

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.7
第40卷 第7期

目次

《大气污染防治行动计划》实施的环境健康效果评估 武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇, 冯涛, 蔡泽林 (2961)

基于达标约束的南京市环境空气质量情景模拟 谢放尖, 史之浩, 李婧祎, 郑新梅, 胡建林, 刘春蕾, 杨峰 (2967)

郑州市 PM_{2.5} 中水溶性离子特征及来源分析 杨留明, 王申博, 郝祺, 韩士杰, 李晨, 赵庆炎, 燕启社, 张瑞芹 (2977)

能见度与 PM_{2.5} 浓度关系及其分布特征 王继康, 张恒德, 桂海林, 饶晓琴, 张碧辉 (2985)

基于扩散模式反演的橡胶轮胎制造行业 VOCs 排放特征 白红祥, 魏巍, 王雅婷, 任云婷, 臧佳欣, 程水源 (2994)

太原市环境空气中挥发性芳香烃碳同位素组成及来源 李颖慧, 闫雨龙, 李志生, 郝爱胜, 李如梅, 杨帆, 彭林 (3001)

办公楼聚集区空气中 PBDEs 谱分布与污染特征 王琳, 邓雅佳, 廖晓勇, 曹红英, 焦春春 (3008)

南北水调东线中游枢纽湖泊有色可溶性有机物来源组成特征 张柳青, 彭凯, 周蕾, 石玉, 李元鹏, 周永强, 龚志军, 张运林, 杨艳 (3018)

黄土丘陵沟壑区小流域不同水体氢氧同位素特征 张荷惠子, 于坤霞, 李占斌, 李鹏, 赵宾华, 柯浩成, 蒋凯鑫 (3030)

基于碳氮同位素的澜沧江水库 TOC 来源差异性分析 王从锋, 胡子龙, 杨正健, 丹勇, 赵萍, 郝文超, 聂小芬, 聂睿, 徐刘得, 刘德富 (3039)

李家河水库污染物来源及水体分层对水质的影响 徐进, 黄廷林, 李凯, 杨尚业, 温成成, 林子深, 李衍庆, 刘雪晴 (3049)

水库淹没带土壤有机氯农药分布特征及风险评价 王霞, 张青琢, 赵高峰, 王晓燕 (3058)

银川市湿地表层水中多环芳烃的分布、来源及生态风险评价 田大年, 党丽慧, 丁润梅, 蔡倩, 张鹏举, 汪岭, 杨慧芳 (3068)

人类活动影响下的垂直气候带岩溶泉地球化学特征对比: 以重庆金佛山水房泉、碧潭泉为例 谢国文, 杨平恒, 盛婷, 邓书金, 洪爱花 (3078)

渝江冲洪积扇地下水化学特征及控制因素分析 唐金平, 张强, 胡谦, 张宇, 聂保伟 (3089)

三峡库区蓄水期和非蓄水期附石藻类群落变化及其影响因素分析 付君珂, 刘黎, 贺新宇, 张红波, 董聪聪, 杨燕君, 施军琼, 吴忠兴 (3099)

降雨对香溪河库湾主要藻种原位生长的影响 翁传松, 刘德富, 张佳磊, 龚川, 沈旭舟 (3108)

绿狐尾藻分解及其氮磷释放特征 童雄, 罗沛, 刘锋, 黄敏, 陈哲, 肖润林, 吴金水 (3118)

微藻固定化条件优化及其污水氨氮去除潜力分析 刘祥, 王婧瑶, 吴娟娟, 鹏飞, 王凯军 (3126)

钛酸盐纳米管对水中氨氮的吸附特性 张政, 冯长生, 张晓瑞, 郑建奎, 蒋彩云, 李攀杰, 王玉萍 (3135)

基于缺陷重构的类芬顿光催化剂在降解染料废水中的应用 唐清文, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 李海翔 (3146)

N 原子杂化石墨烯高效活化过一硫酸盐降解 RBk5 染料废水 于永波, 黄湾, 董正玉, 吴丽颖, 张倩, 洪俊明 (3154)

Cu²⁺ 对以 NO₂⁻ 为电子受体反硝化过程的影响 买文可, 彭永臻, 吉建涛 (3162)

CANON 中试反应器启动及性能优化 孙庆花, 吴迪, 周家中, 郑志佳 (3169)

好氧段碳源浓度对同步去除和富集磷酸盐生物膜的影响 徐林建, 潘杨, 章豪, 冯鑫, 魏攀龙, 尤星怡 (3179)

有机物特性对 AAO 系统污泥沉降性能的影响 刘小博, 袁林江, 陈希, 薛欢婷 (3186)

不同污泥浓度下缺氧 FNA 对硝化菌活性的影响 吕心涛, 周桐, 田夏迪, 谷鹏超, 杨岸明, 王伟佳, 张树军 (3195)

ANAMMOX 菌铁自养反硝化工艺的稳定性 张文静, 黄勇, 毕贞, 胡羽婷, 董石语 (3201)

在线 NaClO 反洗对倒置 A²O-MBR 系统微生物群落的影响 王旭东, 高森, 王莹莹, 杨永哲, 刚家斌, 符国力, 王磊 (3208)

基于有机物释放和经济性的污泥预处理方法评价 袁悦, 谭学军, 郑舍予 (3216)

北京市清水与再生水协同利用优化模型 张田媛, 谭倩, 王淑萍 (3223)

N-亚硝胺在不同处理工艺污水处理厂中的分布及其去除 柳王荣, 赵建亮, 杨愿愿, 姚理, 刘有胜, 应光国 (3233)

北京市生活污水中曲马多和芬太尼的赋存 周子雷, 杜鹏, 白雅, 韩胜, 黄红梅, 徐泽琼, 李喜青 (3242)

贵阳市污水处理厂中典型抗生素的污染水平及生态风险 杨钊, 李江, 张圣虎, 向福亮, 唐涛涛, 杨娅男 (3249)

紫色土丘陵区畜禽养殖场土壤中抗生素抗性基因分布特征 程建华, 唐翔宇, 刘琛 (3257)

四环素对污泥蚯蚓粪中微生物种群和抗性基因的影响 陈景阳, 夏慧, 黄魁, 吴颖 (3263)

热水解污泥厌氧消化过程中肠球菌抗生素抗性基因与毒力基因的转归 李慧莉, 裴媛玫, 李姗, 何芙蓉, 杨月婷, 魏源送, 佟娟 (3270)

鸡粪与中药渣共堆肥对抗生素抗性基因的影响 武晋萍, 陈建文, 刘勇, 张红, 李君剑 (3276)

宁武亚高山湖泊细菌群落的时空格局及驱动机制 王雪, 刘晋仙, 柴宝峰, 罗正明, 赵鹏宇, 暴家兵 (3285)

石家庄市春季景观水体 nirS 型反硝化细菌群落特征分析 张艺冉, 李再兴, 孙悦, 霍然, 孟文茹, 王凌霄, 申邵恒, 杨子程, 周石磊 (3295)

磷差异性调控水稻根际 nirK/nirS 型反硝化菌组成与丰度 湛钰, 高丹丹, 盛荣, 魏文学, 秦红灵, 张文钊, 侯海军, 汤亚芳 (3304)

会仙岩溶湿地、稻田与旱地土壤细菌群落结构特征比较 贾远航, 靳振江, 袁武, 程跃扬, 邱江梅, 梁锦桃, 潘复静, 刘德深 (3313)

湘中典型稻田系统 Cd 平衡分析 蒋凯, 邓潇, 周航, 龙坚, 李欣阳, 董霞, 王树兵, 刘文辉, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (3324)

改良剂对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响 李义纯, 王艳红, 唐明灯, 巫彬芳, 李林峰, 艾绍英, 凌志祥 (3331)

重金属固定植物促生细菌的筛选及其阻控小麦富集重金属效应 韩辉, 王晓宇, 蔡红, 姚伦广, 蔡倩迪, 王逸雪, 陈兆进 (3339)

不同品种辣椒镉亚细胞分布和化学形态特征差异 彭秋, 李桃, 徐卫红, 焦璐琛, 邓继宝 (3347)

添加磷对水稻-油菜轮作土壤 N₂O 排放影响 孙正, 苏荣琳, 徐鹏, 吴宏涛, 胡金丽, 赵劲松, 胡荣桂 (3355)

渭北旱原土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响 刘杰, 马艳婷, 王宪玲, Sompouviset Thongsouk, 李利敏, 秦亚旭, 赵志远, 郑伟, 翟丙年 (3361)

不同土地利用类型的土壤中多环芳烃的纵向迁移特征 鲁垠涛, 向鑫鑫, 张士超, 刘明丽, 王静, 李爽, 姚宏, 孙绍斌 (3369)

西湖景区土壤中邻苯二甲酸酯污染水平、来源分析和空间分布特征 廖健, 邓超, 陈怡, 周文钊, 林春绵, 张辉 (3378)

生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响 李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 张久成, 陈树兰, 王慧玲, 张妍, 俞方悦, 杨林, 董胜虎 (3388)

《环境科学》征订启事(3194) 《环境科学》征稿简则(3222) 信息(3256, 3284, 3323)

降雨对香溪河库湾主要藻种原位生长的影响

翁传松¹, 刘德富^{1,2}, 张佳磊^{1*}, 龚川¹, 沈旭舟¹

(1. 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 河流生态修复与藻类利用湖北省重点实验室, 武汉 430068; 2. 三峡大学水利与环境学院, 三峡库区生态环境教育部工程中心, 宜昌 443002)

摘要: 为明晰蓄水期降雨对三峡库区香溪河支流主要藻种原位生长的影响因素, 本文在三峡水库降雨前后采用原位培养装置(培养笼)对铜绿微囊藻、小球藻和栅藻生物量变化特征进行原位培养实验. 结果表明:①研究期间(2017年10月4~18日)降雨期与非降雨期水动力条件存在显著性差异(ANOVA, $P < 0.05$), 降雨期间3种主要藻种 Chl-a 总量、比生长速率均显著小于非降雨期(ANOVA, $P < 0.05$), 表明降雨对藻类生长起一定的抑制作用; 相关分析结果指出, 表征垂向掺混的4个水动力参数与3种藻种比生长速率呈显著/极显著负相关关系, 表明水动力条件中剪切力 τ 、垂向紊流黏性系数 V_t 和垂向紊流扩散系数 V_l 的改变是导致藻类迅速衰亡的关键因素; ②降雨前培养装置内混合层深度较低(1~2 m), 降雨后(10月10~18日)混合层深度明显上升(大于5 m), 同时降雨期叶绿素 a (Chl-a) 浓度显著低于非降雨期(ANOVA, $P < 0.05$). 相关分析结果表明, 光混比与3种藻种的比生长速率呈显著/极显著正相关, 表明降雨导致水体垂向扰动增强, 混合层不断扩大, 打破了水体原有的水温分层从而抑制藻类的生长增殖; ③降雨量、水温、光照强度、总氮(TN)和溶解性总氮(DTN)在降雨期与非降雨期均存在显著差异(ANOVA, $P < 0.05$), 相关分析表明, 降雨带来降雨量、水温、光照强度、总氮(TN)和溶解性总氮(DTN)改变是影响3种主要藻种比生长速率的关键环境参数.

