

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.5
第40卷 第5期

目次

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

异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系

王振方^{1,2,3}, 张玮^{1,2,3*}, 杨丽^{1,2,3}, 徐玉萍⁴, 赵风斌⁵, 王丽卿^{1,2,3*}

(1. 上海海洋大学农业部鱼类营养与环境生态研究中心, 上海 201306; 2. 上海海洋大学水产种质资源发掘与利用教育部重点实验室, 上海 201306; 3. 上海海洋大学水产科学国家级实验教学示范中心, 上海 201306; 4. 暨南大学生命科学与技术学院, 广州 510632; 5. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 异龙湖是云南省第九大湖泊, 属典型的高原浅水湖泊。为了解该湖不同湖区浮游植物群落特征, 于2013年8月至2014年7月逐月对该湖西区、东区和沉水植被恢复示范区浮游植物及环境因子进行调查分析。结果表明, 不同湖区生境条件具有空间异质性, 示范区和西区水体总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₄⁺-N)、五日生化需氧量(BOD₅)、透明度(SD)、浊度(Turb.)和电导率(EC)等理化指标无显著差异, 而与东区有显著差异性($P < 0.05$)。3个湖区浮游植物密度均以蓝藻门所占比重最大, 浮游植物优势类群不同, 西区细小平裂藻(*Merismopedia tenuissima*)优势度最高, 东区拉氏拟柱孢藻(*Cylindrospermopsis raciborskii*)和湖生伪鱼腥藻(*Pseudanabaena limnatica*)优势度最高, 示范区细小平裂藻和拟项圈藻(*Anabaenopsis* sp.)优势度最高。通过主坐标分析(PCoA)对3个湖区浮游植物群落β多样性进行比较发现, 西区和示范区群落结构较为相似, 而与东区具有极显著的差异($P < 0.01$)。运用冗余分析(RDA)探讨异龙湖浮游植物群落特征与环境因子的关系, 结果表明, TN、TP、BOD₅和SD是影响异龙湖浮游植物群落分布的主要环境因子, NH₄⁺-N、EC、高锰酸盐指数和pH值对浮游植物群落也有一定的影响。

关键词: 浮游植物; 异龙湖; 高原湖泊; 空间异质性; 富营养化

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)05-2249-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.201810157

Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China

WANG Zhen-fang^{1,2,3}, ZHANG Wei^{1,2,3*}, YANG Li^{1,2,3}, XU Yu-ping⁴, ZHAO Feng-bin⁵, WANG Li-qing^{1,2,3*}

(1. Centre for Research on Environmental Ecology and Fish Nutrient (CREEFN) of the Ministry of Agriculture, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4. College of Life Science and Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 5. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Yilong Lake, a shallow, plateau lake, is the ninth largest water body in the Yunnan Province, China. In order to figure out the characteristics of phytoplankton communities in different regions of this lake, the phytoplankton and environmental factors in the west region, east region, and in a submerged macrophytes restoration demonstration region were monthly investigated and analyzed from August 2013 to July 2014. The results showed that the habitats in different regions were spatially heterogeneous. Total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), ammonia nitrogen (NH₄⁺-N), five-day biochemical oxygen demand (BOD₅), transparency (SD), turbidity (Turb.), and electrical conductivity (EC) had no significant differences between the demonstration region and the west region, but these two regions showed significant differences in comparison with the east region ($P < 0.05$). The largest phytoplankton density was Cyanophyta and the dominant species in the three regions were different. *Merismopedia tenuissima* had the highest dominance in the west region; *Cylindrospermopsis raciborskii* and *Pseudanabaena limnatica* were the most dominant taxa in the east region; while *Merismopedia tenuissima* and *Anabaenopsis* sp. were dominant in the *O. uminata* restoration demonstration region. PCoA compared the β diversity of phytoplankton communities in the three different regions based on the entire year investigations. It was found that the community structures of the west region and *O. uminata* restoration demonstration region were similar ($P > 0.05$), but they were significantly different from the community from the east region ($P < 0.01$). Redundant analysis (RDA) showed that TN, TP, BOD₅, and SD were the main environmental factors affecting the distribution of phytoplankton community in Yilong Lake. In addition, NH₄⁺-N, EC, permanganate index, and pH also have a certain effect on the phytoplankton community.

Key words: phytoplankton; Yilong Lake; plateau lake; spatial heterogeneity; eutrophication

收稿日期: 2018-10-21; 修订日期: 2018-12-08

基金项目: 云南省重大科技项目(2013FD048)

作者简介: 王振方(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为藻类生态学, E-mail: aquawangzf@163.com

* 通信作者, E-mail: weizhang@shou.edu.cn; lqwang@shou.edu.cn

浮游植物是水域生态系统中的初级生产者^[1], 是生物地球化学循环的基础环节^[2], 除了能对水生态系统的稳定起重要的调节作用外, 还能对水环境的变化做出最直接的响应^[3], 因而常被用作评价湖泊生态状态的重要指标^[4]. 在不同类型的湖泊中, 影响浮游植物群落变化的主导因子各不相同^[5~9]. Habib 等^[5]研究苏格兰高地南部 Lomond 湖表明, 该湖浮游植物群落主要受水温、溶解氧、透明度和高锰酸盐指数的影响; Flores 等^[6]对意大利南部地中海气候的浅水湖泊 Arancio 湖的研究表明, 电导率对浮游植物的影响最大; Arhonditis 等^[7]研究了温带地区的华盛顿湖, 发现透明度、总磷和捕食压力对浮游植物的影响最大. 国内学者对长江流域的湖泊研究发现, 水体氮、磷浓度波动、温度升高及透明度的变化等均可能造成蓝藻和硅藻水华的暴发^[8, 9]; 还有研究表明, 沉水植物可通过竞争营养盐、释放化感物质、为浮游动物提供庇护所等方式抑制藻类生长, 使水体藻密度降低, 并改变浮游植物群落结构^[10~12].

