

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

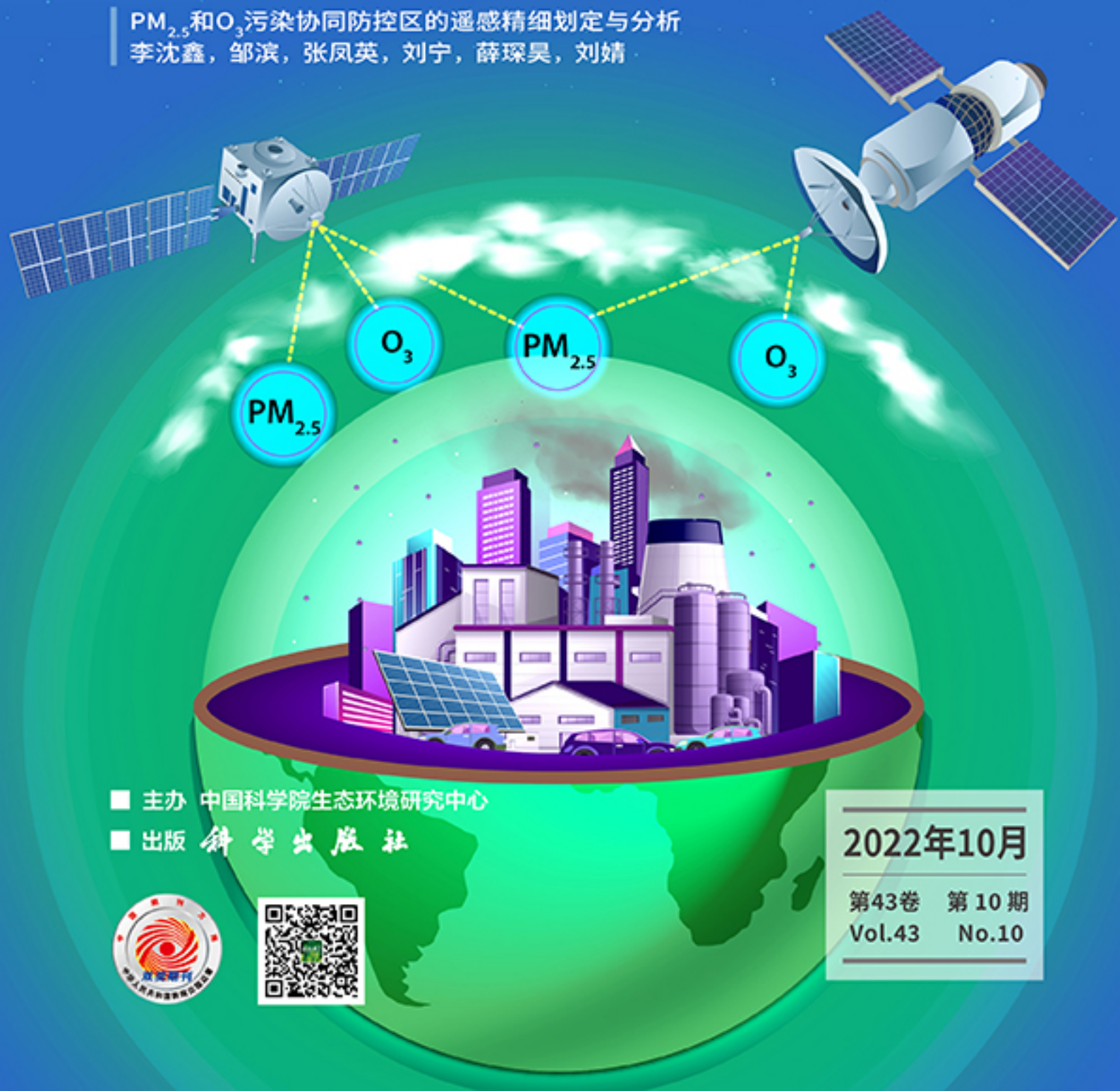
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

PM_{2.5}和O₃污染协同防控区的遥感精细划定与分析
李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年10月

第43卷 第10期
Vol.43 No.10

目次

PM _{2.5} 和O ₃ 污染协同防控区的遥感精细划定与分析	李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧 (4293)
广州市冬季一次典型臭氧污染过程分析	裴成磊, 谢雨彤, 陈希, 张涛, 邱晓暖, 王瑜, 王在华, 李梅 (4305)
佛山臭氧浓度预报方程的建立与应用	陈辰, 洪莹莹, 谭浩波, 司徒淑婷, 程银琳, 步巧利, 吴蒙, 潘巧英 (4316)
乌海市高分辨率大气污染源排放清单构建及其在臭氧污染成因探究中的应用	张瑞欣, 楚波, 尚春林, 曹喜萍, 李光耀, 朱玉凡, 刘晓, 夏佳琦, 陈强 (4327)
结合在线监测和自动识别系统分析东海沿岸船舶排放特征	邱浩, 刘丹彤, 吴杨周, 李思远, 丁朔, 胡康, 张家乐, 陈梅汀 (4338)
机动车制动磨损颗粒物及挥发性有机物的组分特征	门正宇, 刘笃优, 郭全有, 张静, 彭剑飞, 吴琳, 毛洪钧 (4348)
笼养鸡舍冬季挥发性有机物排放特征	曹甜甜, 郑云昊, 张羽, 王悦, 丛群欣, 王源昊, 董红敏 (4357)
上海市生活垃圾房气溶胶中可培养细菌污染状况及种群特征	卢冰洁, 张翔, 王川, 邱俊, 李丹 (4367)
浙江省2008~2018年人为源氨排放清单及分布特征	方利江, 杨一群, 叶观琼 (4380)
“双碳”目标下钢铁行业控煤降碳路线图	薛英岚, 张静, 刘宇, 陈瑜, 孙健, 蒋洪强, 张伟, 曹东 (4392)
空间关联网络结构特征的减排效应: 基于城市群视角	郑航, 叶阿忠 (4401)
中国对外直接投资的减污降碳效应及其实现机制	白梓函, 吕连宏, 赵明轩, 张楠, 罗宏 (4408)
近年全国地表水水质变化特征	嵇晓燕, 侯欢欢, 王姗姗, 杨凯 (4419)
湟水河流域地表水体微塑料分布、风险及影响因素	范梦苑, 黄懿梅, 张海鑫, 李好好, 黄倩 (4430)
汾河流域地表水化学同位素特征及其影响因素	赵春红, 申豪勇, 王志恒, 梁永平, 赵一, 谢浩, 唐春雷 (4440)
城镇化进程中珠江三角洲高锰地下水赋存特征及成因	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 李海军 (4449)
喀什噶尔河下游平原区地下水咸化特征及成因分析	鲁涵, 曾妍妍, 周金龙, 孙英 (4459)
重庆市老龙洞地下河流域硝酸盐来源和生物地球化学过程的识别	王雨畅, 杨平恒, 张洁茹 (4470)
蓝藻水华过程中优势种群演替模式、效应及驱动因子分析	欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李佳欣, 李玉鑫, 施军琼, 吴忠兴 (4480)
珠海市磨刀门水道输水水源水库群浮游植物群落特征及其环境驱动因子	张茉莉, 王思瑞, 昌盛, 王山军, 金德才, 樊月婷, 张坤峰, 谢琼, 付青 (4489)
营养物质对铜绿微囊藻生长和藻际细菌的影响	吕萍, 李慧莉, 徐勇, 郑效旭, 黄振华, 王聪, 徐圣君, 庄绪亮 (4502)
老化作用对微塑料吸附四环素的影响及其机制	王林, 王姝歆, 曾祥英, 何杨, 黄雯, 郑世界, 张建强 (4511)
沉积物和土壤中胶体对氯霉素吸附行为的影响	晏彩霞, 罗燕清, 聂明华, 周旋, 丁明军 (4522)
历史抗生素胁迫改变磺胺甲噁唑和甲氧苄啶对活性污泥的影响: ARGs及其潜在宿主	张忠兴, 樊晓燕, 李星, 高玉玺, 赵君如 (4536)
阳朔典型铅锌矿区流域土壤重金属空间分布特征及来源解析	陈盟, 潘泳兴, 黄奕翔, 王耀耀, 张睿东 (4545)
白洋淀及周边土壤重金属的分布特征及生态风险评估	郑飞, 郭欣, 汤名扬, 朱冬, 董四君, 康乐, 陈兵 (4556)
基于地理探测器的镇域尺度土壤重金属含量空间分异及其影响因素分析	龚仓, 王亮, 王顺祥, 张志翔, 董航, 刘玖芬, 王德伟, 严步青, 陈映 (4566)
燃煤电厂重金属排放与周边土壤中重金属污染特征及健康风险	车凯, 陈崇明, 郑庆宇, 范辉, 魏明磊, 罗蓬, 郁金星 (4578)
海南岛半干旱区农用地土壤重金属富集因素、健康风险及来源识别	杨剑洲, 龚晶晶, 王振亮, 高健翁, 杨建坤, 胡树起, 唐世新 (4590)
九龙江口红树林表层沉积物重金属赋存形态及污染评价	张华兰, 于瑞莲, 万瑞安, 胡恭任, 黄华斌, 吴雅清 (4601)
我国茶叶主产区有机肥重金属含量现状	伊晓云, 方丽, 杨向德, 马立峰, 刘美雅, 张群峰, 倪康, 石元值 (4613)
甘肃省农业土壤邻苯二甲酸酯累积特征及来源分析	陈玉玉, 张光全, 张杨, 李明凯, 郝佳欣, 熊有才, 李崇霄, 曹靖 (4622)
三峡库区澎溪河不同高程消落带土壤磷形态及磷酸酶活性分布特征	高艺伦, 方芳, 唐子超, 张蕊, 蒋艳雪, 郭劲松 (4630)
塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳组分特征及其与理化因子的相关性	李昕竹, 贡璐, 唐军虎, 罗艳, 丁肇龙, 朱海强, 张涵, 李蕊希 (4639)
黄土丘陵区柠条人工林不同深度土壤呼吸速率对土壤湿度的响应	孙亚荣, 王亚娟, 赵敏, 薛文艳, 梁思琦, 刘乐, 刘超, 陈云明 (4648)
基于Meta-analysis的生物炭对土壤硝态氮淋失和磷酸盐固持影响	姜志翔, 崔爽, 张鑫, 郝敏, 孙德茂 (4658)
低分子有机酸强化植物修复重金属污染土壤的作用与机制	方治国, 谢俊婷, 杨青, 卢烨桢, 黄海, 朱芸娟, 尹思敏, 吴鑫涛, 都韶婷 (4669)
无机钝化剂对镉污染酸性水稻土的修复效果及其机制	张剑, 孔繁艺, 卢升高 (4679)
改良铅锌矿渣对栎树幼苗铅锌富集与耐性机制	谢天志, 陈永华, 苏荣葵, 刘慧, 姚海松 (4687)
CaO ₂ /FA复合材料富集磷效能及其回收物对土壤改良作用	岳薇, 李大鹏, 吴玲予, 王璐, 汤尧禹, 朱企, 黄勇 (4697)
早稻秸秆还田和减钾对晚稻产量和土壤肥力的影响	黄巧义, 黄建凤, 黄旭, 吴永沛, 李苹, 付弘婷, 唐拴虎, 刘一峰, 徐培智 (4706)
秸秆连续还田配施化肥对稻-油轮作土壤碳库及作物产量的影响	蔡影, 付思伟, 张博睿, 胡宏祥, 刘文雯, 俞金涛, 贾临东, 刘运峰 (4716)
化肥减量配施秸秆对双季稻田固氮微生物群落的影响	陈凯鹏, 韦菊娟, 陈丹, 王聪, 沈健林, 李勇, 吴金水 (4725)
化肥减量与有机物料添加对华北潮土微生物氮循环功能基因丰度和氮转化遗传潜力的影响	李胜君, 胡荷, 李刚, 王蕊, 赵建宁, 张贵龙, 修伟明 (4735)
长期覆膜条件下农田土壤微生物群落的响应特征	胡志娥, 肖谋良, 丁济娜, 李剑虹, 陈剑平, 葛体达, 鲁顺保 (4745)
长期秸秆还田对潮土真菌群落、酶活性和小麦产量的影响	马垒, 李燕, 魏建林, 李子双, 周晓琳, 郑福丽, 吴小宾, 王利, 刘兆辉, 谭德水 (4755)
土壤改良剂对再生水滴灌根际土壤菌群多样性及病原菌和抗生素抗性基因丰度的影响	崔丙健, 崔二革, 刘春成, 胡超, 樊向阳, 李中阳, 高峰 (4765)
氮素对苜蓿植物修复垃圾堆场镉-多环芳烃复合污染土壤及土壤细菌群落结构的影响	李怡佳, 马俊伟, 李玉倩, 肖琛, 沈心怡, 牛云, 陈家军 (4779)
抗生素降解剂对猪粪堆肥腐熟和细菌群落演替的影响	李琳琳, 张昕, 马军伟, 孙万春, 成琪璐, 林辉 (4789)
《环境科学》征订启事 (4337) 《环境科学》征稿简则 (4407) 信息 (4521, 4705, 4800)	