关键词: 降雨; 垂向掺混; 光混比; 原位生长; 三峡水库

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)07-3108-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201811235

Influence of Rainfall on the *in situ* Growth of Dominant Algae Species in Xiangxi River

WENG Chuan-song¹, LIU De-fu^{1,2}, ZHANG Jia-lei^{1*}, GONG Chuan¹, SHEN Xu-zhou¹

(1. Hubei Key Laboratory of Ecological Restoration of River-lakes and Algal Utilization, College of Civil Engineering and Construction and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: To understand the influence of rainfall on the *in situ* growth (in a culture cage) of dominant algae species in the Xiangxi River tributary of the Three Gorges Reservoir, culture experiments were carried out to measure the biomass of *Microcystis aeruginosa*, *Chlorella vulgaris*, and *Chlorella aeruginosa* before and after rainfall. The results showed that ① during the study period (October 4-18, 2017), there were significant differences in hydrodynamic conditions between the rainfall period and the non-rainfall period (ANOVA, $P < 0.05$). Total Chl-a and the specific growth rate of the three main algae during rainfall period were significantly lower than during the non-rainfall period, which inhibited algae growth to some extent. The results of correlation analysis showed that the four hydrodynamic parameters characterizing vertical mixing had a highly significant negative correlation with the specific growth rate of the three dominant algae species. Meanwhile, the changes of shear force τ , the vertical turbulent viscosity coefficient V_t , and the vertical turbulent diffusion coefficient V_l were the key factors leading to the rapid decline of algae; ② the depth of the mixed layer was lower (1-2 m) before rainfall, but increased (>5 m) markedly after rainfall (October 10-18). At the same time, the concentration of Chl-a during the rainfall period was significantly lower than that during the non-rainfall period. The results of the correlation analysis showed that there was a highly significant positive correlation between the ratio of eutrophic depth to mixing depth (Z_{eu}/Z_{mix}) and the specific growth rate of the three dominant algae species. This indicated that the vertical disturbance of water was enhanced by rainfall, and mixing layer expanded continuously, which reduced the water temperature stratification and thus inhibited the growth and proliferation of algae; ③ there were significant differences in rainfall, water temperature, light intensity, total nitrogen, and dissolved total nitrogen between the rainfall period and non-rainfall period (ANOVA, $P < 0.05$). Correlation analysis showed that changes in rainfall, water temperature, light intensity, total nitrogen, and dissolved total nitrogen caused by rainfall were the key environmental parameters affecting the *in situ* growth rate of three dominant algae.

Key words: rainfall; vertical mixing; the ratio of eutrophic depth to mixing depth; *in situ* growth; Three Gorges Reservoir

收稿日期: 2018-11-28; 修订日期: 2019-02-18

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07101003-008); 科技部国际科技合作专项(2014DFE70070); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51209190)

作者简介: 翁传松(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为流域水环境保护, E-mail: wengchuansong@sina.com

* 通信作者, E-mail: zhangjialei@craes.org.cn

三峡水库自 2003 年蓄水成库以来因改变了库区的水文和水动力情势导致支流水华频发, 对库区人民生活、工农业用水及水库的正常运行带来不利影响, 成为国内外广泛关注的生态环境问题之一^[1-4]。

从藻类生态学角度来看, 水动力条件是影响藻类生长的关键因素^[5-8]。一方面水动力条件通过影响藻类细胞的分裂、形态、光合特性、光合色素的组成以及藻细胞的生存能力来影响藻类的生长, 另一方面通过直接影响藻细胞周围的环境(例如: 光照强度、水温、营养盐和浮游动物分布)间接影响藻类的生长。相关学者和科研团队在三峡水库香溪河野外原位观测发现: 降雨的发生总是伴随着水华现象的快速消退^[9, 10]。综合目前三峡水库支流水华生消过程和机制的研究成果认为“三峡水库的水华问题从本质上讲是因为大坝建设导致的生境条件的演变, 这种演变的核心是水动力背景的改变”。李锦秀等^[11]基于监测数据构建了大宁河支流流速与藻类水华关系曲线并提出了临界流速的概念, 认为当支流流速小于临界流速时, 暴发水华现象, 反之, 水华现象消失。曹巧丽等^[12]基于室内控制实验指出当室内控制流速大于 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时仍然暴发水华, 即在三峡水库支流决定水华消失的流速不存在。徐耀阳^[13]基于三峡水库香溪河现场跟踪监测数据指出水体滞留时间越长, 藻类越容易生长聚集从而暴发水华。但是郑丙辉等^[14]在 2007 年 12 月 ~ 2008 年 1 月之间, 在大宁河河段监测到了严重的微囊藻水华现象, 按照前期研究结果, 此时水体滞留时间最长, 水温最低, 从理论上讲不会暴发水华, 因此水体滞留时间并不是影响水华暴发的主控因素。本团队基于近 10 年的香溪河野外原位观测数据, 运用微弱流场监测技术^[15], 发现在三峡水库支流普遍存在分层异重流现象, 同时运用临界深度理论和中度扰动理论, 指出分层异重流所导致的真光层/混合层的变化是影响水华生消的关键因素。本团队通过野外跟踪监测、室内外控制实验和数值模拟等方法开展了降雨对水华消退的影响机制研究。结合其他科研团队在三峡水华生消机制方面的研究成果, 推测降雨所带来的三峡水库支流水动力条件的改变可能是导致降雨期间水华快速消失的原因。纪道斌等^[16]基于香溪河暴雨过程中监测数据指出: 降雨对水华存在着抑制和促进的双重作用, 降雨通过洪水的冲刷作用对藻类生物量产生稀释作用, 降低藻类生物量浓度; 暴雨冲刷过程中所携带的泥沙颗粒增加了水体中悬浮物浓度, 透明度减少, 导致真光层深度降低, 抑制藻类生长; 降雨增大了水体

的垂向掺混强度, 水体表层藻类在水体剪切力的作用下进入中下层, 抑制了水华的发生; 但是, 降雨导致水体温度梯度增大, 混合层减小, 则为日后的水华的暴发提供了适宜条件。崔玉洁^[10]基于降雨期间香溪河库湾跟踪监测和数值模拟结果指出: 在香溪河库湾分层异重流这种特殊的水动力条件下, 降雨通过增大水体的垂向掺混强度导致藻类的原位沉降作用加强, 表层水华现象消失。高圻烽等^[17]基于香溪河干支流水动力和藻类生长耦合模拟结果指出, 水体的垂向掺混强度对于叶绿素浓度和藻类生长具有重要影响, 水体垂向掺混加强抑制了藻类富集作用, 同时通过水体的垂向掺混过程将藻类带入水体真光层深度以下, 抑制藻类的生长, 导致叶绿素浓度降低。基于以上科研成果笔者推测: 降雨一方面通过影响香溪河水体垂向掺混强度来直接影响藻类的生长, 另一方面通过影响水体的营养盐浓度、水下光热结构(例如: 光混比)来间接影响藻类的生长。但是降雨是通过影响哪些水动力参数来影响藻类的生长过程尚不明晰, 同时水华的暴发是一个藻类演替、快速增殖和上浮聚集到水体表层为肉眼所见的生态学过程, 如果仅仅用叶绿素浓度或者藻类细胞密度这些瞬时值无法准确地表征水华的生消过程。藻类比生长速率通常是指特性藻种在天然水域进行原位培养所得到的生长速率, 因此藻类原位生长实验能有效揭示藻类在特定水域中实际生长特征与生态学行为。李哲^[18]通过在三峡水库彭溪河支流开展主要藻种比生长速率的初步研究, 设计适用于三峡水库支流的藻类原位生长培养装置。同时冯婧等^[19]在三峡水库彭溪河支流比生长速率及其影响因素的研究结果表明: 三峡这种特殊的水动力条件一方面通过改变流速的大小来影响主要藻种的比生长速率; 另一方面通过影响水温、营养盐浓度和藻类的漂移来影响藻类的比生长速率。表明藻类原位生长实验能较好地揭示降雨所带来的水动力条件的改变对水华生消过程的影响。

因此本研究在香溪河库湾选取不同生长策略的 3 种主要藻种进行原位生长实验, 分析降雨期与非降雨期对藻类比生长速率的变化特征, 综合运用数理统计分析和生态学理论分析影响藻类比生长速率的主控环境因素, 以期对三峡水库水华生消机制理论体系的构建提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概述

香溪河为三峡水库第一条一级支流, 位于荆山山脉与巫山山脉之间 ($110^{\circ}25' \sim 111^{\circ}06'E$, $30^{\circ}57'$

~31°34'N), 干流全长 94 km. 该流域属亚热带大陆性季风气候, 年降雨量 900 ~ 1 200 mm, 夏季炎热多伏旱, 以暴雨为主; 秋季阴冷潮湿, 以阴雨为主. 因此本研究时间选为水华多暴发的 10 月, 地点选为香溪河野外环境观测站监测平台(图 1), 三峡库区水位及入库流量变化过程见图 2.