很多研究针对整个湖泊水环境因子对浮游植物群落变化的影响进行了报道^[13~15], 但由于不同湖区的湖岸形态、水下地形和风力扰动强度不同, 水生植被分布范围不同, 以及人为干扰程度的不同, 湖泊不同区域的生境常常呈现一定的空间异质性^[16~19]. 已有一些研究表明, 湖泊中不同湖区的生境异质性是引起浮游植物群落结构差异性的重要原因, 如叶琳琳等^[20]的研究发现, 太湖夏季不同湖区之间浮游植物群落不同, 大部分湖区水草较少, 为“藻型水体”, 而在贡湖湾、东太湖等湖区沉水植物较多, 水体中藻类丰度和种类都与梅梁湾差别较大; 孙祥等^[21]对天目湖的研究也表明, 河流区、过渡区、湖泊区因营养盐条件、水温、水体流速、湖面宽度、固体颗粒物(底泥沙、颗粒态磷等)悬浮程度不同, 导致浮游植物总生物量存在明显的空间分

布异质性. 另外, 生态浮床或人工围隔的建立对浮游植物群落结构及其生物多样性也有一定的影响^[22, 23]. 尽管国内学者在湖泊生境异质性与浮游植物群落关系方面已开展了一些研究, 但这些研究多集中于平原地区水体或长江中下游水体, 而有关高原湖泊的研究还鲜见报道.

异龙湖(东经 102°28' ~ 102°38', 北纬 23°28' ~ 23°42') 是云南省第九大湖泊, 平均海拔 1 407.11 m, 为典型的高原浅水湖泊. 近年来, 因降雨量变化、人为干扰等因素, 逐渐演变为重度富营养化湖泊^[24~27]. 由于气候因素和人为不合理的农业灌溉, 导致该湖水位不断下降, 东西区分界逐渐明显; 西区沉水植物茂盛(略呈沼泽化), 呈“草型湖区”, 东区沉水植物分布较少, 藻类密度高, 呈“藻型湖区”^[28].

本文于 2013 年 8 月至 2014 年 7 月对异龙湖东区和西区, 以及东区南部的人工围隔沉水植物修复示范区展开研究, 对 3 个湖区的水环境因子和浮游植物进行逐月调查, 分析不同湖区浮游植物群落差异和原因, 通过了解不同湖区生态系统特征, 以期对异龙湖水环境保护和生态修复提供基础资料.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

异龙湖湖面面积约 31 km², 流域面积约 360 km²^[29]. 东西区分界明显, 西区平均水深 102 cm, 沉水植物覆盖率约 60%, 主要有小茨藻(*Najas minor*)、黄花狸藻(*Utricularia aurea*)、篦齿眼子菜(*Potamogeton pectinatus*)等, 东区年平均水深 208 cm, 沉水植被覆盖率约为 15%, 主要为狐尾藻(*Myriophyllum verticillatum*)和少量眼子菜(*Potamogeton* spp.)^[28]; 2013 年 6 月起, 开始在东区的南部浅水区建设沉水植被修复示范区, 面积为 3.7 hm², 平均水深 140 cm, 主要种植物种为: 刺苦

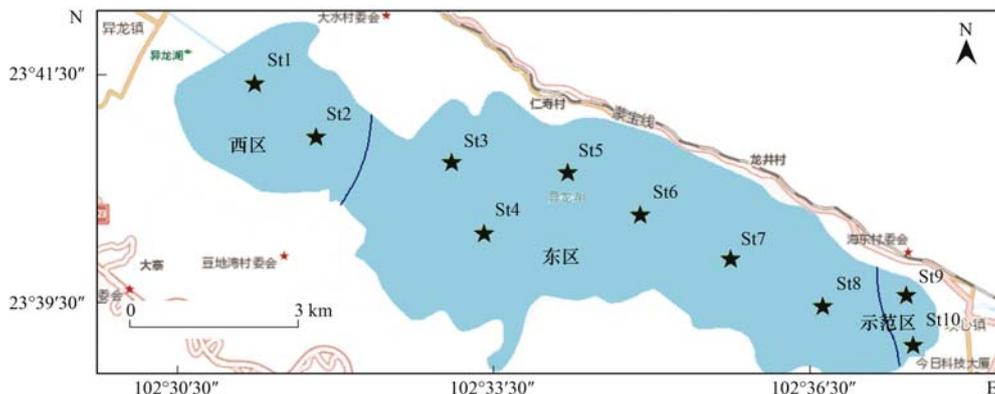


图 1 异龙湖采样点示意

Fig. 1 Sampling sites in Yilong Lake

草 (*Vallisneria spinulosa*)、海菜花 (*Ottelia acuminata* var. *acuminata*)、轮叶黑藻 (*Hydrilla verticillata*) 等。本研究根据现有条件, 将异龙湖分为 3 个湖区展开调查。具体采样点设置如图 1 所示。

1.2 样品采集与处理

2013 年 8 月至 2014 年 7 月, 逐月对异龙湖西区 (St1、St2)、东区 (St3 ~ St8) 和示范区 (St9、St10) 进行样品采集。用 5 L 有机玻璃采水器采集 0.5 m 和 1 m 的水样, 并进行混匀, 用于浮游植物样品分析和水质指标测定。

浮游植物分析: 取 1 L 混合水样用 15% 鲁哥氏碘液和 4% 福尔马林溶液现场固定, 在实验室内经 48 h 沉淀, 浓缩至 50 mL, 将浓缩后的样品摇匀, 取 0.1 mL 于帕默尔计数框内, 在 400 倍光学显微镜下鉴定, 具体处理和鉴定方法参照文献 [30, 31]。

水质参数: 透明度 (SD) 采用塞氏盘现场测定; 溶解氧 (DO)、电导率 (EC) 和 pH 值采用 YSI 多参数水质分析仪现场测定; 取 500 mL 混合水样, 4 h 内带回实验室, 进行总氮 (TN)、总磷 (TP)、氨氮

(NH_4^+-N)、高锰酸盐指数、五日生化需氧量 (BOD_5) 和浊度 (Turb.) 等指标的测定, 具体测定参考国家标准方法 [32]。

1.3 数据统计与分析

浮游植物群落与环境因子的关系运用 CANOCO 4.5 软件进行分析, 首先使用去趋势对应分析 (DCA) 对浮游植物群落数据进行检验, 以选择合适的排序和分析方法, 本文根据检验结果 (排序轴最大为 $1.33 < 3$) 选用冗余分析 (RDA), 并进行蒙特卡洛置换检验, 逐步筛选出对浮游植物群落特征具有显著性影响的环境因子进行分析; 采用 R 3.2.5 中的 *vegan* 包进行主坐标分析 (PCoA), 对 3 个湖区间浮游植物群落结构相似性及差异性比较; 其它图表在 Origin 9.0 和 Excel 2007 中完成。

2 结果与分析

2.1 水环境因子

2013 年 8 月至 2014 年 7 月异龙湖 3 个湖区的 TN、TP、 NH_4^+-N 、 BOD_5 、Turb. 和 EC 均表现为东区 > 西区 \geq 示范区 (图 2), 西区和示范区的 TN、TP、

