

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第7期

Vol.39 No.7

**2018**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

近20年来中国典型区域PM<sub>2.5</sub>时空演变过程 ..... 罗毅,邓琼飞,杨昆,杨扬,商春雪,喻臻钰 (3003)

西安市PM<sub>2.5</sub>健康损害价值评估 ..... 魏国茹,史兴民 (3014)

河北香河亚微米气溶胶组分特性、来源及其演变规律分析 ..... 江琪,王飞,孙业乐 (3022)

南京北郊秋季PM<sub>2.5</sub>碳质组分污染特征及来源分析 ..... 徐足飞,曹芳,高嵩,鲍孟盈,石一凡,章炎麟,刘晓妍,范美益,张雯淇,卞航,刘寿东 (3033)

临安夏季霾和清洁天气PM<sub>2.5</sub>化学组成特征比较 ..... 梁林林,孙俊英,张养梅,刘畅,徐婉筠,张根,刘旭艳,马千里 (3042)

盘锦市秋冬季节PM<sub>2.5</sub>中碳组分特征及来源解析 ..... 张蕾,姬亚芹,张军,王士宝,李越洋,赵静琦,张伟 (3051)

南京冬季气溶胶光学特性及黑碳光吸收增强效应 ..... 黄聪聪,马嫣,郑军 (3057)

夏季青岛大气粗细粒子中微量元素的浓度、溶解度及干沉降通量 ..... 李鹏志,李茜,石金辉,高会旺,姚小红 (3067)

太原市夏季降水中溶解态重金属特征及来源 ..... 叶艾玲,程明超,张璐,何秋生,郭利利,王新明 (3075)

杭州地区大气CO<sub>2</sub>体积分数变化特征及影响因素 ..... 浦静姣,徐宏辉,姜瑜君,杜荣光,齐冰 (3082)

典型工业源VOCs治理现状及排放组成特征 ..... 景盛翱,王红丽,朱海林,杨强,卢滨,夏阳,余传冠,陶士康,李莉,楼晟荣,黄成,唐伟,井宝莉 (3090)

地级市域工业VOCs排放源排特性及其控制技术应用现状:以秦皇岛市为例 ..... 胡旭睿,虎啸宇,王灿 (3096)

青霉素发酵尾气VOCs污染特征及健康风险评价 ..... 郭斌,么瑞静,张硕,马磊,康江,王姗姗 (3102)

轻型汽油车尾气OC和EC排放因子实测研究 ..... 黄成,胡馨遥,鲁君 (3110)

南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价 ..... 田春晖,杨若杼,古丽扎尔·依力哈木,钱新,王金凤,李慧明 (3118)

西安城区路面细颗粒灰尘重金属污染水平及来源分析 ..... 石栋奇,卢新卫 (3126)

三峡库区主要河流秋季pCO<sub>2</sub>及其影响因素 ..... 罗佳宸,毛蓉,李思悦 (3134)

泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素 ..... 寇永朝,华琨,李洲,李志 (3142)

生物滞留对城市地表径流磷的去除途径 ..... 李立青,刘雨情,杨佳敏,王娟 (3150)

淀山湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系 ..... 杨丽,张玮,尚光霞,张军毅,王丽卿,魏华 (3158)

抚仙湖硅藻群落的时空变化特征及其与水环境的关系 ..... 李蕊,陈光杰,康文刚,陈丽,王教元,陈小林,刘园园,冯钟,张涛 (3168)

蓝藻水华及其降解对沉积物-水微界面的影响 ..... 王永平,谢瑞,晁建颖,姬昌辉,于剑 (3179)

生物炭对人工湿地植物根系形态特征及净化能力的影响 ..... 徐德福,潘潜潜,李映雪,陈晓艺,王佳俊,周磊 (3187)

Mn-Co/蜂窝陶瓷催化剂制备及催化臭氧化对苯二酚效能 ..... 张兰河,高伟国,陈子成,张海丰,王旭明 (3194)

Fe/Cu双金属活化过一硫酸盐降解四环素的机制 ..... 李晶,鲍建国,杜江坤,冷一非,孔淑琼 (3203)

铈酸盐改性钛酸纳米片对水中Cd(II)的吸附行为及机制 ..... 康丽,刘文,刘晓娜,刘宏芳,李一菲 (3212)

铁锰原位氧化产物吸附微量磷的实验 ..... 蔡言安,毕学军,张嘉凝,董杨,刘文哲 (3222)

制备方法对铁钛复合氧化物磷吸附性能的影响:共沉淀法与机械物理混合法 ..... 仲艳,王建燕,陈静,张高生 (3230)

电导率对厌氧产酸、正渗透与微生物燃料电池耦合工艺运行性能的影响 ..... 陆宇琴,刘金梦,王新华,李秀芬,李晔 (3240)

不同磷浓度下生物除磷颗粒系统的COD需求 ..... 李冬,曹美忠,郭跃洲,梅宁,李帅,张杰 (3247)

基质浓度对ABR反应器SAD协同脱氮除碳效能影响 ..... 张敏,姜滢,汪瑶琪,韦佳敏,陈重军,沈耀良 (3254)

采用含硫铁化学污泥作为反硝化电子供体进行焦化废水中总氮深度去除 ..... 付炳炳,潘建新,马景德,王丰,吴海珍,韦朝海 (3262)

间歇曝气下短程硝化耦合污泥微膨胀稳定性 ..... 高春娣,孙大阳,安冉,赵楠,焦二龙,祝海兵 (3271)

基于高通量测序的SBR反应器丝状膨胀污泥菌群分析 ..... 洪颖,姚俊芹,马斌,徐双,张彦江 (3279)

纳米零价铁(NZVI)对厌氧产甲烷活性、污泥特性和微生物群落结构的影响 ..... 苏润华,丁丽雨,任洪强 (3286)

气水比对后置固相反硝化滤池工艺脱氮及微生物群落影响 ..... 张千,吉芳英,付旭芳,陈晴空 (3297)

活性污泥胞外多聚物提取方法的比较 ..... 孙秀玥,唐珠,杨新萍 (3306)

