

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, 笄文怡, 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)

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¹, 纪道斌^{1*}, 王丽婧^{2*}, 李虹², 李莹杰²

(1. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002; 2. 中国环境科学研究院长江经济带生态环境研究中心, 北京 100012)

摘要: 采用 2018 年 9 月对三峡水库典型一级支流——香溪河和神农溪回水区水质监测数据, 分析和对比了香溪河和神农溪的溶解氧和叶绿素 a 等指标垂向分布特征, 讨论了影响其垂向分布的环境因子。结果表明, 香溪河与神农溪的溶解氧含量在表层 0~10 m 和 0~12 m 水体分层现象明显, 且随水深增加而递减。其表层水体的溶解氧饱和度 S_{DO} 分别为 139.20% 和 107.78%, 已经达到过度饱和状态 ($S_{DO} > 100\%$); 中层与底层水体溶解氧浓度较稳定, 无分层现象。香溪河和神农溪回水区水体中叶绿素 a 垂向分布与溶解氧分布的规律一致, 表层水体中叶绿素 a 浓度整体上表现为中度富营养化 ($5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1} < \text{Chl-a} < 20 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)。Pearson 相关性分析显示, 香溪河与神农溪水体中的溶解氧与水温、浮游植物垂向分布之间存在显著相关性, 水温分层以及浮游植物的生命活动是影响溶解氧垂向分布的关键因素。叶绿素 a 与水温 and pH 呈现出显著的正相关性, 与浊度表现为显著负相关性, 表明浮游植物垂向分布主要受光照强度沿水深衰减和水温分层现象的影响。

关键词: 三峡水库; 蓄水期; 香溪河; 神农溪; 溶解氧; 叶绿素 a; 垂向分布

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)05-2107-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201909026

Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Chlorophyll a in Typical Tributaries During the Impoundment Period of the Three Gorges Reservoir

YANG Fan¹, JI Dao-bin^{1*}, WANG Li-jing^{2*}, LI Hong², LI Ying-jie²

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Eco-Environment Research Center of Yangtze River Economic Belt, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: The water quality of the backwater areas in the Xiangxi River and Shennong River, which are typical tributaries of the Three Gorges Reservoir, was monitored in September 2018. The vertical distribution characteristics of dissolved oxygen, chlorophyll a, and other indicators in the two rivers were analyzed and compared, and the environmental factors affecting their vertical distribution were discussed. The results showed that the dissolved oxygen concentration 0-10 m and 0-12 m from the surface of the Xiangxi River and Shennong River, respectively, showed significant stratification and decreased with increasing water depth. The dissolved oxygen saturation of surface water was 139.20% and 107.78%, respectively, reaching a state of supersaturation ($S_{DO} > 100\%$). The dissolved oxygen concentration in the middle and bottom water was more stable without stratification. The vertical distribution characteristics of chlorophyll a were consistent with those of dissolved oxygen in the Xiangxi River and Shennong River, and the chlorophyll a concentration in the surface water showed moderate eutrophication ($5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1} < \text{Chl-a} < 20 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$). According to Pearson correlation analysis, the vertical distribution of dissolved oxygen in the Xiangxi River and Shennong River was significantly correlated with that of water temperature and phytoplankton. The stratification of water temperature and the life activities of phytoplankton were the key factors affecting the vertical distribution of dissolved oxygen. Chlorophyll a was positively correlated with water temperature and pH, and negatively correlated with turbidity, indicating that the vertical distribution of phytoplankton was mainly affected by the attenuation of light intensity along the water depth and the stratification of water temperature.

Key words: Three Gorges Reservoir; impoundment period; Xiangxi River; Shennong River; dissolved oxygen; chlorophyll a; vertical distribution

溶解氧是反映水体污染程度的重要指标, 同时也是维系水生生物存活和水生态环境平衡的重要因素^[1-5]。当水体处于缺氧状态或者水体中溶解氧过度饱和都会对水生生态系统产生不利影响, 一般清洁的地表水水体中溶解氧含量趋近饱和, 而当水体受到污染后则会使溶解氧含量大幅度降低, 水质恶化^[6,7]。同时, 浮游植物进行光合作用时会释放氧气, 使得水体中溶解氧含量增加, 而当浮游植物进行呼吸作用时, 则会消耗水体中的溶解氧, 使水体中溶

解氧含量降低。一些研究发现, 大型浅水湖泊水体中溶解氧含量垂向分布主要受到水温分层和浮游植物的影响, 垂向分层并不稳定^[8]。也有研究表明水体

收稿日期: 2019-09-03; 修订日期: 2019-12-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51779128, 51879099); 国家自然科学基金重大项目 (91647207); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (51709096); 国家重点研发计划项目 (2016YFC0402204, 2016YFC0401702)

作者简介: 杨凡 (1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水生态环境修复, E-mail: 915246310@qq.com

* 通信作者, E-mail: 394816707@qq.com; wanglj@craes.org.cn

中溶解氧的含量与水体分层、温度、悬浮物和 pH 等指标有重要关系^[9,10]. 浮游植物是水生态系统中的重要生产者,对水生态系统内的能量转换和物质输移过程起着关键作用^[11~14]. 浮游植物是水生态系统内的关键组成部分,其空间分布特征将会直接影响到水生态系统的稳定性. 浮游植物受水生态系统内各种理化因子的影响,具有特殊的空间变化特征^[15~17],而叶绿素 a 浓度与浮游植物的生物量之间有着紧密联系,叶绿素 a 是生物指标和水体理化因子综合作用表现,利用叶绿素 a 浓度来表征水生态系统中浮游植物的生长状态及分布特征^[18,19]. 因此研究河流生态系统中溶解氧与叶绿素 a 浓度的空间分布特征及其与环境因子之间的联系具有重要意义.