1.2 实验装置

整个实验装置设计在野外监测平台支架上. 通过钢圈和目绢丝制成直径为 0.3 m, 高度为 5 m 的原位培养笼, 将制成的培养笼悬挂于支架上并高出水面 0.5 m 以免围格外浮游动物、原有藻种等进入, 影响整个实验结果. 因培养笼装置内衬钢圈, 故除去浮游动物和原有藻种的原水可透过目绢丝进入培养笼内部. 实验共设计 3 组原位培养笼并列悬

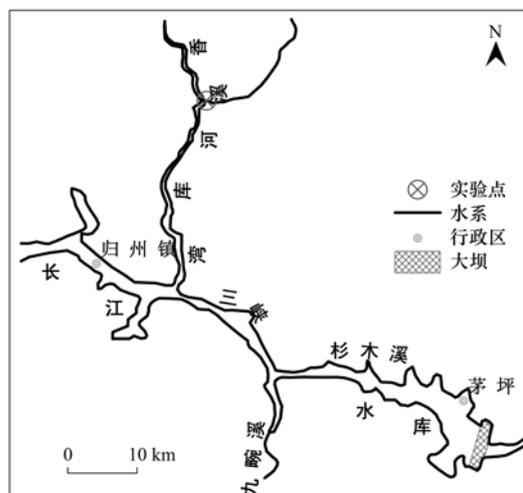


图 1 香溪河回水区示意

Fig. 1 Backwater area of the Xiangxi River

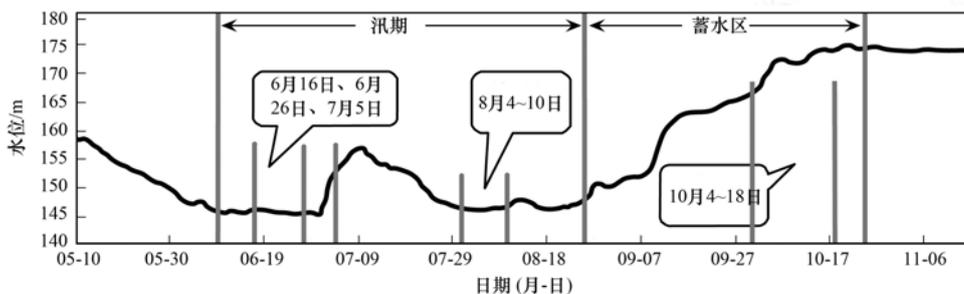


图 2 三峡库区水位及入库流量变化过程

Fig. 2 Process of water level and inflow discharge in Three Gorges Reservoir area

挂于支架上, 每组培养笼内的水体营养条件、环境条件及水动力条件均与外界原水相同. 本实验装置示意如图 3 所示, 围格设计标准如表 1.

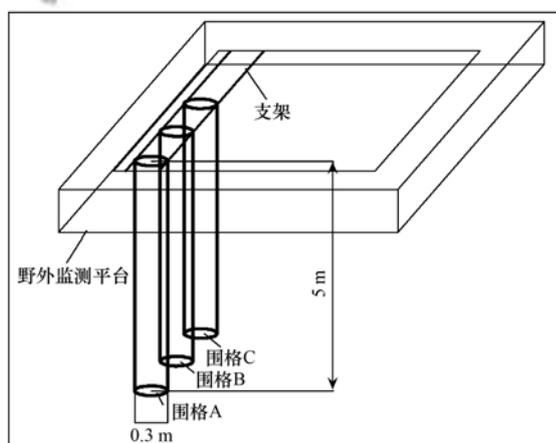


图 3 培养装置示意

Fig. 3 Map of the two incubation devices

1.3 实验方法

本研究时间选在营养盐充足、水温适宜且气象多变的汛末蓄水期, 即 10 月 4 ~ 18 日, 周期为 15 d. 培养对象依据藻类形态功能组^[20] (morphologically-based functional groups, MBFG), 选出 3 种香溪河水库主要藻种: 铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*)、小球藻 (*Chlorella*) 和栅藻 (*Scenedesmus*), 藻种均来自于中国科学院水生生物研究所专业技术人员扩培 (编号分别为: FACHB-646、FACHB-8 和 FACHB-489), 各种藻细胞密度在 $1 \times 10^7 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$. 将扩培后的藻种放入原位培养笼后, 每隔一天早上, 通过采水器分别在围格内的表层和底层取 250 mL 水样, 每取一次藻种都用蒸馏水将采水器进行冲洗, 以免影响其它围格内藻种的生长, 将采集后的水样带回实验室做水质分析.

表 1 野外原位实验设计

Table 1 Setup of field *in situ* experiment

序号	围格编号	直径/m	深度/m	材料	藻种	围格内水体
1	A	0.30	5	钢圈 + 300 目绢丝	微囊藻	过滤水
2	B	0.30	5	钢圈 + 300 目绢丝	小球藻	过滤水
3	C	0.30	5	钢圈 + 300 目绢丝	栅藻	过滤水

本研究选择以叶绿素 a (Chl-a) 浓度来衡量藻类生物的指标, 水柱里 Chl-a 浓度计算参照 Parsons 计算公式^[21]: 由于每一监测点 Chl-a 的垂直分布是深度的函数: $\text{Chl-a} = f(z)$, 对其进行积分, 将得到新的 Chlt:

$$\text{Chlt} = \sum_n^{n+1} \frac{(\text{Chl-a}_i + \text{Chl-a}_{i+1})}{2} \times (D_{i+1} - D_i) \quad (1)$$

式中, Chlt 为水柱 Chl-a 浓度 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$); Chl-a_i 为第 i 层 Chl-a 浓度 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$); n 为采样层数; D_i 为第 i 层采样深度 (m); $1 \leq i \leq n-1$.

由 Parsons 的计算公式, 可以进一步定义叶绿素总量计算公式:

$$M = \sum_{i=1}^n \text{Chlt}_i \times S \quad (2)$$

式中, M 为水柱叶绿素总量 (mg); Chlt_i 为水柱中第 i 层叶绿素 a 浓度 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$); n 为采样层数; S 为围格截面积 (m^2); $1 \leq i \leq n-1$.

本研究中所获得的藻类原位生长速率为在培养装置中的表现生长速率^[22]:

$$\mu = \ln\left(\frac{X_2}{X_1}\right) / t \quad (3)$$

式中, μ 为藻类比生长速率 (d^{-1}); X_i 为 i 时刻的 Chl-a 浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); t 为培养天数 (d).

现场主要监测指标有: 水温、相对湿度、气温、pH 值、溶解氧、电导率、气压、光照强度等. 其中水温、pH 值、溶解氧、电导率等参数由 Hydrolab DS5 多参仪 (美国) 现场测定; 光照强度 (PAR) 由 LI-1400 水下光量子仪 (美国) 测定; 湿度、气温由室内温湿度计测定.

室内主要监测指标有: 叶绿素 a (Chl-a)、总氮 (TN)、氨氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、硝氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、总磷 (TP)、正磷酸盐 (PO_4^{3-}) 等营养盐浓度. 所有室内化学指标分析方法参照文献^[23]来进行测定.

1.4 水体垂向掺混强度各具体参数

紊动黏性系数^[24]是 Boussinesq 于 1887 年首次提出的, 其是针对流体处于紊动状态时脉动场的对流输运对整个时均场的影响, 因此紊动黏性系数是联系紊流脉动场和时均场的一个重要的物理参数, 分别包括垂向紊流黏性系数和垂向紊流扩散系数, 反映了水体在垂向上的动能交换能力和扩散的运输能力. 需要指出的是, 在不同的相关模型中, 受到边界条件、研究对象等诸多因素的影响时, 紊动黏性系数的取值不尽相同, 只能给出一个大致范围, 甚至同一研究区域的不同时段也可能有所差异. 本文采用笛卡尔坐标系下的三维数字模型基本方程,

由以下公式表述^[25]:

$$V_r = S_m k^{1/2} l + V_b \quad (4)$$

$$V_l = S_h k^{1/2} l + \lambda_b \quad (5)$$

式中, V_r 和 V_l 表示垂向紊流黏性系数和垂向紊流扩散系数 ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$); V_b 和 λ_b 表示背景混合系数, 一般取 $10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; k 为紊动能; l 为混合长; S_m 和 S_h 为稳态函数, 由下列求解:

$$S_m = \frac{0.556 + 2.08G_h}{1 + 20.4G_h + 53.1G_h^2}$$

$$S_h = \frac{0.699}{1 + 17.3G_h}$$

$$G_h = \frac{l^2}{k} N^2$$

雷诺数 Re 是一种可以表征流体流动情况的无量纲数. $Re < 2000$ 为层流状态, $Re > 4000$ 为紊流状态. 紊流状态的特征是速度、压力等运动要素在时空上具有随机性, 且速度存在纵向和垂向的脉动速度, 是一种非定常流. 雷诺数^[26]主要由下式推导得出:

$$Re = \frac{v'h'}{\mu} \quad (6)$$

式中, v' 表示相同流向水层的平均流速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); h' 表示相同流向水层的厚度 (m); μ 为运动黏性系数, 取 $1.0074 \times 10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