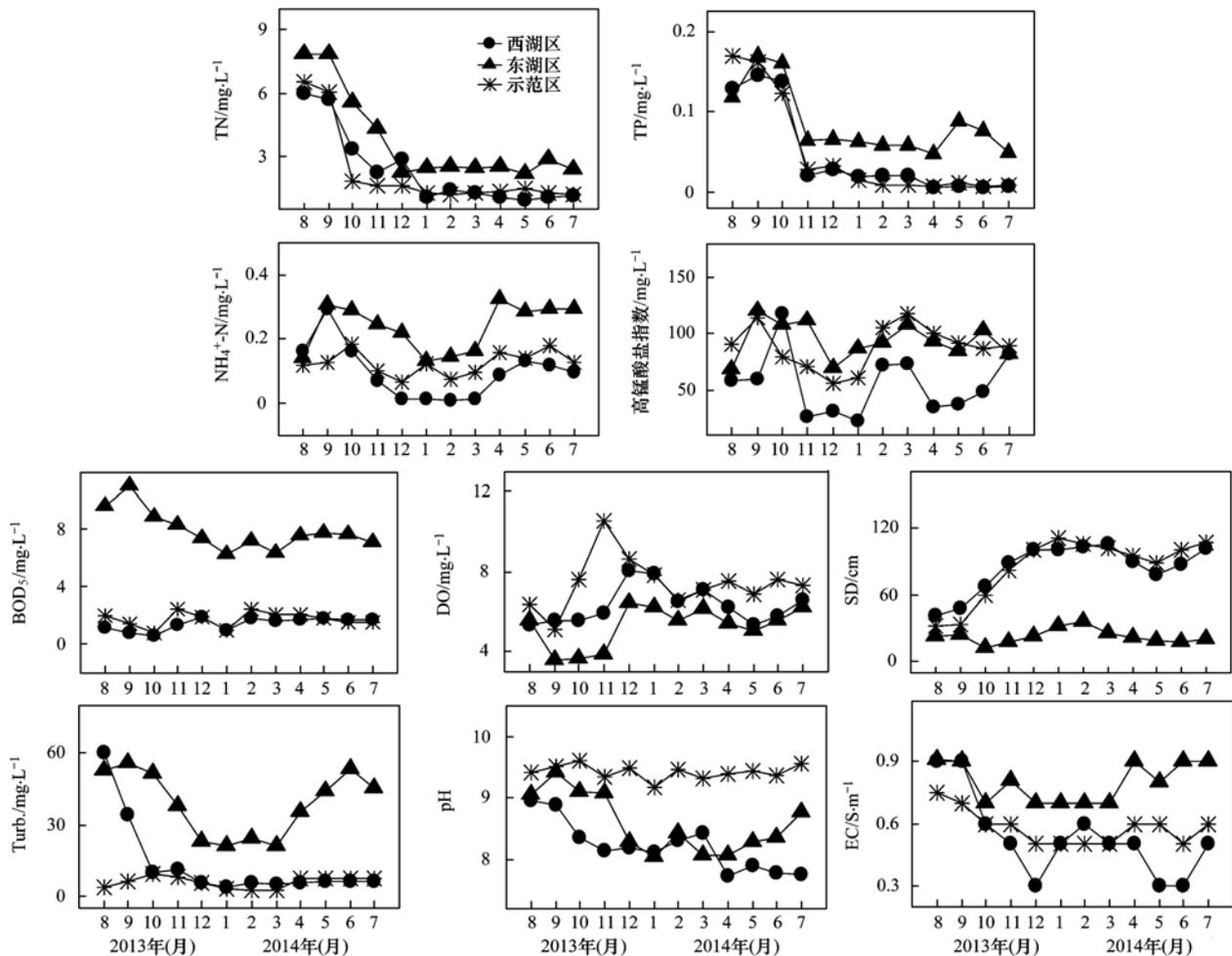


图 2 3 个湖区水质参数月变化

Fig. 2 Monthly variation of water quality parameters in three lake regions

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 BOD_5 、SD、Turb. 和 EC 等水质指标无显著差异 ($P > 0.05$), 但与东区有显著地差异性 ($P < 0.05$), 且东区 TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 BOD_5 、Turb. 和 EC 等指标测定值在全年水平上普遍高于西区和示范区, 3 个湖区间高锰酸盐指数未见明显区别. 此外, 3 个湖区环境因子呈现出一定的季节变化, TN 和 TP 在夏季最高, 冬季最低; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 Turb. 表现为夏季和春季较高, 秋季和冬季较低的趋势; DO 和 SD 的季节变化趋势与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 相反; SD 和 DO 在冬季较高, pH 值为示范区最高. 根据 GB 3838-2002, 3 个湖区 TN、TP 等指标在多个月份均超过 V 类标准, 湖区整体呈富营养化状态.

2.2 浮游植物

2.2.1 浮游植物组成

3 个湖区共鉴定出浮游植物 8 门 211 种 (表 1), 绿藻、硅藻、蓝藻和裸藻这 4 个门类占比重较大, 西区和示范区相同种类多, 而与东区所存在的种类有显著差异 ($P < 0.05$). 西区共 8 门 152 种, 绿藻门最多, 占总数量的 46.71%, 其次为硅藻门和蓝藻门, 分别占比 19.74% 和 17.11%. 东区共 7 门 161 种, 绿藻门占总数量的 50.31%, 其次为硅藻门和蓝藻门, 分别占比 18.01% 和 16.77%. 示范区共 7 门 139 种, 绿藻门占总数量的 42.45%, 蓝藻门和硅藻门分别占比 22.30% 和 21.58%. 对于 3 个湖区而言, 共有 22 种仅在西区出现, 25 种仅在东区出现, 23 种仅在示范区出现.