三峡水库自从 2003 年成库以来,在发挥巨大的防洪、发电和通航等效益的同时,也使得长江三峡段水文水动力条件发生剧变^[20,21],三峡水库蓄水前,三峡库区内支流表现为典型的河流型流态,而在三峡水库开始蓄水运行后,库区水位升高,水流流速变缓,水环境与水生态在时空尺度上发生了显著变化^[22]. 库湾回水区由原先的河流型生态系统特征逐渐转变为特殊的“河库型”生态系统特征^[23],水体扩散能力减弱,水体滞留时间延长,水生生境产生变化从而引起生物群落结构发生变化,水体中适应静水环境的水生生物物种增多,以香溪河和神农溪等为代表的典型支流频繁出现严重水华^[24~26]. 目前针对三峡库区支流库湾的研究主要聚焦于支流营养盐、浮游植物迁移和水动力特性等^[27~29],在年内水库调度运行过程中,9~10 月为三峡水库汛后蓄水水位的变动期,同时也是库区支流的水动力条件从典型的河流型急流水体转变成类似湖泊型缓流水体的过渡期,支流回水区水环境特征尤为特殊,而对这一特殊时期不同支流回水区溶解氧与叶绿素 a 垂向分布特征的研究及其影响因子的研究相对较少. 鉴于此,本文基于三峡水库汛后蓄水期对库区典型支流——香溪河和神农溪的水质监测资料,分析两条河流水体中溶解氧和叶绿素 a 的垂向分布规律,并且探讨水体中溶解氧和叶绿素 a 与理化因子之间的联系,揭示三峡水库汛后蓄水期时库区内不同支流的溶解氧与叶绿素 a 垂向特殊分布的驱动因素及其与各种理化因子变化的响应特性,找到三峡库区内不同支流之间的相同规律,以期为我国河道型水库科学管理和支流水环境保护提供决策参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

香溪河位于湖北省西部地区,发源于神农架,是

流经湖北省兴山县与秭归县的最大河流. 是三峡水库湖北库区一级支流,河流全长 97.3 km,河口距离三峡大坝 34.5 km,流域面积为 3 183 km²,河道顺直狭长,呈现出河道型环境特征. 神农溪位于湖北省西部,发源于神农架林区,是三峡库区巴东段的一级支流,河流全长 60.6 km,河口距离三峡大坝 69.9 km,流域面积为 1 047 km²,河道呈葫芦连接状,呈现为过渡型环境特征.

1.2 样点布设

于 2018 年 9 月对香溪河和神农溪的回水区段进行水质监测. 从香溪河库湾的河口位置向库湾回水末端依次布设 5 个监测点,依次为 XX01、XX02、XX03、XX04 和 XX05,神农溪从河口至库湾回水末端依次布设 5 个监测点,依次为 SN01、SN02、SN03、SN04 和 SN05. 具体位置如图 1 所示.

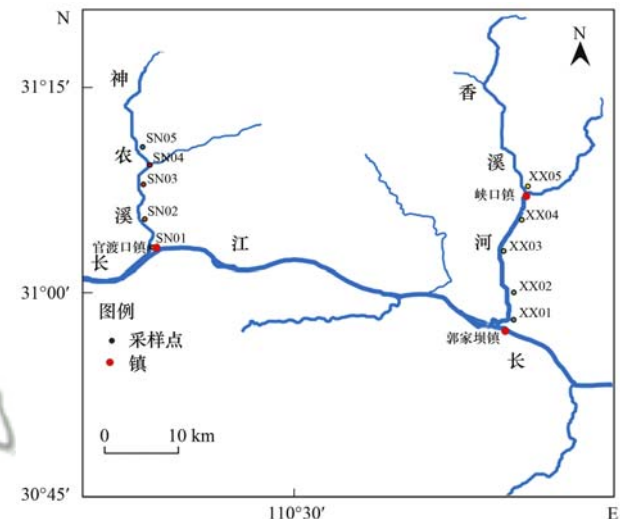


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Locations of the sampling sites

1.3 监测指标

监测指标包括溶解氧 (DO)、pH 值 (pH)、水温 (WT)、浊度 (turbidity)、水深 (depth)、叶绿素 a 浓度 (Chl-a)、透明度 (SD)、水下光合有效辐射 (PAR)、总氮 (TN) 和总磷 (TP).

1.4 实验分析

溶解氧 (DO)、pH 值 (pH)、水温 (WT)、浊度 (turbidity)、水深 (depth) 和叶绿素 a 浓度 (Chl-a) 由 YSI-EXO 多参数水质分析仪 (美国) 从各监测点的表层至底层均匀地进行测定. 总氮 (TN) 和总磷 (TP) 于现场使用 2.5 L 有机玻璃采水器采集水样,将水样保存于 350 mL 的聚乙烯水样瓶中,然后将水样放入冰箱低温保存带回实验室. 总氮 (TN) 采用过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定,总磷 (TP) 采用碱性过硫酸钾消解-钼锑抗显色分光光度法测定^[30]. 水下光合有效辐射 (PAR) 使用 International

Light 4100 光照计(美国)现场测定,透明度(SD)使用塞氏盘在现场测定.

1.5 数据分析

淡水中溶解氧饱和度 S_{D0} 是湖库水体中重要的环境指标,计算公式为^[31]:

$$S_{D0} = (c_{D0}/c_T) \times 100\%$$
 (1)

式中, S_{D0} 为溶解氧饱和度(%); c_{D0} 为实测溶解氧质量浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); c_T 为观测温度下的饱和溶解氧质量浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),计算公式为^[32]:

$$c_T = 477.8/(T + 32.36)$$
 (2)

式中, T 为实测水温($^{\circ}\text{C}$). 采用 Excel 进行处理分析数据, ArcGIS10.3 绘制研究区域的监测断面图, Origin9.0 绘制各指标垂向分布图, 相关性分析采用 SPSS25.0 进行分析. 针对三峡水库支流水体, 参考目前已有研究成果, 采取与表层温差 $\leq 0.5^{\circ}\text{C}$ 所对应的水深(m)为作为混合层深度^[33], 采用 1% 表面光强所对应的水深(m)作为真光层深度^[34].

2 结果与分析

2.1 溶解氧垂向分布特征

香溪河与神农溪支流回水区水体中不同水深的溶解氧含量如表 1 所示, 表层水体定义为水面下 0.5 m 处水体, 中层水体指 1/2 水深处水体, 底层水体指河底以上 0.5 m 处水体^[30].