在紊流过程中, 因质点从某层流进入相邻的另一层流时会产生能量交换, 其动量发生改变, 引起切应力 τ . 紊流流体的剪切力 τ 由黏性剪切力 τ_u 和紊流剪切力 τ_t 构成, 即:

$$\tau = \tau_u + \tau_t \quad (7)$$

紊流时, 一般 τ_u 可忽略不计, 即^[27]:

$$\tau = \tau_t = \rho k^2 y^2 \left(\frac{du}{dy}\right)^2 \quad (8)$$

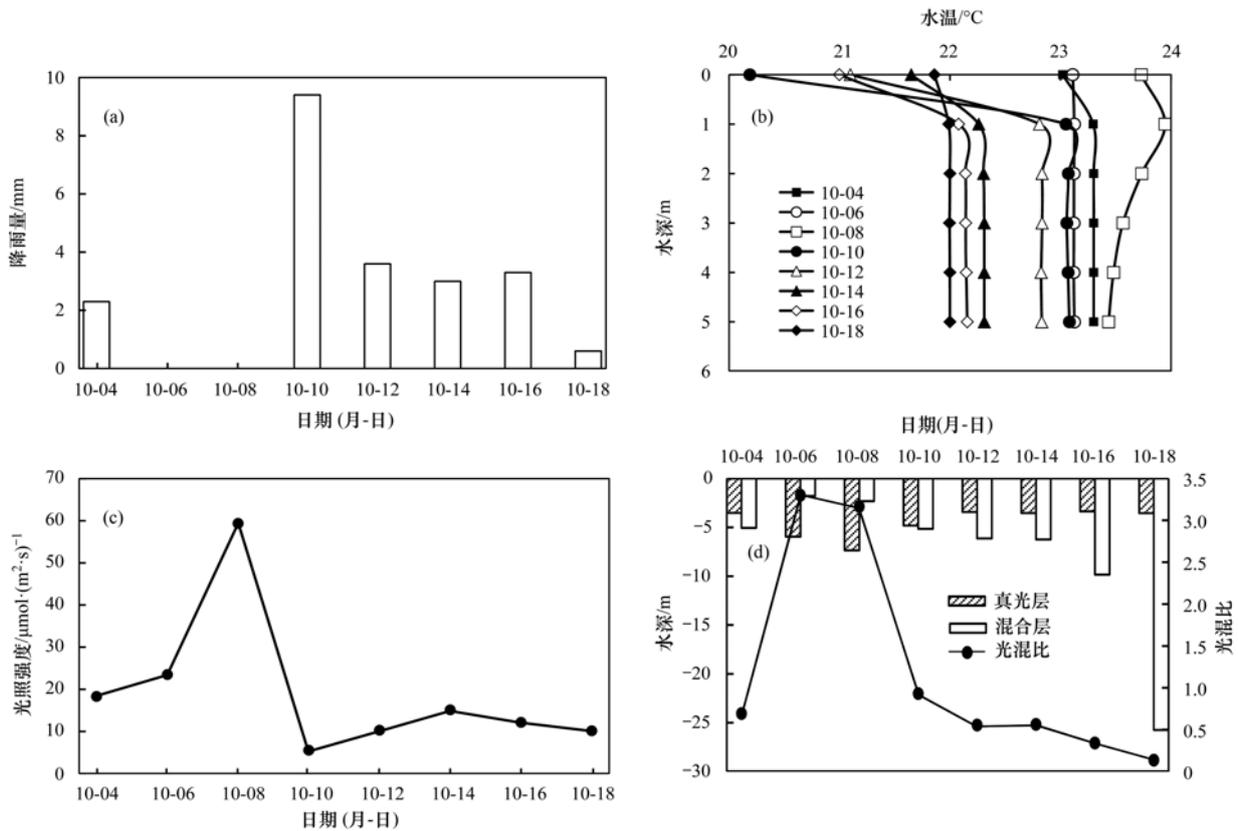
式中, τ 为剪切力 ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$); k 为卡门常数, k 为 $0.4 \sim 0.42$; y 取水深 (m).

2 结果与分析

2.1 研究期间香溪河环境参数特征

2.1.1 研究期间香溪河水文气象特征

如图 4 所示, 受降雨影响, 降雨量、水温、光照强度、真光层、混合层和光混比 (真光层深度/混合层深度) 六大气象参数在降雨期与非降雨期存在显著性差异 (ANOVA, $P < 0.05$). 如图 4(a) 所示, 降雨量在降雨期变化范围为 $0.60 \sim 9.40 \text{mm}$, 降雨量最大值出现在 10 月 10 日, 平均值为 $(3.70 \pm 3.00) \text{mm}$, 非降雨期降雨量为 0mm , 表明降雨期降雨量对营养盐和藻类生物量有一定的稀释作用. 如



10-06 ~ 10-08 为晴天, 其他监测时间段均有持续小雨 (降雨量均 < 10 mm), 下同

图 4 研究期间香溪河气象参数特征

Fig. 4 Characteristics of meteorological parameters in the Xiangxi River during the research period

图 4(b) 所示, 水温在降雨期变化范围为 21.00 ~ 23.30°C, 平均值为 $(22.41 \pm 0.49)^\circ\text{C}$, 表底温差变化范围 0.14 ~ 2.89°C, 平均值为 $(1.14 \pm 1.09)^\circ\text{C}$, 其中表底温差最大值出现在降雨量最大值出现的 10 月 10 日; 非降雨期水温变化范围为 23.11 ~ 23.95°C, 平均值为 $(23.38 \pm 0.30)^\circ\text{C}$, 非降雨期的表底温差较小, 为 0.01 ~ 0.29°C; 按照水体稳定分层判别标准 (温差 $> 1^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$, 水体形成稳定分层; $0.2^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1} < \text{温差} < 1^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$, 水体为弱分层; 温差 $< 0.2^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$, 水体为完全混合水体), 降雨期出现了稳定分层现象, 非降雨期为完全混合水体。如图 4(c) 所示, 光照强度在降雨期变化范围为 5.54 ~ 18.29 $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 平均值为 $(11.92 \pm 4.41) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 非降雨期光照强度变化范围为 23.50 ~ 59.37 $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 平均值为 $(41.44 \pm 25.36) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 。如图 4(d) 所示, 真光层在降雨期变化范围为 3.41 ~ 4.81 m, 平均值为 $(3.68 \pm 0.55) \text{m}$, 非降雨期的变化范围为 5.93 ~ 7.34 m, 平均值为 $(6.64 \pm 0.99) \text{m}$; 混合层在降雨期的变化范围为 5.04 ~ 25.74 m, 平均值为 $(9.69 \pm 8.05) \text{m}$, 非降雨期的变化范围为 1.80 ~ 2.32 m, 平均值为 $(2.06 \pm 0.37) \text{m}$; 光混比在降雨期变化范围为 0.14 ~ 0.93, 平均值为

0.54 ± 0.28, 非降雨期变化范围为 3.17 ~ 3.30, 平均值为 3.23 ± 0.1。

如图 5 所示, 表征水体垂向掺混强度的 4 个水动力学参数表现出表层 < 中层 < 底层的垂向分布趋势, 表明受降雨影响, 培养装置内下层水体对上层水体有很强的黏滞、拉拽作用, 使得上层水体反向运动形成环流, 增强水体上下的交换和掺混; 因此培养装置内下层水体剪切力 τ 、垂向紊流黏性系数 V_r 和垂向紊流扩散系数 V_l 在降雨期显著大于非降雨期 (ANOVA, $P < 0.05$)。如图 5(a) 所示, 下层水体垂向紊流黏性系数 V_r 在降雨期变化范围为 $1.11 \times 10^{-3} \sim 2.18 \times 10^{-3} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 平均值为 $(1.71 \times 10^{-3} \pm 4.55 \times 10^{-4}) \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; 非降雨期垂向紊流黏性系数 V_r 变化范围为 $8.13 \times 10^{-4} \sim 9.20 \times 10^{-4} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 平均值为 $(8.67 \times 10^{-4} \pm 7.60 \times 10^{-5}) \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。如图 5(b) 所示, 垂向紊流扩散系数 V_l 在降雨期变化范围为 $1.86 \times 10^{-3} \sim 3.20 \times 10^{-3} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 平均值为 $(2.46 \times 10^{-3} \pm 6.43 \times 10^{-4}) \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; 非降雨期垂向紊流扩散系数 V_l 范围为 $1.16 \times 10^{-3} \sim 1.28 \times 10^{-3} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 平均值为 $(1.22 \times 10^{-3} \pm 8.48 \times 10^{-5}) \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。如图 5(c) 所示, 下层水体剪切力 τ 在降雨期变化范围为 8.31 ~

