

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



2020

Vol.41 No.5
第41卷 第5期

目次

上海大气 PM _{2.5} 来源解析对比: 基于在线数据运用 3 种受体模型	周敏 (1997)
不同浓度臭氧对单颗粒气溶胶化学组成的影响	吴梦曦, 成春雷, 黄渤, 李梅, 陈多宏 (2006)
二次有机气溶胶壳对氯化钠核吸湿性的影响: 基于单颗粒微观尺度	张淑佳, 徐亮, 郭新梅, 黄道, 李卫军 (2017)
城区与县区不同空气质量下碳组分污染特征对比分析	李欣悦, 张凯山, 邓林俐, 向铎鹏, 武文琪, 殷子渊 (2026)
临沂市 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 中元素分布特征及来源解析	陆平, 赵雪艳, 殷宝辉, 张楠, 王歆华, 余浩, 杨文, 王晓丽 (2036)
西安市秋冬季市区与山区微生物气溶胶组成特征及来源	谢雯文, 路瑞, 慕飞飞, 戚玉珍, 白文艳, 李彦鹏 (2044)
北京市典型餐饮企业大气污染物排放特征	何万清, 王天意, 邵霞, 聂磊, 石爱军 (2050)
基于随机森林模型的中国 PM _{2.5} 浓度影响因素分析	夏晓圣, 陈菁菁, 王佳佳, 程先富 (2057)
大气污染联合治理分区视角下的中国 PM _{2.5} 关联关系时空变异特征分析	杨文涛, 黄慧坤, 魏东升, 赵斌, 彭焕华 (2066)
基于地-空观测数据的粤港澳大湾区大气污染调查及时空演变特征	王耀庭, 梁加成, 郑祚芳, 李青春, 李威, 窦俊 (2075)
龙子祠泉域岩溶地下水水化学特征及成因	唐春雷, 郑秀清, 梁永平 (2087)
三峡水库总磷时空变化特征及滞留效应分析	唐小娅, 童思陈, 黄国鲜, 许光祥, 李丹 (2096)
三峡水库汛后蓄水期典型支流溶解氧与叶绿素 a 垂向分布特征	杨凡, 纪道斌, 王丽婧, 李虹, 李莹杰 (2107)
汉丰湖正式运行年水体营养盐分布特征	付适, 倪九派, 何丙辉, 李天阳, 唐毅, 钱田, 向可翠 (2116)
白洋淀水体富营养化和沉积物污染时空变化特征	刘鑫, 史斌, 孟晶, 周云桥, 可欣, 王铁宇 (2127)
新安江水库悬浮颗粒物时空分布、沉降通量及其营养盐效应	史鹏程, 朱广伟, 杨文斌, 许海, 朱梦圆, 刘明亮, 虞左明, 吴志旭, 郑文婷, 王裕成, 笪文怡, 胡林娜 (2137)
不同水文情景下高邮湖、南四湖和东平湖有色可溶性有机物的生物可利用性特征	张柳青, 石玉, 李元鹏, 郭燕妮, 周蕾, 周永强, 张运林, 杨艳 (2149)
水源水库藻类功能群落演替特征及水质评价	李衍庆, 黄廷林, 张海涵, 温成成, 杨尚业, 林子深, 高欣 (2158)
人工强制混合对金盆水库水体藻类群落结构时空演替的影响	王晨旭, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 徐金兰, 司凡, 张晗, 路林超 (2166)
雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体好氧反硝化菌群落空间分布特征及驱动因素	周石磊, 孙悦, 岳智丞, 张航, 王周强, 刘世崇, 彭瑞哲, 苑世超, 李再兴, 崔建升 (2177)
分层型水库水体好氧不产氧光合细菌时空演替特征	张海涵, 王燕, 黄廷林, 王晨旭, 路林超, 司凡, 李楠, 刘凯文, 闫苗苗, 苗雨甜 (2188)
大型通江湖泊有色可溶性有机物对不同水文情景的响应	郭燕妮, 李元鹏, 石玉, 张柳青, 周蕾, 周永强, 张运林, 韩龙飞 (2198)
秦岭北麓河流夏季有色溶解有机物分布特征及影响因素	林子深, 黄廷林, 杨尚业, 温成成, 李衍庆, 周石磊, 宋选社 (2210)
长江下游流水体中多环芳烃的分布及生态风险评估	贾天琪, 雷荣荣, 武小琳, 倪涛涛, 孙树睿, 郭伟, 刘文彬 (2221)
太湖水体中 NSAIDs 的时空分布规律和生态风险评价	廉杰, 李祎飞, 王晓喧, 叶彬, 邹华, 史红星 (2229)
8 种典型 PhACs 在水中的赋存、生态风险及其对大型溞的影响	徐鑫磊, 刘建超, 陆光华 (2239)
我国南方桉树人工林区水库沉积物污染物的分布特征及迁移规律	朱雅, 李一平, 罗凡, 李荣辉, 黄列, 程一鑫, 蒋裕丰 (2247)
基于连续监测的城市内河返黑返臭机制初探: 以南宁市二坑溪为例	李永新, 王威, 何妹, 申泰铭 (2257)
城郊流域源汇景观格局与水体抗生性的关系	李敏, 唐剑锋, 陈利顶, 赵方凯, 冯青郁, 杨磊 (2264)
城市雨水径流中溶解性有机物的分子化学多样性	聂云汉, 陈浩, 李磊, 朱奔, 赵昕, 贾其隆, 徐慧婷, 叶建锋 (2272)
方解石/氯磷灰石混合物添加对水体内源磷迁移转化的调控效应和机制	柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 吴俊麟, 辛慧敏, 黄良君 (2281)
不同环境条件下铁矿物和针铁矿纳米颗粒稳定性	王智巧, 马杰, 陈雅丽, 翁莉萍, 顾亚陶, 李永涛 (2292)
向日葵秸秆生物炭强化 Fe(III)/S ₂ O ₈ ²⁻ 体系降解苯甲酸	孙鹏, 张凯凯, 张玉, 张延荣 (2301)
非活化单过硫酸盐降解柳氮磺胺吡啶: 动力学及机制	丁曦, 张学维, 周润生, 宋哲, 严佳颖, 周磊, 修光利 (2310)
贵州某规模化养猪场废水中抗生素的污染特征及去除效果	杨钊, 李江, 向福亮, 李彦澄, 马凯, 谢锋 (2320)
新型填料 A/O 生物滤池处理低碳氮比农村污水脱氮	赵远哲, 杨永哲, 王海燕, 储昭升, 常洋, 董伟羊, 闫国凯, 王欢, 李丛宇 (2329)
贫营养好氧反硝化菌株的脱氮特性及氮/碳平衡分析	文刚, 王彤, 黄廷林, 万琪琪, 曹瑞华, 寇莉青, 杨尚业 (2339)
连续流 SNAD 工艺处理猪场沼液启动过程中微生物种群演变及脱氮性能	秦嘉伟, 信欣, 鲁航, 张萍萍, 王露蓉, 邹长武, 郭俊元 (2349)
不同培养条件厌氧氨氧化颗粒污泥性质及微生物群落结构差异	姜澄, 郭萌蕾, 谢军祥, 常尧彬, 谢嘉玮, 陈重军, 沈耀良 (2358)
反硝化除磷耦合部分亚硝化-厌氧氨氧化一体式工艺的启动	陈亚, 印雯, 张星星, 张钰, 宋吟玲, 吴鹏, 徐乐中 (2367)
土壤环境承载力评价体系构建与应用	李笑诺, 丁寿康, 陈卫平, 王夏晖, 吕斯丹, 刘睿 (2373)
磁性生物炭的合成及对土壤重金属污染的钝化效果	王俊楠, 程珊珊, 展文豪, 任强, 马晓宇, 王洋洋 (2381)
还原增溶强化 EGTA 淋洗修复重金属污染土壤	张金永, 朱玉婷, 王明新, 韩堂, 葛嘉琦 (2390)
不同价态铬和土壤理化性质对大麦根系毒性阈值的影响	付平南, 贡晓飞, 罗丽韵, 王琪, 李花粉 (2398)
生物炭施用对紫色土旱坡地土壤氮流失形态及通量的影响	王舒, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 慈恩, 徐国鑫, 李妍, 高明 (2406)
长期撂荒恢复土壤团聚体组成与有机碳分布关系	王兴, 钟泽坤, 张欣怡, 吴少君, 卢绪巧, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (2416)
施用生物炭对壤土土壤微生物代谢养分限制和碳利用效率的影响	王强, 耿增超, 许晨阳, 郭靖宇, 李倩倩, 刘莉丽, 赵汉红, 杜旭光 (2425)
间种高粱及施用大颗粒尿素对茶园 N ₂ O 排放的影响	张珂彬, 刘新亮, 康曼, 王毅, 沈健林, 李勇 (2434)
缙云山森林植被类型对土壤 N ₂ O 相关功能微生物的影响	王盛燕, 王富华, 罗东海, 吕盛, 王子芳, 高明 (2445)
咸水滴灌对棉田土壤 N ₂ O 排放和反硝化细菌群落结构的影响	郭慧楠, 马丽娟, 黄志杰, 李美琪, 侯振安, 阎伟 (2455)
有机质提升对酸性红壤氮循环功能基因及功能微生物的影响	储成, 吴赵越, 黄欠如, 韩成, 钟文辉 (2468)
模拟酸雨对毛竹阔叶林过渡带土壤真菌结构及其多样性的影响	王楠, 潘小承, 王传宽, 白尚斌 (2476)
海洋沉积物中细菌 DNA 和 RNA 水平群落差异	李明月, 杨雨虹, 米铁柱, 贺惠, 甄毓 (2485)
2003 ~ 2013 年中国湿地变化的空间格局与关联性	周婷, 马蛟蛟, 徐颂军 (2496)

汉丰湖正式运行年水体营养盐分布特征

付适¹, 倪九派¹, 何丙辉^{1*}, 李天阳¹, 唐毅², 钱田¹, 向可翠³

(1. 西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715; 2. 西南大学动物科学学院, 重庆 400715; 3. 重庆市开州区环境监测站, 开州 405400)