表 1 三峡库区典型支流溶解氧浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
Table 1 Concentration of dissolved oxygen in typical tributaries of the Three Gorges Reservoir area/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

河流	水体	DO 变化范围	DO 平均值
香溪河	表层	7.95 ~ 16.19	12.28
	中层	4.93 ~ 9.56	7.29
	底层	5.82 ~ 8.34	7.40
神农溪	表层	7.88 ~ 10.60	8.83
	中层	7.16 ~ 8.21	7.61
	底层	7.02 ~ 8.11	7.68

由表 1 可以看出, 香溪河和神农溪的表层水体中溶解氧浓度均大于中层水体和底层水体中溶解氧的浓度. 两条河流回水区流域各监测点溶解氧垂向分布如图 2 所示. 可以看出水体中溶解氧含量在不同水深有着较大的差异, 其中表层水体溶解氧分层现象较明显. 香溪河的各监测点垂向上的分布规律基本一致, 且溶解氧含量最大值均出现在水下 1 m 深度的位置. 在水下 0 ~ 10 m 内溶解氧浓度变化较大, 垂向上有较大差异, 在水下 0 ~ 1 m 内溶解氧浓度逐渐随水深逐渐增加, 而在 1 ~ 10 m 内随着水深的不断增加, 各个监测点垂向上溶解氧浓度呈现一个急剧降低的趋势. 在 10 m 之后溶解氧含量波动较

小, 在 10 m 至 15 m 内随着水深的增加, 溶解氧含量略有减小, 15 m 之后随着水深的增加, 溶解氧含量又稍有增加. 神农溪各监测点垂向上溶解氧最大值均出现在水下 1 m 的位置处, 且溶解氧在 0 ~ 12 m 水层内溶解氧分层现象严重, 这与霍静^[35]在蓄水期对神农溪研究所发现的现象一致, 12 m 之后随着水深深度的增加, 神农溪各监测点溶解氧浓度垂向上浓度变化稳定, 分层现象消失.

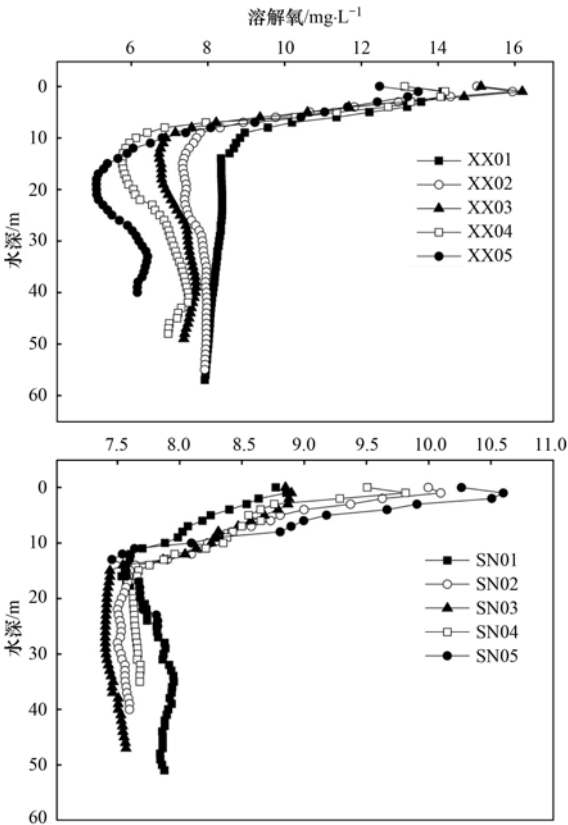


图 2 三峡库区典型支流溶解氧浓度垂向分布
Fig. 2 Vertical distribution of dissolved oxygen concentration in typical tributaries of the Three Gorges Reservoir area

2.2 理化因子垂向分布特征

如图 3 所示, 2018 年 9 月香溪河与神农溪回水区水体中存在显著的水温分层现象, 各监测点垂向上水温呈现出一个逐渐降低的分布趋势, 香溪河与神农溪回水区各监测点分别在 0 ~ 10 m 和 0 ~ 12 m 的水层内水温递减, 此水层深度为“温跃层”, 在水深达到“温跃层”后水温稳定, 分层现象消失, 这两条河流各监测点的温度变化范围分别为 25.07 ~ 29.46 $^{\circ}\text{C}$ 和 22.85 ~ 28.63 $^{\circ}\text{C}$, 表明水温不是藻类生长的限制因子, 表、底温差变化范围分别为 2.86 ~ 4.28 $^{\circ}\text{C}$ 和 4.63 ~ 5.78 $^{\circ}\text{C}$.

香溪河与神农溪回水区各监测点的 pH 分别在 0 ~ 10 m 和 0 ~ 12 m 的水深范围内沿呈现出一个急剧减小的变化趋势, 这两条河流 pH 值的变化范围分别为 7.81 ~ 9.01 和 7.91 ~ 8.52, 均表现为弱