表 1 3 个湖区浮游植物种类组成

门类	西区	东区	示范区	门类	西区	东区	示范区
黄藻门	2	3	2	硅藻门	30	29	30
甲藻门	3	4	3	蓝藻门	26	27	31
金藻门	3	0	0	裸藻门	14	14	12
隐藻门	3	3	2	绿藻门	71	81	59

2.2.2 浮游植物密度

3 个湖区浮游植物相对丰度均显示出蓝藻门占绝对优势 (图 3), 但也存在明显的差别. 西区蓝藻门密度占比 79.48%, 硅藻门占比 8.28%, 绿藻门占比 5.99%, 其余几个门类共占比 6.25%; 绿藻门在夏季 (2013 年 9 月) 占比较大, 而金藻门在冬季 (2013 年 12 月至 2014 年 1 月) 占比较大. 东区多样性较低, 蓝藻门全年占优, 密度占比 94.88%, 绿藻门占比 1.83%, 硅藻门占比 1.57%, 其余几个门类共占比 1.72%; 且绿藻门和裸藻门仅在 2013 年 9 月占有一定的比重, 其余月份均为蓝藻门最高. 示范区蓝藻门密度占比 87.50%, 绿藻门占比 6.71%, 裸藻门占比 2.72%, 其余几个门类共占比

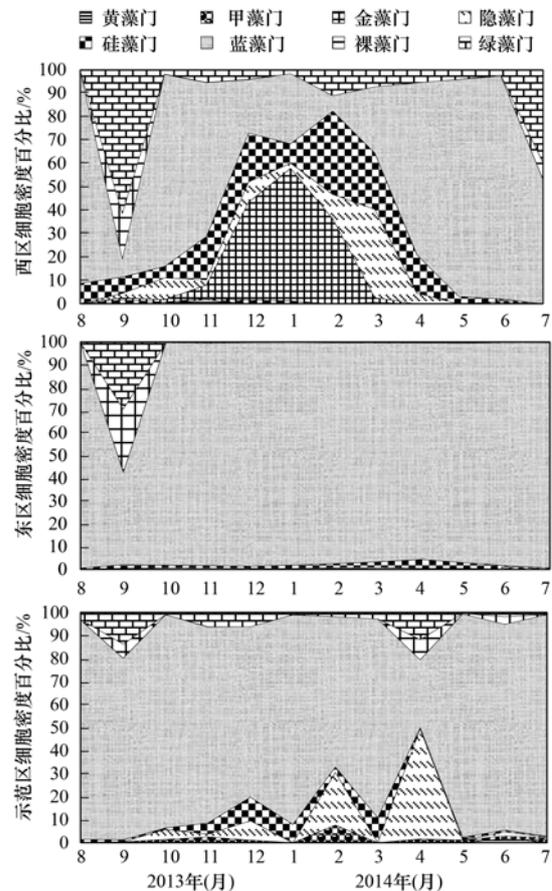


图 3 3 个湖区浮游植物相对细胞丰度月变化

Fig. 3 Monthly variation of phytoplankton relative abundance in three lake regions

3.07%.

通过 PCoA 进行浮游植物群落 β 多样性比较, PCoA1 (44.57%) 和 PCoA2 (14.55%) 代表能最大区分 3 个湖区浮游植物群落特征的第一和第二主坐标轴, 仅这两轴形成的第一个平面即解释 3 个湖区所有差异的 59.12%, 说明 PCoA 能够较好地反映 3 个湖区浮游植物群落的 β 多样性 (图 4). 降维后西区 (A) 中心坐标为 (0.31, 0.11), 示范区 (C) 中心坐标为 (0.30, 0.03), 东区 (B) 中心坐标为 (-0.25, -0.01), A 与 C 湖区距离较近, 而与 B 相距较远, 通过 ANOVA 对各组浮游植物群落的 Jaccard 排序距离分析发现, 西区和示范区群落特征较为相似, 两者与东区具有极显著的差异 ($P < 0.01$), 见图 4.

2.2.3 浮游植物优势种

3 个湖区浮游植物优势种主要集中在蓝藻门、绿藻门和硅藻门这 3 个门类 (表 2). 其中西区共 8 种, 细小平裂藻 (*Merismopedia tenuissima*) 优势度最高为 0.19; 东区共 7 种, 拉氏拟柱孢藻 (*Cylindrospermopsis raciborskii*) 和湖生伪鱼腥藻 (*Pseudanabaena limnatica*) 优势度最高, 分别为 0.24

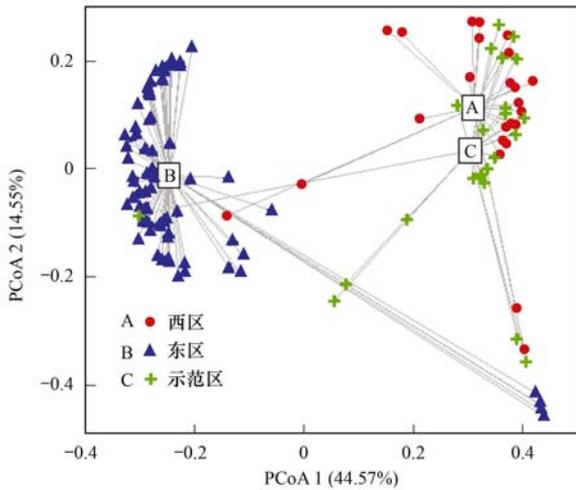


图 4 3 个不同湖区浮游植物群落 β 多样性 PCoA 分析

Fig. 4 Principal Coordinate Analysis of phytoplankton community β diversity in three lake regions

表 2 3 个湖区浮游植物优势种及优势度

Table 2 Dominant species and dominance index of phytoplankton in three lake regions

门类	优势种及拉丁名	西区	东区	示范区
硅藻门	短线脆杆藻 (<i>Fragilaria brevistriata</i>)	0.06	—	—
	具缘微囊藻 (<i>Mcrocystis marglnata</i>)	0.03	—	—
	水华微囊藻 (<i>M. flos-aquae</i>)	0.06	—	—
	螺旋鞘丝藻 (<i>Lyngbya contorta</i>)	—	0.04	—
	细鞘丝藻 (<i>Leptolyngbya</i> sp.)	—	0.03	—
蓝藻门	拟项圈藻 (<i>Anabaenopsis</i> sp.)	—	—	0.10
	拉氏拟柱孢藻 (<i>Cylindrospermopsis raciborskii</i>)	—	0.24	0.05
	细小平裂藻 (<i>Merismopedia tenuissima</i>)	0.19	0.16	0.15
	优美平裂藻 (<i>M. elegans</i>)	0.02	0.10	0.04
	湖生伪鱼腥藻 (<i>Pseudanabaena limntica</i>)	0.05	0.21	0.09
	史氏棒胶藻 (<i>Dactylococcopsis acicularis</i>)	0.06	0.06	—
绿藻门	微小四角藻 (<i>Tetraedron minimum</i>)	0.05	—	—
	普通小球藻 (<i>Chlorella vulgaris</i>)	—	—	0.04

藻、优美平裂藻、螺旋鞘丝藻、细鞘丝藻和湖生伪鱼腥藻的密度远高于其他两区,并且在东区全年变幅较大,春季和夏季的密度普遍高于秋季和冬季;示范区各优势种的密度仅在 2013 年的 8 月和 9 月较高,其他月份较低.综合而言,东区浮游植物平均密度普遍高于西区和示范区,且多呈现出夏季或秋季较高,冬季较低的趋势.