摘要: 三峡前置库汉丰湖正式运行后, 水体由河流形态转变为兼具湖泊、河流特征的特殊形态, 导致水体生物地球化学过程发生较大变化。为探究汉丰湖氮磷营养盐时空分布特征及其影响因素, 在汉丰湖面设定 7 个采样点, 于 2018 年 1~12 月对汉丰湖各点位分层采样, 监测营养盐和 Chl-a 等指标变化。结果表明, 汉丰湖上中下层水体垂直混合较均匀, 营养盐浓度差异不显著 ($P > 0.05$)。TN 浓度在 1~9 月呈波动减小趋势, 10~12 月逐渐增加, 月平均浓度为 $1.52 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。NO₂⁻-N 浓度在 1~4 月波动减小, 5~6 月急剧增大, 7~12 月波动减小, 月平均浓度为 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。NO₃⁻-N 浓度表现为 1~6 月逐渐降低, 7~12 月逐渐增加的趋势。NH₄⁺-N 浓度在 7 月最高, 为 $0.44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其余月份变化不明显, 月平均值为 $0.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。TP、DP 和 SRP 浓度全年呈现波动变化, 增减趋势不明显, 其平均浓度分别为 0.17 、 0.11 和 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。汉丰湖磷盐主要来源于上游的南河和桃溪河, 且大体呈现出由上游镇东大丘至下游调节坝递减的趋势。各营养盐中, TP 为汉丰湖藻类生长的决定性因子。

关键词: 三峡库区; 汉丰湖; 分布特征; 营养盐; 影响因素

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)05-2116-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201910119

Spatial-temporal Distribution of Nutrients in Hanfeng Lake After Official Operation

FU Shi¹, NI Jiu-pai¹, HE Bing-hui^{1*}, LI Tian-yang¹, TANG Yi², QIAN Tian¹, XIANG Ke-cui³

(1. Key Laboratory of Eco-environment in the Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. College of Animal Science, Southwest University, Chongqing 400715, China; 3. Environmental Monitoring Station, Kaizhou District, Chongqing, Kaizhou 405400, China)

Abstract: The hydrograph of Hanfeng Lake, which is the largest pre-dam of the Three Gorges Reservoir, varied between the fluvial stage and lake stage after the lake was officially operated, resulting in large shifts in the aquatic biogeochemical processes. To explore the spatial-temporal distribution of nitrogen and phosphorus concentrations and identify their influencing factors in Hanfeng Lake, seven sampling sites were set up to monitor the changes of nutrients and other water indicators at different water depths monthly from January to December 2018. The results showed that completely vertical mixing across water profiles was observed. The nutrient concentrations were not significantly different between the top, middle, and bottom water depths ($P > 0.05$). Total nitrogen concentration decreased from January to September but gradually increased from October to December, with a monthly average concentration of $1.52 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. NO₂⁻-N concentration decreased in the first four months, increased sharply from May to June, and decreased from July to December with a monthly average concentration of $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. NO₃⁻-N concentration gradually decreased from January to June, and gradually increased from July to December. NH₄⁺-N concentration was the highest in July, with a concentration of $0.44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and the change in other months was not notable, with a monthly average concentration of $0.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The concentrations of total phosphorus (TP), dissolved phosphorus, and soluble reactive phosphorus showed insignificant changes in trends throughout the year, with monthly average concentrations of $0.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $0.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. The phosphate concentration was mainly sourced from the upstream Nan River and Taoxi River, and gradually decreased from upper Zhendong to the downstream regulating dam. Of these nutrients, TP was the key factor in the growth of algae in Hanfeng Lake.

Key words: Three Gorges Reservoir Area; Hanfeng Lake; spatial-temporal distribution; nutrients; influencing factors

氮磷营养盐是河流、湖泊生态系统中不可或缺的重要组成部分, 它们为浮游植物提供了合成有机质的物质基础^[1,2]。受水动力、温度等环境因子的影响, 氮磷营养盐浓度呈现一定的空间分布^[3], 使得湖泊浮游植物也具有明显的空间分布特征^[4~6]。湖泊营养盐和浮游植物生长之间的关系是湖泊生态学研究的重要内容, 长期为国内外研究热点^[7~10]。

自 2003 年蓄水以来, 三峡大坝建设造成库区支流库湾水文、水动力条件改变, 使得部分水体出现富营养化^[11,12]。此外, 干流水体的倒灌引起支流水体流速降低等水文条件变化^[13], 同时使库区库湾营养

盐分布空间分异明显^[14], 其变化过程较为复杂。开州区汉丰湖位于三峡水库一级支流澎溪河的上游, 是三峡库区最大的前置库^[15]。与库区其他水体相比, 汉丰湖的水文条件及生态环境特征具有特异性^[16]。目前对于汉丰湖的研究主要集中于汉丰湖运行前营养状态与浮游植物群落结构、环境因子等的

收稿日期: 2019-10-17; 修订日期: 2019-12-16

基金项目: 国务院三峡建设委员会办公室生态与环境系统重点支流水质监测项目 (JJ2015-016); 国家自然科学基金项目 (41771312); 中央高校基本科研业务费专项 (SWU118079)

作者简介: 付适 (1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为城市水土保持, E-mail: fs199562@email.swu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: hebinghui@swu.edu.cn

水质水生态变化特征,蓄水期营养状态变化^[17~19];试运行期间的水质、水生态评价^[16],以及生态系统功能评价^[20, 21]等方面.而对于汉丰湖正式运行后的营养盐及其对浮游植物分布影响方面的研究还不多见.本文以开州区汉丰湖为研究对象,基于2018年1~12月汉丰湖氮磷营养盐、Chl-a及透明度等指标的逐月监测数据,分析氮磷营养盐在汉丰湖区域的时空分布规律及结构特征,并结合相关环境因子讨论其变化原因.本研究对于了解汉丰湖正式运行后营养盐的生物地球化学过程有着重要的意义,以期为库区其他类似库湾的研究提供参考,并为汉丰湖以及三峡库区水生态保护提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域

汉丰湖位于重庆市开州区丰乐镇(图1),汉丰湖是为减小三峡水库蓄水造成的55 km²消落区对开州区生态环境的不良影响而建.它位于开州区城区东河与南河交汇处,范围东起乌杨桥水位调节坝,西至镇东大丘.2017年底汉丰湖水位调节坝正式运行蓄水,常年水位为170~175 m,库周长为36.4 km,湖泊东西跨度12.51 km,南北跨度5.86 km,西段狭窄,东段开阔,呈“Y”字形沿县城东西延展,蓄水量8 000万m³,常年水面14.8 km²,是我国西部内陆最大的城市

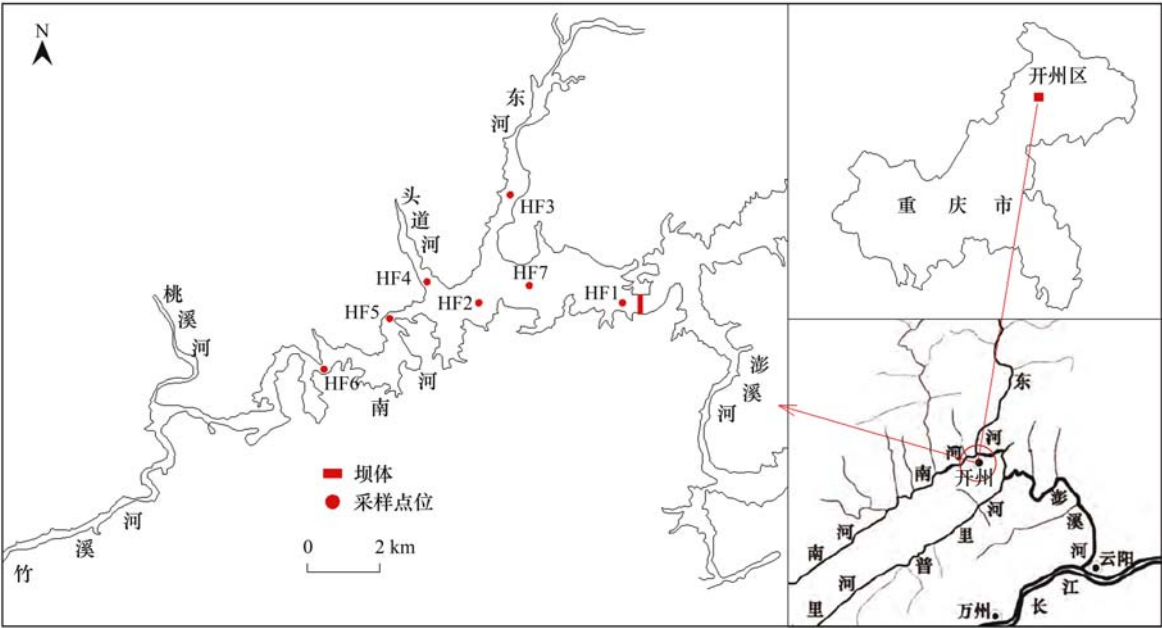


图1 汉丰湖采样点分布情况示意
Fig. 1 Location map of sampling sites in Hanfeng Lake

人工湖.2018年7月末发现研究区域全境出现较为严重的水华现象,8月中旬实施排水重蓄措施,水位受影响较大,9月水华现象完全消失.

1.2 采样与实验分析

汉丰湖范围内根据控制断面的地理位置特征设置7个采样点,其中HF1和HF7为湖体控制断面, HF2~HF6为支流来水控制断面,点位设置情况见表1.

表1 汉丰湖站监测点位情况

Table 1 Basic information on sampling sites in Hanfeng Lake			
采样点	名称	经纬度	
HF1	调节坝	108°26'11"E	31°11'22"N
HF2	东湖郡	108°24'40"E	31°11'16"N
HF3	东河大桥	108°25'01"E	31°12'05"N
HF4	头道沟入口	108°23'58"E	31°11'13"N
HF5	石龙船大桥	108°19'41"E	31°11'37"N
HF6	镇东大丘	108°22'22"E	31°10'16"N
HF7	东南河交汇	108°24'47"E	31°11'19"N

每月下旬乘坐快艇携带便携式GPS确定采样点,沿监测断面进行监测.设置断面中垂线分层采样:按各采样点水深(H)分别在水面以下0.5 m、 $1/2H$ 和 $H-0.5$ m等分上、中和下3层采样;水深大于10 m分上中下3层采样,水深小于10 m分上下两层采样.采用便携式水深测定仪测定水深,采用美国哈希便携式多参数水质仪(HydrolabDS5X, HACH,美国)测定水温(T)、pH、溶解氧(DO)和电导率,采用塞氏盘法测定透明度.每个采样点采集的上中下3层水样均用聚乙烯瓶分装并4℃冷藏带回实验室立即进行相关水质指标测定:叶绿素a浓度(Chl-a)采用丙酮提取-分光光度法测定;水体总氮(TN)、溶解性总氮(DN)采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定(测定波长220 nm),硝酸盐氮(NO_3^- -N)采用紫外分光光度法测定;亚硝态氮(NO_2^- -N)采用N-(1-萘基)-乙二胺光度法测定,铵态

