对太湖富营养化和藻类生长的影响研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2006.
- [29] 张艳晴, 杨桂军, 秦伯强, 等. 光照强度对水华微囊藻 (*Microcystis flos-aquae*) 群体大小增长的影响[J]. 湖泊科学, 2014, **26**(4): 559-566.
- Zhang Y Q, Yang G J, Qin B Q, *et al.* Effect of light intensity on growth of *Microcystis flos-aquae* colonies size [J]. Journal of Lake Sciences, 2014, **26**(4): 559-566.
- [30] 吴阿娜, 朱梦杰, 汤琳, 等. 淀山湖蓝藻水华高发期叶绿素 a 动态及相关环境因子分析[J]. 湖泊科学, 2011, **23**(1): 67-72.
- Wu E N, Zhu M J, Tang L, *et al.* Dynamics of chlorophyll-a and analysis of environmental factors in Lake Dianshan during summer and autumn [J]. Journal of Lake Sciences, 2011, **23**(1): 67-72.
- [31] Gantzer P A, Bryant L D, Little J C. Effect of hypolimnetic oxygenation on oxygen depletion rates in two water-supply reservoirs [J]. Water Research, 2009, **43**(6): 1700-1710.
- [32] 王国芳. 高密度蓝藻消亡对富营养化湖泊黑臭水体形成的作用及机理[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [33] 尚丽霞, 柯凡, 李文朝, 等. 高密度蓝藻厌氧分解过程与污染物释放实验研究[J]. 湖泊科学, 2013, **25**(1): 47-54.
- Shang L X, Ke F, Li W C, *et al.* Laboratory research on the contaminants release during the anaerobic decomposition of high-density cyanobacteria [J]. Journal of Lake Sciences, 2013, **25**(1): 47-54.
- [34] 陈伟民, 蔡后建. 微生物对太湖微囊藻的好氧降解研究[J]. 湖泊科学, 1996, **8**(3): 248-252.
- Chen W M, Cai H J. Study on the aerobic decomposition of microcystis in Taihu Lake [J]. Journal of Lake Sciences, 1996, **8**(3): 248-252.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Regional Transport of Atmospheric Particulate Matter in Beijing from October to November, 2016	ZHANG Han-yu, CHENG Shui-yuan, YAO Sen, <i>et al.</i> (1999)
Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, QIAO Li-ping (2010)
Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1534 m) in Central East China	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, <i>et al.</i> (2019)
Concentration Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang	YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2027)
Scenario Analysis of PM _{2.5} Concentration Targets and Milestones in China	HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, <i>et al.</i> (2036)
PM _{2.5} Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang	DU Xiao-shen, YAN Li, HE Jin-yu, <i>et al.</i> (2043)
Emission Characteristics and List of Inorganic Elements in Fine Particles of Typical Industrial Kilns in Zhengzhou City	ZHAO Qing-yan, HAN Shi-jie, ZHANG Yi-shun, <i>et al.</i> (2052)
Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in the Urban Area of Nanjing, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (2062)
Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City	LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (2069)
Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees	LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, <i>et al.</i> (2078)
Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China	HUANG Li, ZHANG Xin-yu, YUAN Guo-fu, <i>et al.</i> (2086)
Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments	LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, <i>et al.</i> (2094)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China	FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, <i>et al.</i> (2101)
Occurrence, Input, and Seasonal Variations of Poly-and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drain Outlets from the Dalian Coastal Area, China	CHEN Hong, HAN Jian-bo, ZHANG Can, <i>et al.</i> (2115)
Space-time Characteristics and Environmental Significance of Stable Isotopes in Precipitation at an Arid Inland River Basin	YUAN Rui-feng, LI Zong-xing, CAI Yu-qin, <i>et al.</i> (2122)
Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment	HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (2132)
Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2143)
Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir	QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2152)
Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m	LI Rui, PAN Chan-juan, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2160)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods	LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, <i>et al.</i> (2170)
Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan (2178)
Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River	XU Jian, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2186)
Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed	JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, <i>et al.</i> (2194)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin	ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, <i>et al.</i> (2202)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	MA Wei-bin, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2211)
Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland	LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (2219)
Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands	FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, <i>et al.</i> (2226)
Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments	HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, <i>et al.</i> (2234)
Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai	WU Jie, XIONG Li-jun, WU Jian, <i>et al.</i> (2240)
Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China	WANG Zhen-fang, ZHANG Wei, YANG Li, <i>et al.</i> (2249)
Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification	LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2258)
Allelopathic Effects and Allelochemicals of <i>Myriophyllum elatinoideis</i> on <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Selenastrum capricornutum</i>	BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, <i>et al.</i> (2265)
Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite	FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, GUO Wen-hai (2271)
Influencing Factors and Transformation Mechanism of Venlafaxine Degradation by UV	LÜ Juan, XU Zhi-wei, WANG Yan (2278)
Mechanism of Synergistic Adsorption of Arsenic and Cadmium by Aluminium-substituted Ferrihydrites	HUANG Bo, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (2287)
Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite	FANG Wen-kan, LI Xiao-di, FANG Jing, <i>et al.</i> (2295)
Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems	QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (2302)
Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control	WU Chun-lei, RONG Yi, LIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (2310)
Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations	MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiang, <i>et al.</i> (2317)
Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15°C SBBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (2326)
Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of <i>Accumulibacter</i> in AO-SBR System	WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, <i>et al.</i> (2333)
Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics	YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, <i>et al.</i> (2341)
Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria	LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, <i>et al.</i> (2349)
Effect of Different Temperatures on the Performance of Autotrophic Nitrogen Removal and Microbial Community from Swine Wastewater	HUANG Fang-yu, DENG Liang-wei, YANG Hong-nan, <i>et al.</i> (2357)
Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants	QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, <i>et al.</i> (2368)
Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain	WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, <i>et al.</i> (2375)
Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes	LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, <i>et al.</i> (2382)
Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, <i>et al.</i> (2394)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH ₄ Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, JIANG Chang-sheng, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (2404)
Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods	WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, <i>et al.</i> (2413)
Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas	TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (2426)
Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil	ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, <i>et al.</i> (2435)
Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi	SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (2443)
Remediation Potential of <i>Ageratum conyzoides</i> L. on Cadmium Contaminated Farmland	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, <i>et al.</i> (2453)
Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting <i>Lactuca sativa</i> L.	JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, <i>et al.</i> (2460)
Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil	SHU Xin, LI Yan, LI Feng, <i>et al.</i> (2471)
Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant	LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, <i>et al.</i> (2483)