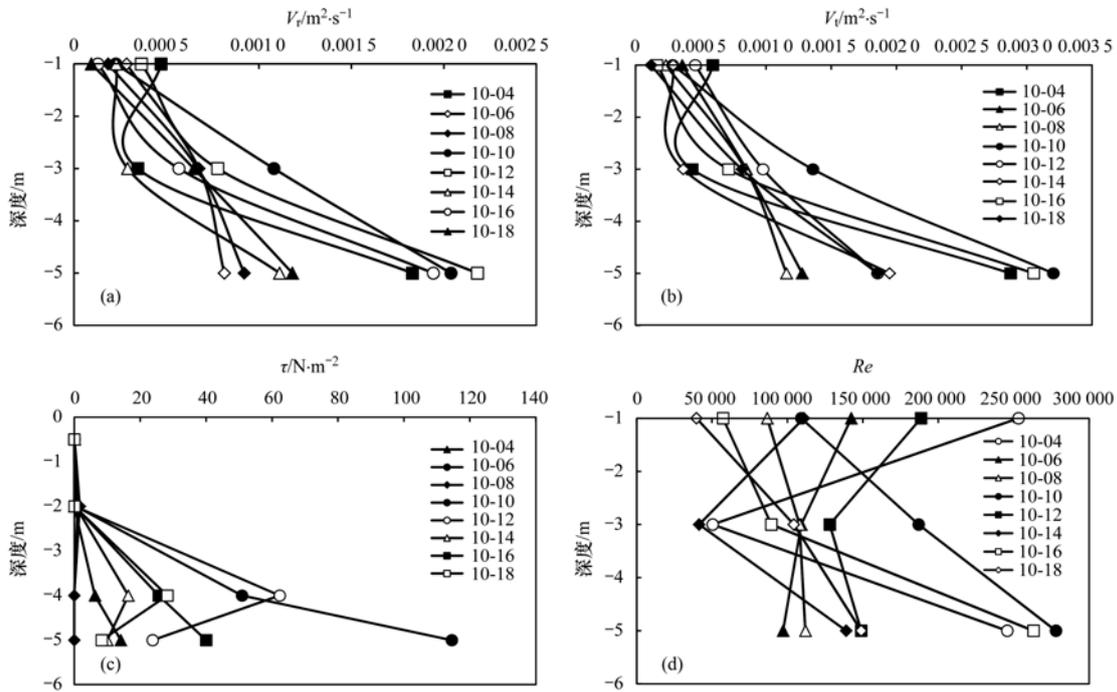


图 5 实验期间香溪河水动力参数特征

Fig. 5 Characteristics of hydrodynamic parameters in the Xiangxi River during the research period

114.51 N·m⁻², 最大值出现在 10 月 10 日, 平均值为 (35.12 ± 40.61) N·m⁻², 表明降雨对下层水体剪切力影响较为明显。

2.1.2 研究期间香溪河理化环境参数特征

如表 2 所示: 研究期间 pH、TN、DTN、在降雨期与非降雨期存在显著差异 (ANOVA, P < 0.05); 电导率、溶解氧、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、TP、DTP、PO₄³⁻ 和 SI 等营养盐浓度不存在显著差异

(ANOVA, P < 0.05); pH 值在非降雨期的平均值为 7.95 ± 0.04, 为弱碱性水体, 受到降雨稀释作用的影响, 降雨期 pH 略有升高, 其平均值为 8.07 ± 0.03. TN 与 DTN 在非降雨期的平均值分别为 (2.19 ± 0.08) mg·L⁻¹ 和 (2.09 ± 0.08) mg·L⁻¹, 受到降雨稀释的影响, 降雨期 TN 和 DTN 略有下降, 其平均值分别为 (2.05 ± 2.58) mg·L⁻¹ 和 (1.94 ± 0.09) mg·L⁻¹.

表 2 香溪河研究期间理化环境参数特征

Table 2 Characteristics of physical and chemistry environmental parameters in the Xiangxi River during the research period

监测项目	降雨期			非降雨期			P
	最小值	最大值	平均值 ± 标准差	最小值	最大值	平均值 ± 标准差	
TN/mg·L ⁻¹	2.00	2.10	2.05 ± 0.04	2.13	2.24	2.19 ± 0.08	0.009**
DTN/mg·L ⁻¹	1.85	2.03	1.94 ± 0.09	2.03	2.15	2.09 ± 0.08	0.032*
NO ₃ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	1.25	1.63	1.47 ± 0.10	1.47	1.63	1.55 ± 0.11	0.577
NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	0.22	0.69	0.41 ± 0.16	0.30	0.63	0.47 ± 0.24	0.736
TP/mg·L ⁻¹	0.04	0.06	0.05 ± 0.18	0.05	0.05	0.05 ± 0.00	0.600
DTP/mg·L ⁻¹	0.03	0.05	0.04 ± 0.01	0.03	0.04	0.03 ± 0.00	0.400
PO ₄ ³⁻ /mg·L ⁻¹	0.00	0.04	0.02 ± 0.01	0.02	0.03	0.03 ± 0.01	0.574
SI/mg·L ⁻¹	3.13	3.53	3.34 ± 0.01	3.19	3.23	3.21 ± 0.03	0.253
pH	8.04	8.11	8.07 ± 0.03	7.92	7.97	7.95 ± 0.04	0.049*
电导率/S·cm ⁻¹	308.00	311.64	310.34 ± 1.38	307.40	310.73	309.07 ± 2.35	0.744
DO/mg·L ⁻¹	7.77	7.97	7.84 ± 0.08	7.13	7.75	7.44 ± 0.44	0.353

2.2 藻种生物量及比生长速率变化趋势

如图 6 所示, 微囊藻 Chl-a 总量在非降雨期和降雨期存在极显著差异 (ANOVA, P < 0.01); 非降雨期 Chl-a 总量上升, 降雨期 Chl-a 总量下降, 表明降雨对培养装置水柱中微囊藻表层的生物量有明显的抑制作用, 而对小球藻和栅藻的影响较弱。

如图 7 所示: 微囊藻、小球藻比生长速率在非降雨期和降雨期存在极显著差异 (ANOVA, P < 0.01); 栅藻比生长速率在非降雨期和降雨期存在显著差异 (ANOVA, P < 0.05). 降雨期和非降雨期微囊藻、小球藻和栅藻比生长速率变化范围分别为: (-0.22 ± 0.22) ~ (0.51 ± 0.20)、(-0.19 ±

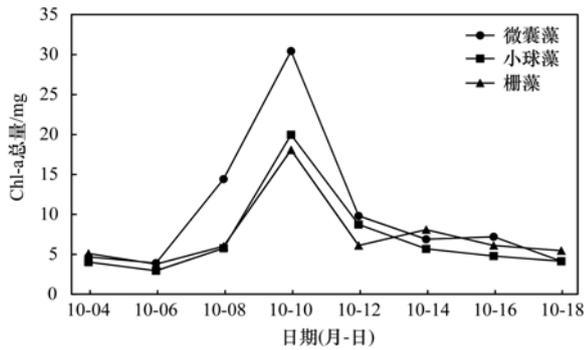


图6 研究期间原位培养装置内 Chl-a 总量变化特征

Fig. 6 Characteristics of the total amount Chl-a in *in situ* culture apparatus during the research period

0.14) ~ (0.48 ± 0.20) 和 (-0.15 ± 0.25) ~ (0.39 ± 0.23) d⁻¹; 降雨期 3 种藻的比生长速率多为负值, 而非降雨期 3 种藻的比生长速率均为正值, 表明降雨对 3 种藻的原位生长均有明显的抑制作用。

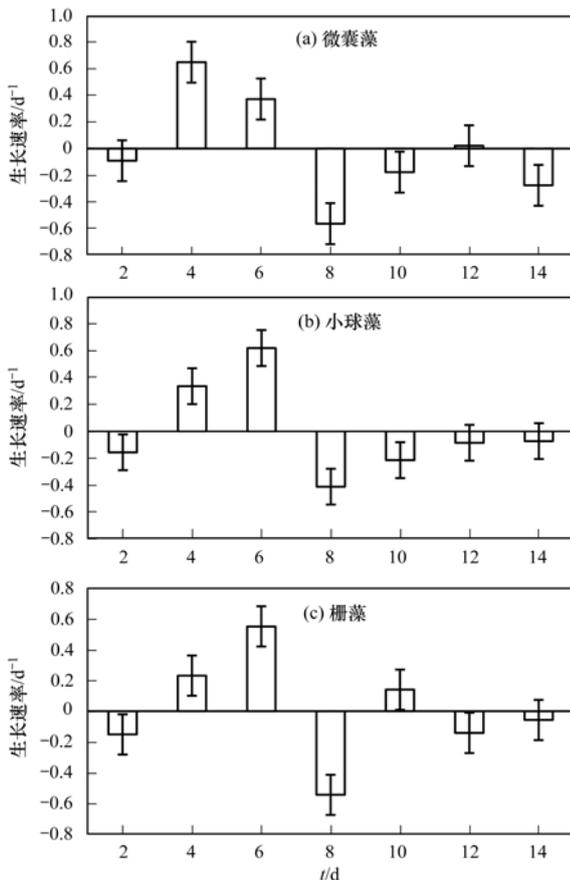


图7 研究期间培养装置内比生长速率变化特征

Fig. 7 Characteristics of the specific growth rate in culture apparatus during the research period

2.3 降雨对藻类比生长速率和 Chl-a 浓度的影响

相关分析表明, 表征垂向掺混的 4 个水动力参数与 3 种主要藻种比生长速率呈显著/极显著负相关关系 ($r_{\text{mic-V}_t} = -0.881, P < 0.01$; $r_{\text{mic-V}_l} = -0.886, P < 0.01$; $r_{\text{mic-}\tau} = -0.751, P < 0.05$; $r_{\text{mic-Re}} = -0.850, P < 0.05$; $r_{\text{chl-V}_t} = -0.824, P < 0.05$;

$r_{\text{chl-V}_l} = -0.799, P < 0.05$; $r_{\text{chl-}\tau} = -0.738, P < 0.05$; $r_{\text{chl-Re}} = -0.717, P < 0.05$; $r_{\text{sce-V}_t} = -0.852, P < 0.01$; $r_{\text{sce-Re}} = -0.780, P < 0.05$). 光混比与 3 种藻种比生长速率呈显著/极显著正相关 ($r_{\text{mic}} = 0.873, P < 0.01$; $r_{\text{chl}} = 0.868, P < 0.01$; $r_{\text{sce}} = 0.687, P < 0.01$). 降雨量与 3 种藻种比生长速率呈显著负相关关系 ($r_{\text{mic}} = -0.818, r_{\text{chl}} = -0.897, r_{\text{sce}} = -0.806, P < 0.05$). WT 与 3 种藻种比生长速率呈显著/极显著正相关关系 ($r_{\text{mic}} = 0.844, P < 0.01$; $r_{\text{chl}} = 0.828, P < 0.05$; $r_{\text{sce}} = 0.738, P < 0.05$). TN 与 3 种藻种比生长速率呈显著/极显著正相关关系 ($r_{\text{mic}} = 0.707, P < 0.05$; $r_{\text{chl}} = 0.840, P < 0.01$; $r_{\text{sce}} = 0.739, P < 0.05$). 微囊藻比生长速率和混合层、气压、pH 呈显著负相关关系 ($r_{\text{混合层}} = -0.710, r_{\text{气压}} = -0.698, r_{\text{pH}} = -0.766, P < 0.05$); 小球藻比生长速率和光强、气温、DTN 呈显著正相关关系 ($r_{\text{光强}} = 0.910, r_{\text{气温}} = 0.743, r_{\text{DTN}} = 0.722, P < 0.05$); 栅藻比生长速率和光强呈显著正相关关系 ($r_{\text{光强}} = 0.813, P < 0.05$).