氮(NH_4^+-N)采用纳氏试剂分光光度法测定,溶解无机氮($\text{DIN} = \text{NO}_3^--\text{N} + \text{NO}_2^--\text{N} + \text{NH}_4^+-\text{N}$);总磷(TP)、溶解性总磷(DP)采用过硫酸钾氧化-钼蓝比色法测定(测定波长: 700 nm);溶解性正磷酸盐(SRP)采用钼蓝比色法测定;高锰酸盐指数采用酸性高锰酸钾滴定法测定。

1.3 数据处理方法

利用 SPSS 25.0 软件进行数据处理与分析. 采用单因素方差分析检验(One-way ANOVA)不同水深及不同月份水样营养盐浓度的差异,利用 Pearson 分析探究各营养盐浓度之间的相关关系. 本文显著水平为: $P < 0.05$ 为差异显著, $P < 0.01$ 为差异极显著. 采用 Originlab 2018 绘图。

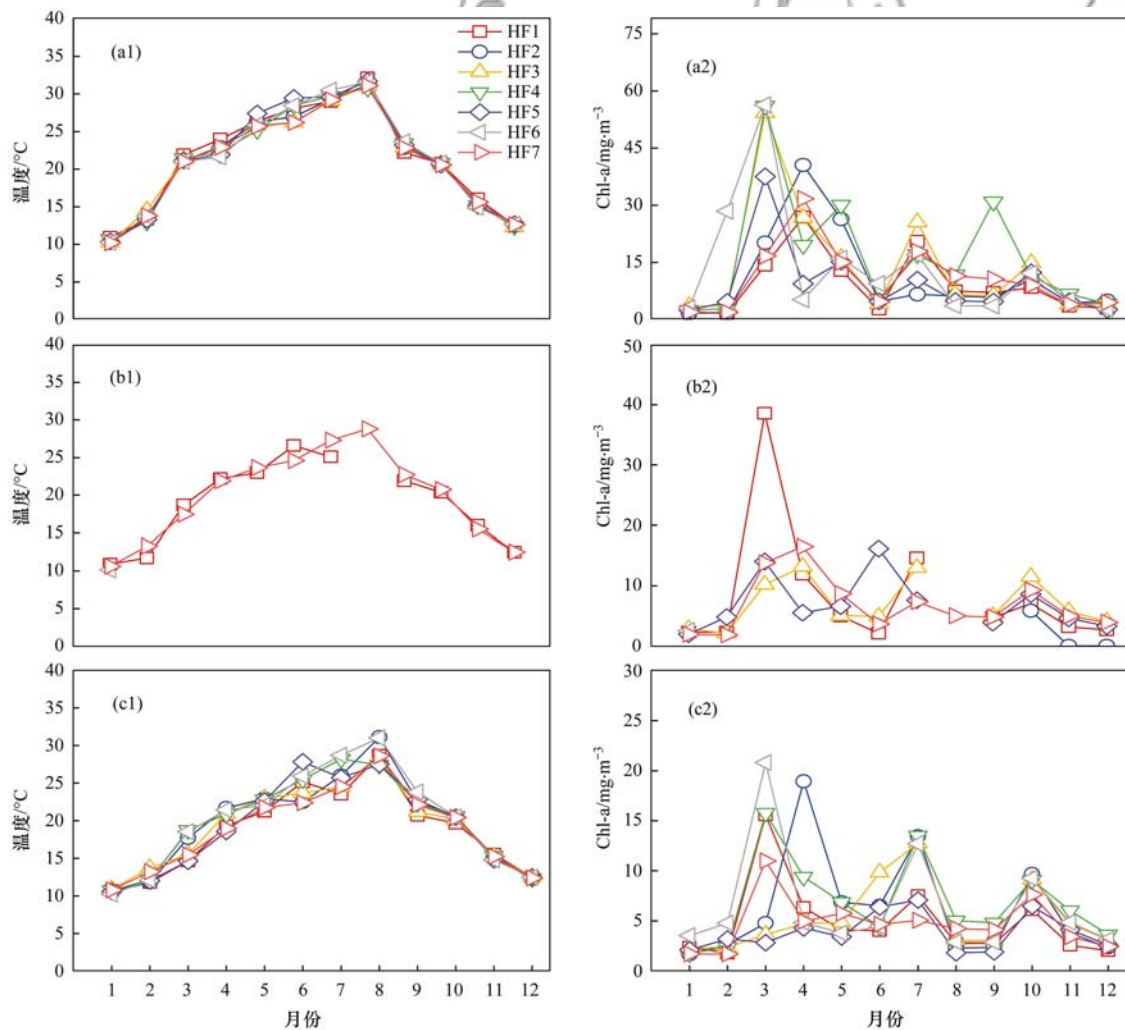
2 结果与分析

不同水深营养盐浓度差异不显著($\text{TP}: P = 0.695$, $\text{DP}: P = 0.959$, $\text{SRP}: P = 0.786$, $\text{TN}: P = 0.751$, $\text{DN}: P = 0.654$, $\text{NO}_3^--\text{N}: P = 0.832$, $\text{NH}_4^+-\text{N}: P$

$= 0.323$, $\text{NO}_2^--\text{N}: P = 0.976$), 且上中下层变化趋势相似, 表明汉丰湖水体全年无明显层化现象, 水体垂直混合较为均匀, 故后文选取不同水深营养盐浓度平均值进行分析与讨论。

2.1 汉丰湖正式运行后水体环境基本特征

研究区域全年水深变化范围为 3.0 ~ 17.0 m, 最大值出现在 1 月的 HF1 (17.0 m), 最小值出现在 8 月的 HF2 (3.0 m). 三峡库区每年 9 月开始蓄水, 2 月开始泄水, 汉丰湖水位会受三峡水位调度的显著影响. 此外, 汉丰湖 7、8 月发生严重水华, 采用了排水重蓄的方法来改善水质, 此措施也对湖区水位产生较大影响. 其他月份汉丰湖水位变动均小于 5.5 m (除去 8 月水深后, HF1: 13.5 ~ 17.0 m; HF2: 7.5 ~ 9.9 m; HF3: 10.5 ~ 16.0 m; HF4: 7.3 ~ 9.8 m; HF5: 11.9 ~ 15.5 m; HF6: 6.3 ~ 11.0 m; HF7: 11.5 ~ 16.3 m), 水位变化趋势与年内三峡水位调度规律相近. 汉丰湖全年水温范围为 9.79 ~ 32.26℃, 上层平均水温为 21.13℃, 中层平均水温为 19.76℃,



(a)、(b)、(c) 分别表示表示上、中、下水层, 下同

图 2 2018 年汉丰湖水体水温 (T) 和叶绿素 (Chl-a) 时空变化特征

Fig. 2 Spatial-temporal variations of water temperature (T) and chlorophyll a (Chl-a) in Hanfeng Lake in 2018

下层平均水温为 19.19℃ (图 2)。2018 年, 汉丰湖整体水温与气温的变化趋势一致, 呈现冬春季节水温较低, 夏秋季节水温较高的变化趋势, 7、8 月水温最高。全年各断面水温之间无明显差异, 夏季上层水温高于中下层水温, 其余各季度上中下 3 层水温差异不大, 且水温变化趋势相同。

从图 2 可以看出, 中汉丰湖 Chl-a 浓度总体变化范围在 1.29 ~ 68.58 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, 平均浓度为 8.21 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 全年变化幅度较大。如图 2 所示, 空间上各个监测断面之间 Chl-a 浓度差异较大, 各断面 Chl-a 年平均值 HF5 最低, HF4 最高。时间上, 上层 Chl-a 浓度全年一共出现 3 个峰值, 分别是 3 月、7 月和 10 月, 7 月出现峰值与当时暴发水华有较大关系, 以 1 月 Chl-a 浓度最小。1~3 月 Chl-a 浓度呈递增趋势, 3~6 月下降, 7~12 月呈波动变化, 变化幅度较前几个月偏小。上中下层均以 3 月 Chl-a 浓度最大。

如图 3, 各采样点 pH 值变化范围在 6.75 ~ 8.81

之间, 均值为 7.91, 基本为弱碱性水质。空间上全年汉丰湖上中下 3 层 pH 变化趋势相同, 各层 pH 值大小关系为: 上层 > 中层 > 下层, 各采样点之间的 pH 差异较小。时间上均表现为 4、7 月 pH 值相对较高, 其他月份 pH 值相差不大。汉丰湖的 DO 浓度在 1.20 ~ 18.47 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间变化, 全年 DO 平均浓度为 5.80 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。空间上, 各断面上中下 3 层 DO 浓度变化趋势基本一致, 汉丰湖 DO 平均浓度表现为: 上层 (6.61 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) > 中层 (5.64 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) > 下层 (4.99 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。时间上表现为 1~3 月波动增加, 3~9 月波动减小, 9~12 月又波动增加的趋势。

2.2 汉丰湖正式运行后水体营养盐时空分布特征

2.2.1 氮营养盐分布特征

汉丰湖水体 TN 平均浓度在 0.58 ~ 3.57 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 均值为 1.52 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。空间上, 汉丰湖上中下 3 层 TN 浓度变化趋势基本一致, 1~5 月表