蓝藻水华过程中优势种群演替模式、效应及驱动因子分析

欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李佳欣, 李玉鑫, 施军琼, 吴忠兴*

(西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆市三峡库区植物生态与资源重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 不同蓝藻种类形成水华的条件不尽相同, 因此, 蓝藻水华过程中常出现不同优势种群的演替, 增加了蓝藻水华生态效应的不确定性和复杂性。然而, 关于蓝藻水华过程中优势种群内部的演替模式、生态效应及其驱动因素, 尚未受到足够关注。因此, 于2018年4月至9月对重庆市内饮用水源地南彭水库进行浮游植物群落动态和水环境监测分析。结果表明: ① 南彭水库共检出浮游植物8门59属108种, 其中优势种4门13种, 以拉氏拟柱孢藻(*Cylindrospermopsis raciborskii*)优势度最高, 其次为假鱼腥藻(*Pseudoanabaena* sp.); ② 5月和7月分别出现蓝藻密度峰值, 此时水华优势类群分别以假鱼腥藻和拟柱孢藻为主, 且Shannon-Weiner多样性指数和Pielou均匀度指数均显著低于其它月份; ③ NMDS结果显示拟柱孢藻和假鱼腥藻与周边浮游植物群落关联程度分别为0.58和0.48, 而VPA结果显示群落变化可由环境因子解释47.51%, 拟柱孢藻和假鱼腥藻仅分别能解释其中的12.04%和12.74%; ④ 拟柱孢藻丰度受到WT、pH和 RUE_N 的显著正影响, 受到SD和 RUE_p 的显著负影响; 假鱼腥藻丰度受到高锰酸盐指数的显著正影响, 受到EC和DO的显著负影响。以上结果说明两种蓝藻在大量生长繁殖时均对周边浮游植物群落产生了显著的影响, 而与假鱼腥藻相比, 拟柱孢藻对水生态系统影响更加明显; 氮限制和温度升高的共同作用能促使拟柱孢藻取代假鱼腥藻, 形成优势种群。

关键词: 拟柱孢藻; 假鱼腥藻; 蓝藻水华; 演替; 资源利用效率

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)10-4480-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202112249

Succession Pattern and Consequences of the Dominant Species During Cyanobacterial Bloom and Its Influencing Factors

OUYANG Tian, ZHAO Lu, JI Lu-lu, YANG Song-qi, ZHENG Bao-hai, DU Yu-xin, LI Jia-xin, LI Yu-xin, SHI Jun-qiong, WU Zhong-xing*

(Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Chongqing Key Laboratory of Plant Ecology and Resources in Three Gorges Reservoir Region, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: The succession of dominant species always occurs during cyanobacterial blooms because there are certain conditions for cyanobacterial blooms formed by different cyanobacteria; this results in more uncertain and complex effects in cyanobacterial blooms. However, the succession pattern and consequences of dominant species and its driving factors have not received enough attention during cyanobacteria blooms. In this study, the phytoplankton community characteristics and water environment factors of Nanpeng Reservoir, a drinking water source in Chongqing, were monitored and analyzed from April to September 2018. The results showed that: ① a total of 108 species of phytoplankton belonging to 59 genera and 8 phyla were identified in Nanpeng Reservoir. Of this, 13 species of 4 phyla were identified as dominant species, among which the dominance index of *Cylindrospermopsis raciborskii* was the highest, followed by that of *Pseudoanabaena* sp. ② The most dominant cyanobacteria were *Pseudoanabaena* and *Cylindrospermopsis* in May and July, respectively, in which cyanobacteria density peaked, whereas the Shannon-Weiner diversity and Pielou evenness were significantly lower than those in the other months. ③ NMDS results showed that the correlation between *Cylindrospermopsis* or *Pseudoanabaena* and the ambient phytoplankton community was 0.58 and 0.48, respectively. Moreover, the VPA results showed that 47.51% of the community variation could be explained by environmental factors, and only 12.04% and 12.74% of variation in community composition could be explained by *Cylindrospermopsis* and *Pseudoanabaena*, respectively. ④ The abundance of *Cylindrospermopsis* was significantly positively affected by WT, pH, and RUE_N and negatively affected by SD and RUE_p . However, the abundance of *Pseudoanabaena* was significantly positively affected by permanganate index and negatively affected by EC and DO. These results suggested that both dominating cyanobacteria had significant effects on the surrounding phytoplankton community. Relative to that of *Pseudoanabaena*, however, *Cylindrospermopsis* had a more obvious impact on the aquatic ecosystem. Moreover, the synergistic effect of N limitation and warming of the water column may have caused the replacement of *Pseudoanabaena* with *Cylindrospermopsis* to form a dominant population.

Key words: *Cylindrospermopsis*; *Pseudoanabaena*; cyanobacterial bloom; succession; resource use efficiency

近年来,随着气候变暖、水体富营养化程度加剧和二氧化碳浓度升高,全球范围内蓝藻水华发生的频率、强度和持续时间均呈现增加态势^[1~3]。蓝藻水华的发生不仅降低了水生态系统生物多样性,而且对生态服务功能包括饮用水、灌溉、渔业、航运和娱乐用途等产生负面效应,造成巨大经济损失^[1,4,5]。因此,蓝藻水华的形成特征和机制^[6]、蓝藻毒素的产生^[7]和蓝藻与其他物种的相互作用机

制^[8]等方面的研究已引起学者们广泛的关注。

有研究表明,蓝藻水华的暴发是复杂的事件,不同种类的水华蓝藻往往在水华频发的水体中一同发

收稿日期: 2021-12-25; 修订日期: 2022-02-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(42177055, 41877410); 重庆市研究生科研创新项目(CYS21106, CYS20105)

作者简介: 欧阳添(1998~),男,硕士研究生,主要研究方向藻类生态生理生态学, E-mail: ouyang77@qq.com

* 通信作者, E-mail: wuzhx@swu.edu.cn

现,在不同区域的水体中占主导地位,并呈现出时间序列上的优势种类演替^[9,10]. Soares 等^[11]在热带水库中观察到在持久的蓝藻水华过程中优势种从固氮蓝藻(卷曲长孢藻和拉氏拟柱孢藻)向非固氮蓝藻(铜绿微囊藻)的转变. Wu 等^[12]发现滇池蓝藻水华过程中出现了束丝藻与微囊藻的演替. 有研究发现固氮蓝藻可以将大气中的氮(N_2)转化为可利用的氨,使其在缺乏氮的水域中比非固氮蓝藻和其他真核浮游植物具有竞争优势,当水体中其他必需营养素充足时就容易形成水华^[1],因此氮的变化可能导致固氮蓝藻与非固氮藻类间的演替并决定优势种类的形成^[13,14]. 然而, Rigosi 等^[15]指出营养物质供应增加和温度升高对促进蓝藻的相对重要性取决于具体的种类,例如,长孢藻对营养物质更敏感,而微囊藻对温度更加敏感,表明蓝藻演替是由多种环境因素共同驱动的,而非单一变量主导.