相关分析表明, 降雨量与 3 种藻种的 Chl-a 浓度呈极显著正相关关系 ($r_{\text{mic}} = 0.969, r_{\text{chl}} = 0.967, r_{\text{sce}} = 0.825, P < 0.01$). 微囊藻、小球藻和栅藻 Chl-a 浓度均与 NO_3^- -N 呈显著负相关关系 ($r_{\text{mic}} = -0.760, r_{\text{chl}} = -0.706, r_{\text{sce}} = -0.622, P < 0.05$). 微囊藻 Chl-a 浓度与 PO_4^{3-} 呈显著负相关关系 ($r = -0.661, P < 0.05$). 小球藻 Chl-a 浓度和 SPC 呈显著正相关关系 ($r = 0.629, P < 0.05$).

综合前期的气象条件, 常规理化参数, 3 种藻的 Chl-a 总量和比生长速率的变化特征及相关分析表明, 降雨通过降雨量的增加对藻的生长起到一个稀释作用, 抑制了藻的生长; 降雨通过增加水体垂向掺混强度, 一方面使得原位垂向掺混作用加强, 致使藻类生物量降低, 另一方面, 通过上下水体交换抑制了藻类生长; 降雨影响了混合层的深度, 光混比降低, 抑制了藻类的生长。

3 讨论

3.1 水动力条件对藻类影响的机制

三峡水库和香溪河支流降雨前后现状跟踪监测和数值模拟表明: 降雨明显增加了干流水体^[10, 16]从表层倒灌入香溪河库湾与上游受冲刷水体从中层潜入水底, 这两股水流对藻类生物量有明显的稀释作用; 降雨对水动力条件的改变增加了水体的剪切力, 产生垂向掺混, 一方面水体垂向掺混强度会对藻细胞造成一定的机械损伤^[24], 促使部分藻细胞死亡; 另一方面水体垂向掺混增加上下水层的交换

强度, 将水体表层的藻细胞带入光照强度较弱不适宜藻类生长的水体中下层, 抑制了藻类的表层繁殖, 降低水柱中藻总的生物量. 本研究结果表明: 降雨带来的水动力条件的改变对藻类生长有一定的抑制作用, 剪切力 τ 、垂向紊流黏性系数 V_t 和垂向紊流扩散系数 V_d 在降雨期显著大于非降雨期 (ANOVA, $P < 0.05$), 降雨中剪切力 τ 、垂向紊流黏性系数 V_t 和垂向紊流扩散系数 V_d 的改变是导致藻类迅速衰亡的关键因素, 这 3 个水动力参数的改变增加了水体的垂向掺混, 对表层水体有很强的黏滞和拉拽作用, 从而使得表层藻类被带入光照强度低的水体下层, 受到光强抑制的效果, 从而藻类表层繁殖受到抑制.

3.2 混合层变化对藻类影响的机制

Sverdrup 理论一般采用真光层深度 (Z_{eu}) 和混合层深度 (Z_{mix}) 之比 (即光混比) 来判别光照在垂向的分布和水体在垂向的掺混对浮游植物生长的影响^[28]. 当真光层深度大于混合层深度 (即 $Z_{eu}/Z_{mix} > 1$) 时, 浮游植物生长不受光照的限制; 当 $Z_{eu}/Z_{mix} < 1$ 时, 浮游植物会因垂向掺混被动地带入真光层^[29, 30] 以下, 从而造成其生长受到光限制, 为此 Sverdrup 建立了临界层理论 (Critical Depth Theory). 本团队在前期香溪河现场监测结果表明^[16, 31]: 大、中型降雨导致水体真光层降低, 而会使混合层深度增加. 水体混合层的加深, 水温分层减弱, 是水华消失的根本原因^[32]. 本研究结果表明: 降雨前 (10 月 6 ~ 8 日), 研究期间培养装置内混合层深度都较低 (1 ~ 2m); 降雨导致真光层深度降低, 混合层深度显著增加, 此时 Z_{eu}/Z_{mix} 显著降低, 按照临界层理论, 抑制了藻类的生长.

3.3 环境参数对不同生存策略藻类的影响

影响藻类生长的主要生境因子包括: 物质基础 (二氧化碳、营养盐和微量元素等)、能量要素 (光照、温度等)、生物要素 (浮游动物捕食等) 以及水动力过程 (水体掺混扰动条件) 的影响^[33-36]. 在水生态系统中, 藻类光合作用是物质循环和能量流动的基础. 光照是浮游植物光合作用的必要条件, 光照强度和时间均会影响藻类初级生产力, 且不同的藻类对光的需求和适应能力也不同^[37]. 水温作为重要的生态因子, 通过影响藻类的酶促反应和水体中营养物质的溶解度从而直接、间接地影响藻类的代谢与增殖. 有研究表明, 在保持其它环境条件均适宜的情况下, 水温每上升 10℃, 浮游植物代谢活动的强度将增加 2 倍^[38], 但当温度超过最适温度时浮游植物初级生产迅速下降. 而且不同藻种对温度的适应范围各有差异, 蓝藻的最适生长温度为 25

~ 35℃, 硅藻在 15 ~ 35℃ 之间均可较好地生长, 金藻、黄藻最适水温为 14 ~ 18℃, 绿藻为 20 ~ 30℃^[39]. 营养盐是构成水域生态系统的重要化学物质基础, 水中的营养盐结构、浓度会对浮游植物的生长起到重要的调控作用. 主要体现在两个方面: 一方面, 营养盐之间的比例会影响浮游植物整体的数量和群落结构; 另一方面, 营养盐的浓度高低, 直接会影响到浮游植物的生长和繁殖^[40]. 降雨除改变水动力条件, 导致水体垂向掺混, 使得水体的混合层不断扩大, 生长受到抑制外. 降雨还会带来水温、光照强度、气温、营养盐、气压、pH 值等环境参数的改变从而影响藻类的生长^[41, 42]. 本文依据藻类形态功能组^[20] 将 3 种藻类分为 VII、IV 型 2 组, 形态功能组 VII 具有无鞭毛无硅质外壳带黏质胶被的大型藻, 如微囊藻; 无鞭毛无硅质外壳无伪空泡大小藻种的小球藻、栅藻划入形态功能组 IV. 代表形态功能组 VII 的微囊藻最适光照强度为 $50 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 左右, 代表形态功能组 IV 的小球藻和栅藻最适光照强度为 $50 \sim 90 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 左右, 光照强度在降雨期平均值为 $(11.92 \pm 4.41) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 非降雨期平均值为 $(41.44 \pm 25.36) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 降雨期光照强度显著低于 VII、IV 型形态功能藻类所需最适光强, 因此抑制了 3 种主要藻类的生长, 导致 3 种主要藻类在研究期间呈现一致的时间变化趋势; 本研究 3 种主要藻类均为无鞭毛无硅质外壳藻类, 因此水体扰动较强的环境条件对其生长产生抑制作用. 本研究结果表明: 表征垂向掺混的 4 个水动力参数与 3 种主要藻种比生长速率呈显著/极显著负相关关系, 同时降雨期水体垂向掺混强度显著大于非降雨期, 抑制了 3 种主要藻类的生长, 因此 3 种主要藻类在研究期间呈现一致的时间变化趋势.

综上所述, 降雨一方面通过增大水体垂向掺混强度降低藻类生物量抑制水华, 另一方面通过影响光照强度抑制藻类的光合作用降低藻类生物量.

4 结论

(1) 降雨带来的水动力条件的改变对藻类生长有一定的抑制作用, 其中剪切力 τ 、垂向紊流黏性系数 V_t 和垂向紊流扩散系数 V_d 的改变 (降雨期均大于非降雨期) 是导致藻类迅速衰亡的关键因素.