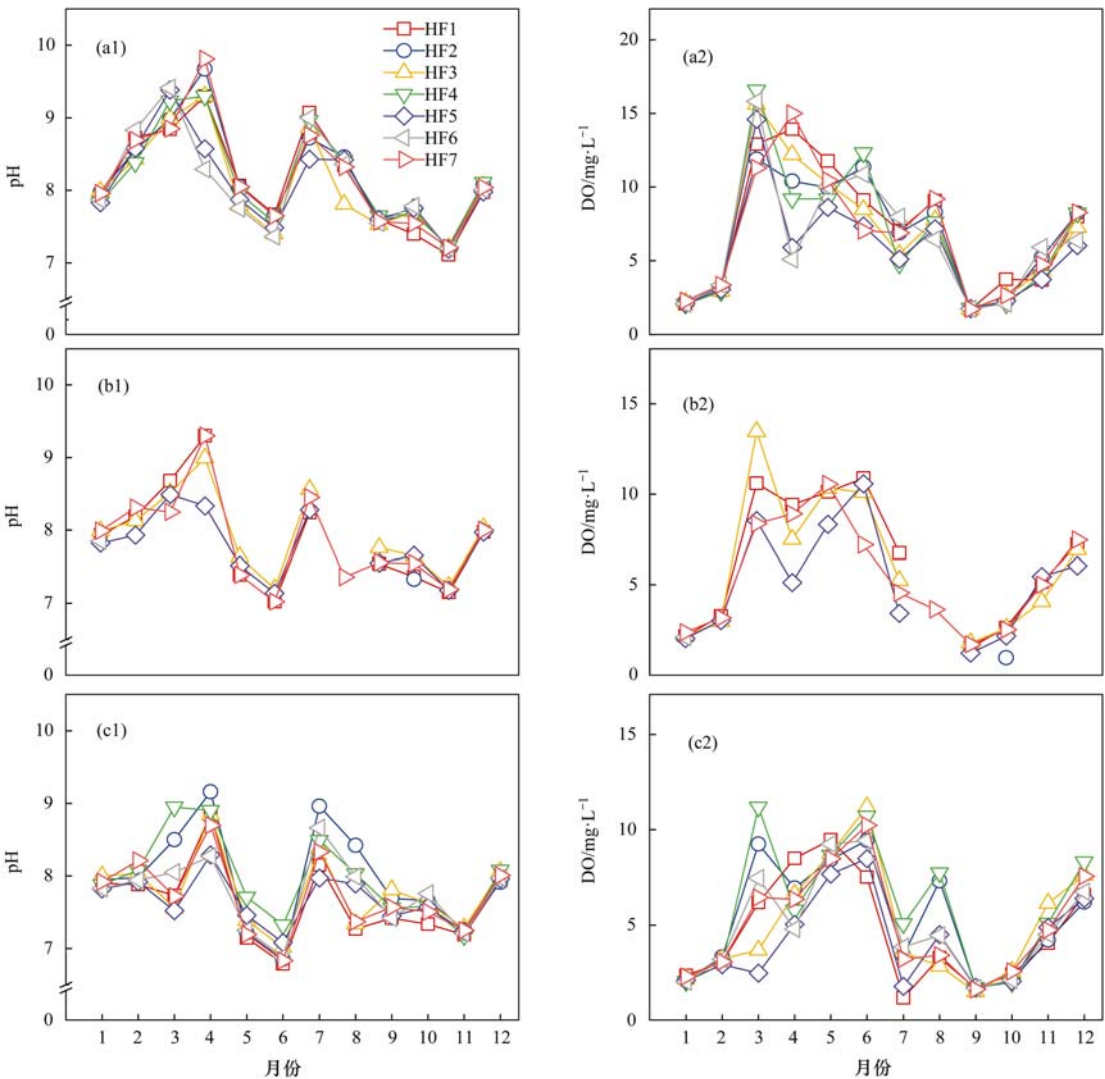


图 3 2018 年汉丰湖水体溶解氧 (DO) 和 pH 时空变化特征

Fig. 3 Spatial-temporal variations of dissolved oxygen (DO) and pH in Hanfeng Lake in 2018

现为下层的 TN 浓度略大于中上层,其他月份上中下层浓度相近;全年各监测断面 TN 浓度差异较大,各断面中 HF6 最高, HF1 最低. 时间上, 1~9 月波动减小, 10~12 月 TN 浓度较低且呈上升趋势, 最低值均出现在 10 月, 4 月和 7 月出现了明显峰值 (图 4). NO_3^- -N 平均浓度在 $0.41 \sim 2.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 均值 $0.81 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. NH_4^+ -N 平均浓度在 $0.001 \sim$

$0.60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 均值 $0.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 空间上, 全年各断面之间 NO_3^- -N 浓度有较明显的差异, 上中下 3 层 NO_3^- -N 浓度变化趋势几乎一致. 1~5 月 NO_3^- -N 与 TN 的变化趋势相同, 但在 7 月出现较大幅度的降低, 处于稳定形态的 NO_3^- -N 较少. 9 月 NO_3^- -N 出现浓度的峰值, 与汉丰湖排水重蓄有较大关系, 重蓄后水体整体 TN 浓度较低.

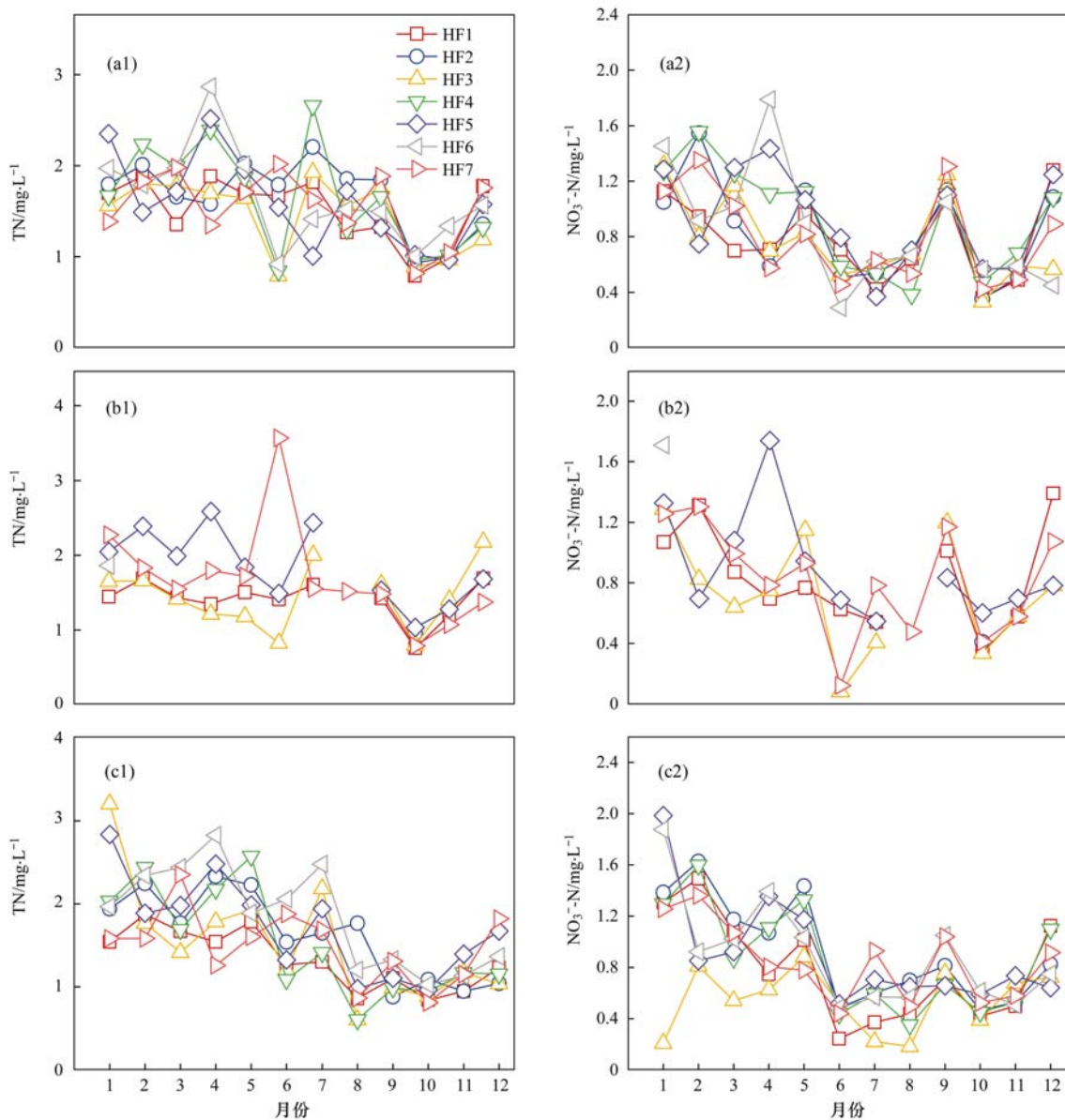


图 4 2018 年汉丰湖水体总氮 (TN) 和硝态氮 (NO_3^- -N) 时空分布特征

Fig. 4 Spatial-temporal distributions of total nitrogen (TN) and nitrate nitrogen (NO_3^- -N) in Hanfeng Lake in 2018

由图 5 可知, 上中下 3 层 NH_4^+ -N 浓度变化趋势一致, 中上层各断面差异不明显, 全年下层 NH_4^+ -N 浓度各断面间存在的差异较上中两层偏大. 时间上, NH_4^+ -N 浓度在 7 月出现最大值, 浓度明显高于其他月份, 9 月的 NH_4^+ -N 浓度最低, 此外其他月份的浓度变化不明显, 总体浓度较低. NO_2^- -N 浓度变化范围

介于 $0.001 \sim 0.368 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均浓度为 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 空间上, 各点位上中层的时间变化规律一致, 下层除 1 月外, 规律也与其两层相近, HF4、HF1 浓度较高, HF2 最低. 时间上, 1~4 月波动减小, 5~6 月急剧增大, 7~12 月波动减小, 全年大多数月份平均浓度处于较低水平.