2.3 浮游植物群落与环境因子的关系

利用蒙特卡洛置换检验对环境因子进行筛选,最终确定 TN、TP、 NH_4^+ -N、SD、 BOD_5 、Turb.、EC 和 pH 等 8 个因子进行 RDA 分析,排序轴 1 和轴 2 对生物变量的解释量为 38.6%,表明运用 RDA 能够较好地反映整个浮游植物群落与环境因子的关系(图 6).与轴 1 相关性较强的环境因子有 BOD_5 、 NH_4^+ -N 和 pH,相关系数分别为 0.5057、-0.4845 和 -0.3251,与轴 2 相关性较强的环境因子有 TN 和 TP,相关系数分别为 0.0609 和 -0.0427.东区

和 0.21;示范区共 6 种,细小平裂藻和拟项圈藻 (*Anabaenopsis* sp.) 优势度最高,分别为 0.15 和 0.10.短线脆杆藻 (*Fragilaria brevistriata*)、具缘微囊藻 (*Mcrocystis marglnata*)、水华微囊藻 (*M. flos-aquae*) 和微小四角藻 (*Tetraedron minimum*) 仅在西区占一定优势,螺旋鞘丝藻 (*Lyngbya contorta*) 和细鞘丝藻 (*Leptolyngbya* sp.) 仅在东区占优势,拟项圈藻和普通小球藻 (*Chlorella vulgaris*) 仅在示范区占优势.

3 个湖区浮游植物优势种密度月变化如图 5,在 2013 年 8 月,西区具缘微囊藻、水华微囊藻、史氏棒胶藻 (*Dactylococcopsis acicularis*)、短线脆杆藻和细小平裂藻平均密度远高于其他两区,分别为 6.35×10^7 、 6.21×10^7 、 22.15×10^7 、 6.58×10^7 和 17.47×10^7 cells·L⁻¹;东区多个月份的细小平裂

浮游植物群落与 TN、TP、Turb.、EC、 BOD_5 、 NH_4^+ -N 和 pH 呈现正相关,与 SD 和 NH_4^+ -N 呈负相关;西区浮游植物群落与 TN、TP、SD 和 pH 呈正相关,与 BOD_5 和 NH_4^+ -N 呈负相关;示范区与西区排序特征更相近(图 6).总体而言,TN、TP、 BOD_5 和 SD 是影响异龙湖浮游植物群落变化的主要环境因子.

3 讨论

对异龙湖 3 个湖区浮游植物群落相似性及差异性进行 PCoA 分析表明(图 4),西区和示范区浮游植物群落结构表征较为相似 ($P > 0.05$),但与东区有极显著差异 ($P < 0.01$),且由图 3 和图 5 也可看出,在不同时期或不同季节条件下 3 个湖区出现的浮游植物优势门类及种类不同,夏季水温较高有利于蓝藻等类群生物量增加^[20],耐受弱光和低温条件的硅藻在冬季可成为优势种^[33].综合而言,3 个

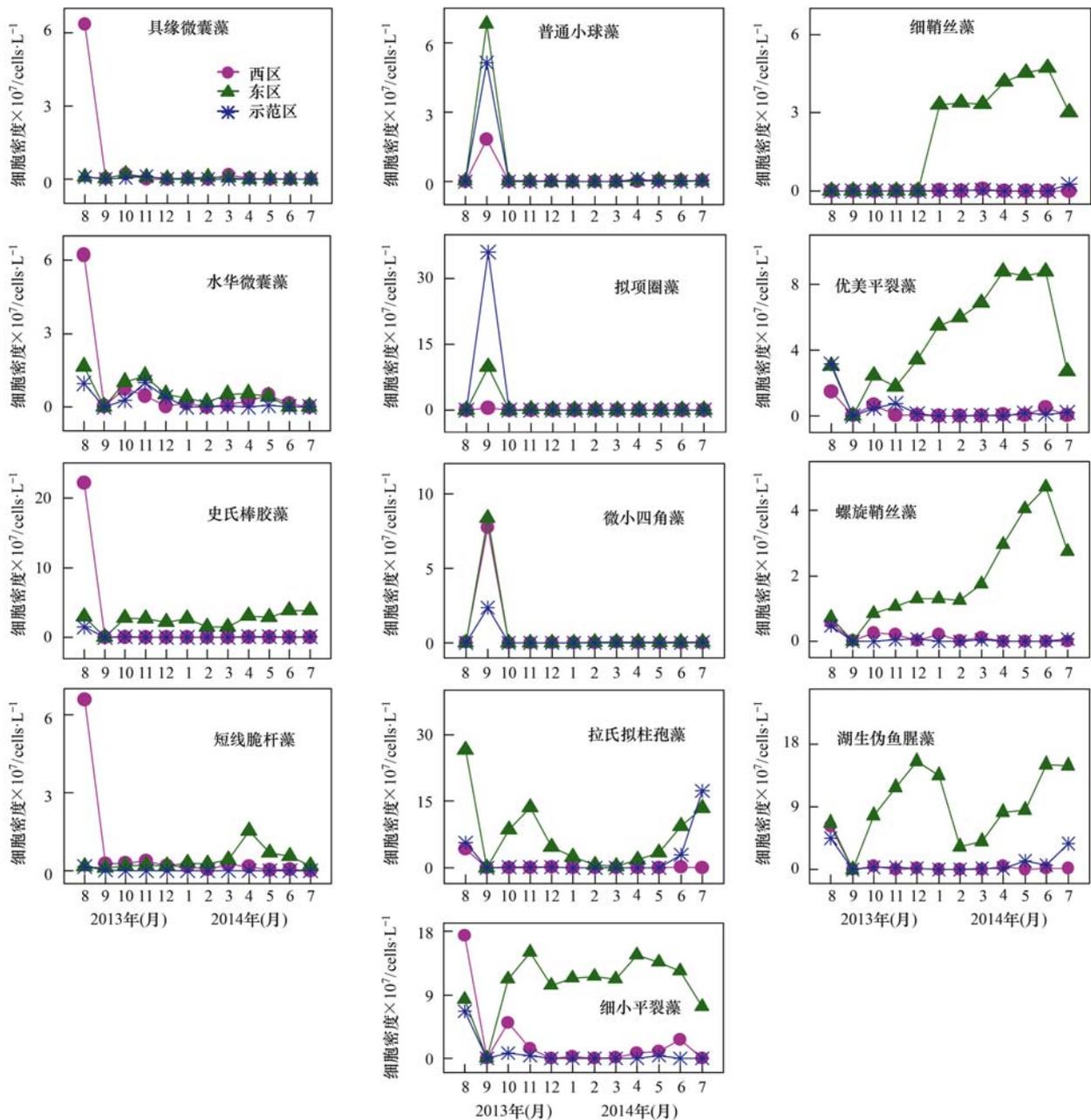


图5 3个湖区浮游植物优势种丰度的月变化

Fig. 5 Monthly abundance variation of dominant phytoplankton species in three lake regions