耐冷嗜碱蒙氏假单胞菌H97的鉴定及其好氧反硝化特性 ..... 蔡茜,何腾霞,冶青,李振轮 (3314)

PFOS前体物质(PreFOSs)降解菌的分离鉴定及其降解特性 ..... 赵淑艳,周涛,王博慧,梁田坤,柳丽芬 (3321)

采油井场土壤微生物群落结构分布 ..... 蔡萍萍,宁卓,何泽,张敏,石建省 (3329)

铜尾矿坝不同恢复年限土壤理化性质和酶活性的特征 ..... 王瑞宏,贾彤,曹苗文,柴宝峰 (3339)

广西某赤泥堆场周边土壤重金属污染风险 ..... 郭颖,李玉冰,薛生国,廖嘉欣,王琼丽,吴川 (3349)

邻苯二甲酸酯在重庆市城市土壤中的污染分布特征及来源分析 ..... 杨志豪,何明靖,杨婷,卢俊峰,魏世强 (3358)

成都平原区水稻土有机碳剖面分布特征及影响因素 ..... 李珊,李启权,王昌全,张浩,肖怡,唐嘉玲,代天飞,李一丁 (3365)

塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳、无机碳含量与环境因子的相关性 ..... 赵晶晶,贡璐,安申群,李杨梅,陈新 (3373)

塔里木盆地北缘绿洲4种土地利用方式土壤有机碳组分分布特征及其与土壤环境因子的关系 ..... 安申群,贡璐,李杨梅,陈新,孙力 (3382)

高原喀斯特土壤有机碳短期稳定的温度作用机制 ..... 唐国勇,张春华,刘方炎,马艳 (3391)

施硼对水稻幼苗吸收和分泌硼的影响 ..... 朱毅,孙国新,陈正,胡莹,郑瑞伦 (3400)

不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析 ..... 胡雪芳,田志清,梁亮,陈俊德,张志民,朱祥民,王士奎 (3409)

南京大气臭氧浓度的季节变化及其对主要作物影响的评估 ..... 赵辉,郑有飞,魏莉,关清 (3418)

三峡库区涪陵和忠县两地居民发汞含量水平及影响因素分析 ..... 程楠,谢青,樊宇飞,王永敏,张成,王定勇 (3426)

人粪便好氧堆肥过程中典型抗生素的消减特性 ..... 时红蕾,王晓昌,李倩 (3434)

COD/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>对青霉素菌渣厌氧消化影响 ..... 强虹,李玉友,裴梦富 (3443)

果蔬类垃圾主发酵堆肥产物储放和利用的恶臭释放特征 ..... 何品晶,蒋宁玲,徐贤,韦顺艳,邵立明,吕凡 (3452)

曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田NH<sub>3</sub>挥发的影响 ..... 庞炳坤,张敬沙,吴杰,李志琳,蒋静艳 (3460)

《环境科学》征订启事(3141) 《环境科学》征稿简则(3202) 信息(3229, 3433, 3451)

# 抚仙湖硅藻群落的时空变化特征及其与水环境的关系

李蕊, 陈光杰\*, 康文刚, 陈丽, 王教元, 陈小林, 刘园园, 冯钟, 张涛

(云南师范大学旅游与地理科学学院, 高原地理过程与环境变化省重点实验室, 昆明 650500)

**摘要:** 抚仙湖是我国重要的深水型淡水湖泊且水体水质总体处于 I 类水平, 近年来在流域开发、全球变暖等影响下其生态环境功能呈现退化的趋势, 需要对湖泊生物的群落组成、分布模式及其驱动因子进行系统评价. 本研究于 2015 年选取抚仙湖的南、中、北湖区共 3 个采样点开展了表层水体硅藻群落和水环境特征的逐月分析. 样品中共发现硅藻 31 个属、166 个种且以浮游类型为主, 其中云南特有硅藻种 *Cyclotella rhomboideo-elliptica* 基本消失. 硅藻群落结构的逐月变化在 3 个采样点中均呈现明显的季节演替特征, 其中 1、2 月优势种主要为 *Fragilaria crotonensis*, 3 月优势种为 *Aulacoseira granulata*, 4 月 *C. ocellata* 与 *F. crotonensis* 同为优势种, 而在其余月硅藻群落结构较为单一且优势物种皆为 *C. ocellata* (相对丰度占 ~80%). 而空间尺度上, 硅藻优势属种分布和群落结构具有较高的一致性. 主成分分析显示, 不同湖区的硅藻群落结构组成和水体环境在时间尺度上存在较大差异, 而在空间尺度上差异较小; 冗余分析和变差分解等分析结果进一步表明, 影响群落结构时空变化的主要驱动因子是气象与物理因子 (包括水温、风速和透明度), 共解释了硅藻群落变率的 27.6%, 表明了该深水湖泊水体热力分层的厚度与持续时间是影响硅藻群落构建的重要过程. 同时, 湖泊营养水平与水体离子浓度也对硅藻群落结构产生了明显影响, 分别解释了硅藻群落变率的 21.2% 和 9.4%. 因此, 持续的区域变暖和流域开发明显影响了抚仙湖的生物群落构建与生态系统健康, 对抚仙湖的生态保护不仅需要控制营养盐等流域污染物的输入, 同时应该积极应对气候变化的长期影响.