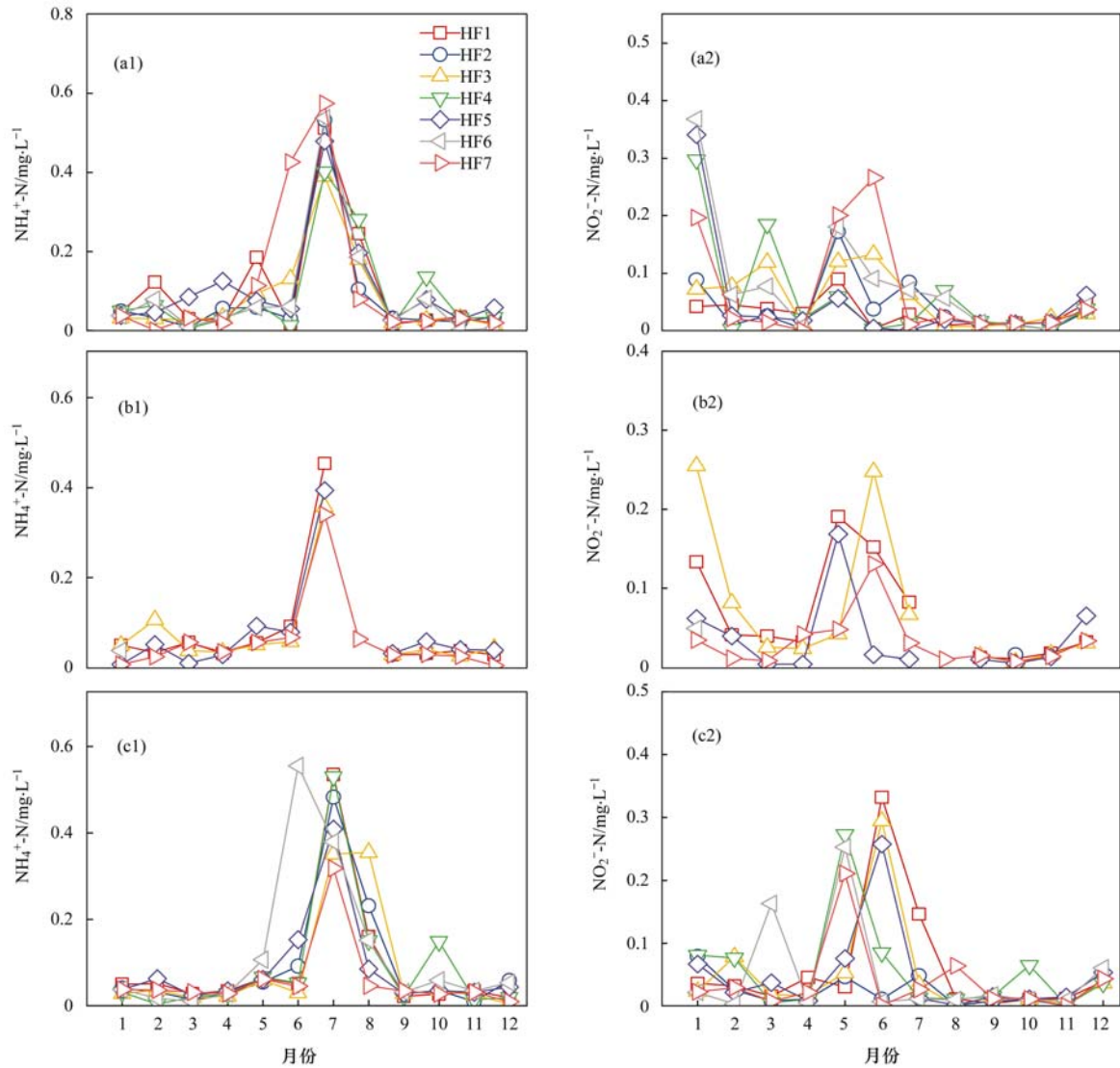


图5 2018年汉丰湖水体铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和亚硝酸盐氮($\text{NO}_2^-\text{-N}$)时空分布特征

Fig. 5 Spatial-temporal distributions of ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) and nitrite nitrogen ($\text{NO}_2^-\text{-N}$) in Hanfeng Lake in 2018

2.2.2 磷营养盐分布特征

如图6, 2018年汉丰湖TP浓度变化范围为 $0.05 \sim 0.75 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值 $0.17 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 汉丰湖全年各断面不同水深TP浓度相差不大, 分析各监测断面TP平均浓度, HF1处TP浓度最低, HF7和HF4点位TP浓度较高, 表明南河和头道河为汉丰湖主要磷污染源, 整体上看, HF6($0.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) > HF2($0.17 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) > HF7($0.14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) > HF1($0.13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), TP浓度从上游向下游递减. TP浓度以3月最高, 7月也出现峰值, 其余各月TP浓度相差不大且趋于平稳.

DP浓度范围为 $0.011 \sim 0.30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值为 $0.11 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 年内时空分布规律与TP相同. SRP浓度范围在 $0.001 \sim 0.283 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 均值为 $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 变化趋势与TP相似, 空间上同样表现为下游SRP浓度低于上游各监测断面.

2.2.3 氮磷营养盐比值

根据Justić等^[22]的营养盐限制状况判断标准: 当水体中N:P大于22时为P限制($\text{N} = \text{DIN}$, $\text{P} = \text{SRP}$); 当N:P小于10时为N限制. 本研究中, 汉丰湖上层、中层和下层水的N:P均值分别为59.821、73.572和105.383, N:P均远高于22(表2), 表现为较强的P限制.

2.2.4 相关性分析

由表3可以看出T与Chl-a、DO、DP、N:P和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 呈显著正相关, 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 呈显著负相关; Chl-a与T、pH、DO和TP呈显著正相关关系; pH与Chl-a、DO、TP、SRP、TN、DN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 呈显著正相关关系, 与 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 呈显著负相关关系; DO与T、Chl-a、pH、TP、TN、DN、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和N:P呈显著正相关关系, Chl-a和DO均与T呈显著正相关关系.

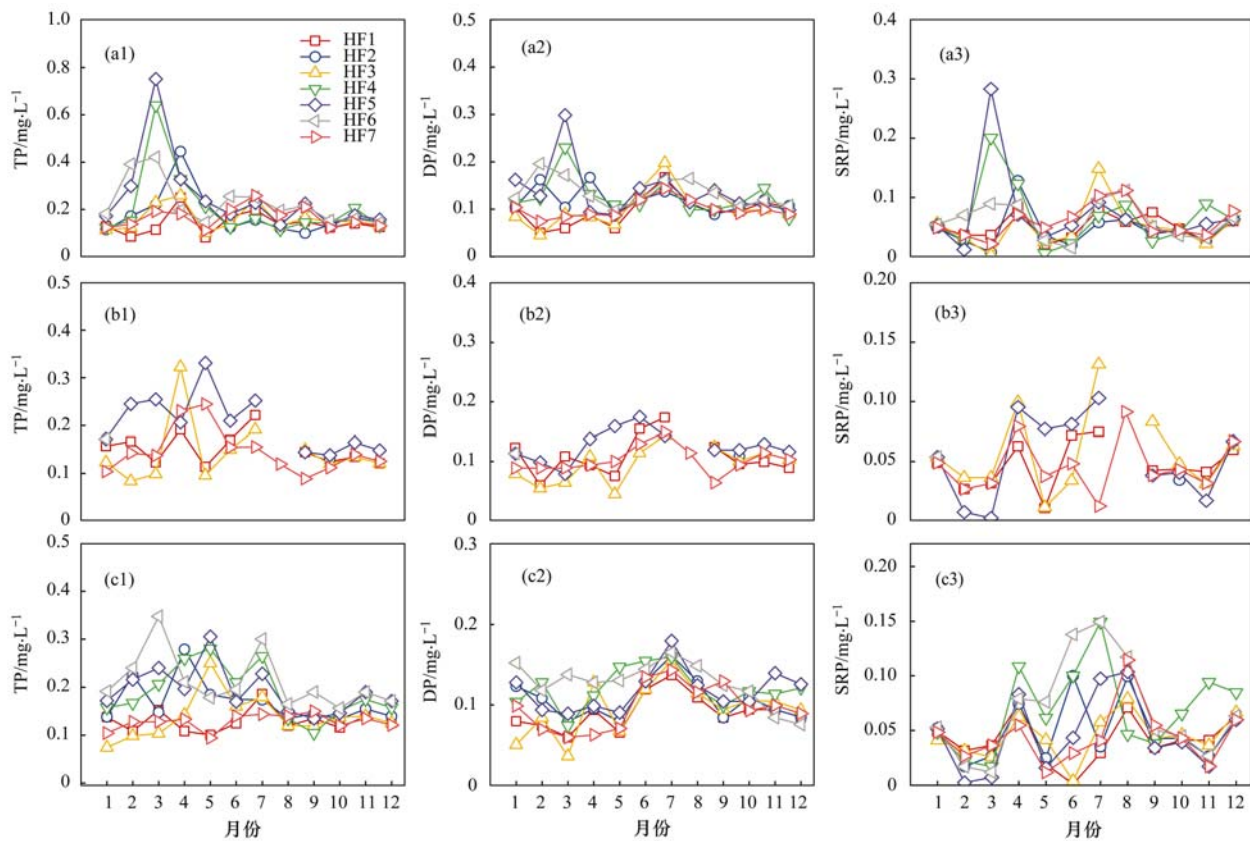


图6 2018年汉丰湖总磷(TP)、可溶性总磷(DP)和正磷酸盐(SRP)时空分布特征
Fig. 6 Spatial-temporal distribution of total phosphorus (TP), soluble total phosphorus (DP), and orthophosphate (SRP) in Hanfeng Lake in 2018

表2 2018年汉丰湖不同水深营养盐浓度

Table 2 Nutrient concentrations of different sampling depths in Hanfeng Lake in 2018

营养盐	上层	上层平均值	中层	中层平均值	下层	下层平均值
TP/mg·L ⁻¹	0.05 ~ 0.75	0.176	0.06 ~ 0.547	0.162	0.05 ~ 0.596	0.166
DP/mg·L ⁻¹	0.02 ~ 0.30	0.109	0.021 ~ 0.295	0.106	0.011 ~ 0.225	0.105
SRP/mg·L ⁻¹	0.001 ~ 0.28	0.051	0.001 ~ 0.251	0.047	0.001 ~ 0.218	0.048
TN/mg·L ⁻¹	0.71 ~ 2.87	1.519	0.577 ~ 3.568	1.486	0.601 ~ 3.203	1.539
DN/mg·L ⁻¹	0.44 ~ 2.26	1.153	0.411 ~ 2.233	1.103	0.431 ~ 2.331	1.114
NO ₃ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	0.16 ~ 1.179	0.800	0.082 ~ 1.739	0.778	0.182 ~ 1.985	0.813
NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	0.001 ~ 0.604	0.090	0.001 ~ 0.453	0.065	0.001 ~ 0.555	0.079
NO ₂ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	0.001 ~ 0.598	0.060	0.002 ~ 0.589	0.054	ND ~ 0.970	0.056
N:P	2.95 ~ 1 325.38	59.821	3.24 ~ 1 264.27	73.572	4.31 ~ 1 968.51	105.383

表3 2018年汉丰湖营养盐与其他参数之间的皮尔逊相关性¹⁾

Table 3 Pearson coefficients between nutrient and other parameters in Hanfeng Lake in 2018

	T	Chl-a	pH	DO	TP	DP	SRP	TN	DN	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	N:P
T	1	0.194 **	0.064	0.332 **	0.104	0.128 *	0.065	0.022	-0.011	-0.185 **	0.338 **	0.02	0.211 **
Chl-a		1	0.441 **	0.273 **	0.265 **	0.075	0.046	0.078	0.096	0.048	0.032	-0.038	0.055
pH			1	0.250 **	0.224 **	0.1	0.203 **	0.291 **	0.302 **	0.240 **	0.181 **	-0.164 **	-0.013
DO				1	0.217 **	-0.03	0.067	0.301 **	0.242 **	0.145 **	0.029	0.189 **	0.182 **
TP					1	0.455 **	0.334 **	0.288 **	0.239 **	0.184 **	0.082	0.073	0.068
DP						1	0.624 **	0.075	0.038	-0.131 *	0.370 **	0.216 **	-0.149 **
SRP							1	0.039	-0.044	-0.191 **	0.363 **	0.249 **	-0.327 **
TN								1	0.751 **	0.620 **	0.083	0.189 **	0.215 **
DN									1	0.852 **	0.013	0.159 **	0.300 **
NO ₃ ⁻ -N										1	-0.292 **	-0.089	0.288 **
NH ₄ ⁺ -N											1	0.174 **	-0.101
NO ₂ ⁻ -N												1	0.001
N:P													1

1) * 表示显著性水平 $P < 0.05$, ** 表示显著性水平 $P < 0.01$

3 讨论

3.1 氮素时空分布成因分析

有研究表明,三峡水库的建设对氮素的迁移与转化有显著的影响. 由于水库的拦截效应和浮游植物及微生物的相互作用,库区水体氮形态易相互转化^[23~26]. NO_3^- -N、 NH_4^+ -N和 NO_2^- -N是三峡入库河流中氮营养盐的主要成分,高比例的溶解态氮量可以保证浮游生物对氮的充分利用.