目前,对水华蓝藻的研究往往只集中在一个优势种的变化及影响因素的分析. 然而,水华蓝藻作为一种多样化和异质性的组合,不同种类在生理上对环境条件的反应各不相同,这导致水华期间浮游植物优势种演替过程复杂多变,且不同种群占据优势地位的因素难以确定^[16]. 因此,为了解形成水华的蓝藻之间的演替特征及其对浮游植物群落的影响,并揭示其潜在的驱动因子,本文选取南彭水库作为研究对象,通过对其浮游植物群落结构和理化环境因子进行调查,分析蓝藻水华过程中浮游植物群落结构变化及水华蓝藻优势种演替,并探讨驱动水华蓝藻优势演替的生态因子,旨在为水库蓝藻水华形成机制和富营养化治理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况与样品采集

南彭水库(29°19'N, 106°41'E)是在长江一级支流花溪河上游筑坝形成的河道型水库,位于重庆市巴南区,属亚热带湿润季风气候,四季分明,春早秋迟,年平均气温 18.7℃,年降水量约 1 000 mm. 南彭水库为重庆市内重要的国家一级保护水源地,库区水域面积约为 1.3 km²,库容量 1.33 × 10⁷ m³. 本研究根据南彭水库形态特征,从入库口到坝前共设置 S1 ~ S5 这 5 个监测点(图 1),于 2018 年 4 月至 2018 年 9 月的每月中旬进行水质调查并采集水样. 鉴于采样区域为河道型水库,采样时依照河流样点设置方法,各样点取主河道左中右表层 0.5 m 深的 3 处水样进行等量混合,其中 1 L 水样现场滴加 15 mL 鲁格试剂固定保存用于浮游植物分析,其余放入冰盒中于当天带回实验室做进一步分析.

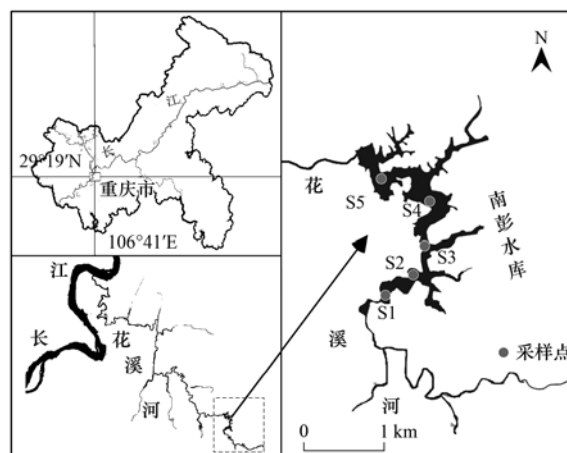


图 1 南彭水库采样点分布示意

Fig. 1 Distributions of sampling sites in the Nanpeng Reservoir

1.2 浮游植物分析

浮游植物样品带回实验室后于暗处静置 2d 左右,虹吸浓缩至 30 mL 后,补加 1 mL 40% 甲醛溶液长期保存. 浮游植物的种类鉴定和细胞计数采用面积为 20 mm × 20 mm,容量为 0.1 mL 的浮游计数框,于 10 × 40 倍光学显微镜(Nikon E-Ci)下进行,具体的种类鉴定与计数方法参考文献[17 ~ 19].

1.3 水体理化指标的测定

表层水体的水温(WT)、pH、电导率(EC)和溶氧(DO)使用多参数水质分析仪 DS5/DS5X (Hydrolab, USA)现场测定,水体透明度(SD)用黑白盘测定. 总磷(TP)和正磷酸盐(PO_4^{3-} -P)用钼酸铵分光光度法测定,总氮(TN)和硝态氮(NO_3^- -N)用紫外分光光度法测定,高锰酸盐指数使用酸性滴定法测定,叶绿素浓度(Chl-a)使用丙酮浸提分光光度法测定,室内分析具体参考文献[20]的方法.

1.4 数据处理与分析

以浮游植物群落资源利用效率(resource use efficiency, RUE)作为评价单位养分影响生物量产生的生态过程指标^[15],可以通过每单位的资源量所产生的浮游植物生物量来衡量^[21]. 因此本研究通过以下公式计算浮游植物的资源利用效率:

$$RUE_p = \rho(\text{Chl-a})/\rho(\text{TP})$$

$$RUE_N = \rho(\text{Chl-a})/\rho(\text{TN})$$

式中, RUE_p 和 RUE_N 分别为浮游植物磷的利用效率和氮的利用效率; $\rho(\text{Chl-a})$ 为浮游植物生物量测量值($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); $\rho(\text{TP})$ 和 $\rho(\text{TN})$ 分别为总磷和总氮的浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

浮游植物的 Manaughton 优势度指数(Y)不小于 0.02 时,可认定该物种为优势种^[22],优势度指数计算公式为:

$$Y_i = (N_i/N)f_i$$

式中, N_i 为第 i 种浮游植物的丰度, N 为浮游植物总丰度, f_i 为第 i 种在各采样点出现的频率。

物种丰富度 (S)、Shannon-Wiener 多样性指数 (H) 和均匀度 (J) 等指标可以衡量浮游植物群落物种多样性, 其中 Shannon 多样性指数 (H) 的计算公式为:

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

Pielou 均匀度指数 (J) 的计算公式为:

$$J = H / \ln S$$

式中, P_i 为物种 i 的相对丰度。

南彭水库各月份间浮游植物群落多样性指数及水体理化因子的差异采用单因素方差分析 (one-way analysis of variance, ANOVA) 进行并作 LSD 事后检验, 对于不满足 ANOVA 方法条件的因子采用 Wilcoxon 非参数检验。不同月份间周边浮游植物群落的差异采用置换多元方差分析 (permutational multivariate analysis of variance, PERMANOVA) 进行显著性检验。

为分析蓝藻水华优势种是否以及在多大程度上影响周边浮游植物群落的结构组成, 使用非度量多维标度法 (non-metric multidimensional scaling, NMDS) 减少群落数据的冗余性, 并以此被动拟合水华优势种丰度, 这一过程中外部变量与降维排序空间中所承担方差载体的关系是后计算的, 不影响群落排序的计算过程, 二者关联强度以 R^2 来衡量^[21]。此外, 采用方差分解方法 (variance partitioning analysis, VPA) 来评估水华优势蓝藻和水体环境因子对周边浮游植物群落组成和结构变化的相对贡献。

为确定水体环境因子与水华优势种丰度之间的联系, 本研究利用广义加性模型 (generalized additive model, GAM) 来探索响应变量与自变量之间线性或者非线性的关系。GAM 先前已被证明可用于阐明人类发病率和气候条件之间的非线性统计关系^[23]。在具体分析时, 由于 GAM 中具有较低广义交叉验证值的模型具有更高的预测能力^[23], 因此在对不同参数比较后选用最大自由度为 3 的样条函数作为自变量的局部平滑方法, 并对水华蓝藻丰度数据进行 $\lg(x+1)$ 转换。

所有数据整理采用 Excel 2019, 具体分析与统计使用 R 4.0.3 中 stats、vegan 和 mgcv 等程序包进行, 并用 ggplot2 程序包作图。

2 结果与分析

2.1 水体理化特征

在调查的 6 个月中, 所有环境因子在时间序列上均呈现显著差异 ($P < 0.05$, 表 1)。水体温度从 4 月逐步上升直到 8 月达到峰值, 随后下降; pH 值的变化与水温类似, 峰值出现在 7 月; EC 在夏季显著低于其他时间; DO 在 5 月达到最低值、在 7 月达到最高值; SD 随时间的变化与 pH 的相反, 7 月平均值最低。此外, 水体氮磷营养元素指标普遍偏高, 尤其是 TN, 除 7 月外样点浓度平均值都在 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上; 而样点 $\rho(\text{TP})$ 平均值在 6 月最低, 为 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 处于较高水平。水体中 5 月浮游植物磷的平均资源利用效率 (RUE_p) 较其他月份显著更低, 仅为 0.26 ± 0.11 ; 而浮游植物氮的平均资源利用效率 (RUE_N) 在 7 月最高, 为 0.023。

表 1 南彭水库环境因子月份变化¹⁾

Table 1 Environmental factors of Nanpeng Reservoir changes in different months						
理化指标	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月
WT/℃	21.76 ± 0.52e	24.36 ± 0.05d	25.14 ± 0.11c	29.94 ± 0.05b	32.34 ± 0.49a	25.56 ± 1.00c
pH	8.83 ± 0.07cd	8.94 ± 0.09c	9.21 ± 0.14b	9.64 ± 0.15a	9.20 ± 0.13b	8.58 ± 0.50d
EC/μS·cm ⁻¹	279.74 ± 4.38b	239.98 ± 6.97d	218.40 ± 3.85e	225.92 ± 8.06de	256.02 ± 9.73c	317.16 ± 24.48a
DO/mg·L ⁻¹	12.36 ± 0.54ab	10.06 ± 0.29c	10.76 ± 0.96bc	13.06 ± 0.34a	13.02 ± 1.75a	11.62 ± 2.68
SD/cm	84.80 ± 14.55a	73.80 ± 11.82ab	62.80 ± 7.46bc	52.40 ± 13.28c	67.00 ± 8.72bc	56.80 ± 13.52c
ρ(TN)/mg·L ⁻¹	2.06 ± 0.30bc	2.00 ± 0.48bc	3.42 ± 0.74a	1.67 ± 0.21c	3.08 ± 0.69a	2.43 ± 0.26a
ρ(NO ₃ ⁻ -N)/mg·L ⁻¹	0.70 ± 0.27c	1.36 ± 0.39ab	0.39 ± 0.10d	1.38 ± 0.23a	0.71 ± 0.15c	1.07 ± 0.09b
ρ(TP)/mg·L ⁻¹	0.06 ± 0.01bc	0.08 ± 0.01a	0.05 ± 0.02c	0.08 ± 0.02a	0.08 ± 0.01ab	0.08 ± 0.02a
ρ(PO ₄ ³⁻ -P)/mg·L ⁻¹	0.02 ± 0.00c	0.03 ± 0.00b	0.02 ± 0.00c	0.04 ± 0.00a	0.04 ± 0.01a	0.03 ± 0.01ab
高锰酸盐指数/mg·L ⁻¹	3.90 ± 0.16c	5.52 ± 0.36ab	4.56 ± 0.77bc	6.21 ± 0.74a	5.14 ± 1.05b	3.72 ± 0.95c
TN:TP	35.13 ± 6.59bc	24.20 ± 6.33cd	68.96 ± 15.27a	21.01 ± 3.85d	41.19 ± 14.70b	19.25 ± 2.49d
ρ(Chl-a)/μg·L ⁻¹	27.72 ± 2.47bcd	20.63 ± 4.89d	25.99 ± 3.70cd	36.32 ± 10.18abc	40.90 ± 16.59ab	46.03 ± 14.25a
RUE _p	0.47 ± 0.06a	0.26 ± 0.11b	0.55 ± 0.20a	0.46 ± 0.17a	0.52 ± 0.16a	0.57 ± 0.24a
RUE _N × 10 ⁻³	13.77 ± 2.75bc	11.02 ± 4.42c	7.94 ± 2.41c	22.64 ± 9.84a	13.97 ± 7.09bc	18.71 ± 4.09ab