湖区浮游植物种类均以易暴发水华的蓝藻^[11]和喜富营养化水体的绿藻物种^[34, 35]占主导地位(表1和表2),说明3个湖区整体呈富营养化状态,但不同湖区代表性物种不同,说明这3个湖区的富营养化程度并不同。水质分析表明,西区和示范区氮磷等营养盐条件也较为相似,而与东区差异显著($P < 0.05$); BOD_5 和透明度也与东区不同($P < 0.05$),表明异龙湖不同湖区存在生境条件空间异质性(图2)。陈洋等^[36]和沈爱春等^[37]对太湖不同湖区浮游植物群落结构特征与环境因子的关系研究也表明,不同湖区浮游植物群落结构特征不同,且影响浮游植物群落演替的主导环境因子也不同。

生境异质性会造成浮游植物群落特征和空间分布格局的变化,而浮游植物种类和数量也在很大程度上响应水生态系统的结构和功能的状态^[38]。已有研究表明,氮磷营养盐、温度、光照、DO和SD等是影响浮游植物群落分布的重要因素^[39-41],本文通过对水质因子和浮游植物群落RDA分析也验证了前人的部分结果。分析表明TN、TP、 BOD_5 和SD是影响异龙湖3个湖区浮游植物群落差异的主导因子,EC、Turb.、 NH_4^+-N 和pH对浮游植物群落特征也有一定的影响(图6)。西区浮游植物密度低于东区,但多样性高于东区,可能是由于水体SD较高,湖区面积较小,受湖泊水动力和气象条件的

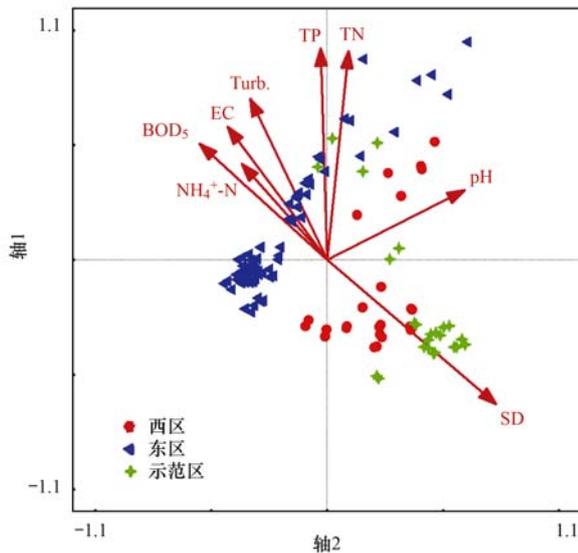


图6 浮游植物群落与环境因子 RDA 分析
Fig. 6 Redundancy analysis of phytoplankton community and environmental factors

影响较小,水生植被覆盖率高(约60%)^[28],部分氮磷等营养盐被水生植物吸收或存储,与藻类的生长形成营养物质的竞争关系;李灵慧等^[10]和路娜等^[42]对东太湖和巢湖的研究也证明了这一结果.由图2和图5可看出,西区的优势蓝藻类群微囊藻的密度与TN和TP呈正相关,而与SD呈现负相关,由于蓝藻门在适宜氮磷比、透明度及适宜温度的条件下可分泌他感物质^[43],改变周围pH及Turb.,抑制了其他藻类的生长^[14,44],使湖区浮游植物群落结构发生改变.东区浮游植物密度相对较高,但群落特征单一,蓝藻全年占优,而此湖区Turb.和BOD₅较高,SD较低,TN年平均为3.75 mg·L⁻¹,TP年平均为0.09 mg·L⁻¹,使喜富营养化水体的拉氏拟柱孢藻和湖生伪鱼腥藻占优势,并且抑制了其它门类浮游植物的生长.有研究表明,许多蓝藻种类能够适应低光、高温等恶劣生境,从而易在生态演替中成为优势种^[45,46].在调查初期,示范区正进行水生植被刺苦草、海菜花的恢复与重建,覆盖面积约3.7 hm²^[28],底质扰动导致此区初始SD较低(2013年9月仅68 cm),TN、TP和Turb.较高(图2),优势类群主要是拟项圈藻和普通小球藻.后期水环境逐渐恢复稳定,水质条件逐渐优于东湖区,且浮游植物群落特征也趋于不同.另外,有研究表明沉水植物除可吸收水体营养盐外,还可释放出能抑制藻类生长的化感物质,造成某些类群藻类密度降低,从而影响浮游植物群落结构^[47,48].因此,异龙湖的3个湖区水质参数及浮游植物群落特征的差异性,也可能与不同湖区中水生植物的种类、丰度和覆盖度有关.

4 结论

(1) 调查期间,异龙湖共鉴定出浮游植物8门211种,其中西区152种,东区161种,示范区139种;3个湖区均以绿藻门种类数最多,蓝藻门密度最高,但代表性物种并不相同.

(2) 西区和沉水植物修复示范区的浮游植物群落β多样性无显著差异($P > 0.05$),而与东区有极显著差异($P < 0.01$).

(3) 3个湖区水体总体呈现富营养化状态,但东区水质状况劣于西区和示范区.

(4) 多元统计分析表明,水环境因子TN、TP、BOD₅和SD是影响异龙湖3个湖区浮游植物群落特征差异的主要因素.