1~8月中除了7、8月 NH_4^+ -N浓度较高外,其他月份浓度均较低,没有明显的时空分布特征. 由 NH_4^+ -N和Chl-a时空分布图可知7月 NH_4^+ -N大量增加与镇东大丘、头道沟两个入湖口外源排入大量 NH_4^+ -N有关,又由于工业废水是 NH_4^+ -N的主要来源^[27],可以推断7月 NH_4^+ -N浓度大幅上升的原因可能是上游短时间内大量工业废水排放. 8月由于排水重蓄处理, NH_4^+ -N浓度已有明显降低但相较于其他月份依旧很高,9月水华现象已完全消失 NH_4^+ -N浓度出现了大幅下降. 这可能是因为 NH_4^+ -N是氮的还原态,而 NO_3^- -N是氮的稳定形态,氮污染多以还原态氮的形式排入水体,经过硝化作用, NH_4^+ -N氧化成 NO_2^- -N,然后再氧化成稳定的 NO_3^- -N,这个过程要消耗掉水体中大量的氧($4.57 \text{ mg} \cdot \text{mg}^{-1}$)^[28],结合本研究中 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N和DO浓度的时空分布,可以直观地观察到3种指标的浓度变化与氮形态的转化过程一致. 笔者推断9月 NH_4^+ -N浓度出现大幅下降表明水体近期处于自净阶段,经过7、8月的污染后大量 NH_4^+ -N通过硝化作用转化为 NO_3^- -N,再者 NO_2^- -N浓度较上月并没有增加,表明硝化的中间过程已大致完成,水体污染物已几乎分解完全,9月水体已完成自净,这与郑丙辉等^[28]对于水体营养盐转化的研究结论一致. NH_4^+ -N浓度10~12月呈现较低浓度且逐渐下降现象, Pearson 相关分析发现水体中 NH_4^+ -N浓度与 NO_3^- -N表现出明显的相关性,从 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N浓度的时间变化趋势可以推断10~12月 NH_4^+ -N的减少可能是由于硝化作用明显,使得 NH_4^+ -N不断转化为 NO_3^- -N且得不到有效地外源补充,继而导致 NH_4^+ -N浓度不断降低,但当笔者引入DO数据综合分析时发现10~12月汉丰湖水体DO浓度是呈逐月增长趋势,与硝化作用大量耗氧的研究事实相悖,因而 NH_4^+ -N的降低与硝化作用明显的假设并不成立. 根据杨柳等^[29]和张国维^[30]对湖泊中浮游植物吸收营养盐的研究发现,浮游植物群落对 NH_4^+ -N具有较高的吸收潜力,Chl-a作为表征藻类等浮游植物现存生物量的重要指标^[14],虽然根

据Chl-a时空分布观察到10~12月Chl-a浓度呈现出下降趋势,间接表明浮游植物的生物量随之逐月减少,但汉丰湖藻类种类繁多^[16],且不同种类藻类对营养盐的吸收速率各不相同^[31],并不能通过Chl-a的降低推断得出浮游植物对于营养盐吸收速率降低,再者10~12月表层DO浓度大幅增加,可说明浮游植物产氧效率逐步变高^[32],进而间接表明浮游植物对外界营养物质的吸收速率加快,由此可以推断得出10~12月 NH_4^+ -N浓度低且逐月下降的原因可能是浮游植物对于 NH_4^+ -N的同化吸收速率大于水体中有机质矿化分解产生营养盐和营养盐外源补充的速率之和.

1~6月,由于温度逐渐升高浮游植物细胞分裂与生长的速率加快,同时加速了浮游植物对于营养盐的同化速率,因而水体中浮游植物的同化作用可能强于有机质的矿化分解作用,导致 NO_3^- -N浓度逐渐缓慢地降低. 7月末汉丰湖发现水华现象,8月进行了排水重蓄处理,月末采样时已无水华现象,7月浮游植物生物量较大,但DO浓度却反而降低. 这是由于在水华暴发过程中同时存在大量的浮游植物死亡,其死亡分解会消耗大量的氧气^[32],因而DO也随之降低. 由于DO浓度较低无法提供硝化作用的必要条件,即便 NH_4^+ -N浓度在7月很高,其中转化为 NO_3^- -N的也只是极少量,导致 NO_3^- -N浓度在7月较低. 9月水体 NO_3^- -N浓度的增加,综合DO浓度、 NH_4^+ -N浓度随时间变化可以推断其原因为明显的硝化作用. 前文已分析推断得到10~12月 NH_4^+ -N降低与浮游植物对于 NH_4^+ -N的同化吸收有关,然而浮游植物对于 NO_3^- -N的吸收潜力较低^[29, 30],加之10~12月DIN浓度有一定幅度的增加,其中 NO_2^- -N在10~12月保持较低浓度对DIN影响甚小,可以由此看出 NO_3^- -N浓度从10~12月呈增加趋势的原因可能是该时间段水体中有机质矿化分解产生营养盐的速率大于浮游植物同化吸收营养盐的速率,使得水体中的硝酸盐产生累积,且因为全年汉丰湖水体未出现层化,垂直混合较为均匀,使得底泥内源释放的硝酸盐与中层、表层水体相混合导致表层中有稳定的 NO_3^- -N补充,最终导致 NO_3^- -N浓度在该时段逐渐增加.

总体而言, NO_2^- -N全年除1、5和6月外浓度较低且变化平稳,1月 NO_2^- -N浓度出现全年最高值的原因可能是1月溶解氧浓度达到全年最低,过低的溶解氧浓度会促使反硝化作用的发生,进而导致了 NO_2^- -N浓度的增加. 这与陈法锦等^[33]在湖光岩玛珥湖的研究结果类似. 虽然5、6月 NO_2^- -N的增长现象

以现有的数据和相关研究暂无法对其进行解释,但由现有数据可以确定 NO_2^- -N浓度与DO呈极显著正相关($P < 0.01$),与pH呈显著负相关($P < 0.01$),待后期测定进一步的数据后将对其以及相关指标进行更深入地研究以探明其变化原因。

3.2 磷素时空分布成因分析

TP、DP和SRP全年除3、7月外浓度都在较小范围内上下浮动,主要受水文和气象条件影响。7月TP、DP和SRP浓度均出现了峰值,HF6的TP浓度明显高于其他断面,由于镇东大丘上游为桃溪河子流域和南河子流域,这两个子流域占到整个开州区面源污染TP贡献量的60.37%^[34],因此推断TP、DP和SRP激增可能是由于上游面源污染造成的,通过前文分析营养盐中仅有TP与Chl-a呈极显著正相关($P < 0.01$),自上游而下的磷盐堆积在流速缓慢的汉丰湖水体作为浮游植物生长的物质基础^[11],更高的TP浓度促进了浮游植物的生长,进而说明TP是7月汉丰湖水华的决定性因子,该结果与陈焰等^[35]的研究结果一致。3月汉丰湖TP、DP和SRP出现峰值不同于7月,虽然上层TP、DP和SRP较高,但观察中下层3月并没有出现峰值,而4月出现了峰值,这是由于3月采样前数日研究区域有较明显的降雨,上游及沿岸流失的水土以异重流^[14]的形式汇入了汉丰湖,造成了TP、DP和SRP浓度在汉丰湖中的层化,上层高于下层和中层。经过一段时间的垂直混合,4月末上中下层达到垂直混合均匀的状态,以至于中层和下层TP、DP和SRP浓度在4月达到峰值。

空间上整体看来,TP、DP和SRP浓度均大体呈现从上游向下游递减的趋势。这与杨凡等^[27]在同为三峡库区支流的大宁河的研究得出了不同的结论,究其原因是因为汉丰湖的磷盐主要是由各个入湖口和沿岸汇入汉丰湖内,包括HF3、HF6和HF4,其中HF6上游为南河子流域和桃溪河子流域,面源污染、城市污染所提供的磷盐较多,HF3上游为东河子流域,HF4为汉丰湖子流域^[34],这两个子流域所贡献的磷盐量较之南河、桃溪河流域之和偏少,再者水体本身具有一定的自净能力^[36],且水体中的浮游植物会对营养盐进行一定程度的吸收同化,综合两方面因素使得汉丰湖TP、DP和SRP浓度的空间分布具有上述特征。

4 结论

(1)调节坝正式运行后汉丰湖上中下3层水体除3、4月磷盐浓度外其余月份营养盐浓度之间不存在显著差异,全年上中下层变化趋势相似,说明

2018年汉丰湖水体营养盐浓度不存在明显层化现象,水体垂直混合较为均匀。

(2)水体自净作用缓解桃溪河、南河流域面源污染程度使得TP、DP和SRP浓度大体呈现从上游向下游递减的趋势。汉丰湖磷盐的来源主要是HF6上游的南河子流域和桃溪河子流域,且TP是汉丰湖浮游植物生长的决定性因子。

(3)1月 NO_2^- -N浓度达到全年最高值,是由于溶解氧浓度过低导致 NO_2^- -N发生反硝化作用。1~6月温度升高导致藻类同化吸收加速是 NO_3^- -N浓度降低的主要原因。7月 NH_4^+ -N浓度急剧增加同时Chl-a达到峰值,非优势藻类的死亡分解大量消耗溶解氧,使水体溶解氧浓度呈较低水平限制 NH_4^+ -N硝化反应,致使7月 NO_3^- -N浓度降低。湖底沉积物内源释放、水体的垂直混合、 NH_4^+ -N的硝化均对10~12月汉丰湖水体中 NO_3^- -N浓度的升高有影响;10~12月 NH_4^+ -N浓度降低与藻类对 NH_4^+ -N的吸收潜力较大有关。

参考文献:

- [1] 朱广伟,金颖薇,任杰,等.太湖流域水库型水源地硅藻水华发生特征及对策分析[J].湖泊科学,2016,28(1):9-21.
Zhu G W, Jin Y W, Ren J, et al. Characteristics of diatom blooms in a reservoir-water supply area and the countermeasures in Taihu Basin, China[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(1): 9-21.
- [2] Dehaire F, Fripiat F, Cavagna A J, et al. Nitrogen cycling in the Southern Ocean Kerguelen Plateau Area: evidence for significant surface nitrification from nitrate isotopic compositions [J]. Biogeosciences, 2015, 12(5): 1459-1482.
- [3] 赵建华,李飞.海州湾营养盐空间分布特征及影响因素分析[J].环境科学与技术,2015,38(S2):32-35.
Zhao J H, Li F. The Recognition of characteristics and pollution sources of nutrients in Haizhou Bay[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38(S2): 32-35.
- [4] Davidson K, Gowen R J, Tett P, et al. Harmful algal blooms: how strong is the evidence that nutrient ratios and forms influence their occurrence [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2012, 115: 399-413.
- [5] Hutchins M G, Johnson A C, Deflandre-Vlandas A, et al. Which offers more scope to suppress river phytoplankton blooms: reducing nutrient pollution or riparian shading? [J]. Science of the Total Environment, 2010, 408(21): 5065-5077.
- [6] 江源,彭秋志,廖剑宇,等.浮游藻类与河流生境关系研究进展与展望[J].资源科学,2013,35(3):461-472.
Jiang Y, Peng Q Z, Liao J Y, et al. Advances and prospects for research into phytoplankton and river habitats [J]. Resources Science, 2013, 35(3): 461-472.
- [7] 匡武名,张萌,张金美,等.鄱阳湖外围湖泊水体营养波动周年特征的比较湖沼学研究[J].湖泊科学,2016,28(6):1293-1305.
Kuang W M, Zhang M, Zhang J M, et al. Comparative limnological study on annual dynamic pattern of nutrients in water column of three suburb lakes adjacent to Lake Poyang [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(6): 1293-1305.

- [8] 刘霞, 刘宝贵, 陈宇炜, 等. 鄱阳湖浮游植物叶绿素 a 及营养盐浓度对水位波动的响应[J]. 环境科学, 2016, **37**(6): 2141-2148.
- Liu X, Liu B G, Chen Y W, *et al.* Responses of nutrients and chlorophyll a to water level fluctuations in Poyang Lake[J]. Environmental Science, 2016, **37**(6): 2141-2148.
- [9] 李军, 刘丛强, 王仕禄, 等. 太湖水体溶解营养盐(N、P、Si)的冬、夏二季变化特征及其与富营养化的关系[J]. 地球与环境, 2005, **33**(1): 63-67.
- Li J, Liu C Q, Wang S L, *et al.* Seasonal variations in composition and distribution of dissolved nutrients in the water column of Taihu Lake, China[J]. Earth and Environment, 2005, **33**(1): 63-67.
- [10] 罗文磊, 田娟, 张菊, 等. 东平湖冬季水体营养盐污染特征及水质评价[J]. 海洋湖沼通报, 2016, (2): 8-16.
- Luo W L, Tian J, Zhang J, *et al.* Characterization of nutrient pollutants of Dongping Lake winter water and its quality assessment[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2016, (2): 8-16.
- [11] Dai H C, Mao J Q, Jiang D G, *et al.* Longitudinal hydrodynamic characteristics in reservoir tributary embayments and effects on algal blooms[J]. PLoS One, 2013, **8**(7): e68186.
- [12] Tan L, Cai Q H, Zhang H Y, *et al.* Trophic status of tributary bay aggregate and their relationships with basin characteristics in a large, subtropical dendritic reservoir, China[J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2014, **23**(3): 650-659.
- [13] Ward J V, Tockner K, Schiemer F. Biodiversity of floodplain river ecosystems: ecotones and connectivity[J]. Regulated Rivers: Research & Management, 1999, **15**(1-3): 125-139.
- [14] 张磊, 蔚建军, 付莉, 等. 三峡库区回水区营养盐和叶绿素 a 的时空变化及其相互关系[J]. 环境科学, 2015, **36**(6): 2061-2069.
- Zhang L, Wei J J, Fu L, *et al.* Temporal and spatial variation of nutrients and chlorophyll a, and their relationship in Pengxi River backwater area, Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science, 2015, **36**(6): 2061-2069.
- [15] 秦明海, 高大水, 操家顺, 等. 三峡库区开县消落区水环境治理水位调节坝设计[J]. 人民长江, 2012, **43**(23): 75-77, 100.
- Qin M H, Gao D S, Cao J S, *et al.* Design of water level regulating dam for water environmental improvement of drawdown area of Kaixian County in Three Gorges Reservoir Area[J]. Yangtze River, 2012, **43**(23): 75-77, 100.
- [16] 杨兵, 何丙辉, 王德宝. 三峡前置库汉丰湖试运行年水文水质变化特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1366-1375.
- Yang B, He B H, Wang D B. Hanfeng Pre-reservoir commissioning time variation feature of the hydrology and water quality in Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1366-1375.
- [17] 郭劲松, 谢丹, 李哲, 等. 三峡水库开县消落区水域冬季蓄水期间藻类群落结构与水质评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(4): 1129-1135.
- Guo J S, Xie D, Li Z, *et al.* Algal community structure and water quality assessment on drawdown area of Kaixian waters in Three Gorges Reservoir during winter storage period[J]. Environmental Science, 2012, **33**(4): 1129-1135.
- [18] 黄祺, 何丙辉, 赵秀兰, 等. 三峡蓄水期间汉丰湖消落区营养状态时间变化[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 928-935.
- Huang Q, He B H, Zhao X L, *et al.* Temporal variation of trophic status in drawdown area of Hanfeng Lake in the storage period of Three Gorges Reservoir in China[J]. Environmental Science, 2015, **36**(3): 928-935.
- [19] 王宇飞, 赵秀兰, 何丙辉, 等. 汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 922-927.
- Wang Y F, Zhao X L, He B H, *et al.* Canonical correspondence analysis of summer phytoplankton community and its environmental factors in Hanfeng Lake[J]. Environmental Science, 2015, **36**(3): 922-927.
- [20] 何宗苾. 三峡库区汉丰湖湿地工程生态效益研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- He Z Y. Study on the ecological Benefit of wetland engineering in the Hanfeng Lake of the Three Gorges Reservoir[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [21] 刘恋. 汉丰湖湖岸水敏性生态系统功能评估研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- Liu L. Study on the functional assessment of water sensitive ecosystem on shore of Hanfeng Lake[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [22] Justić D, Rabalais N N, Turner R E, *et al.* Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its consequences[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1995, **40**(3): 339-356.
- [23] 朱媛媛, 刘琰, 周北海, 等. 丹江口水库流域氮素时空分布特征[J]. 中国环境监测, 2016, **32**(2): 50-57.
- Zhu Y Y, Liu Y, Zhou B H, *et al.* The temporal and spatial distribution of nitrogen in Danjiangkou Reservoir watershed[J]. Environmental Monitoring in China, 2016, **32**(2): 50-57.
- [24] Howarth R W, Billen G, Swaney D, *et al.* Regional nitrogen budgets and riverine N & P fluxes for the drainages to the North Atlantic Ocean: natural and human influences[J]. Biogeochemistry, 1996, **35**(1): 75-139.
- [25] 胡春华, 周文斌, 钟夏莲, 等. 江西省万安水库对氮、磷营养盐的滞留效应[J]. 湖泊科学, 2011, **23**(1): 35-39.
- Hu C H, Zhou W B, Zhong X L, *et al.* Retention of nitrogen and phosphorus in Wan'an Reservoir, Jiangxi Province[J]. Journal of Lake Sciences, 2011, **23**(1): 35-39.
- [26] David M B, Wall L G, Royer T V, *et al.* Denitrification and the nitrogen budget of a reservoir in an agricultural landscape[J]. Ecological Applications, 2006, **16**(6): 2177-2190.
- [27] 杨凡, 杨正健, 纪道斌, 等. 三峡库区不同河段支流丰水期叶绿素 a 和营养盐的空间分布特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(11): 4944-4952.
- Yang F, Yang Z J, Ji D B, *et al.* Spatial distribution characteristics of chlorophyll a and nutrient salts in tributaries of different river sections in the Three Gorges Reservoir Area during the flood season[J]. Environmental Science, 2019, **40**(11): 4944-4952.
- [28] 郑丙辉, 曹承进, 秦延文, 等. 三峡水库主要入库河流氮营养盐特征及其来源分析[J]. 环境科学, 2008, **29**(1): 1-6.
- Zheng B H, Cao C J, Qin Y W, *et al.* Analysis of nitrogen distribution characters and their sources of the major input rivers of Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science, 2008, **29**(1): 1-6.
- [29] 杨柳, 章铭, 刘正文. 太湖春季浮游植物群落对不同形态氮的吸收[J]. 湖泊科学, 2011, **23**(4): 605-611.
- Yang L, Zhang M, Liu Z W. Uptake of various forms of nitrogen by phytoplankton community in spring in Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2011, **23**(4): 605-611.
- [30] 张国维. 湖光岩玛珥湖溶解态氮与浮游植物及其氮吸收的研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2014.
- Zhang G W. Studies on dissolved nitrogen, phytoplankton and

- nitrogen uptake by phytoplankton in Huguangyan Maar Lake [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2014.
- [31] 蔡霞. 大型藻类对氮的吸收利用模型研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2018.
- Cai X. Modelling nitrogen absorption and Utilization of *Laminaria japonica* [D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2018.
- [32] 黄钰铃, 陈明曦. 水华生消模拟及其溶解氧变化过程分析[J]. 环境科学与技术, 2013, **36**(10): 67-72.
- Huang Y L, Chen M X. Simulation for algal bloom occurrence & disappearance and its variation process of dissolved oxygen[J]. Environmental Science & Technology, 2013, **36**(10): 67-72.
- [33] 陈法锦, 劳齐斌, 卞培旺, 等. 湖光岩玛珥湖水体中营养盐的时空分布特征及其影响因素[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(6): 1693-1706.
- Chen F J, Lao Q B, Bian P W, *et al.* Spatial and temporal distributions of nutrients and their influencing factors in the Huguangyan Maar Lake[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(6): 1693-1706.
- [34] 谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 等. 汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(4): 1760-1769.
- Xie J C, Zhao X L, He B H, *et al.* Analysis of the characteristics of nitrogen and phosphorus emissions from agricultural non-point sources on Hanfeng Lake Basin [J]. Environmental Science, 2019, **40**(4): 1760-1769.
- [35] 陈焰, 黄宏, 彭文启, 等. 基于探索性数据分析的汉丰湖富营养化驱动因子研究[J]. 长江流域资源与环境, 2018, **27**(5): 1104-1113.
- Chen Y, Huang H, Peng W Q, *et al.* Research on eutrophication driven factors of Hanfeng Lake based on exploratory data analysis [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, **27**(5): 1104-1113.
- [36] 张质明, 王晓燕, 马文林, 等. 未来气候变暖对北运河通州段自净过程的影响[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(2): 730-739.
- Zhang Z M, Wang X Y, Ma W L, *et al.* The effects of global warming on purification processes of Tongzhou section of Beiyun river[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(2): 730-739.