(2) 10 月 10 ~ 18 日出现降雨现象使得培养装置内 Chl-a 浓度明显降低, 持续降雨现象会抑制藻类的生长, 但降雨所导致的水动力条件不是藻类衰亡的根本原因; 降雨导致水体垂向扰动增强, 混合层不断扩大, 打破水体原有水温分层从而抑制藻类

的生长增殖是水华消失的根本原因。

(3)由方差分析及相关分析表明:降雨带来降雨量、水温、光照强度、总氮(TN)和溶解性总氮(DTN)改变是影响3种主要藻种比生长速率的关键环境参数。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Karp-Boss L, Boss E, Jumars P A. Nutrient fluxes to planktonic osmotrophs in the presence of fluid motion[J]. Oceanography and Marine Biology, 1996, **34**: 71-107.
- [3] Edwards N, Beeton S, Bull A T, *et al.* A novel device for the assessment of shear effects on suspended microbial cultures[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1989, **30**(2): 190-195.
- [4] Sin Y, Wetzel R L, Anderson I C. Spatial and temporal characteristics of nutrient and phytoplankton dynamics in the York River Estuary, Virginia: analyses of long-term data[J]. Estuaries, 1999, **22**(2): 260-275.
- [5] 黄宁秋. 水动力条件对三峡库区次级支流典型藻类生长影响[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
Huang N Q. Effects of hydrodynamic condition on the growth of algae at secondary tributary in the Three Gorges Reservoir[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [6] Hondzo M, Lyn D. Quantified small-scale turbulence inhibits the growth of a green alga[J]. Freshwater Biology, 1999, **41**(1): 51-61.
- [7] Warnaars T A, Hondzo M. Small-scale fluid motion mediates growth and nutrient uptake of *Selenastrum capricornutum* [J]. Freshwater Biology, 2006, **51**(6): 999-1015.
- [8] Berger S A, Diehl S, Stibor H, *et al.* Water temperature and mixing depth affect timing and magnitude of events during spring succession of the plankton[J]. Oecologia, 2007, **150**(4): 643-654.
- [9] 刘心愿, 宋林旭, 纪道斌, 等. 降雨对蓝藻水华消退影响及其机制分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 774-782.
Liu X Y, Song L X, Ji D B, *et al.* Effect of the rainfall on extinction of cyanobacteria bloom and its mechanism analysis[J]. Environmental Science, 2018, **39**(2): 774-782.
- [10] 崔玉洁. 三峡水库香溪河藻类生长敏感生态动力学过程及其模拟[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
Cui Y J. The sensitive ecological dynamic processes and their simulations of algal growth of Xiangxi Bay in the Three Gorges Reservoir[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.
- [11] 李锦秀, 杜斌, 孙以三. 水动力条件对富营养化影响规律探讨[J]. 水利水电技术, 2005, **36**(5): 15-18.
Li J X, Du B, Sun Y S. Effect of hydrodynamics on the eutrophication [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, **36**(5): 15-18.
- [12] 曹巧丽, 黄钰玲, 陈明曦. 水动力条件下蓝藻水华生消的模拟实验研究与探讨[J]. 人民珠江, 2008, (4): 8-10, 13.
Cao Q L, Huang Y L, Chen M X. Experimental research on hydro-dynamic simulation of cyanobacteria bloom outbreak and extinction[J]. Pearl River, 2008, (4): 8-10, 13.
- [13] 徐耀阳. 浅述湖泊生态系统营养状态二维坐标评价方法[J]. 安徽农学通报, 2011, **17**(17): 53-54.
Xu Y Y. A brief introduction of a two-dimensional graphical approach for assessing lake ecosystems[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2011, **17**(17): 53-54.
- [14] 郑丙辉, 张佳磊, 王丽婧, 等. 大宁河水华敏感期浮游植物与环境因子关系[J]. 环境科学, 2011, **32**(3): 641-648.
Zheng B H, Zhang J L, Wang L J, *et al.* Exploration of relationships between phytoplankton and related environmental factors in the Daning river during sensitive period of algal blooms [J]. Environmental Science, 2011, **32**(3): 641-648.
- [15] 马骏, 刘德富, 纪道斌, 等. 三峡水库支流库湾低流速条件下测流方法探讨及应用[J]. 长江科学院院报, 2011, **28**(6): 30-34, 54.
Ma J, Liu D F, Ji D B, *et al.* Flow measurement methods under low flow velocity at the tributary bays of three gorges reservoir [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, **28**(6): 30-34, 54.
- [16] 纪道斌, 李媛, 孔松, 等. 典型暴雨洪水对三峡水库香溪河库湾水华的影响[J]. 中国农村水利水电, 2013, (6): 39-44.
Ji D B, Li Y, Kong S, *et al.* The influence of a typical storm flood on the water bloom in the Xiangxi Bay, Three Gorges Reservoir[J]. China Rural Water and Hydropower, 2013, (6): 39-44.
- [17] 高圻烽, 何国建, 方红卫, 等. 三峡库区支流中水体的垂向掺混对于藻类生长的影响[J]. 水利学报, 2017, **48**(1): 96-103.
Gao Q F, He G J, Fang H W, *et al.* Effects of vertical mixing on algal growth in the tributary of Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, **48**(1): 96-103.
- [18] 李哲, 谢丹, 郭劲松, 等. 三峡水库澎溪河典型优势藻原位生长速率的初步研究[J]. 湖泊科学, 2012, **24**(5): 746-754.
Li Z, Xie D, Guo J S, *et al.* Preliminary study on in situ growth rate of dominant algae species in Pengxi River of the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Lake Sciences, 2012, **24**(5): 746-754.
- [19] 冯婧, 李哲, 闫彬, 等. 三峡水库不同运行阶段澎溪河典型优势藻原位生长速率[J]. 湖泊科学, 2014, **26**(2): 235-242.
Feng J, Li Z, Yan B, *et al.* In situ growth rate of dominant algae species in Pengxi River of the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Lake Sciences, 2014, **26**(2): 235-242.
- [20] 杨毓, 卢金锁, 张颖. 深水型水库藻形态功能组(MBFG)的季节演替特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(1): 121-128.
Yang Y, Lu J S, Zhang Y. Seasonal succession characteristics of the morphologically-based functional groups (MBFG) in deep-water reservoir[J]. Environmental Science, 2017, **38**(1): 121-128.
- [21] Butler E I. A manual of chemical and biological methods for sea water analysis; by Timothy Parsons, Yoshiaki Maita and Carol M. Lalli, Pergamon Press, Oxford, 1984, 184 pp., US\$MY8.95/19.50, £ 5.50/£ 12.25[J]. Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers, 1984, **31**(12): 1523.
- [22] Littler M M, Littler D S. Handbook of phycological methods [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
- [23] 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.
- [24] Schmitt F G. About Boussinesq's turbulent viscosity hypothesis: historical remarks and a direct evaluation of its validity [J].

- Comptes Rendus Mécanique, 2007, **335**(9-10): 617-627.
- [25] 何金平. 金山湖水体运行方案及物质输运数值模拟研究 [D]. 南京: 河海大学, 2007.
He J P. The operational scheme and numerical simulation of pollutant transportation in Jinshan Lake [D]. Nanjing: Hohai University, 2007.
- [26] Hondzo M M, Kapur A, Lembi C A. The effect of small-scale fluid motion on the green alga *Scenedesmus quadricauda* [J]. *Hydrobiologia*, 1997, **364**(2-3): 225-235.
- [27] 普朗特. 流体力学概论 [M]. 郭永怀, 陆士嘉, 译. 北京: 科学出版社, 1981.
- [28] Wetzel R G. Photosynthesis, productivity and growth: the physiological ecology of phytoplankton: G. P. Harris. *Ergebnisse die Limnologie, Archiv für Hydrobiologie, Beiheft 10*. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1978, 171 pp., ISBN 3-510-47008-7 [J]. *Aquatic Botany*, 1980, **9**: 98-99.
- [29] Delgadillo-Hinojosa F, Gaxiola-Castro G, Segovia-Zavala J A, *et al.* The effect of vertical mixing on primary production in a bay of the gulf of California [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1997, **45**(1): 135-148.
- [30] Oliver R L, Whittington J, Lorenz Z, *et al.* The influence of vertical mixing on the photoinhibition of variable chlorophyll *a* fluorescence and its inclusion in a model of phytoplankton photosynthesis [J]. *Journal of Plankton Research*, 2003, **25**(9): 1107-1129.
- [31] 田泽斌, 刘德富, 姚绪蛟, 等. 水温分层对香溪河库湾浮游植物功能群季节演替的影响 [J]. *长江流域资源与环境*, 2014, **23**(5): 700-707.
Tian Z B, Liu D F, Yao X J, *et al.* Effect of water temperature stratification on the seasonal succession of phytoplankton function grouping in Xiangxi Bay [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, **23**(5): 700-707.
- [32] Godlewska M, Mazurkiewicz-Boroń G, Pocięcha A, *et al.* Effects of flood on the functioning of the Dobrezyce reservoir ecosystem [J]. *Hydrobiologia*, 2003, **504**(1-3): 305-313.
- [33] 望雪, 程豹, 杨正健, 等. 澜沧江流域沉积物间隙水-上覆水营养盐特征与交换通量分析 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 2126-2134.
Wang X, Cheng B, Yang Z J, *et al.* Differences in diffusive fluxes of nutrients from sediment between the natural river areas and reservoirs in the Lancang River Basin [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 2126-2134.
- [34] Falkowski P G. The role of phytoplankton photosynthesis in global biogeochemical cycles [J]. *Photosynthesis Research*, 1994, **39**(3): 235-258.
- [35] Lavery P S, Lukatelich R J, McComb A J. Changes in the biomass and species composition of macroalgae in a eutrophic estuary [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1991, **33**(1): 1-22.
- [36] Domingues R B, Anselmo T P, Barbosa A B, *et al.* Light as a driver of phytoplankton growth and production in the freshwater tidal zone of a turbid estuary [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, **91**(4): 526-535.
- [37] 刘青, 张晓芳, 李太武, 等. 光照对 4 种单胞藻生长速率、叶绿素含量及细胞周期的影响 [J]. *大连水产学院学报*, 2006, **21**(1): 24-30.
Liu Q, Zhang X F, Li T W, *et al.* Effects of light on growth rate, chlorophyll level and cell cycle in four alga species [J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2006, **21**(1): 24-30.
- [38] 蓝天. 淀山湖浮游植物与环境因子的相关性研究 [D]. 上海: 上海师范大学, 2014.
Lan T. Study on the correlation between phytoplankton and environmental factors in Dianshanhu [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2014.
- [39] 王利利. 水动力条件下藻类生长相关影响因素研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
Wang L L. Research on the relevant factors of the algal growth in hydrodynamic condition [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [40] 梁英, 刘春强, 田传远, 等. 不同营养盐浓度对 6 种海洋微藻群落演替的影响 [J]. *水产科学*, 2013, **32**(11): 627-635.
Liang Y, Liu C Q, Tian C Y, *et al.* Effects of nutrient concentrations on community succession in six marine microalga species [J]. *Fisheries Science*, 2013, **32**(11): 627-635.
- [41] Clausing R J, Fong P. Environmental variability drives rapid and dramatic changes in nutrient limitation of tropical macroalgae with different ecological strategies [J]. *Coral Reefs*, 2016, **35**(2): 669-680.
- [42] 韦力元, 王真, 洪松. 气象与水质对滇池草海叶绿素 *a* 浓度的影响 [J]. *环境科学与技术*, 2016, **39**(10): 26-30, 35.
Wei L Y, Wang Z, Hong S. Influences of meteorological conditions and water quality factors on chlorophyll-*a* in Caohai, Dianchi Lake [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **39**(10): 26-30, 35.