1) 同一行不同小写字母表示具有显著性差异 ($P < 0.05$)

2.2 浮游植物群落结构与优势种

调查期间, 南彭水库共检出浮游植物 8 门 59 属

108 种。其中绿藻种类最多, 为 26 属 50 种, 占比 46.3%, 其次为蓝藻 (16.7%) 和硅藻 (13.0%) 分别为

12 属 18 种和 9 属 14 种, 随后裸藻 5 属 11 种和甲藻 3 属 10 种占比分别为 10.2% 和 9.3%, 而其余 3 门种类较少, 包括隐藻 2 属 3 种, 金藻和黄藻各 1 种[图 2 (a)]. 尽管蓝藻种类相对绿藻较少, 但藻密度上占据明显优势, 平均值达 7.84×10^7 个 $\cdot\text{L}^{-1}$, 占浮游植物

总密度的 94.1% [图 2(b)]. 从浮游植物密度组成时间变化来看, 蓝藻在各个月份中均占据优势地位, 并且在 5 月和 7 月中出现两个峰值, 分别为 $(2.01 \pm 0.71) \times 10^8$ 个 $\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $(1.13 \pm 0.18) \times 10^8$ 个 $\cdot\text{L}^{-1}$, 与之相比 4 月最低, 仅为 $(6.17 \pm 1.07) \times 10^6$ 个 $\cdot\text{L}^{-1}$.

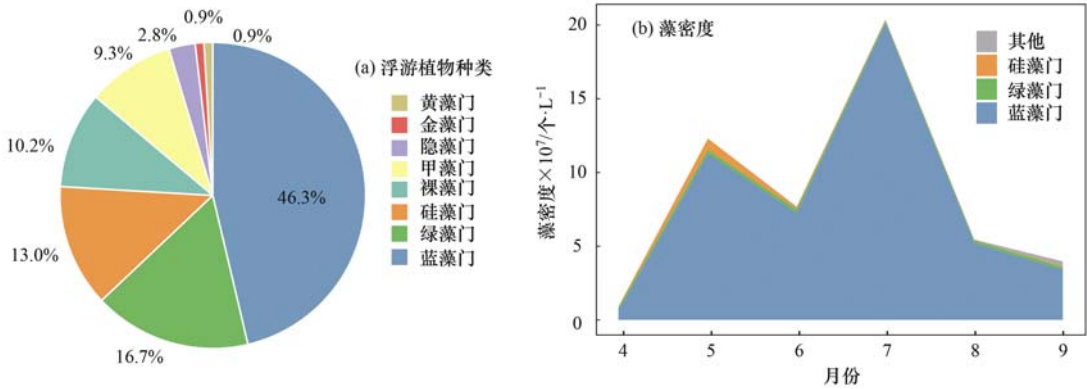


图 2 浮游植物种类和藻密度组成
Fig. 2 Compositions of phytoplankton species and density

各月份中共发现 4 门 13 个优势种 ($Y \geq 0.02$), 包括蓝藻 7 种、绿藻 2 种、硅藻 2 种和隐藻 2 种(表 2). 南彭水库优势种在不同月份各不相同, 既有交叉又有演替, 但假鱼腥藻在各月均以优势种或亚优势种出现, 并且在 4 月和 5 月占据最高优势度(0.592 和 0.899), 而在 6~9 月, 拉氏拟柱孢藻的

优势度最高(优势度分别为 0.518、0.912、0.424 和 0.441). 以整个调查期数据分析, 结果显示优势种为 3 种丝状蓝藻, 其中水华束丝藻作为 6 月、8 月和 9 月的优势种替代了之前的绿藻(狭形纤维藻和四尾栅藻)和硅藻(尖针杆藻和披针曲壳藻), 但其优势度较低.

表 2 浮游植物优势种优势度指数 (Y)¹⁾
Table 2 Dominance index (Y) of dominant phytoplankton species

优势种	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	调查期
拉氏拟柱孢藻(<i>Cylindrospermopsis raciborskii</i>)	—	—	0.518	0.912	0.424	0.441	0.438
假鱼腥藻(<i>Pseudoanabaena</i> sp.)	0.592	0.899	0.285	0.057	0.124	0.047	0.312
水华束丝藻(<i>Aphanizomenon flosaquae</i>)	—	—	0.101	—	0.077	0.031	0.030
尖针杆藻(<i>Synedra acus</i>)	0.046	0.025	—	—	—	—	—
四尾栅藻(<i>Scenedesmus quadricauda</i>)	0.023	—	—	—	—	—	—
狭形纤维藻(<i>Ankistrodesmus angustus</i>)	0.113	—	—	—	—	—	—
披针曲壳藻(<i>Achnanthes lanceolata</i>)	—	0.029	—	—	—	—	—
湖泊鞘丝藻(<i>Lyngbya limnetica</i>)	—	—	—	—	0.029	0.027	—
中华尖头藻(<i>Merismopedia sinica</i>)	—	—	—	—	0.024	0.028	—
细小平裂藻(<i>Merismopedia tenuissima</i>)	—	—	—	—	0.060	0.138	—
棒胶藻(<i>Rhabdogloea</i> sp.)	—	—	—	—	0.128	0.030	—
尖尾蓝隐藻(<i>Chroomonas acuta</i>)	—	—	—	—	—	0.042	—
卵形隐藻(<i>Cryptomonas ovata</i>)	—	—	—	—	—	0.023	—

1) “—”表示该种藻类在相应月份为非优势种($Y < 0.02$)

2.3 水华优势蓝藻对浮游植物群落的影响

整个研究期间, 各月份浮游植物群落组成的空间差异都不显著 ($P > 0.05$), 各样点间的水华优势蓝藻(拉氏拟柱孢藻和假鱼腥藻)密度与组成的变化趋势相一致(图 3). 然而, 在此次蓝藻水华过程中发生了明显的优势种演替现象, 在 5 月发生了以假鱼腥藻为主的蓝藻水华, 在 6 月则呈现出假鱼腥藻和拟柱孢藻共同主导占优的现象, 而在 7 月拟柱孢

藻水华暴发, 藻密度达到最大值, 此后蓝藻水华开始消退, 并在 8 月和 9 月呈现出多种蓝藻共存但仍以拟柱孢藻为主的现象(图 3 和表 2).

蓝藻水华对浮游植物群落的影响在生物多样性层面有所体现. 南彭水库浮游植物群落物种丰富度在夏季 7 月藻密度达到最高峰时最低, 各样点丰富度平均值仅为 11.6, 相反在 9 月水华末期时物种丰富度最高, 平均值达到 27[图 4(a)]. 此外, 各样点

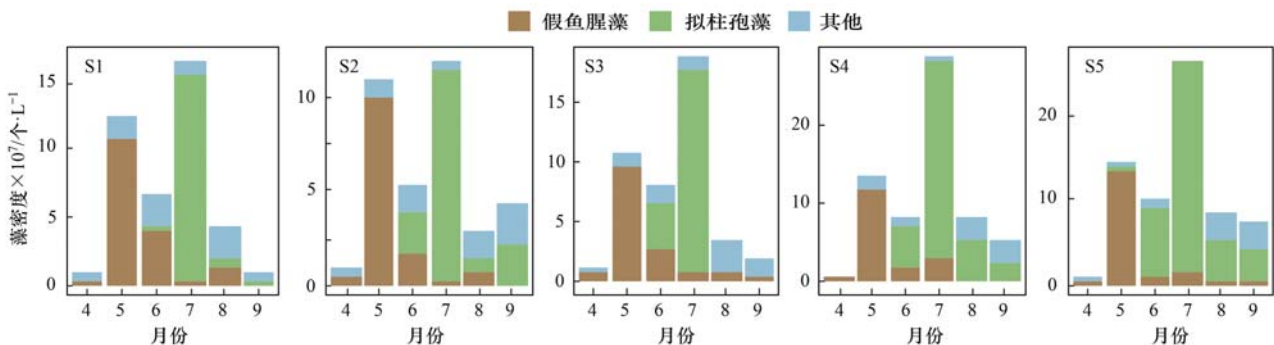
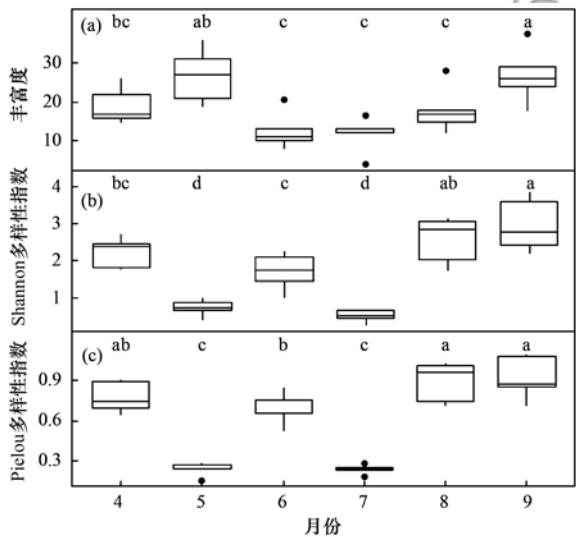


图3 水华蓝藻优势种藻密度时空分布
Fig. 3 Temporal and spatial distribution of dominant cyanobacteria in algal bloom

Shannon 多样性指数平均值在 5 月和 7 月较低,分别为 0.79 和 0.57,与其余 4 个月份有显著性差异 ($P < 0.05$) [图 4(b)]. Pielou 均匀度指数的变化趋势与 Shannon 多样性指数基本一致,同样在 5 月和 7 月较其他月份显著更低 ($P < 0.05$),样点平均值都为 0.24 [图 4(c)].