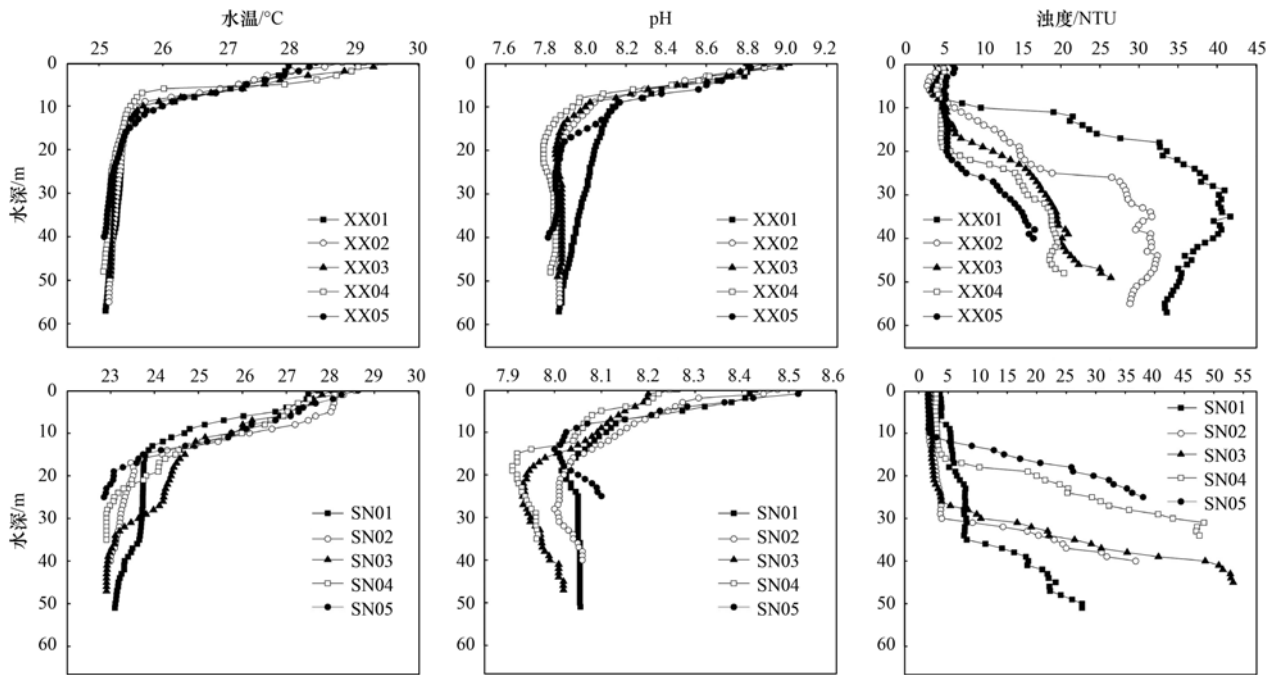


图3 三峡库区典型支流理化因子垂向分布

Fig. 3 Vertical distribution of physical and chemical factors in typical tributaries of the Three Gorges Reservoir area

碱性,这与刘德富^[36]等在长江支流多年的监测结果一致.而通过图3可知香溪河与神农溪回水区各监测点的水体浊度表现出与水温 and pH 不同的垂向分布规律,这两条河流在表层0~10 m和0~12 m内浊度较低,垂向上无明显变化,变化范围分别为4.1~5.4 NTU和1.6~5.4 NTU,随着水深的逐渐增加,各个监测点的浊度呈现出一个急剧升高的变化趋势.

2.3 Chl-a 垂向分布特征

香溪河与神农溪的各监测点叶绿素 a (Chl-a) 浓度垂向分布特征如图4所示,香溪河与神农溪两条河流叶绿素 a 浓度垂向上分别在0~10 m和0~12 m内有明显的分层现象,且各监测点均在水下1 m 深位置处出现最大值,各监测点表层水体中叶绿素 a 浓度平均值变化范围分别为7.03~9.37 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和3.95~8.06 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,均随着水深的增加而急剧减小的垂向分布.香溪河与神农溪水深分别在水下10 m和12 m后叶绿素 a 浓度较低,且分层现象消失;根据美国“河口营养状况评价”(NEEA-ASSETS)对河流富营养化状态进行了划分^[37];Chl-a > 60 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 表示过度富营养化;20 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ < Chl-a < 60 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 表示高度富营养化;5 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ < Chl-a < 20 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 表示中度富营养化;Chl-a < 5 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 表示低度富营养化,香溪河与神农溪表层水体中叶绿素 a 浓度整体平均值分别为8.05 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和5.26 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,根据此标准可知香溪河与神农溪的表层水体表现为中度富营养化.

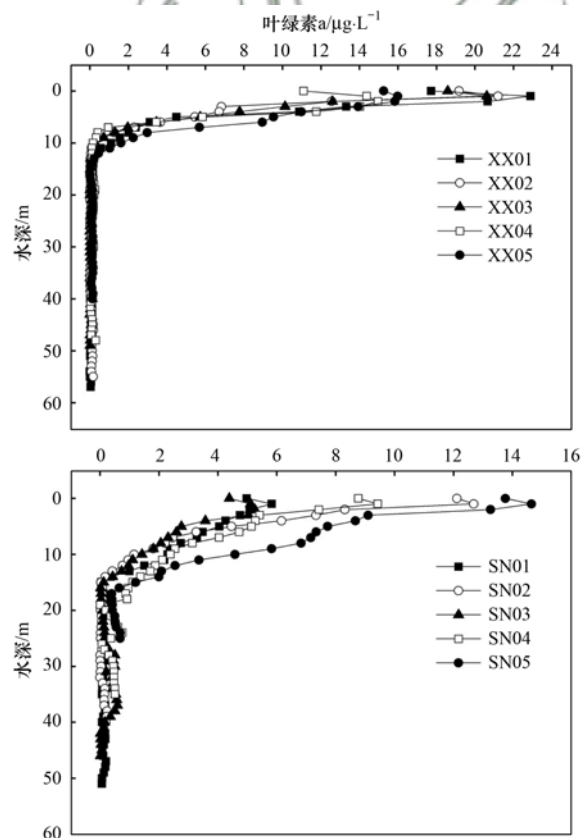


图4 三峡库区各支流叶绿素 a 垂向分布

Fig. 4 Vertical distribution of chlorophyll a in tributaries of the Three Gorges Reservoir area

2.4 理化因子相关性分析

香溪河与神农溪库湾溶解氧和叶绿素 a 浓度垂向分布与各种理化因子的相关性分析如表2所示.香溪河与神农溪叶绿素 a 浓度均与溶解氧(DO)、温度

(WT)和 pH 呈现出极显著正相关性而与浊度为极显著负相关性. 可以看出库区支流库湾叶绿素 a 的垂向分布与较多理化因子之间存在紧密联系,这与牛远等^[38]在抚仙湖进行研究所得出叶绿素 a 浓度与 pH

和温度表现出极显著正相关性的结论一致. 而这两条支流库湾回水区水体中溶解氧均与 pH 呈极显著正相关性,与浊度表现为显著负相关性,这与劳其斌^[39]等在湖光岩玛珥湖进行研究得出的结论一致.

表 2 三峡库区各支流溶解氧和叶绿素 a 与环境因子的相关性¹⁾

Table 2 Correlation of dissolved oxygen and chlorophyll a with environmental factors in tributaries of the Three Gorges Reservoir area					
河流		溶解氧	温度	pH	浊度
香溪河	Chl-a	0.889 **	0.927 **	0.931 **	-0.413 **
	溶解氧	1	0.890 **	0.917 **	-0.153 *
神农溪	Chl-a	0.820 **	0.864 **	0.833 **	-0.432 **
	溶解氧	1	0.911 **	0.928 **	-0.601 **

1) * 表示在 0.05 水平(双侧)显著相关; ** 表示在 0.01 水平(双侧)显著相关

3 讨论

3.1 溶解氧垂向分布成因分析

大量研究资料表明,三峡水库在 2003 年蓄水运行之后,干流水体水位升高,水体的流速减缓^[22, 40],库区内支流水体滞留时间延长^[41],使得支流上游输入的营养物质在支流库湾滞留,造成水体富营养化状态,水华频频暴发^[42],水华生命活动使得水体中溶解氧含量发生变化^[43]. 水库表层水体中溶解氧的来源主要有两个方面;浮游植物进行光合作用释放氧气和空气中的氧气溶解于水体,而水库深层水体中的溶解氧主要是通过水库中水层的垂向对流交换所获得^[44]. 如图 2 所示,三峡库区蓄水时段,香溪河与神农溪库湾回水区内的各个监测点溶解氧垂向上均存在明显的分层现象,且分别在表层水体 0~10 m 和 0~12 m 内溶解氧浓度较高,最大值均出现在水下 1 m 的位置处.