**关键词:** 抚仙湖; 硅藻群落; 时空分布; 水温; 营养盐

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)07-3168-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201710188

## Spatio-temporal Variations of Diatom Community and Their Relationship with Water Environment in Fuxian Lake

LI Rui, CHEN Guang-jie\*, KANG Wen-gang, CHEN Li, WANG Jiao-yuan, CHEN Xiao-lin, LIU Yuan-yuan, FENG Zhong, ZHANG Tao

(Provincial Key Laboratory of Plateau Geographical Processes and Environmental Change, School of Tourism and Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

**Abstract:** Fuxian Lake is an important deep lake in China with trophic status generally categorized as class I. However, there exists a trend of degradation in its ecological and environmental health under the increasing impacts derived from catchment development and recent global warming. Therefore, it is important to evaluate the community composition, distribution patterns, and driving factors of lake biota. In order to uncover the spatio-temporal variations in water quality and diatom communities, a monthly survey of diatom community composition and limnological characteristics was carried out in the surface waters of three sampling sites from the south, middle, and north of the lake basin in Fuxian in 2015. A total of 166 diatom species belonging to 31 genera were identified, which was dominated by planktonic diatoms with the extirpation of *Cyclotella rhomboideo-elliptica*, an endemic species for Yunnan. Diatom community structure showed significant seasonal succession across the three sites, which were dominated by *Fragilaria crotonensis* in January and February, by *Aulacoseira granulata* in March, by *Cyclotella ocellata* and *F. crotonensis* in April, and by *C. ocellata* for other months (i. e., relative abundance of ~80%). Over the spatial scale, the distribution of the dominant diatoms displayed a high degree of similarity. Principal component analysis further showed that there existed significant difference in the diatom community structure and lake environment over the temporal scale, but no significant deviance was found across the three sites. The results of redundancy analysis and variation partitioning revealed that the key driver included meteorological and physical factors (i. e., water temperature, wind velocity, and Secchi depth), which accounted for 27.6% of the total variance in diatom community changes. In combination with the thermocline analysis, the change in lake hydrodynamics may have influenced the thickness and duration of the thermal stratification of lake water, resulting in the reorganization of the diatom community. At the same time, the lake-water nutrients and ions also exerted an important influence on community structuring, which explained the 21.2% and 9.4% of the diatom variation, respectively. Therefore, regional warming and catchment development have significantly structured the biological community and ecosystem health of Fuxian Lake. In all, measures should be taken not only to control the watershed input of pollutants but also to actively mitigate the long-term impact of climate change for the protection and ecological remediation of Fuxian Lake.

收稿日期: 2017-10-24; 修订日期: 2018-01-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771239, 41461096, 31460131); 国家重点基础研究发展计划前期研究专项(2014CB460607)

作者简介: 李蕊(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊沉积与环境, E-mail: 790811996@qq.com

\* 通信作者, E-mail: guangjiechen@gmail.com

**Key words:** Fuxian Lake; diatom community; spatio-temporal distribution; water temperature; nutrients

抚仙湖(24°17' ~ 24°37'N, 102°49' ~ 102°57'E)位于云南省中部,是我国第二深淡水湖泊且总体处于贫营养状态,然而随着流域开发与人类活动的增强、工农业和旅游业的快速发展,湖泊水体开始出现富营养化、生物入侵、生态系统退化等问题。例如自 20 世纪 80 年代以来,抚仙湖总氮、总磷等营养离子载荷量总体上升,导致了水体透明度明显下降<sup>[1]</sup>。随着湖泊的富营养化以及太湖新银鱼的引入,抚仙湖特有鱼类抗浪鱼大量减少<sup>[2,3]</sup>。同时,抚仙湖不同湖区面临的流域开发类型和强度不同,因此水体污染物的来源与负荷存在一定的空间差异。抚仙湖北部流域主要为澄江县城及其周边地区带来的农业面源污染、居民生活污水和磷化工开发污染<sup>[4]</sup>;南部湖区主要面临农业面源污染以及历史上星云湖水流通过隔河下泄的污染物输入<sup>[5]</sup>。抚仙湖水体环境特征存在的空间差异可能导致了不同湖区浮游植物的群落结构和密度出现差别<sup>[6,7]</sup>。抚仙湖冬-春季转换期间的全湖调查发现,浮游植物群落呈现南北湖区的显著差异且总磷与温度为主要影响因素<sup>[8]</sup>。2002 ~ 2003 年抚仙湖和邻近的星云湖为期一年的逐月监测结果表明,浮游藻类群落季节变化主要受上行效应控制,水温、硝酸盐含量是主要的影响因子<sup>[9]</sup>。抚仙湖沉积物研究表明,近百年来营养盐的持续增加促进了湖泊初级生产力的提高<sup>[10]</sup>,导致了 20 世纪 50 年代以来云南本地特有硅藻种 *Cyclotella rhomboideo-elliptica* 丰度的快速降低,同时伴随着 *Cyclotella ocellata*、*Fragilaria crotonensis* 等物种的显著增加<sup>[3,11]</sup>。因此,在多重环境胁迫的影响下,需要对抚仙湖藻类群落的空间分布、季节变化模式及其环境驱动因子进行系统识别。

硅藻是水生态系统中重要的初级生产者和藻类组成,因其分布广泛、属种丰富,生长周期短(约 1 ~ 7 d)、繁殖快且具有较强扩散能力,能快速响应生境变化<sup>[12]</sup>并对特定环境因子具有相对确定的适宜度和耐受值,已被广泛应用于水体环境监测评价与古环境重建研究<sup>[13]</sup>。例如,硅藻群落变化能够有效地指示湖泊水体的营养状态<sup>[14]</sup>。对瑞典湖泊长达 20 年的监测结果显示,硅藻群落结构的变化与流域侵蚀导致的营养盐输入呈显著相关<sup>[15]</sup>;太湖近 10 年的监测结果表明,营养盐是驱动湖泊硅藻群落结构时空变化的重要影响因素<sup>[16]</sup>。同时温度的波动可以直接影响藻类个体生长与新陈代谢速率,因

此硅藻群落也能敏感地指示气候变化。相对于其它藻类而言,硅藻在较低的水温下更具竞争优势,通常会在春季和秋季暴发成为优势属种<sup>[17]</sup>。水体温度的变化还通过改变水体物理、化学特征进而影响硅藻群落结构和生态功能<sup>[18]</sup>。例如在深水湖泊,温度的上升能够增强水体混合和热力分层的时间与强度,还会改变湖上层与湖下层水体的营养盐交换与化学过程<sup>[19]</sup>。如区域气候变暖是导致泸沽湖近 10 年来硅藻群落变化的主要驱动因子,*Cyclostephanos dubius*、*Cyclotella* 和 *Fragilaria* 已成为主要硅藻优势种<sup>[20]</sup>。