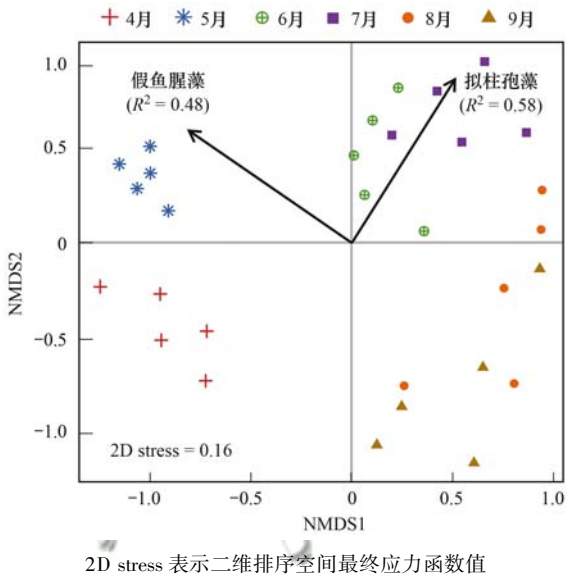
不同小写字母表示具有显著性差异 ($P < 0.05$)
图4 南彭水库浮游植物的多样性指数

Fig. 4 Diversity index of phytoplankton in Nanpeng Reservoir

在非约束群落排序分析中,NMDS 二维平面上各月样本具有明显的区分 (PERMANOVA, $F = 7.86$, $P < 0.001$,图 5). 与假鱼腥藻 ($R^2 = 0.48$, $P = 0.002$) 相比,拟柱孢藻 ($R^2 = 0.58$, $P = 0.002$) 与周边环境浮游植物群落的关联程度更高. 而 VPA 结果表明,相比于环境变量对浮游植物群落组成变化的解释(47.5%),两种水华蓝藻假鱼腥藻和拟柱孢藻的相对贡献相差不大,分别解释了 12.74% 和 12.04% 的方差(图 6).

2.4 水华优势蓝藻演替的驱动因子分析

为探究水华优势蓝藻沿不同类型环境梯度下的变化,以蓝藻丰度的对数值为响应变量,水体理化因子作为自变量构建广义可加模型. 结果发现拟柱孢



2D stress 表示二维排序空间最终应力函数值
图5 非蓝藻水华优势种浮游植物群落 NMDS 图
Fig. 5 NMDS ordination plots of the non-dominant cyanobacteria bloom specialist in phytoplankton community

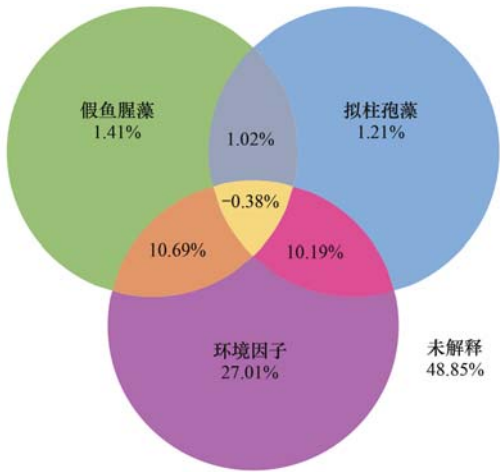
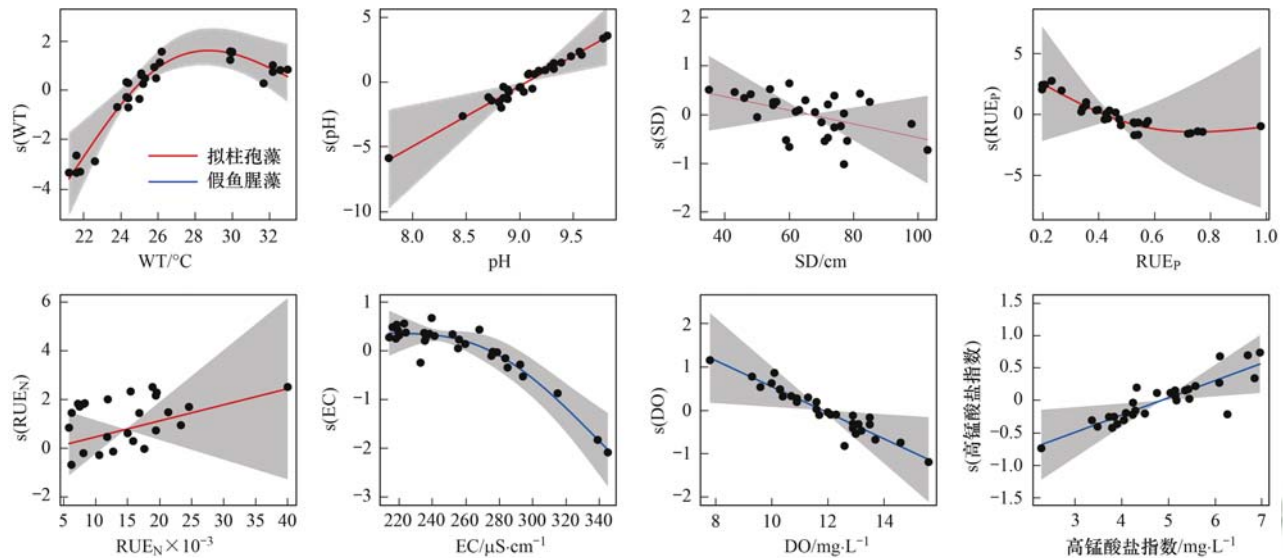


图6 拟柱孢藻、假鱼腥藻与环境因子对周边浮游植物群落相对贡献的方差分解分析
Fig. 6 Variation partitioning analysis of the relative contributions of *C. raciborskii*, *Pseudoanabaena* sp., and environmental factors to ambient phytoplankton community

藻丰度对数受到 WT、pH、SD、 RUE_p 和 RUE_N 的显著影响 ($P < 0.05$),模型的整体解释率 R^2 为 0.957;

而假鱼腥藻丰度的对数受到 EC、DO 和高锰酸盐指数的显著影响 ($P < 0.05$), 模型的整体解释率 R^2 为 0.856 (表 3). 显著环境变量对蓝藻丰度影响的平滑回归曲线表明, 拟柱孢藻丰度的对数随水温增加而增加, 在 28℃ 左右存在一个拐点; 随 RUE_P 增加而降

低, 在 0.5 左右趋于平稳; 在 pH、SD 和 RUE_N 的环境梯度下受线性影响, 其中与 pH 和 RUE_N 为正相关, 与 SD 为负相关 (图 7). 而假鱼腥藻丰度的对数随 EC 和 DO 的增加而减少, 随高锰酸盐指数的增加而增加, 其中 EC 在大于 260 时影响更为强烈 (图 7).



$s()$ 为经样条函数变化后的自变量, 阴影部分为 95% 的置信区间
图 7 显著环境变量与拟柱孢藻或假鱼腥藻丰度的广义可加模型分析图

Fig. 7 Relationship between significant environmental variables and the abundance of *C. raciborskii* or *Pseudoanabaena* sp. based on the generalized additive models

表 3 GAM 中环境变量对拟柱孢藻或假鱼腥藻丰度对数的响应结果¹⁾

Table 3 Response of environmental variables to the abundance of *C. raciborskii* or *Pseudoanabaena* sp. in the GAM

环境因子	拟柱孢藻 ($R^2 = 0.957, P < 0.01$)		假鱼腥藻 ($R^2 = 0.856, P < 0.01$)	
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
WT	10.793	0.003 **	1.857	0.121
pH	9.827	0.008 **	0.078	0.785
EC	2.352	0.142	14.491	0.001 **
DO	1.302	0.276	5.425	0.038 *
SD	5.975	0.011 *	3.717	0.113
TN	1.879	0.196	3.574	0.083
NO ₃ ⁻ -N	0.989	0.339	0.028	0.871
TP	0.778	0.395	0.288	0.601
PO ₄ ³⁻ -P	0.664	0.431	0.108	0.748
高锰酸盐指数	1.117	0.241	6.377	0.027 *
TN/TP	0.021	0.889	2.653	0.129
Chl-a	3.846	0.073	3.641	0.081
RUE_P	4.937	0.031 *	2.057	0.177
RUE_N	10.502	0.007 **	1.467	0.335

1) * 表示自变量具有显著性 ($P < 0.05$), ** 表示自变量具有极显著性 ($P < 0.01$)

3 讨论

3.1 蓝藻水华期间浮游植物群落特征分析

南彭水库在 4~9 月调查期间的浮游植物群落组成与西南地区其他水库相似, 以绿藻、蓝藻和硅

藻为主 (图 2)^[24~26]. 河流筑坝形成水库之后, 由激流环境转变为静水环境, 水体流速减缓、滞留时间变长并截留营养物质, 有利于浮游植物的生存与繁殖^[27], 这解释了南彭水库浮游植物群落以蓝、绿藻等富营养型静水种为主的现象. 尽管蓝藻种类较绿藻少, 但就丰度来看, 蓝藻占据了绝对优势. Paerl 等^[28,29] 指出蓝藻作为原核生物, 在较高的温度下具有更高的生长速率, 这使得在营养丰富的条件下蓝藻与其他真核初级生产者 (包括硅藻、绿藻和甲藻等) 具有明显的竞争优势. 在调查期间, 南彭水库的水温在 22~32℃ 之间, 水体 TN 和 TP 浓度远超水体富营养化的临界浓度 [$\rho(TN)$ 为 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\rho(TP)$ 为 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$], 这些条件为蓝藻的生长并占据优势地位提供了良好的外部条件.