香溪河与神农溪库湾回水区不同水层溶解氧饱和度如表 3 所示. 可以看出两条典型支流表层水体中的溶解氧均已经达到过度饱和状态($S_{DO} > 100\%$),溶解氧含量过高,可能会对鱼类及其他水生生物的生命活动产生危害^[45, 46].

表 3 三峡库区典型支流溶解氧饱和度分布

Table 3 Distribution of dissolved oxygen saturation in typical tributaries of the Three Gorges Reservoir area				
河流	水体	c_{DO}	c_T	$S_{DO}/\%$
香溪河	表层	11.06	7.95	139.20
	中层	6.81	8.21	82.80
	底层	7.30	8.24	88.60
神农溪	表层	8.67	8.04	107.78
	中层	7.55	8.41	89.77
	底层	7.67	8.63	88.84

香溪河与神农溪库湾回水区溶解氧分别在 0~10 m 和 0~12 m 水层内存在明显的分层现象,且这两条河流各监测点垂向上最大值均出现在水下

1 m 深的位置处. 通过 Pearson 相关性分析如表 2 所示,发现香溪河与神农溪库湾回水区溶解氧与叶绿素 a 呈现显著的正相关性,相关系数分别为 0.889 和 0.820 ($P < 0.01$),且通过计算溶解氧饱和度 S_{DO} 发现,香溪河与神农溪库湾表层水体中溶解氧饱和度均达到过度饱和状态($S_{DO} > 100\%$). 浮游植物的生物量会对水体中的溶解氧含量产生直接的影响^[43]. 杨正健^[41]在三峡库区浮游植物分布特征的研究中发现浮游植物处于真光层时,浮游植物的光合作用大于呼吸作用释放氧气. 并且通过图 2 与图 4 发现两条河流溶解氧与叶绿素 a 在垂向上最大值均出现在水下 1 m 的位置处,可知香溪河与神农溪库湾回水区表层水体中的溶解氧主要来源于浮游植物的光合作用释放氧气溶解于表层水体造成,表层水体溶解氧浓度较高.

有资料表明,水体中的初级生产力主要是存在于表层水体中,太阳辐射在水体中主要受到水分子、悬浮颗粒和可溶性有机物等物质的散射和吸收而呈现出一个指数衰减的变化^[47]. 由 Pearson 相关性发现香溪河和神农溪库湾溶解氧浓度与浊度存在显著的负相关性,相关系数分别为 -0.153 ($P < 0.05$) 和 -0.601 ($P < 0.01$). 由图 3 可知香溪河与神农溪库湾各监测点浊度沿水深增加,使得太阳辐射在水体中的传播受到阻碍,浮游植物生物量也随之明显减少^[38],限制了水体中浮游植物的生长和初级生产力,浮游植物光合作用沿水深而逐渐减小,因而造成溶解氧含量沿水深逐渐减小.

香溪河与神农溪库湾水体中溶解氧浓度分别在 10 m 和 12 m 分层现象消失,图 3 可知,香溪河与神农溪库湾水体中水温存在明显的分层现象,且发现这两条河流的氧跃层、温跃层都出现在同一个水深的位置,表明温度热力分层也是影响这两条河流因素溶解氧垂向分布的另一个关键因素. 水温分层同时决定了垂向的水动力交换,由于温跃层的形成会

使得水体的垂向交换过程受阻,致使中底层的溶解氧无法接受表层水体中溶解氧的补给,使得香溪河与神农溪库湾中底层溶解氧浓度处于一个较低且稳定的状态. 香溪河与神农溪库湾溶解氧与 pH 之间垂向分布也呈显性正相关关系,相关系数分别为 0.917 和 0.928 ($P < 0.01$) 这与何剑波^[48]在千岛湖的研究发现一致, pH 也是造成溶解氧产生变化的重要因素. 水体本身具有氧化还原性质^[49], 氧化还原过程为^[50]: $4\text{H}^+ + \text{O}_2(\text{气}) + 4\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O}(\text{液})$. pH 值减小, 表示水体中 H^+ 浓度增加, 从而促进该氧化还原反应向正反应方向发生, O_2 与 H^+ 反应生成水, 使得水体中溶解氧浓度降低.

3.2 叶绿素 a 垂向分布成因

由图 4 可知, 在三峡水库蓄水期, 香溪河与神农溪回水区各监测点叶绿素 a 浓度分别在 0~10 m 和 0~12 m 的水层内分层现象严重, 叶绿素 a 浓度沿水深增加而逐渐减小, 这与刘德富^[36]在香溪河的研究发现一致, 且各监测点的最大值均出现在水下 1 m 左右的位置处. 在两条河流的中底层水体中叶绿素 a 浓度较低且无分层现象. 通过现场观测得出香溪河与神农溪各监测点的真光层深度平均值分别为 10.88 m 和 12.68 m, 混合层深度分别为 2.6 m 与 2.2 m. 由临界层理论^[51]可知, 发现这两条河流表层水体中的混合层深度均小于真光层深度, 表明表层水体中浮游植物光照充足, 且两条河流表层水体营养充足(香溪河总氮平均值 $1.43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总磷平均值 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 神农溪总氮平均值 $1.73 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总磷平均值 $0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 满足香溪河与神农溪表层水体浮游植物旺盛生长的物质条件, 叶绿素 a 浓度较大, 但各监测点叶绿素 a 浓度垂向最大值出现在水下 1 m 的深度可能是由于库湾表面水体光照强度较大, 超过了浮游植物生长的适宜范围, 出现了光抑制现象^[52], 香溪河与神农溪各监测点表层水体的叶绿素 a 主要受光照强度的影响, 随着水深的增加, 水体中浮游植物所接受到的光照强度逐渐减小, 为进行光合作用, 大量浮游植物迁移至水体表层聚集, 从而使得叶绿素 a 浓度沿水深逐渐降低^[14, 47, 53, 54], 由图 3 可知, 香溪河与神农溪库湾各监测点浊度分别在 10 m 和 12 m 后浊度突变递增也阻碍了光照的垂向传播, 抑制藻类的生长, 使得香溪河与神农溪各监测点叶绿素 a 浓度在 10 m 和 12 m 水深后浓度较低. 另外通过图 3 可以看出, 香溪河与神农溪库湾回水区水温存在明显的分层现象, 阻碍了水体的垂向交换, 使得香溪河与神农溪库湾的中层与底层叶绿素 a 浓度稳定地处于一个较低的低度. Pearson 相关分析结果表明(表 2), 三峡水库蓄