近年来国内硅藻研究工作已取得较大进展,但对云南部分大中型湖泊水体硅藻的现代研究相对较少。因此有必要对抚仙湖开展连续的硅藻监测及环境响应研究,并建立用于水质监测的硅藻评价指标。为了识别抚仙湖硅藻群落时空变化的模式及其对水体环境的响应特征,本研究于 2015 年对抚仙湖硅藻群落结构做了逐月变化的调查研究,通过探讨抚仙湖水体硅藻群落季节演替变化特征、空间分布特点以及主要影响因素与时空模式的异同,以期对抚仙湖水环境和生态评价提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

抚仙湖是一个南北向的断层溶蚀湖泊,形如倒置葫芦状,中间窄、两端大,其南北长 31.4 km,东西宽 11.8 km,湖周长 100.8 km,北部湖区较南部湖区宽且深,中部呈喉扼形,为一个半封闭的外流湖泊,换水周期长(166.9 a),通过东侧唯一的出口海口河流向西江水系的南盘江<sup>[21]</sup>。当抚仙湖水面高程为 1 722.5 m 时,湖面面积为 216.6 km<sup>2</sup>,湖容量为 206.18 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,最大水深 158.9 m,平均水深 95.2 m,流域面积 674.69 km<sup>2</sup>。抚仙湖湖盆总体较陡,大于 100 m 水深的面积占全湖面积的 45.5%,而小于 10 m 水深的面积仅占 4.1%,导致了湖滨带不发育、水生植物覆盖面积有限(约占湖泊面积的 0.1%)。湖区属中亚热带半湿润季风气候,流域年平均气温 15.5℃,年降雨量 800 ~ 1 100 mm。在人类活动长期影响下流域植被覆盖面积仅为 27%,主要以稀疏马尾松和栎树为主,由于大部分山地岩石裸露、土壤较为贫瘠,抚仙湖流域水土流失较为严重。

## 1.2 采样与样品处理

根据抚仙湖的湖盆形态和流域开发特征,从南到北设置了3个采样点(图1),分别位于抚仙湖的南部(T1点; 24.364 784°N, 102.844 354°E),中部(T2点; 24.404 737°N, 102.861 073°E)以及北部(T3点; 24.574 911°N, 102.894 287°E). T1、T2和T3采样点水深分别为75、100、158 m. 采样时间为2015年1月~12月,使用美国Van Dom采水器对表层水样进行采集. 气象数据来源于澄江气象站,包括气温(air temperature, AT)、风速(wind velocity, WV)和降雨量(precipitation, PRE),选取采样当日及前一周数据并获得周平均气温、周平均风速及周累积降雨量.

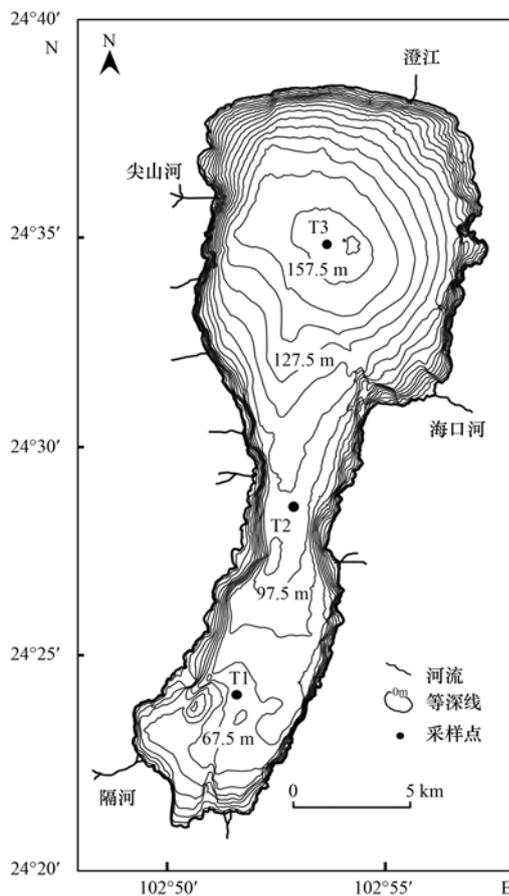


图1 抚仙湖采样监测点位置示意

Fig. 1 Contour map showing the three sampling sites of Fuxian Lake

各采样点取1 L水样4℃保存带回实验室测定理化指标总氮(total nitrogen, TN)、总磷(total phosphorus, TP)、可溶性正磷酸盐磷( $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ )、氨氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )、硝酸盐氮( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ )以及叶绿素a(chlorophyll a, Chl-a)的浓度<sup>[22]</sup>. 采用多参数水质监测仪(美国YSI6600)每5 m间隔现场测量水体表

层0~50 m位置的垂向水体温度(water temperature, WT)、表层水体pH等指标,透明度(Secchi Depth, SD)用塞氏盘测定. 水体中的钙(Ca)、钾(K)、镁(Mg)、钠(Na)、铁(Fe)、铅(Pb)、锰(Mn)、氯化物( $\text{Cl}^-$ )、硫酸盐( $\text{SO}_4^{2-}$ )等由云南省环境科学研究院分析测试中心测定.

表层水体的硅藻定性样品采用20 μm浮游生物网来获取,加无水乙醇试剂固定后进行实验室室内样品处理,加入30%的 $\text{H}_2\text{O}_2$ 并置于80℃的水浴锅中水浴4 h,以去除硅藻细胞壁上的有机质,待反应完全后,以1 200  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的转速离心样品4 min,用滴管吸出上层清液后加入蒸馏水混合,重复3次,离心完成后加入无水乙醇试剂密封保存. 将硅藻浓缩液滴至玻片上,待完全干燥后用Naphrax树胶进行制片<sup>[23]</sup>. 硅藻属种的鉴定主要参照欧洲硅藻分类系统<sup>[24]</sup>,并参考文献[25~28]的图谱,于1 000倍Leica生物显微镜(油镜; Leica DM2500)下进行属种鉴定. 每个样品的硅藻计数为400粒,出现半个以上壳体计数为1粒,硅藻数据表示为相对丰度(%).