参考文献:

- [1] Salmaso N. Long-term phytoplankton community changes in a deep subalpine lake: responses to nutrient availability and climatic fluctuations [J]. *Freshwater Biology*, 2010, **55**(4): 825-846.
- [2] 赵旭辉,孔繁翔,谢薇薇,等.全球CO₂水平升高对浮游植物生理和生态影响的研究进展[J]. *生态学报*, 2012, **32**(21): 6880-6891.
Zhao X H, Kong F X, Xie W W, et al. Effect of enhanced CO₂ level on the physiology and ecology of phytoplankton [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(21): 6880-6891.
- [3] Liu C Q, Liu L S, Shen H T. Seasonal variations of phytoplankton community structure in relation to physico-chemical factors in Lake Baiyangdian, China [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, **2**: 1622-1631.
- [4] Ptacnik R, Lepistö L, Willén E, et al. Quantitative responses of lake phytoplankton to eutrophication in Northern Europe [J]. *Aquatic Ecology*, 2008, **42**(2): 227-236.
- [5] Habib O A, Tippett R, Murphy K J. Seasonal changes in phytoplankton community structure in relation to physico-chemical factors in Loch Lomond, Scotland [J]. *Hydrobiologia*, 1997, **350**(1-3): 63-79.
- [6] Flores L N, Barone R. Phytoplankton dynamics in two reservoirs with different trophic state (Lake Rosamarina and Lake Arancio, Sicily, Italy) [J]. *Hydrobiologia*, 1998, **369-370**: 163-178.
- [7] Arhonditsis G B, Winder M, Brett M T, et al. Patterns and mechanisms of phytoplankton variability in Lake Washington (USA) [J]. *Water Research*, 2004, **38**(18): 4013-4027.
- [8] Crossetti L O, de M. Bieudo C E. Phytoplankton as a monitoring tool in a tropical urban shallow reservoir (Garças Pond): the assemblage index application [J]. *Hydrobiologia*, 2008, **610**(1): 161-173.
- [9] 胡芳,许振成,姚玲爱,等.剑潭水库浮游植物群落特征与水环境因子关系研究[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(4): 950-958.
Hu F, Xu Z C, Yao L A, et al. Community structure of phytoplankton and its relationship with aquatic environment factors in Jiantan Reservoir [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(4): 950-958.
- [10] 李灵慧,吴建斌,陆雪林,等.东太湖水生植物季节演替及抑藻效应初探[J]. *浙江农业科学*, 2016, **57**(2): 288-291, 293.

- [11] Huszar V L M, Silva L H S, Domingos P, *et al.* Phytoplankton species composition is more sensitive than OECD criteria to the trophic status of three Brazilian tropical lakes[J]. *Hydrobiologia*, 1998, **369-370**: 59-71.
- [12] Reynolds C S. The ecology of phytoplankton[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- [13] 刘东艳, 孙军, 钱树本. 胶州湾浮游植物研究 II 环境因子对浮游植物群落结构变化的影响[J]. *青岛海洋大学学报*, 2002, **32**(3): 415-421.
Liu D Y, Sun J, Qian S B. Phytoplankton research in Jiaozhou Bay II: influence of environmental factors on phytoplankton community structure changes[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2002, **32**(3): 415-421.
- [14] 王丽卿, 许莉, 卢子园, 等. 淀山湖浮游植物数量消长及其与环境因子的关系[J]. *环境科学*, 2011, **32**(10): 2868-2874.
Wang L Q, Xu L, Lu Z Y, *et al.* Dynamic of Phytoplankton Abundance and the Relationship with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(10): 2868-2874.
- [15] 栾青杉, 孙军, 宋书群, 等. 长江口夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析[J]. *植物生态学报*, 2007, **31**(3): 445-450.
Luan Q S, Sun J, Song S Q, *et al.* Canonical correspondence analysis of summer phytoplankton community and its environment in the Yangtze River estuary, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2007, **31**(3): 445-450.
- [16] 李钦钦, 邓建才, 胡维平, 等. 太湖金墅湾水源地浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. *应用生态学报*, 2010, **21**(7): 1844-1850.
Li Q Q, Deng J C, Hu W P, *et al.* Community structure of phytoplankton and its relationships with environmental factors in drinking water source of Jinshu Bay, Taihu Lake[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, **21**(7): 1844-1850.
- [17] 董百丽. 太湖沉水植物群落及其环境因子对生境异质性的响应[D]. 北京: 中国科学院大学, 2011.
- [18] 陈亮, 张修峰, 刘正文. 惠州西湖浮游植物群落对生态系统修复的响应[J]. *武汉植物学研究*, 2010, **28**(4): 453-459.
Chen L, Zhang X F, Liu Z W. The response of a phytoplankton community to ecosystem restoration in Huizhou West Lake[J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2010, **28**(4): 453-459.
- [19] 鲁蕾, 吴亦潇, 张维昊. 城市小型湖泊浮游植物群落结构特征及演替规律——以武汉沙湖为例[J]. *生态学报*, 2017, **37**(18): 5993-6004.
Lu L, Wu Y X, Zhang W H. Distribution and succession pattern of phytoplankton communities in a small urban lake, Sand Lake in Wuhan City, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(18): 5993-6004.
- [20] 叶琳琳, 吴晓东, 于洋, 等. 太湖不同湖区蓝藻细胞裂解速率的空间差异[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(6): 1302-1311.
Ye L L, Wu X D, Yu Y, *et al.* Spatial differences in cell lysis rates of cyanobacteria in Lake Taihu[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, **30**(6): 1302-1311.
- [21] 孙祥, 朱广伟, 杨文斌, 等. 天目湖沙河水库浮游植物群落结构的时空异质性[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4160-4168.
Sun X, Zhu G W, Yang W B, *et al.* Spatio-temporal variations in phytoplankton community in Shahe Reservoir, Tianmuhu, China[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4160-4168.
- [22] 刘娅琴, 邹国燕, 宋祥甫, 等. 富营养水体浮游植物群落对新型生态浮床的响应[J]. *环境科学研究*, 2011, **24**(11): 1233-1241.
Liu Y Q, Zou G Y, Song X F, *et al.* Response of phytoplankton community to a new ecological floating bed system (EFBS) in enclosures with eutrophicated water [J]. *Research of Environmental Science*, 2011, **24**(11): 1233-1241.
- [23] 刘娅琴, 邹国燕, 宋祥甫, 等. 框式复合型生态浮床对富营养水体浮游植物群落结构的影响[J]. *水生生物学报*, 2010, **34**(1): 196-203.
Liu Y Q, Zou G Y, Song X F, *et al.* Effect of a new ecological floating bed system (efbs) on phytoplankton community in eutrophicated water[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2010, **34**(1): 196-203.
- [24] 荆春燕, 曾广权. 异龙湖流域生态功能区划分析[J]. *云南环境科学*, 2003, **22**(4): 49-51.
Jing C Y, Zeng G Q. Analysis on ecological functional regionization in Yilong Lake Basin[J]. *Yunnan Environmental Science*, 2003, **22**(4): 49-51.
- [25] 肖茜, 杨昆, 曹臻, 等. 杞麓湖与异龙湖水体提取及湖泊面积变化动态监测[J]. *安徽农学通报*, 2017, **23**(24): 123-124, 141.
- [26] 李杰, 陈静, 赵磊. 异龙湖藻类群落特征及环境响应关系[J]. *环境科学与技术*, 2014, **37**(S2): 58-61, 230.
Li J, Chen J, Zhao L. Phytoplankton population response of water environmental index in Yilong Lake[J]. *Environmental Science and Technology*, 2014, **37**(S2): 58-61, 230.
- [27] 魏翔, 唐光明. 异龙湖近 20 年来营养盐与水生生态系统变化[J]. *环境科学导刊*, 2014, **33**(S2): 9-14.
Wei X, Tang G M. Changes of nutrients and aquatic ecosystem of Yilong Lake in recent twenty decades[J]. *Environmental Science Survey*, 2014, **33**(2): 9-14.
- [28] 赵凤斌. 异龙湖沉水植物群落恢复影响因子与恢复技术研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017.
Zhao F B. Research on impacting factors of submerged plants communities restoration and related techniques in Yilong Lake, Yunnan Province [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017.
- [29] 刘晓海, 宁平, 张军莉, 等. 围湖造田和退田还湖对异龙湖的影响[J]. *昆明理工大学学报(理工版)*, 2006, **31**(5): 78-81, 94.
Liu X H, Ning P, Zhang J L, *et al.* Towards the effects of reclaiming the land from the lake and restoring the Lake from the Land in Yilong Lake [J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Science and Technology)*, 2006, **31**(5): 78-81, 94.
- [30] 金相灿, 屠卿瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. (第二版). 北京: 中国环境出版社, 1990. 241-244.
- [31] 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.
Hu H J, Wei Y X. The freshwater algae of China systematics, taxonomy and ecology[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [32] 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.
- [33] 代龚圆, 李杰, 李林, 等. 滇池北部湖区浮游植物时空格局及相关环境因子[J]. *水生生物学报*, 2012, **36**(5): 946-956.
Dai G Y, Li J, Li L, *et al.* The spatio-temporal pattern of phytoplankton in the north basin of lake Dianchi and related environmental factors[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2012, **36**(5): 946-956.
- [34] 邬红娟, 任江红, 卢媛媛. 武汉市湖泊浮游植物群落排序及