水期, 香溪河与神农溪库湾回水区叶绿素 a 浓度与 pH 呈显性相关, 相关系数分别为 0.931 和 0.833 ($P < 0.01$). 水中游离的 CO_2 、 H_2CO_3 、 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 构成了一个可逆的二氧化碳-碳酸盐体系^[55]: $\text{CO}_2(\text{气}) + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{CO}_3^{2-} + 2\text{H}^+$, 受浮游植物光合作用的影响, 随着浮游植物数量的增多, 光合作用所消耗的 CO_2 量就会增多, 这就导致了水体中 H^+ 浓度降低, 一般情况下水体中 CO_2 浓度较低, 藻类光合作用时主要利用 HCO_3^- , 在藻类植物体内的羧化酶作用下, 将 HCO_3^- 转化为 CO_2 进行光合作用, 同时置换出大量 OH^- , 也使得水体中 pH 值升高. 随着水深的增加, 浮游植物的数量减少, 光合作用减弱, pH 沿水深呈下降趋势, 与水体中叶绿素 a 浓度呈显著的正线性相关.

4 结论

(1) 三峡水库汛后蓄水期, 香溪河与神农溪库湾回水区水体中溶解氧、水温、pH 和叶绿素 a 均呈现出明显的分层现象, 分层深度分别为 0~10 m 和 0~12 m, 之后随着水深的增加, 各项指标趋于稳定, 分层现象消失.

(2) 三峡水库汛后蓄水期, 香溪河与神农溪库湾回水区各监测点表层水体中溶解氧含量已经达到过度饱和状态($S_{\text{DO}} > 100\%$), 会对表层水生生物产生危害, 且两条河流各监测点垂向上溶解氧最大值均出现水下 1 m 深的位置处. 香溪河的各监测点溶解氧与 pH 和叶绿素 a 之间呈现出显著的正相关性, 溶解氧的垂向分布主要受浮游植物的垂向分布和水温分层的影响.

(3) 三峡水库汛后蓄水期, 香溪河与神农溪库湾回水区叶绿素 a 浓度与溶解氧、温度和 pH 之间相关性显著. 各监测点垂向上叶绿素 a 浓度最大值均出现在水下 1 m 深的位置处, 在 1 m 后沿水深叶绿素 a 浓度逐渐降低, 香溪河与神农溪表层水体中叶绿素 a 浓度整体上已经达到中度富营养化状态. 香溪河与神农溪分别在水深 10 m 和 12 m 之后各监测点由于受光照强度衰减、水体浊度突变剧增和水温分层的影响, 使得库区支流的中层和底层水体中叶绿素 a 浓度较低.

参考文献:

- [1] 殷燕, 吴志旭, 刘明亮, 等. 千岛湖溶解氧的动态分布特征及其影响因素分析[J]. 环境科学, 2014, 35(7): 2539-2546.
- Yin Y, Wu Z X, Liu M L, et al. Dynamic distributions of dissolved oxygen in lake Qiandaohu and its environmental influence factors[J]. Environmental Science, 2014, 35(7): 2539-2546.