优势种组成可以在一定程度上反映研究水库的污染现状^[25], 尽管南彭水库浮游植物优势种种类数较多, 但其优势度在不同月份存在差异, 大部分种类仅在某月份成为优势种属 (表 2). 而蓝藻作为最典型的富营养水体优势类群, 在南彭水库中优势种类最多, 表明水体污染现状不容乐观. 朱广伟等^[30] 调查发现硅藻在气温 16℃ 以上时, 生物量开始快速增加, 当气温达到 26℃ 之后便开始下降, 并且相比于尖针杆藻, 曲壳藻的最佳生长温度更高. 这符合本研

究中尖针杆藻在 4 月成为优势种,披针曲壳藻在 5 月成为优势种的现象.而当 9 月水体温度和光照减弱时,隐藻由于独特的辅助色素能用于光合作用,并能凭借鞭毛调节自身在水体中位置的特性所具备竞争优势^[31,32],成为优势种类.

蓝藻优势种类的大量生长将通过种间相互作用(资源竞争和化感作用等)直接抑制其他浮游植物种类的生长,当增殖暴发形成水华时将引起水质的改变从而间接影响浮游植物群落结构^[6,33,34].在本研究中,蓝藻密度在 5 月和 7 月形成了两个峰值,此时浮游植物群落的 Shannon 多样性指数和 Pielou 均匀度指数与其他月份相比都显著更低[图 4(b)和图 4(c)],表明蓝藻水华暴发时将降低浮游植物群落结构稳定性,使得浮游植物群落结构趋于简单,这与陈莎等^[24]的研究结果相一致,在夏季较高温度和光照条件下,蓝藻优势种类的大量生长对其他藻类形成抑制,导致生物多样性降低.

3.2 不同水华蓝藻优势种对浮游植物群落的影响

调查期间所发现的 3 种优势种均为丝状蓝藻,并远超过蓝藻水华阈值(10^7 个 $\cdot$ L⁻¹)^[35],与同气候地区调查结果一致,表明丝状蓝藻的优势普遍存在^[25,36].在 5 月和 7 月水华暴发时假鱼腥藻和拟柱孢藻分别在浮游植物中占据绝对优势地位(图 3),两种蓝藻在大量生长繁殖时都对周边浮游植物群落产生了显著的影响,相较于假鱼腥藻,拟柱孢藻与周边群落的关联程度更高(图 5).Figueredo 等^[37]的研究证实拟柱孢藻藻株的渗出物对不同藻类的光合活性具有较强的抑制作用.化感作用被认为在湖泊浮游植物结构和演替中起重要作用,并与水生生境的生态相互作用紧密联系^[38],主要原因在于由于本地物种缺乏与入侵物种长期共存,并且没有进化到能够忍受入侵物种产生的化感物质^[39].有研究表明拟柱孢藻作为一种全球性的入侵蓝藻与其潜在的产毒能力^[40],可能改变物种优势结构、养分动态和初级生产力水平,从而严重影响被入侵的群落和物种多样性,相较于假鱼腥藻这种广布性物种,拟柱孢藻在大量增殖形成水华时对被入侵群落的结构组成将产生更大的影响^[41].因此,尽管在两种藻华暴发期间浮游植物群落的 Shannon 指数和 Pielou 指数无显著性差异,但丰富度存在显著差异,且拟柱孢藻水华期间更低(图 4).

此外,调查期间各月份的浮游植物群落结构组成具有显著性差异,VPA 结果表明造成这种差异绝大部分是由于环境条件差异所导致的,而水华蓝藻种类仅能解释较少的一部分方差(图 6).但这并不能说明水华优势种对周边群落的影响不大,相反优

势蓝藻形成水华后会对水环境产生显著改变.藻体的大量聚集降低了水体透明度,同时死亡的藻体被微生物分解诱发的缺氧条件等,都间接影响其它浮游植物的生长繁殖^[6].观察到 7 月拟柱孢藻水华时透明度降至最低,而 pH 和 DO 处于较高水平(表 2),这与其他地区蓝藻水华发生时的环境特征相一致^[42,43].相反,5 月假鱼腥藻水华时 DO 处于较低水平,并且 GAM 结果发现假鱼腥藻丰度的对数随 DO 增加而减少(图 7).有研究表明 DO 在蓝藻水华暴发期间往往明显升高并达到峰值,但后期常常降至同期最低点^[43,44].因此,调查发现 7 月的藻密度相较于 5 月更高[图 2(b)],推测在 5 月假鱼腥藻水华已开始衰退,而在 7 月拟柱孢藻水华正处于暴发峰值,假鱼腥藻的优势地位正逐渐被拟柱孢藻所取代.

3.3 影响两种水华蓝藻优势种演替的环境因素

在蓝藻水华频繁发生的湖泊中不同优势种类竞争并经历生态演替,蓝藻水华形成种的相对成功是复杂和协同环境因素的结果,而不是单一的支配变量,重要的是要探讨形成水华类群的外部驱动因素^[45].在淡水生态系统中,最普遍的水华蓝藻模式就是固氮蓝藻和非固氮蓝藻之间主导地位的确定与转换,而温度与营养物质被证明是关键的影响因素^[36,45,46].传统上认为当 N 缺乏时,固氮蓝藻将占据优势地位,但在本研究中无论是固氮的拟柱孢藻还是非固氮的假鱼腥藻都不受 TN 和 NO₃⁻-N 梯度的影响(表 3).考虑到 N 和 P 等营养物质对浮游植物群落具有系统性的影响,因此浮游植物群落的资源利用效率(RUE)相比水体中的 N 和 P 浓度更能体现营养的限制情况^[21].

陶敏等^[25]对四川丘陵区水库的浮游植物群落优势种研究中发现,假鱼腥藻全年都占据优势地位,生态响应速率高,相比其他优势蓝藻包括拟柱孢藻是相对泛化的种群,处于不断掠夺其他物种资源的扩张状态.本研究发现在 5 月较低的氮磷比和 RUE_p(表 1),分别表明此时水体中 P 相对丰富,浮游植物群落对 P 的竞争利用不激烈.而南彭水库作为富营养的水体,尤其是长期处于高氮磷比的情况下,在 P 得到满足时,长期适应本地环境的假鱼腥藻相较于拟柱孢藻更具有竞争优势.

从 RUE_p 响应拟柱孢藻丰度对数的平滑回归曲线可以看出,当 RUE_p 大于 0.5 之后,拟柱孢藻不再受到 RUE_p 的负面影响(图 7),表明在浮游植物群落对 P 的竞争利用较为激烈时,水体中的 P 成为其他浮游植物的限制因素,相反由于拟柱孢藻在 P 限制水体中具有出色的磷吸收和利用能力^[47,48],使其更具竞争优势,这也解释了拟柱孢藻为何能够在 6

~9 月 RUE_p 较高时成为主要的优势种(表 1 和表 2). 而 7 月拟柱孢藻水华暴发时观察到的 RUE_N 峰值(表 1)以及拟柱孢藻丰度的对数随 RUE_N 增加而增加的现象(图 7), 都表明具有固氮能力的拟柱孢藻在 N 相对限制的情况下具有竞争优势. 此外, 固氮作用作为高昂成本的生物反应, 与其他酶催化过程类似, 在有可利用氮源(如硝酸盐和铵盐)时会得到抑制, 而较高的温度下固氮作用将会增强^[49]. 因此, 7 月较高的温度将有利于起源于热带地区的拟柱孢藻形成水华^[40].

4 结论

(1) 调查期间共检出浮游植物 8 门 59 属 108 种, 蓝藻在丰度和优势种组成上占据绝对优势地位, 5~7 月水华优势种由假鱼腥藻向拟柱孢藻演替, 生物多样性较低.

(2) 水华蓝藻主要通过改变水环境特征来间接影响周边浮游植物群落, 相比本地的假鱼腥藻, 入侵蓝藻-拟柱孢藻对水生生态系统的影响更强烈.

(3) 在 N 缺乏和温度升高的协同影响作用下, 具有固氮能力的拟柱孢藻取代假鱼腥藻成为蓝藻水华的优势类群.

参考文献:

- [1] Huisman J, Codd G A, Paerl H W, *et al.* Cyanobacterial blooms [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2018, **16**(8): 471-483.
- [2] O'Neil J M, Davis T W, Burford M A, *et al.* The rise of harmful cyanobacteria blooms: the potential roles of eutrophication and climate change [J]. *Harmful Algae*, 2012, **14**: 313-334.
- [3] Paerl H W, Paul V J. Climate change: links to global expansion of harmful cyanobacteria [J]. *Water Research*, 2012, **46**(5): 1349-1363.
- [4] 马健荣, 邓建明, 秦伯强, 等. 湖泊蓝藻水华发生机理研究进展 [J]. *生态学报*, 2013, **33**(10): 3020-3030.
- [5] Ma J R, Deng J M, Qin B Q, *et al.* Progress and prospects on cyanobacteria bloom-forming mechanism in lakes [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(10): 3020-3030.
- [6] 秦伯强, 王小冬, 汤祥明, 等. 太湖富营养化与蓝藻水华引起的饮用水危机——原因与对策 [J]. *地球科学进展*, 2007, **22**(9): 896-906.
- [7] Qin B Q, Wang X D, Tang X M, *et al.* Drinking water crisis caused by eutrophication and cyanobacterial bloom in Lake Taihu: cause and measurement [J]. *Advances in Earth Science*, 2007, **22**(9): 896-906.
- [8] Paerl H W, Otten T G. Harmful cyanobacterial blooms: causes, consequences, and controls [J]. *Microbial Ecology*, 2013, **65**(4): 995-1010.
- [9] Merel S, Walker D, Chicana R, *et al.* State of knowledge and concerns on cyanobacterial blooms and cyanotoxins [J]. *Environment International*, 2013, **59**: 303-327.
- [10] 彭宇科, 路俊玲, 陈慧萍, 等. 蓝藻水华形成过程对氮磷转化功能细菌群的影响 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(11): 4938-4945.
- [11] Peng Y K, Lu J L, Chen H P, *et al.* Dynamic changes of nitrogen-transforming and phosphorus-accumulating bacteria along with the formation of cyanobacterial blooms [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(11): 4938-4945.
- [12] Zhang M, Zhang Y C, Yang Z, *et al.* Spatial and seasonal shifts in bloom-forming cyanobacteria in Lake Chaohu: patterns and driving factors [J]. *Phycological Research*, 2016, **64**(1): 44-55.
- [13] 贾晓会, 施定基, 史绵红, 等. 巢湖蓝藻水华形成原因探索及“优势种光合假说” [J]. *生态学报*, 2011, **31**(11): 2968-2977.
- [14] Jia X H, Shi D J, Shi M H, *et al.* Formation of cyanobacterial blooms in Lake Chaohu and the photosynthesis of dominant species hypothesis [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(11): 2968-2977.
- [15] Soares M C S, de A Rocha M I, Marinho M M, *et al.* Changes in species composition during annual cyanobacterial dominance in a tropical reservoir: physical factors, nutrients and grazing effects [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2009, **57**(2): 137-149.
- [16] Wu Y L, Li L, Zheng L L, *et al.* Patterns of succession between bloom-forming cyanobacteria *Aphanizomenon flos-aquae* and *Microcystis* and related environmental factors in large, shallow Dianchi Lake, China [J]. *Hydrobiologia*, 2016, **765**(1): 1-13.
- [17] Paterson M J, Schindler D W, Hecky R E, *et al.* Comment: lake 227 shows clearly that controlling inputs of nitrogen will not reduce or prevent eutrophication of lakes [J]. *Limnology and Oceanography*, 2011, **56**(4): 1545-1547.
- [18] Schindler D W, Hecky R E, Findlay D L, *et al.* Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: results of a 37-year whole-ecosystem experiment [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, **105**(32): 11254-11258.
- [19] Rigosi A, Carey C C, Ibelings B W, *et al.* The interaction between climate warming and eutrophication to promote cyanobacteria is dependent on trophic state and varies among taxa [J]. *Limnology and Oceanography*, 2014, **59**(1): 99-114.
- [20] Dokulil M T, Teubner K. Cyanobacterial dominance in lakes [J]. *Hydrobiologia*, 2000, **438**(1-3): 1-12.
- [21] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类--系统、分类及生态 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [22] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [23] 中国科学院中国孢子植物志编辑委员会. 中国淡水藻志-第十二卷-硅藻门, 异极藻科 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [24] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [25] Olli K, Klais R, Tamminen T. Rehabilitating the cyanobacteria - niche partitioning, resource use efficiency and phytoplankton community structure during diazotrophic cyanobacterial blooms [J]. *Journal of Ecology*, 2015, **103**(5): 1153-1164.
- [26] Lampitt R S, Wishner K F, Turley C M, *et al.* Marine snow studies in the northeast Atlantic Ocean: distribution, composition and role as a food source for migrating plankton [J]. *Marine Biology*, 1993, **116**(4): 689-702.
- [27] Xu L, Stige L C, Chan K S, *et al.* Climate variation drives dengue dynamics [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, **114**(1): 113-118.
- [28] 陈莎, 谢青, 付梅, 等. 三峡库区典型支流水库浮游动植物群落结构特征及其与环境因子的关系 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(5): 2303-2312.
- [29] Chen S, Xie Q, Fu M, *et al.* Structural characteristics of

- zooplankton and phytoplankton communities and its relationship with environmental factors in a typical tributary reservoir in the Three Gorges Reservoir region [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2303-2312.
- [25] 陶敏, 岳兴建, 岳珊, 等. 四川丘陵区水库浮游植物群落结构与蓝藻水华风险——基于优势种生态位与种间联结研究[J]. *生态学报*, 2021, **41**(23): 9457-9469.
Tao M, Yue X J, Yue S, *et al.* Phytoplankton community structure and cyanobacteria bloom risk of reservoirs in hilly regions of Sichuan Province based on dominant species niche and interspecific association[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(23): 9457-9469.
- [26] 张耀文, 李洪, 李嘉, 等. 西南山区典型河道型水库藻类功能群时空演替特征及其影响因素: 以紫坪铺水库为例[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2680-2687.
Zhang Y W, Li H, Li J, *et al.* Spatiotemporal succession characteristics of algal functional groups and its impact factors for a typical channel-type reservoir in a southwest mountainous area [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2680-2687.
- [27] 曹承进, 郑丙辉, 张佳磊, 等. 三峡水库支流大宁河冬、春季水华调查研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(12): 3471-3480.
Cao C J, Zheng B H, Zhang J L, *et al.* Systematic investigation into winter and spring algal blooms in Daning River of Three Gorges Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(12): 3471-3480.
- [28] Paerl H W, Hall N S, Calandrino E S. Controlling harmful cyanobacterial blooms in a world experiencing anthropogenic and climatic-induced change[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(10): 1739-1745.
- [29] Paerl H W, Huisman J. Blooms like it hot[J]. *Science*, 2008, **320**(5872): 57-58.
- [30] 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.
- [31] Abirhire O, North R L, Hunter K, *et al.* Environmental factors influencing phytoplankton communities in Lake Diefenbaker, Saskatchewan, Canada[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2015, **41**(S2): 118-128.
- [32] Tardio M, Tolotti M, Novarino G, *et al.* Ecological and taxonomic observations on the flagellate algae characterising four years of enclosure experiments in Lake Tovel (Southern Alps) [J]. *Hydrobiologia*, 2003, **502**(1-3): 285-296.
- [33] Moustaka-Gouni M, Vardaka E, Michaloudi E, *et al.* Plankton food web structure in a eutrophic polymictic lake with a history of toxic cyanobacterial blooms[J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, **51**(1 Pt 2): 715-727.
- [34] Paerl H W, Fulton R S, Moisan P H, *et al.* Harmful freshwater algal blooms, with an emphasis on cyanobacteria[J]. *The Scientific World Journal*, 2001, **1**: 76-113.
- [35] 况琪军, 马沛明, 胡征宇, 等. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展[J]. *安全与环境学报*, 2005, **5**(2): 87-91.
Kuang Q J, Ma P M, Hu Z Y, *et al.* Study on the evaluation and treatment of lake eutrophication by means of algae biology[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2005, **5**(2): 87-91.
- [36] Hu L L, Shan K, Huang L C, *et al.* Environmental factors associated with cyanobacterial assemblages in a mesotrophic subtropical plateau lake: a focus on bloom toxicity[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **777**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146052.
- [37] Figueredo C C, Giani A, Bird D F. Does allelopathy contribute to *Cylindrospermopsis raciborskii* (cyanobacteria) bloom occurrence and geographic expansion? [J]. *Journal of Phycology*, 2007, **43**(2): 256-265.
- [38] Leão P N, Vasconcelos M T S D, Vasconcelos V M. Allelopathy in freshwater cyanobacteria [J]. *Critical Reviews in Microbiology*, 2009, **35**(4): 271-282.
- [39] Mack R N, Simberloff D, Lonsdale W M, *et al.* Biotic invasions: causes, epidemiology, global consequences, and control[J]. *Ecological Applications*, 2000, **10**(3): 689-710.
- [40] Antunes J T, Leão P N, Vasconcelos V M. *Cylindrospermopsis raciborskii*: review of the distribution, phylogeography, and ecophysiology of a global invasive species [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2015, **6**, doi: 10.3389/fmicb.2015.00473.
- [41] 李红敏, 孙炯明, 张莎莎, 等. 拟柱孢藻 (*Cylindrospermopsis raciborskii*) 入侵对水生态系统群落结构和物种多样性的影响[J]. *生态学杂志*, 2018, **37**(12): 3757-3768.
Li H M, Sun J M, Zhang S S, *et al.* The impacts of *Cylindrospermopsis raciborskii* invasion on community structure and species diversity of aquatic ecosystem[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(12): 3757-3768.
- [42] 吴阿娜, 朱梦杰, 汤琳, 等. 淀山湖蓝藻水华高发期叶绿素 a 动态及相关环境因子分析[J]. *湖泊科学*, 2011, **23**(1): 67-72.
Wu E N, Zhu M J, Tang L, *et al.* Dynamics of chlorophyll-a and analysis of environmental factors in Lake Dianshan during summer and autumn[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, **23**(1): 67-72.
- [43] 张宁红, 黎刚, 郁建桥, 等. 太湖蓝藻水华暴发主要特征初析[J]. *中国环境监测*, 2009, **25**(1): 71-74.
Zhang N H, Li G, Yu J Q, *et al.* Character of blue-green algal blooms outbreak in Taihu Lake[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2009, **25**(1): 71-74.
- [44] Yan X C, Xu X G, Wang M Y, *et al.* Climate warming and cyanobacteria blooms: looks at their relationships from a new perspective[J]. *Water Research*, 2017, **125**: 449-457.
- [45] Shan K, Song L R, Chen W, *et al.* Analysis of environmental drivers influencing interspecific variations and associations among bloom-forming cyanobacteria in large, shallow eutrophic lakes [J]. *Harmful Algae*, 2019, **84**: 84-94.
- [46] Paerl H W, Otten T G. Duelling 'CyanoHABs': unravelling the environmental drivers controlling dominance and succession among diazotrophic and non-N₂-fixing harmful cyanobacteria[J]. *Environmental Microbiology*, 2016, **18**(2): 316-324.
- [47] Bai F, Shi J Q, Yang S Q, *et al.* Interspecific competition between *Cylindrospermopsis raciborskii* and *Microcystis aeruginosa* on different phosphorus substrates [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**(34): 42264-42275.
- [48] Wu Z X, Shi J Q, Li R H. Comparative studies on photosynthesis and phosphate metabolism of *Cylindrospermopsis raciborskii* with *Microcystis aeruginosa* and *Aphanizomenon flos-aquae*[J]. *Harmful Algae*, 2009, **8**(6): 910-915.
- [49] Brauer V S, Stomp M, Rosso C, *et al.* Low temperature delays timing and enhances the cost of nitrogen fixation in the unicellular cyanobacterium *Cyanothece* [J]. *The ISME Journal*, 2013, **7**(11): 2105-2115.