- 水质生态评价[J]. 湖泊科学, 2007, **19**(1): 87-91.
- Wu H J, Ren J H, Lu Y Y. A community ordination of phytoplankton and ecological assessment of water quality of lakes in Wuhan[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2007, **19**(1): 87-91.
- [35] 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.
- [36] 陈洋, 胡晓东, 张建华, 等. 太湖不同区域浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. *水生态学杂志*, 2017, **38**(3): 38-44.
- Chen Y, Hu X D, Zhang J H, *et al.* Phytoplankton community structure and its relationship with environmental factors in different regions of Taihu Lake [J]. *Journal of Hydroecology*, 2017, **38**(3): 38-44.
- [37] 沈爱春, 徐兆安, 吴东浩. 太湖夏季不同类型湖区浮游植物群落结构及环境解释[J]. *水生态学杂志*, 2012, **33**(2): 43-47.
- Shen A C, Xu Z A, Wu D H. Environmental impacts on summer phytoplankton community structure in different types of bays, Taihu Lake[J]. *Journal of Hydroecology*, 2012, **33**(2): 43-47.
- [38] Sommer U, Adrian R, De Senerpont Domis L, *et al.* Beyond the plankton ecology group (PEG) model: mechanisms driving plankton succession[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2012, **43**(1): 429-448.
- [39] 杨强, 谢平, 徐军, 等. 河流型硅藻水华研究进展[J]. *长江流域资源与环境*, 2011, **20**(S1): 159-165.
- Yang Q, Xie P, Xu J, *et al.* Research advances of diatom blooms in rivers[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, **20**(S1): 159-165.
- [40] Gaedke U, Ruhstroth-Bauer M, Wiegand I, *et al.* Biotic interactions may overrule direct climate effects on spring phytoplankton dynamics[J]. *Global Change Biology*, 2010, **16**(3): 1122-1136.
- [41] 马沛明, 施练东, 张俊芳, 等. 浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4560-4569.
- Ma P M, Shi L D, Zhang J F, *et al.* Succession of phytoplankton assemblages and its influencing factors in Tangpu Reservoir, Zhejiang Province[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4560-4569.
- [42] 路娜, 尹洪斌, 邓建才, 等. 巢湖流域春季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. *湖泊科学*, 2010, **22**(6): 950-956.
- Lu N, Yin H B, Deng J C, *et al.* Spring community structure of phytoplankton from Lake Chaohu and its relationship to environmental factors [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, **22**(6): 950-956.
- [43] 宗梅, 郑西强, 王翔宇. 巢湖万年埠沿岸浮游植物与环境因子关系[J]. *安徽农业科学*, 2016, **44**(27): 102-105.
- Zong M, Zheng X Q, Wang X Y. The relationship between phytoplankton and related environmental factors in the littoral zone of Wannianbu, Chaohu Lake [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016, **44**(27): 102-105.
- [44] Walsby A E, Kinsman R, George K I. The measurement of gas vesicle volume and buoyant density in planktonic bacteria [J]. *Journal of Microbiological Methods*, 1992, **15**(4): 293-309.
- [45] 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.
- 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.
- [46] 孔繁翔, 高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. *生态学报*, 2005, **25**(3): 589-595.
- Kong F X, Gao G. Hypothesis on cyanobacteria bloom-forming mechanism in large shallow eutrophic lakes [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(3): 589-595.
- [47] Figueredo C C, Giani A. Seasonal variation in the diversity and species richness of phytoplankton in a tropical eutrophic reservoir [J]. *Hydrobiologia*, 2001, **445**(1-3): 165-174.
- [48] 徐恒省, 张咏, 王亚超, 等. 太湖浮游植物种类组成时空变化规律[J]. *环境监控与预警*, 2012, **4**(6): 38-41.
- Xu H S, Zhang Y, Wang Y C, *et al.* Spatial and temporal variation in the composition of phytoplankton species in Taihu Lake [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2012, **4**(6): 38-41.

CONTENTS

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