- [2] 朱旭旭, 高爱国, 王世永, 等. 泉州湾春、夏季表层溶解氧分布特征及其影响因素分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2017, **56**(4): 531-539.
- Zhu X X, Gao A G, Wang S Y, *et al.* Distribution of dissolved oxygen in the surface water and its influential factors in Quanzhou Bay during spring and summer[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2017, **56**(4): 531-539.
- [3] He B Y, Dai M H, Zhai W D, *et al.* Hypoxia in the upper reaches of the Pearl River Estuary and its maintenance mechanisms: a synthesis based on multiple year observations during 2000-2008[J]. Marine Chemistry, 2014, **167**: 13-24.
- [4] 杜彦良, 彭文启, 刘畅. 分层湖泊溶解氧时空特性研究进展[J]. 水利学报, 2019, **50**(8): 990-998.
- Du Y L, Peng W Q, Liu C. A review of dissolved oxygen variation and distribution in the stratified lakes or reservoirs[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, **50**(8): 990-998.
- [5] 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 factors [J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1393-1402.
- [6] 赵其彪, 孙军, 李丹, 等. 东海低氧区及邻近水域浮游植物的季节变化[J]. 生态学报, 2015, **35**(7): 2366-2379.
- Zhao Q B, Sun J, Li D, *et al.* Seasonal changes of the phytoplankton along hypoxia area and adjacent waters in the East China Sea [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(7): 2366-2379.
- [7] Cantin A, Beisner B E, Gunn J M, *et al.* Effects of thermocline deepening on lake plankton communities[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2011, **68**(2): 260-270.
- [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] 胡鹏, 杨庆, 杨泽凡, 等. 水体中溶解氧含量与其物理影响因素的实验研究[J]. 水利学报, 2019, **50**(6): 679-686.
- Hu P, Yang Q, Yang Z F, *et al.* Experimental study on dissolved oxygen content in water and its physical influence factors[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, **50**(6): 679-686.
- [10] 庄晓珊, 桓清柳, 彭莹, 等. 深圳东部近岸海域溶解氧的时空分布特征[J]. 热带海洋学报, 2018, **37**(5): 98-105.
- Zhuang X S, Huan Q L, Peng Y, *et al.* Spatial and temporal distribution of dissolved oxygen in the coastal waters of eastern Shenzhen[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2018, **37**(5): 98-105.
- [11] 田时弥, 杨扬, 乔永民, 等. 珠江流域东江干流浮游植物叶绿素 a 时空分布及与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2015, **27**(1): 31-37.
- Tian S M, Yang Y, Qiao Y M, *et al.* Temporal and spatial distribution of phytoplankton chlorophyll-a and its relationships with environmental factors in Dongjiang River, Pearl River basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2015, **27**(1): 31-37.
- [12] Kazamia E, Helliwell K E, Purton S, *et al.* How mutualisms arise in phytoplankton communities: Building eco-evolutionary principles for aquatic microbes[J]. Ecology Letters, 2016, **19**(7): 810-822.
- [13] 笪文怡, 朱广伟, 吴志旭, 等. 2002-2017 年千岛湖浮游植物群落结构变化及其影响因素[J]. 湖泊科学, 2019, **31**(5): 1320-1333.
- Da W Y, Zhu G W, Wu Z X, *et al.* Long-term variation of phytoplankton community and driving factors in Qiandaohu Reservoir[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, **31**(5): 1320-1333.
- [14] 黄立成, 周远洋, 周起超, 等. 云南程海浮游植物初级生产力的时空变化及其影响因子[J]. 湖泊科学, 2019, **31**(5): 1424-1436.
- Huang L C, Zhou Y Y, Zhou Q C, *et al.* Temporal-spatial variation in phytoplankton primary production and its influencing factors in Lake Chenghai on the Yunnan Plateau, China [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, **31**(5): 1424-1436.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Beaver J R, Kirsch J E, Tausz C E, *et al.* Long-term trends in seasonal plankton dynamics in Lake Mead (Nevada-Arizona, USA) and implications for climate change [J]. Hydrobiologia, 2018, **822**(1): 85-109.
- [18] 余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 等. 风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3519-3529.
- Yu M L, Hong G X, Zhu G W, *et al.* Wind field influences on the spatial distribution of cyanobacterial blooms and nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China [J]. Environmental Science, 2019, **40**(8): 3519-3529.
- [19] 吴奇丽, 张坤, 陈欢, 等. 华阳河湖群叶绿素 a 浓度的季节动态和空间分布[J]. 水生态学杂志, 2019, **40**(2): 66-72.
- Wu Q L, Zhang K, Chen H, *et al.* Seasonal and spatial variation of chlorophyll-a concentration in the Huayanghe Lake Group [J]. Journal of Hydroecology, 2019, **40**(2): 66-72.
- [20] 王丽平, 郑丙辉, 张佳磊, 等. 三峡水库蓄水后对支流大宁河富营养化特征及水动力的影响[J]. 湖泊科学, 2012, **24**(2): 232-237.
- Wang L P, Zheng B H, Zhang J L, *et al.* Effects on eutrophication and hydrodynamics of Daning River after impoundment of Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Lake Sciences, 2012, **24**(2): 232-237.
- [21] 纪道斌, 刘德富, 杨正健, 等. 三峡水库香溪河库湾水动力特性分析[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2010, **40**(1): 101-112.
- Ji D B, Liu D F, Yang Z J, *et al.* Hydrodynamic characteristics of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir [J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica, 2010, **40**(1): 101-112.
- [22] 邹家祥, 翟红娟. 三峡工程对水环境与水生态的影响及保护对策[J]. 水资源保护, 2016, **32**(5): 136-140.
- Zou J X, Zhai H J. Impacts of Three Gorges Project on water environment and aquatic ecosystem and protective measures [J]. Water Resources Protection, 2016, **32**(5): 136-140.
- [23] 黄玥, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡水库蓄水运行后出入库断面水质评价与预测[J]. 环境污染与防治, 2019, **41**(2): 211-215, 239.