## 1.3 数据统计分析

硅藻鉴定完成后将属种进行统计,选择相对丰度大于10%的硅藻属种绘制抚仙湖3个采样点逐月硅藻相对丰度图谱. 将各月的由表层0~50 m位置的垂向水体温度做出等值线图,并计算了湖泊温跃层深度(thermocline depth)、温跃层上界(metalimnion top)和温跃层下界(metalimnion bottom). 上述分析在C2软件和R3.4.1软件使用rLakeanalyzer程序包完成.

在探讨硅藻群落与环境因子之间的关系时,首先选择至少在2个样品点中出现,且含量至少在一个样品中超过1%的常见硅藻属种数据进行数值分析<sup>[29]</sup>,36个样品中共有18个主要硅藻属种用于数值分析,硅藻属种数据用平方根进行转换<sup>[30]</sup>. 首先对硅藻属种数据进行去趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA),结果显示,排序轴的最大长度梯度为1.87个标准离差单元(SD),因此更适宜选用主成分分析(principal component analysis, PCA)进行排序分析<sup>[31]</sup>. 应用主成分分析(PCA)提取硅藻群落变化的主要方向,以揭示硅藻群落结构变化的主要环境梯度,并结合断棍模型(Broken-stick)进行零模型检验提取统计学上显著的主成分主轴个数,并生成PCA排序图. 此外,将环境数据进行Q-Q正态分布检验,并进行标准化处理,采用线性回归的冗余分析(redundancy analysis,

RDA) 研究环境因子对硅藻群落组合变化的影响, 首先对各环境因子进行显著性检验, 保留显著的环境变量 ( $P < 0.05$ ) 进入 RDA 分析和置换检验, 并检查各个变量的共线性程度, 即用变量的方差膨胀因子 (variance inflation factors, VIF) 度量, 选择 VIF 值都小于 20 的环境变量生成 RDA 排序图, 并用两个优势硅藻属种对湖泊表层水温变化的绘制物种响应曲线以及分别提取 PCA1、PCA2 的得分与显著环境因子进行相关分析, 并将不共线的显著环境变量分为物理因子 (WT、WV、SD)、水化学离子 (Ca、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、K) 和营养盐 (TP、-P) 这 3 组进行分组变差分解分析。

本文所采用的多变量数据分析 (包括排序分析以及变差分解分析) 均在 R3.4.1 软件中使用 vegan2.4-3 程序包进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 主要环境因子的变化

抚仙湖 2015 年 1~12 月主要环境因子的变化特征见图 2。2015 年 1~12 月采样期间, 气温在 8.1

~23.3 $^{\circ}\text{C}$  之间, 其中 1 月和 2 月气温最低, 最高温度出现在 5~8 月, 平均在 21.5 $^{\circ}\text{C}$ ; 据采样前一周的累积降雨量数据可知, 降雨量主要集中在 7~10 月, 在 14~51 mm 之间, 而这期间, 以 8 月降雨量相对较低; 风速 2~6 月较大, 在 2  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上, 1 月和 12 月风速在 1.5~2  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  之间, 其余月小于 1.5  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 平均 1.1  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。从 3 个采样点逐月的水化学数据来看, 总磷从 1 月开始呈增长趋势, 在 3 月 T1 点达到年内最高值为 65  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 3 月后开始下降, 5 月浓度最低 (<10  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 5 月后缓慢上升并在 11 月达到峰值 (平均 45  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ); 可溶性正磷酸盐与总磷的变化趋势相似, 最高值都出现在 3 月, 平均小于 10  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 总氮浓度从 1 月开始缓慢下降, 3~4 月浓度较低 (平均 190  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 4 月后开始缓慢增长, 在 8~10 月浓度相对较高 (平均 268  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 11 月浓度达到全年最低值 (平均 153  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ); 氨氮与硝酸盐氮表现出了与总氮较为一致的变化趋势, 氨氮在 21~164  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  之间, 硝酸盐氮的平均浓度小于 80  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。钙 1~5 月浓度相对较高, 期间在 4 月达到峰值 (平均 46.4  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )

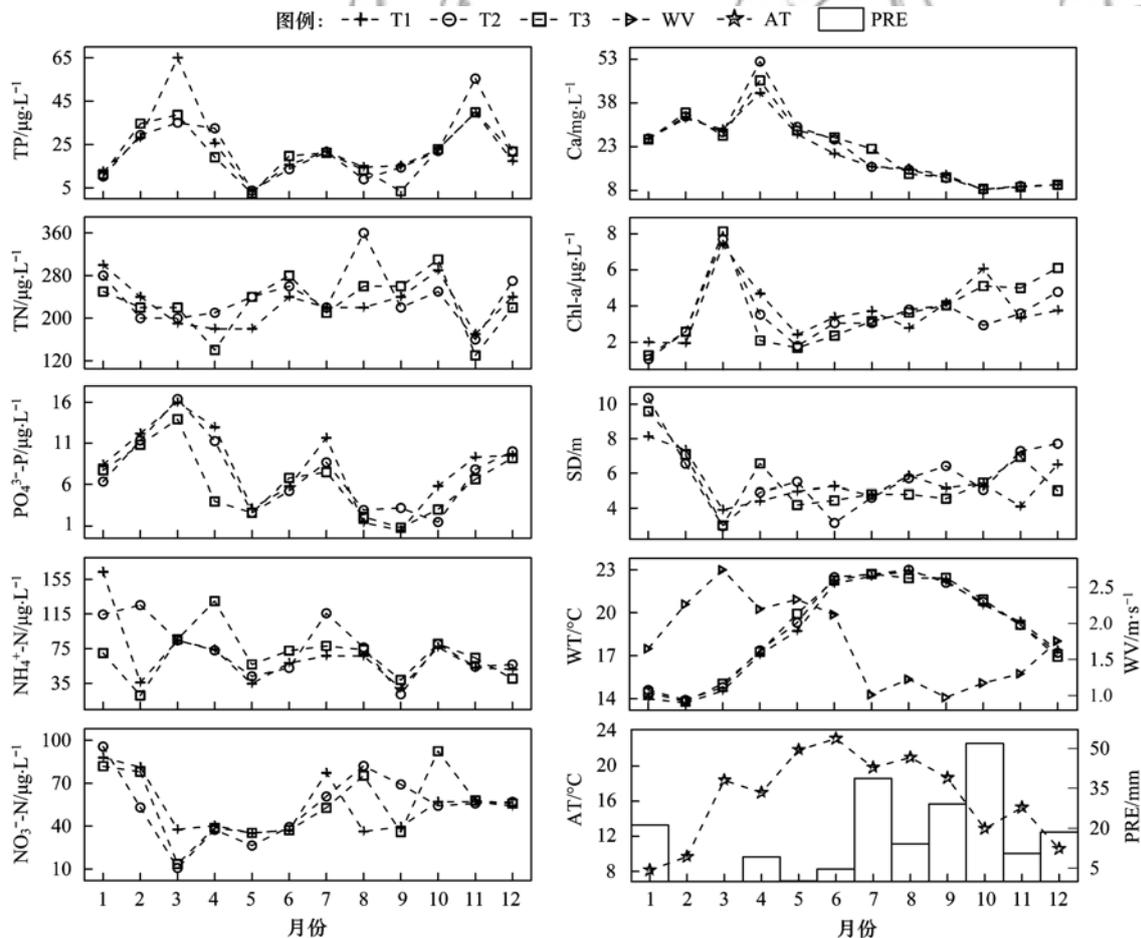


图 2 抚仙湖 2015 年 1~12 月主要环境因子的变化特征

Fig. 2 Monthly changes of key environmental factors in 2015 at Fuxian Lake

在5月开始缓慢下降,在10~12月浓度达到全年最低(9.2 mg·L<sup>-1</sup>). 叶绿素 a 浓度在 1.1 ~ 8.1 μg·L<sup>-1</sup>之间, 1~2月浓度最低(平均 1.9 μg·L<sup>-1</sup>), 并从1月开始全年呈上升趋势, 3月叶绿素 a 在全年达到最高值(平均 7.7 μg·L<sup>-1</sup>). 透明度与叶绿素 a 表现出相反的变化趋势, 1月透明度全年最高(平均 9.4 m), 3月透明度全年最低(平均 3.3 m).

2.2 垂直水温及温跃层季节变化

抚仙湖为单季混合湖泊, 抚仙湖 3 个采样点 2015 年逐月表层 0~50 m 的垂直水温剖面图、温跃层动态图显示(图 3), 在采样期间, 抚仙湖表层水年均温约 18.9℃, 最高温度 23.0℃ (2015-08-18), 最低 13.7℃ (2015-02-09). 由于 3 个采样点的水深存在差异, 故热力分层模式存在一定的差异. 总体来说, 3 个采样点在 2015 年 1 月上旬~3 月中旬 50 m 范围内水体呈等温分布, 湖泊处于混合状态. 3 月

下旬~5 月下旬, 随着季节上气温的升高, 导致水温增高, 湖泊分层逐步形成; 此时温跃层厚度计算值约为 0, 温跃层薄, 混合深度几乎与温跃层位置重合, 平均混合深度约为 27.4 m, 相对于稳定期要深, 这是由于 4℃ 以上淡水密度随温度升高而减小的速率随温度增加而增加. 因而当水温相对较低时, 升温所导致的水体垂直密度梯度变化较小, 故可达到的混合深度较深. 5 月底~9 月上旬, 气温较高, 进而影响水温, 导致温跃层在这一阶段迅速加强, 同时温跃层厚度增加, 最厚可达 5.9 m, 此阶段的湖泊热力稳定性最高. 9 月中下旬开始, 表层水体开始降温, 热力分层开始消失. 但由于消失初期(9 月中下旬~10 月上旬)气温仍然较高, 导致了温跃层强度延迟下降甚至增长. 10 月中旬后, 温跃层的位置及厚度、混合深度都迅速下降, 湖泊水体的混合作用逐渐加强.