CONTENTS

Comparison of Three Receptor Models for Source Apportionment of PM _{2.5} in Shanghai: Using Hourly Resolved PM _{2.5} Chemical Composition Data	ZHOU Min (1997)
Impact of Differents in the Concentrations of Ozone on the Chemical Composition of Single Particles	WU Meng-xi, CHENG Chun-lei, HUANG Bo, <i>et al.</i> (2006)
Influence of Secondary Organic Coating on Hygroscopicity of a Sodium Chloride Core: Based on Micro-scale Single Particle Analysis	ZHANG Shu-jia, XU Liang, GUO Xin-mei, <i>et al.</i> (2017)
Comparative Analysis of Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosol Components in the Atmosphere Between Urban and Suburban Areas	LI Xin-yue, ZHANG Kai-shan, DENG Lin-li, <i>et al.</i> (2026)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Elements Bonded with PM _{2.5} and PM ₁₀ in Linyi	LU Ping, ZHAO Xue-yan, YIN Bao-hui, <i>et al.</i> (2036)
Characteristics and Sources of Microbial Aerosols in Urban and Mountainous Areas in Autumn and Winter in Xi'an, China	XIE Wen-wen, LU Rui, MU Fei-fei, <i>et al.</i> (2044)
Pollution Characteristics of Cooking Fumes, Particulates, and Non-methane Hydrocarbons in the Exhaust of Typical Beijing Restaurants	HE Wan-qing, WANG Tian-yi, SHAO Xia, <i>et al.</i> (2050)
PM _{2.5} Concentration Influencing Factors in China Based on the Random Forest Model	XIA Xiao-sheng, CHEN Jing-jing, WANG Jia-jia, <i>et al.</i> (2057)
Spatio-temporal Variation of PM _{2.5} Related Relationships in China from the Perspective of Air Pollution Regional Linkage Control and Prevention	YANG Wen-tao, HUANG Hui-kun, WEI Dong-sheng, <i>et al.</i> (2066)
Characteristics of Spatial and Temporal Evolution and Investigation of Air Pollution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Based on Ground-Space Observation Data	WANG Yao-ting, LIANG Jia-cheng, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (2075)
Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in the Longzici Spring Catchment	TANG Chun-lei, ZHENG Xiu-qing, LIANG Yong-ping (2087)
Tempo-spatial and Retention Analysis of Total Phosphorus in the Three Gorges Reservoir	TANG Xiao-ya, TONG Si-chen, HUANG Guo-xian, <i>et al.</i> (2096)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Chlorophyll a in Typical Tributaries During the Impoundment Period of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, JI Dao-bin, WANG Li-jing, <i>et al.</i> (2107)
Spatial-temporal Distribution of Nutrients in Hanfeng Lake After Official Operation	FU Shi, NI Jiu-pai, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (2116)
Spatio-temporal Variations in the Characteristics of Water Eutrophication and Sediment Pollution in Baiyangdian Lake	LIU Xin, SHI Bin, MENG Jing, <i>et al.</i> (2127)
Spatial-temporal Distribution of Suspended Solids and Its Sedimentation Flux and Nutrients Effects in Xin'anjiang Reservoir, China	SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (2137)
Bioavailability Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Gaoyou, Lake Nansi, and Lake Dongping Under Different Hydrological Scenarios	ZHANG Liu-qing, SHI Yu, LI Yuan-peng, <i>et al.</i> (2149)
Succession Characteristics of Algae Functional Groups and Water Quality Assessment in a Drinking Water Reservoir	LI Yan-qing, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Artificial Mixing on Temporal and Spatial Succession of Algae Community Structure in Jinpen Reservoir	WANG Chen-xu, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2166)
Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Aerobic Denitrification Bacterial Community Structure from Baiyangdian Lake in Xiong'an New Area During the Winter Freezing Period	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUE Ge-cheng, <i>et al.</i> (2177)
Spatial and Temporal Succession Characteristics of Aerobic Anoxygenic Photosynthesis Bacteria in a Stratified Reservoir	ZHANG Hai-han, WANG Yan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2188)
Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Dynamics to Different Hydrological Scenarios in the Two Largest Freshwater Lakes Connected to the Yangtze River	GUO Yan-mi, LI Yuan-peng, SHI Yu, <i>et al.</i> (2198)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Northern-Side River of the Qinling Mountains in Summer	LIN Zi-shen, HUANG Ting-lin, YANG Shang-ye, <i>et al.</i> (2210)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Tributary Waters of the Lower Reaches of the Yangtze River, China	JIA Tian-qi, LEI Rong-rong, WU Xiao-lin, <i>et al.</i> (2221)
Temporal and Spatial Occurrence of NSAIDs in Taihu Lake and Relevant Risk Assessment	LIAN Jie, LI Yi-fei, WANG Xiao-xuan, <i>et al.</i> (2229)
Occurrence and Ecological Risk of Eight Typical PhACs in Surface Water and Its Impact on <i>Daphnia magna</i>	XU Xin-lei, LIU Jian-chao, LU Guang-hua (2239)
Distribution Characteristics and Migration Rules of Pollutants in Sediments of Reservoirs with <i>Eucalyptus</i> Plantation, Southern China	ZHU Ya, LI Yi-ping, LUO Fan, <i>et al.</i> (2247)
Mechanism of Urban Black Odorous Water Based on Continuous Monitoring: A Case Study of the Erkeng Stream in Nanning	LI Yong-xin, WANG Wei, HE Mei, <i>et al.</i> (2257)
Relationship Between Source-Sink Landscape Pattern and Antibiotics in Surface Water in Peri-urban Watershed	LI Min, TANG Jian-feng, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (2264)
Molecular Chemo-diversity of the Dissolved Organic Matter Occurring in Urban Stormwater Runoff	NIE Yun-han, CHEN Hao, LI Lei, <i>et al.</i> (2272)
Regulating Effect and Mechanism of Calcite/Chlorapatite Mixture Addition on Transformation and Transport of Phosphorus in Sediments	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2281)
Stability of Ferrihydrite and Goethite Nanoparticles Under Different Environmental Conditions	WANG Zhi-qiao, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i> (2292)
Sunflower-Staw-Derived Biochar-Enhanced Fe(III)/S ₂ O ₈ ²⁻ System for Degradation of Benzoic Acid	SUN Peng, ZHANG Kai-kai, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2301)
Non-activated Peroxymonosulfate-Induced Degradation of Sulfasalazine: Kinetics and Mechanism Investigations	DING Xi, ZHANG Xue-wei, ZHOU Run-sheng, <i>et al.</i> (2310)
Pollution Characteristics and Removal Effects of Antibiotics in Wastewater from Large-Scale Pig Farms in Guizhou	YANG Zhao, LI Jiang, XIANG Fu-liang, <i>et al.</i> (2320)
Nitrogen Removal in Low-C/N Rural Sewage Treatment by Anoxic/Oxic Biofilter Packed with New Types of Fillers	ZHAO Yuan-zhe, YANG Yong-zhe, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2329)
Nitrogen Removal Performance and Nitrogen/Carbon Balance of Oligotrophic Aerobic Denitrifiers	WEN Gang, WANG Tong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2339)
Bacterial Community Shifts and Nitrogen Removal Characteristics for a SNAD Process Treating Anaerobic Digester Liquor of Swine Wastewater (ADLSW) in a Continuous-Flow Biofilm Reactor (CFBR)	QIN Jia-wei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (2349)
Characteristics of ANAMMOX Granular Sludge and Differences in Microbial Community Structure Under Different Culture Conditions	JIANG Ying, GUO Meng-lei, XIE Jun-xiang, <i>et al.</i> (2358)
Start-up of an Integrated Process of Denitrifying Phosphorus Removal Coupled with Partial Nitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation	CHEN Ya, YIN Wen, ZHANG Xing-xing, <i>et al.</i> (2367)
Construction and Application of an Evaluation System for Soil Environmental Carrying Capacity	LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2373)
Synthesis of Magnetic Biochar and Its Application in the Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soils	WANG Jun-nan, CHENG Shan-shan, ZHAN Wen-hao, <i>et al.</i> (2381)
Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soil by EDTA Washing Enhanced with Reduction Solubilization	ZHANG Jin-yong, ZHU Yu-ting, WANG Ming-xin, <i>et al.</i> (2390)
Toxicity of Chromium to Root Growth of Barley as Affected by Chromium Speciation and Soil Properties	FU Ping-nan, GONG Xiao-fei, LUO Li-yun, <i>et al.</i> (2398)
Effect of Fertilizer Reduction and Biochar Application on Soil Nitrogen Loss in Purple Upland	WANG Shu, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (2406)
Relationship Between the Composition of Soil Aggregates and the Distribution of Organic Carbon Under Long-Term Abandoned Restoration	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHANG Xin-yi, <i>et al.</i> (2416)
Effects of Biochar Application on Soil Microbial Nutrient Limitations and Carbon Use Efficiency in Lou Soil	WANG Qiang, GENG Zeng-chao, XU Chen-yang, <i>et al.</i> (2425)
N ₂ O Emissions from Tea Plantations with Sorghum Intercropping and Application of Big Urea Pills	ZHANG Ke-bin, LIU Xin-liang, KANG Man, <i>et al.</i> (2434)
Effects of Different Forest Vegetation Types on Soil Nitrogen-Related Microbial Communities and Functions in Jinyun Mountain	WANG Ying-yang, WANG Fu-hua, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (2445)
Nitrous Oxide Emission and Denitrifying Bacterial Communities as Affected by Drip Irrigation with Saline Water in Cotton Fields	GUO Hui-nan, MA Li-juan, HUANG Zhi-jie, <i>et al.</i> (2455)
Effect of Organic Matter Promotion on Nitrogen-Cycling Genes and Functional Microorganisms in Acidic Red Soils	CHU Cheng, WU Zhao-yue, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i> (2468)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Fungi Diversity in the Transition Zone of Moso Bamboo and Broadleaf Forest	WANG Nan, PAN Xiao-cheng, WANG Chuan-kuan, <i>et al.</i> (2476)
Differences Between DNA- and RNA-Based Bacterial Communities in Marine Sediments	LI Ming-yue, YANG Yu-hong, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (2485)
Spatial Patterns and Spatial Autocorrelations of Wetland Changes in China During 2003-2013	ZHOU Ting, MA Jiao-jiao, XU Song-jun (2496)