- Huang Y, Huang Z L, Xiao W F, *et al.* Water quality evaluation and prediction of the reservoir inflow and outflow after the Three Gorges Project operation [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2019, **41**(2): 211-215, 239.
- [24] 张庆文, 宋林旭, 纪道斌, 等. 香溪河库湾水质特征与非回水区水华响应关系[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(7): 3018-3026.
- Zhang Q W, Song L X, Ji D B, *et al.* Relationship between water quality of Xiangxi River Reservoir and the algal blooms in non-return area in the Three Gorges Reservoir Area [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(7): 3018-3026.
- [25] 李欣, 宋林旭, 纪道斌, 等. 春季敏感时期三峡水库典型支流沉积物-水界面氮释放特性[J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 1113-1121.
- Li X, Song L X, Ji D B, *et al.* Characteristics of nitrogen release at the sediment-water interface in the typical tributaries of the Three Gorges Reservoir during the sensitive period in spring [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1113-1121.
- [26] 袁铁君, 毕永红, 胡征宇. 三峡水库主要支流碱性磷酸酶活性的比较[J]. *湖泊科学*, 2019, **31**(4): 1012-1022.
- Yuan Y J, Bi Y H, Hu Z Y. Comparative study on alkaline phosphatase activity of main tributaries of Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(4): 1012-1022.
- [27] 苏青青, 刘德富, 纪道斌, 等. 蓄水期三峡水库香溪河沉积物-水系统营养盐分布特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 2135-2144.
- Su Q Q, Liu D F, Ji D B, *et al.* Nutrient distribution characteristics of the sediment-water system in the Xiangxi River during the impoundment of TGR [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 2135-2144.
- [28] 刘心愿, 宋林旭, 纪道斌, 等. 蓄水前后三峡库区香溪河沉积物磷形态分布特征及释放通量估算[J]. *环境科学*, 2018, **39**(9): 4169-4178.
- Liu X Y, Song L X, Ji D B, *et al.* Distribution characteristics and release fluxes of phosphorus forms in Xiangxi Bay sediments in the Three Gorges Reservoir before and after impoundment [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(9): 4169-4178.
- [29] 黄佳维, 纪道斌, 宋林旭, 等. 三峡水库夏季不同支流倒灌特性及其影响分析[J]. *水力发电学报*, 2019, **38**(4): 63-74.
- Huang J W, Ji D B, Song L X, *et al.* Characteristics and effects of different density flows in tributaries of Three Gorges reservoir in summer [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2019, **38**(4): 63-74.
- [30] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 525-644.
- [31] 沈忱, 吕平毓, 王义成, 等. 水库蓄水后长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区干流溶解氧时空分布[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2015, **55**(1): 39-45.
- Shen C, Lv P Y, Wang Y C, *et al.* Spatial and temporal distribution of dissolved oxygen in the main stream of the national nature reserve for rare and endemic fish in the upper reaches of the Yangtze river after reservoir impounding [J]. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2015, **55**(1): 39-45.
- [32] 张朝能. 水体中饱和溶解氧的求算方法探讨[J]. *环境科学研究*, 1999, **12**(2): 54-55.
- Zhang C N. Study on calculation method of saturation values of dissolved oxygen in water [J]. *Research of Environmental Sciences*, 1999, **12**(2): 54-55.
- [33] Monterey C I, Dewitt L M. Seasonal variability of global mixed layer depth from WORD 98 temperature and salinity profiles [M]. Pacific Grove, California: National Oceanic and Atmospheric Administration, 2000.
- [34] Kirk J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems (2nd ed.) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- [35] 霍静, 崔玉洁, 宋林旭, 等. 三峡水库神农溪库湾水体季节性分层特性[J]. *生态学杂志*, 2019, **38**(4): 1166-1174.
- Huo J, Cui Y J, Song L X, *et al.* Seasonal stratification of waters in the Shennong Stream of the Three Gorges Reservoir [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, **38**(4): 1166-1174.
- [36] 刘德富, 黄钰铃, 纪道斌, 等. 三峡水库支流库湾水华与生态调度[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [37] Bricker S B, Ferreira J G, Simas T. An integrated methodology for assessment of estuarine trophic status [J]. *Ecological Modelling*, 2003, **169**(1): 39-60.
- [38] 牛远, 孔祥虹, 余辉, 等. 抚仙湖夏季热分层时期浮游植物空间分布特征[J]. *生态学杂志*, 2016, **35**(7): 1865-1871.
- Niu Y, Kong X H, Yu H, *et al.* Spatial distribution of phytoplankton community during summer stratification in Lake Fuxian [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, **35**(7): 1865-1871.
- [39] 劳其斌, 卞培旺, 曾珍, 等. 湖光岩玛珥湖溶解氧的时空分布特征及其影响因素[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2018, **37**(4): 714-723.
- Lao Q B, Bian P W, Zeng Z, *et al.* Spatial-temporal distributions of dissolved oxygen and its affecting factors in Huguangyan Maar Lake [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2018, **37**(4): 714-723.
- [40] 刘德富, 杨正健, 纪道斌, 等. 三峡水库支流库湾水华机理及其调控技术研究进展[J]. *水利学报*, 2016, **47**(3): 443-454.
- Liu D F, Yang Z J, Ji D B, *et al.* A review on the mechanism and its controlling methods of the algal blooms in the tributaries of Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, **47**(3): 443-454.
- [41] 杨正健. 分层异重流背景下三峡水库典型支流库湾水华生态机理及其调控[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
- [42] 陈昭明, 王伟, 赵迎, 等. 三峡水库支流水体富营养化现状及防治策略[J]. *环境工程*, 2019, **37**(4): 32-37.
- Chen Z M, Wang W, Zhao Y, *et al.* Water eutrophication status and control strategy of tributaries in the Three Gorges Reservoir region [J]. *Environmental Engineering*, 2019, **37**(4): 32-37.
- [43] 曲茉莉. 浅析黑龙江境内松花江干流溶解氧变化趋势及环境影响因子的相关性[J]. *环境科学与管理*, 2011, **36**(12): 67-69, 116.
- Qu M L. Analysis on variation tendencies of dissolved oxygen in Songhua River mainstream and correlation of environmental impact factors [J]. *Environmental Science and Management*, 2011, **36**(12): 67-69, 116.
- [44] 崔彦萍, 王保栋, 陈求稳. 三峡正常蓄水后长江口叶绿素 a 和溶解氧变化及其成因[J]. *生态学报*, 2014, **34**(21): 6309-6316.
- Cui Y P, Wang B D, Chen Q W. The spatial-temporal dynamics of chlorophyll a and DO in the Yangtze estuary after normal impoundment of the Three Gorges Reservoir [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(21): 6309-6316.
- [45] 柴小平, 魏娜, 母清林, 等. 浙江近岸海域春季表层溶解氧饱和度分布及影响因素[J]. *中国环境监测*, 2015, **31**(5): 140-144.
- Chai X P, Wei N, Mu Q L, *et al.* Distribution and main influencing factors of the surface dissolved oxygen saturation of Zhejiang offshore in spring [J]. *Environmental Monitoring in*

- China, 2015, **31**(5): 140-144.
- [46] 解磊. 青岛浮山前分层小水库溶解氧时空变化特征[D]. 青岛: 青岛大学, 2015.
- [47] 卢蓓. 湖泊沉水植物适应水体光衰减的初步研究[D]. 武汉: 中国科学院大学(中国科学院武汉植物园), 2017.
- [48] 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.
- [49] 孙学诗, 胡治洲, 刘明, 等. 秋季东海水体 Eh、pH 分布特征及其影响因素[J]. 海洋环境科学, 2019, **38**(2): 211-220. Sun X S, Hu Z Z, Liu M, *et al.* Distributions and influence factors of Eh and pH in the East China Sea in autumn[J]. Marine Environmental Science, 2019, **38**(2): 211-220.
- [50] 黄岁樑, 臧常娟, 杜胜蓝, 等. pH、溶解氧、叶绿素 a 之间相关性研究 II: 非养殖水体[J]. 环境工程学报, 2011, **5**(8): 1681-1688. Huang S L, Zang C J, Du S L, *et al.* Study on the relationships among pH, dissolved oxygen and chlorophyll a II: non-aquaculture water [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, **5**(8): 1681-1688.
- [51] Harris G P. Photosynthesis, productivity and growth: the physiological ecology of phytoplankton [M]. Schweizerbart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1978.
- [52] 吴守璇. 光辐射对太湖浮游植物初级生产力的影响研究[D]. 广州: 暨南大学, 2005.
- [53] 梅佳欣. 辐射日变化对浮游植物生长及初级生产的影响[D]. 厦门: 厦门大学, 2018.
- [54] 周远洋. 程海真光层深度与浮游植物初级生产力的时空特征解析[D]. 昆明: 云南大学, 2017.
- [55] Yao G R, Gao Q Z, Wang Z G, *et al.* Dynamics of CO₂ partial pressure and CO₂ outgassing in the lower reaches of the Xijiang River, a subtropical monsoon river in China[J]. Science of the Total Environment, 2007, **376**(1-3): 255-266.



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)