CONTENTS

Regionalization and Analysis of PM _{2.5} and O ₃ Synergetic Prevention and Control Areas Based on Remote Sensing Data	LI Shen-xin, ZOU Bin, ZHANG Feng-ying, <i>et al.</i>	(4293)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in Guangzhou in Winter	PEI Cheng-lei, XIE Yu-tong, CHEN Xi, <i>et al.</i>	(4305)
Establishment and Application of Foshan Ozone Concentration Forecast Equation	CHEN Chen, HONG Ying-ying, TAN Hao-bo, <i>et al.</i>	(4316)
Establishment of High-Resolution Emissions Inventory in Wuhai and Its Application in Exploring the Causes of Ozone Pollution	ZHANG Rui-xin, CHU Bo, SHANG Chun-lin, <i>et al.</i>	(4327)
Investigating the Pollutants of Marine Shipping Emissions Along the East China Sea by Combining in-situ Measurements and Automatic Identification System	QIU Hao, LIU Dan-tong, WU Yang-zhou, <i>et al.</i>	(4338)
Chemical Component of Particulate Matters and VOCs Characteristics During Vehicle Brake Processes	MEN Zheng-yu, LIU Du-you, GUO Quan-you, <i>et al.</i>	(4348)
Characterization of VOCs Emissions from Caged Broiler House in Winter	CAO Tian-tian, ZHENG Yun-hao, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(4357)
Concentrations and Community Structures of Culturable Bacteria in Aerosols of Household Garbage Stations in Shanghai	LU Bing-jie, ZHANG Xiang, WANG Chuan, <i>et al.</i>	(4367)
Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emissions in Zhejiang Province from 2008 to 2018	FANG Li-jiang, YANG Yi-qun, YE Guan-qiong	(4380)
Roadmap of Coal Control and Carbon Reduction in the Steel Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target	XUE Ying-lan, ZHANG Jing, LIU Yu, <i>et al.</i>	(4392)
Carbon Emission Reduction Effect of Spatial Correlation Network Structure Characteristics: From the Perspective of Urban Agglomeration	ZHENG Hang, YE A-zhong	(4401)
Pollution and Carbon Reduction Effect of OFDI in China and Its Mechanism	BAI Zi-han, LÜ Lian-hong, ZHAO Ming-xuan, <i>et al.</i>	(4408)
Variation Characteristics of Surface Water Quality in China in Recent Years	JI Xiao-yan, HOU Huan-huan, WANG Shan-shan, <i>et al.</i>	(4419)
Distribution, Risk, and Influencing Factors of Microplastics in Surface Water of Huangshui River Basin	FAN Meng-yuan, HUANG Yi-mei, ZHANG Hai-xin, <i>et al.</i>	(4430)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Surface Water of the Fenhe River Basin and Influence Factors	ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, WANG Zhi-heng, <i>et al.</i>	(4440)
Characteristics and Causes of High-manganese Groundwater in Pearl River Delta During Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(4449)
Characteristics and Causes of Groundwater Salinization in the Plain Area of the Lower Kashgar River	LU Han, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i>	(4459)
Sources and Biogeochemical Processes of Nitrate in the Laolongdong Karst Underground River Basin, Chongqing	WANG Yu-yang, YANG Ping-heng, ZHANG Jie-ru	(4470)
Succession Pattern and Consequences of the Dominant Species During Cyanobacterial Bloom and Its Influencing Factors	OUYANG Tian, ZHAO Lu, JI Lu-lu, <i>et al.</i>	(4480)
Structural Characteristics of Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Group of Drinking Water Reservoirs by Water Transmission from Modaomen Waterway in Zhuhai	ZHANG Mo-li, WANG En-rui, CHANG Sheng, <i>et al.</i>	(4489)
Effects of Nutrients on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and Bacteria in the Phycosphere	LÜ Ping, LI Hui-li, XU Yong, <i>et al.</i>	(4502)
Effect of Aging on Adsorption of Tetracycline by Microplastics and the Mechanisms	WANG Lin, WANG Shu-xin, ZENG Xiang-ying, <i>et al.</i>	(4511)
Effect of Colloids in Sediment and Soil on Their Sorption Behavior of Chloramphenicol	YAN Cai-xia, LUO Yan-qing, NIE Ming-hua, <i>et al.</i>	(4522)
Historical Antibiotic Stress Changed the Effects of Sulfamethoxazole and Trimethoprim on Activated Sludge: ARGs and Potential Hosts	ZHANG Zhong-xing, FAN Xiao-yan, LI Xing, <i>et al.</i>	(4536)
Spatial Distribution and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-Zinc Mining Area, Yangshuo	CHEN Meng, PAN Yong-xing, HUANG Yi-xiang, <i>et al.</i>	(4545)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Baiyangdian Lake	ZHENG Fei, GUO Xin, TANG Ming-yang, <i>et al.</i>	(4556)
Spatial Differentiation and Influencing Factor Analysis of Soil Heavy Metal Content at Town Level Based on Geographic Detector	GONG Cang, WANG Liang, WANG Shun-xiang, <i>et al.</i>	(4566)
Heavy Metal Emissions from Coal-fired Power Plants and Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risks in Surrounding Soils	CHE Kai, CHEN Chong-ming, ZHENG Qing-yu, <i>et al.</i>	(4578)
Enrichment Factors, Health Risk, and Source Identification of Heavy Metals in Agricultural Soils in Semi-arid Region of Hainan Island	YANG Jian-zhou, GONG Jing-jing, WANG Zhen-liang, <i>et al.</i>	(4590)
Speciation and Pollution Assessment of Heavy Metals in Mangrove Surface Sediments in Jiulong River Estuary	ZHANG Hua-lan, YU Rui-lian, WAN Rui-an, <i>et al.</i>	(4601)
Status of Heavy Metal in Organic Fertilizers in Main Tea Growing Regions of China	YI Xiao-yun, FANG Li, YANG Xiang-de, <i>et al.</i>	(4613)
Accumulation Characteristics and Sources of PAEs in Agricultural Soils in Gansu Province	CHEN Yu-yu, ZHANG Guang-quan, ZHANG Yang, <i>et al.</i>	(4622)
Distribution Characteristics of Soil Phosphorus Forms and Phosphatase Activity at Different Altitudes in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	GAO Yi-lun, FANG Fang, TANG Zi-chao, <i>et al.</i>	(4630)
Characteristics of Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Other Soil Physical and Chemical Factors in Cotton Fields with Different Continuous Cropping Years in the Oasis on the Northern Edge of Tarim Basin	LI Xin-zhu, GONG Lu, TANG Jun-hu, <i>et al.</i>	(4639)
Response of Soil Respiration Rates to Soil Temperature and Moisture at Different Soil Depths of <i>Caragana korshinskii</i> Plantation in the Loess-Hilly Region	SUN Ya-rong, WANG Ya-juan, ZHAO Min, <i>et al.</i>	(4648)
Influence of Biochar Application on Soil Nitrate Leaching and Phosphate Retention: A Synthetic Meta-analysis	JIANG Zhi-xiang, CUI Shuang, ZHANG Xin, <i>et al.</i>	(4658)
Role and Mechanism of Low Molecular-Weight-Organic Acids in Enhanced Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soil	FANG Zhi-guo, XIE Jun-ting, YANG Qing, <i>et al.</i>	(4669)
Remediation Effect and Mechanism of Inorganic Passivators on Cadmium Contaminated Acidic Paddy Soil	ZHANG Jian, KONG Fan-yi, LU Sheng-gao	(4679)
Mechanism of Lead-zinc Enrichment and Resistance of Spent Mushroom Compost to Lead-Zinc Slag in <i>Koeleria paniculata</i>	XIE Tian-zhi, CHEN Yong-hua, SU Rong-kui, <i>et al.</i>	(4687)
Phosphorus Enrichment Efficiency of CaO ₂ @FA Composites and the Effect of Its Recovered Material on Soil Improvement	YUE Wei, LI Da-peng, WU Ling-yu, <i>et al.</i>	(4697)
Effects of Early Rice Straw Returning with Reducing Potassium Fertilizer on Late Rice Yield and Soil Fertility	HUANG Qiao-yi, HUANG Jian-feng, HUANG Xu, <i>et al.</i>	(4706)
Effects of Continuous Straw Returning with Chemical Fertilizer on the Carbon Pool and Crop Yield of Rice-Rape Rotation Soils	CAI Ying, FU Si-wei, ZHANG Bo-rui, <i>et al.</i>	(4716)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Combined with Straw Application on Diazotrophic Communities in a Double Rice Cropping System	CHEN Kai-peng, WEI Ju-xian, CHEN Dan, <i>et al.</i>	(4725)
Impacts of Co-application of Chemical Fertilizer Reduction and Organic Material Amendment on Fluvio-aquic Soil Microbial N-cycling Functional Gene Abundances and N-converting Genetic Potentials in Northern China	LI Sheng-jun, HU He, LI Gang, <i>et al.</i>	(4735)
Response Characteristics of Soil Microbial Community Under Long-term Film Mulching	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, DING Ji-na, <i>et al.</i>	(4745)
Effects of Long-term Straw Returning on Fungal Community, Enzyme Activity and Wheat Yield in Fluvio-aquic Soil	MA Lei, LI Yan, WEI Jian-lin, <i>et al.</i>	(4755)
Effects of Soil Amendments on the Bacterial Diversity and Abundances of Pathogens and Antibiotic Resistance Genes in Rhizosphere Soil Under Drip Irrigation with Reclaimed Water	CUI Bing-jian, CUI Er-ping, LIU Chun-cheng, <i>et al.</i>	(4765)
Effect of Nitrogen on the Phytoremediation of Cd-PAHs Co-contaminated Dumpsite Soil by Alfalfa (<i>Medicago sativa</i> L.) and on the Soil Bacterial Community Structure	LI Yi-jia, MA Jun-wei, LI Yu-qian, <i>et al.</i>	(4779)
Effect of Antibiotic-Degrading Bacteria on Maturity and Bacterial Community Succession During Pig Manure Composting	LI Wei-lin, ZHANG Xin, MA Jun-wei, <i>et al.</i>	(4789)