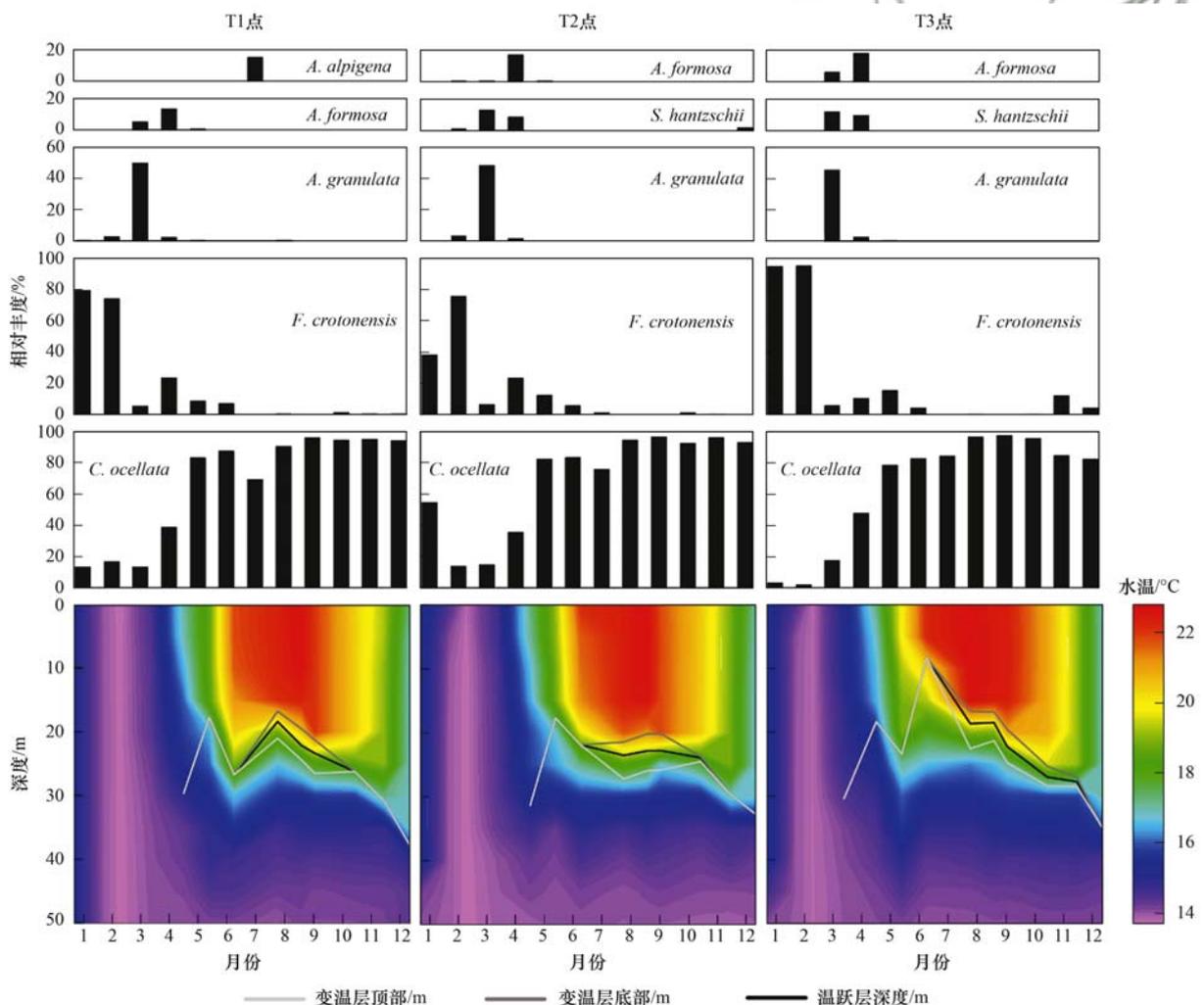
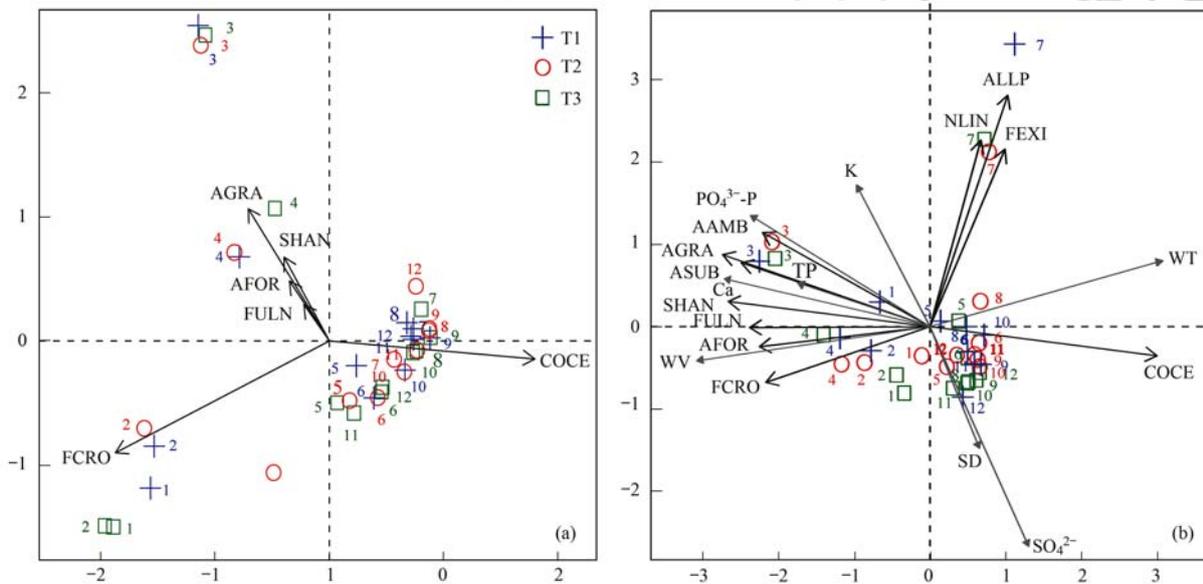


图 3 抚仙湖 3 个采样点逐月硅藻相对丰度图谱及垂直水温剖面、温跃层动态  
 Fig. 3 Profiles showing the relative abundance of dominant diatom species, water temperature, and thermocline distribution at the three sites of Fuxian Lake

### 2.3 硅藻群落的种类组成及主要优势种的时空变化

本研究共采集到硅藻 166 种、31 属。从抚仙湖 3 个采样点逐月硅藻相对丰度图谱(图 3)中可以看出, 2015 年 1~2 月, T1 点和 T3 点的主要优势种为 *Fragilaria crotonensis* (74% ~ 92%), 伴生种为 *Cyclotella ocellata*、*Aulacoseira granulata*、*Aulacoseira ambigua*、*Aulacoseira alpigena*、*Asterionella formosa* 和 *Stephanodiscus hantzschii*。而 T2 点 1 月主要优势种为 *C. ocellata* (55%), *F. crotonensis* 较 T1 和 T2 点丰度要低(39%), 2 月 *F. crotonensis* 增加成为优势种(76%)。3 月, *F. crotonensis* 减少(6% ~ 7%), 3 个采样点均以 *A. granulata* 为优势种(44% ~ 48%), 4 月, *C. ocellata* 开始增加并成为优势种(36% ~ 49%), 同时 *F. crotonensis* (11% ~ 24%) 和 *A. formosa* (14% ~ 19%) 相对丰度也有所增加。5 月开始, 3 个点 *C. ocellata* 大量增加, 并持续至 12 月占绝对优势(71% ~ 98.5%)。