CONTENTS

Health Benefit Evaluation for Air Pollution Prevention and Control Action Plan in China	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (2961)
Scenario Simulation Study Constrained by the Ambient Air Quality Standards in Nanjing	XIE Fang-jian, SHI Zhi-hao, LI Jing-yi, <i>et al.</i> (2967)
Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Zhengzhou	YANG Liu-ming, WANG Shen-bo, HAO Qi, <i>et al.</i> (2977)
Relationship Between Atmospheric Visibility and PM _{2.5} Concentrations and Distributions	WANG Ji-kang, ZHANG Heng-de, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (2985)
Characteristics of VOCs Emitted from the Rubber Tire Manufacturing Industry Based on the Inverse-Dispersion Calculation Method	BAI Hong-xiang, WEI Wei, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (2994)
Stable Carbon Isotope Compositions and Source Apportionments of Volatile Aromatic Compounds in the Urban Atmosphere of Taiyuan, China	LI Ying-hui, YAN Yu-long, LI Zhi-sheng, <i>et al.</i> (3001)
Spectral Distribution and Pollution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Air of an Office Building Clustered Area	WANG Lin, DENG Ya-jia, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3008)
Characterizing Chromophoric Dissolved Organic Matter in Key Lakes in the Middle Reaches of the East Route of the South-North Water Diversion Project	ZHANG Liu-qing, PENG Kai, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (3018)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes in Different Water Bodies in Hilly and Gully Regions of the Loess Plateau	ZHANG He-hui-zi, YU Kun-xia, LI Zhan-bin, <i>et al.</i> (3030)
Analysis of Total Organic Carbon Source Differences Between New and Old Cascade Reservoirs using Carbon and Nitrogen Isotopes	WANG Cong-feng, HU Zi-long, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (3039)
Pollution Sources and the Stratification Effects on Water Quality in Lijiahe Reservoir	XU Jin, HUANG Ting-lin, LI Kai, <i>et al.</i> (3049)
Distribution and Potential Risk of Organochlorine Pesticides in the Soil of a Submerged Area Around Miyun Reservoir	WANG Xia, ZHANG Qing-zhuo, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3058)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Waters of the Yinchuan Wetlands	TIAN Da-nian, DANG Li-hui, DING Run-mei, <i>et al.</i> (3068)
Comparison of the Geochemical Characteristics of Karst Springs of a Vertically Zoned Climate Region under Human Activity: A Case of Shuifang Spring and Bitan Spring in the Jinfo Mountain Area, Chongqing	XIE Guo-wen, YANG Ping-heng, SHENG Ting, <i>et al.</i> (3078)
Groundwater Chemical Characteristics and Analysis of Their Controlling Factors in an Alluvial Fan of Jianjiang River	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (3089)
Dynamics of Epilithic Algae Communities and Their Relationship with Environmental Factors During Storage and Non-storage Periods in the Three Gorges Reservoir	FU Jun-ke, LIU Li, HE Xin-yu, <i>et al.</i> (3099)
Influence of Rainfall on the <i>in situ</i> Growth of Dominant Algae Species in Xiangxi River	WENG Chuan-song, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (3108)
Decomposition of <i>Myriophyllum aquaticum</i> and the Associated Release of Nitrogen and Phosphorus	TONG Xiong, LUO Pei, LIU Feng, <i>et al.</i> (3118)
Optimization of the Parameters for Microalgae Immobilization and Analysis of Its Recovery Potential for Ammonia Nitrogen in Wastewater	LIU Xiang, WANG Jing-yao, WU Juan-juan, <i>et al.</i> (3126)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Titanate Nanotubes	ZHANG Zheng, FENG Chang-sheng, ZHANG Xiao-nui, <i>et al.</i> (3135)
Application of Fenton-like Photocatalysts Based on Defect Reconstruction in Degradation of Dye Wastewater	TANG Qing-wen, AN Xiao-qiang, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (3146)
Degradation of RBK5 with Peroxymonosulfate Efficiently Activated by N-Doped Graphene	YU Yong-bo, HUANG Wan, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (3154)
Effect of Cu ²⁺ on Denitrification Using NO ₂ ⁻ as an Electron Acceptor	MAI Wen-ke, PENG Yong-zhen, JI Jian-tao (3162)
Start-up and Performance Optimization of a CANON Pilot Reactor	SUN Qing-hua, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (3169)
Effects of Aerobic Carbon Sources on Biofilm with Simultaneous Phosphate Removal and Enrichment	XU Lin-jian, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (3179)
Effect of Organic Characteristics on Sludge Settability in an AAO System	LIU Xiao-bo, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (3186)
Effect of Free Nitrous Acid on the Activity of Nitrifying Bacteria in Different Sludge Concentrations Under Anoxic Conditions	LÜ Xin-tao, ZHOU Tong, TIAN Xia-di, <i>et al.</i> (3195)
Stability of ZVI-dependent Autotrophic Denitrification by ANAMMOX Bacteria	ZHANG Wen-jing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3201)
Effect of On-line NaClO Backwashing on Microbial Communities in an Inverted A ² O-MBR System	WANG Xu-dong, GAO Miao, WANG Ying-ying, <i>et al.</i> (3208)
Evaluation of Organic Matter Release and Economy for Various Pretreatments of Sewage Sludge	YUAN Yue, TAN Xue-jun, ZHENG She-yu (3216)
Model-based Optimization for the Coordinated Supply of Clear and Reclaimed Water in the Central Districts of Beijing, China	ZHANG Tian-yuan, TAN Qian, WANG Shu-ping (3223)
Occurrence and Removal of N-nitrosamines in the Wastewater Treatment Plants Using Different Treatment Processes	LIU Wang-rong, ZHAO Jiang-liang, YANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3233)
Occurrence of Tramadol and Fentanyl Use in Domestic Wastewater in Beijing	ZHOU Zi-lei, DU Peng, BAI Ya, <i>et al.</i> (3242)
Pollution Level and Ecological Risk of Typical Antibiotics in Guiyang Wastewater Treatment Plants	YANG Zhao, LI Jiang, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Various Livestock Feedlot Soils of the Hilly Purple Soil Region	CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, LIU Chen (3257)
Effects of Tetracycline on Microbial Communities and Antibiotic Resistance Genes of Vermicompost from Dewatered Sludge	CHEN Jing-yang, XIA Hui, HUANG Kui, <i>et al.</i> (3263)
Fate of Antibiotic Resistance Genes and Virulence Genes in Enterococci During Anaerobic Digestion Process of Thermal Hydrolyzed Sludge	LI Hui-li, PEI Yuan-mei, LI Shan, <i>et al.</i> (3270)
Effect of Co-composting of Chicken Manure with Chinese Medicinal Herbal Residues on Antibiotic Resistance Genes	WU Jin-ping, CHEN Jian-wen, LIU Yong, <i>et al.</i> (3276)
Spatio-temporal Patterns of Microbial Communities and Their Driving Mechanisms in Subalpine Lakes, Ningwu, Shanxi	WANG Xue, LIU Jin-xian, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (3285)
Community Structure Characteristics of <i>nirS</i> Denitrifying Bacteria of Spring Typical Parkland Waterbodies in Shijiazhuang City	ZHANG Yi-ran, LI Zai-xing, SUN Yue, <i>et al.</i> (3295)
Differential Responses of Rhizospheric <i>nirK</i> - and <i>nirS</i> -type Denitrifier Communities to Different Phosphorus Levels in Paddy Soil	ZHAN Yu, GAO Dan-dan, SHENG Rong, <i>et al.</i> (3304)
Comparison of Soil Bacterial Community Structure Between Paddy Fields and Dry Land in the Huixian Karst Wetland, China	JIA Yuan-hang, JIN Zhen-jiang, YUAN Wu, <i>et al.</i> (3313)
Cd Balance Analysis of a Typical Rice Paddy System in Central Hunan	JIANG Kai, DENG Xiao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3324)
Effects of an Amendment on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System	LI Yi-chun, WANG Yan-hong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (3331)
Isolation of Heavy Metal Immobilizing and Plant Growth-Promoting Bacteria and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Wheat	HAN Hui, WANG Xiao-yu, CAI Hong, <i>et al.</i> (3339)
Differences in the Cadmium-Enrichment Capacity and Subcellular Distribution and Chemical Form of Cadmium in Different Varieties of Pepper	PENG Qiu, LI Tao, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (3347)
Effect of Phosphorus Addition on N ₂ O Emissions from Rice-Rapeseed Rotation Soils	SUN Zheng, SU Rong-lin, XU Peng, <i>et al.</i> (3355)
Impact of Land Use Type on the Stability and Organic Carbon Content of Soil Aggregates in the Weibei Dryland	LIU Jie, MA Yan-ting, WANG Xian-ling, <i>et al.</i> (3361)
Vertical Distribution Characteristics of PAHs in Soils with Different Land Use Types During Rapid Urbanization	LU Yin-tao, XIANG Xin-xin, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (3369)
Pollution Levels, Sources, and Spatial Distribution of Phthalate Esters in Soils of the West Lake Scenic Area	LIAO Jian, DENG Chao, CHEN Yi, <i>et al.</i> (3378)
Impact of Biochar on Soil Bulk Density and Aggregates of Lou Soil	LI Qian-qian, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (3388)