为了探讨抚仙湖水体表层硅藻群落的结构变化的主要方向与主要的环境梯度, 对抚仙湖水体表层硅藻群落数据做了主成分分析(PCA), 并使用断棍模型(Broken-stick)进行零模型检验提取统计学上显著的主成分主轴个数。结果显示, 显著的主轴共有两个, 其中主轴 1 解释了硅藻群落结构变化的 60.4%, 主轴 2 解释了群落变化的 22.7% [图 4 (a)]。抚仙湖硅藻群落的季节变化顺序是先沿着主轴 2 的正方向演替, 再沿着主轴 1 的正方向变化。主轴 1 负方向是喜冷水种 *F. crotonensis*, 正方向是 *C. ocellata*; 主轴 2 正方向主要是喜营养的 *A. granulata*、*S. hantzschii*、*A. formosa* 和 *F. ulna*。时间尺度上, 属种的变化顺序由 1 月 2 月的占优的喜冷水种 *F. crotonensis* 到 3 月占优喜磷种 *A. granulata* 再到其他月占优的个体小, 表体比大的 *C. ocellata*。空间尺度上, 3 个采样点的硅藻优势属种分布表现出较高的一致性和相似的硅藻群落结构。



不同的颜色符号代表不同的采样点, 同一个颜色符号代表同一采样点的不同月, 所代表的月在符号周围进行了标注; AALP: *Aulacoseira alpigena*; AAMB: *Aulacoseira ambigua*; AFOR: *Asterionella formosa*; AGRA: *Aulacoseira granulata*; ASUB: *Aulacoseira subarctica*; COCE: *Cyclotella ocellata*; FCRO: *Fragilaria crotonensis*; FEXI: *Fragilaria exigua*; FULN: *Fragilaria ulna*; NLIN: *Nitzschia linearis*; SHAN: *Stephanodiscus hantzschii*

图 4 抚仙湖 2015 年硅藻群落变化的 PCA 及其与显著环境变量关系的 RDA 分析

Fig. 4 PCA and RDA triplots showing the spatio-temporal changes in both diatom assemblages and key environmental variables in 2015 for Fuxian Lake

### 2.4 硅藻群落主要优势种的时空变化的影响因子识别

为了探讨抚仙湖水体表层硅藻群落的结构变化的主要影响因子, 首先选取了 3 个采样点中的占绝对优势的两个硅藻属种 *C. ocellata* 与 *F. crotonensis*, 采用高斯单峰模型的逻辑回归方法将两

个优势硅藻种的相对丰度与 3 个采样点 1~12 月的表层水体温度进行分析(图 5)。结果显示, 随着表层水温的增加, *C. ocellata* 对表层水体温度变化呈现显著正相关( $r^2 = 0.69, P < 0.001, n = 36$ ), 而 *F. crotonensis* 则呈现显著负相关( $r^2 = 0.48, P < 0.001, n = 36$ )。

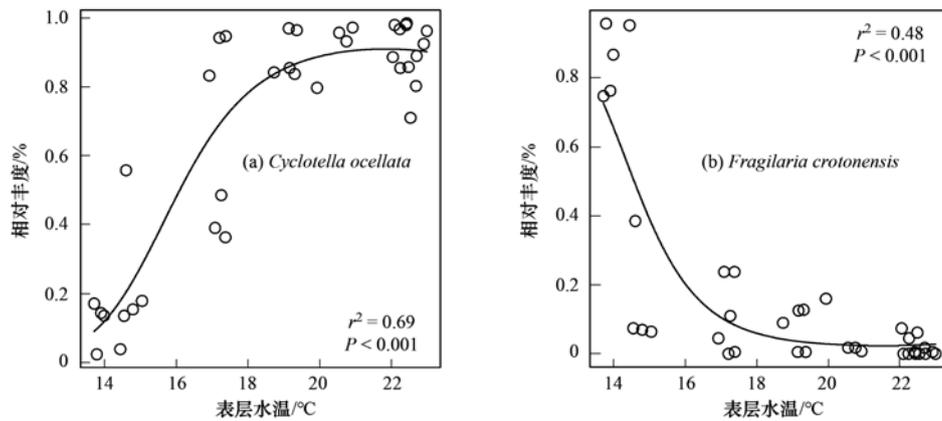
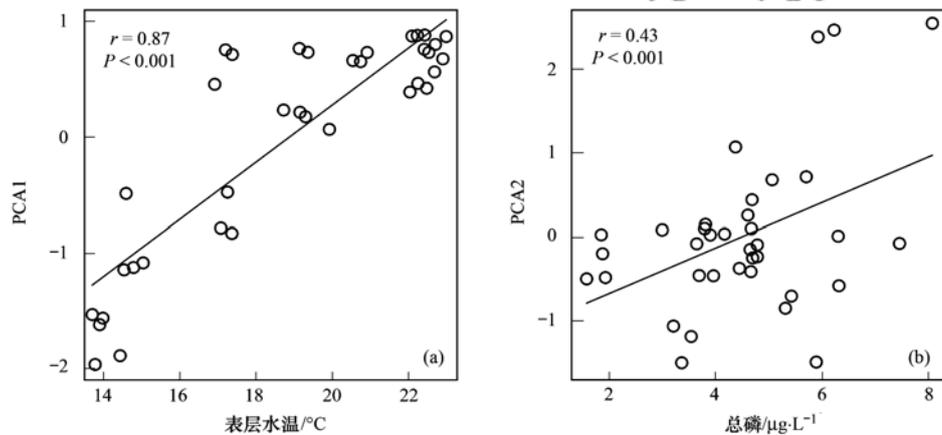


图 5 两个优势硅藻属种对湖泊表层水温变化的响应曲线

Fig. 5 Species response curves of *Cyclotella ocellata* and *Fragilaria crotonensis* along the gradient of surface water temperature

为了进一步揭示硅藻群落结构变化的主要环境梯度,利用硅藻群落 PCA 主轴 1 和主轴 2 的样品得分分别与表层水体温度、总磷浓度进行相关分析(图 6),结果显示,PCA1 得分与表层水温具有显著

相关性( $r = 0.87, P < 0.001, n = 36$ ), PCA2 与总磷浓度具有显著相关性( $r = 0.43, P < 0.01, n = 36$ ). 因此,主轴 1 反映的主要环境梯度为水温及其相关因子,主轴 2 反映的主要环境梯度为营养盐.



图(a)横坐标表层水温数据为原始数据;图(b)横坐标总磷数据进行了平方根转换

图 6 抚仙湖硅藻 PCA 主轴 1 及主轴 2 与显著环境因子的相关分析结果

Fig. 6 Correlation analyses showing the relationship of the diatom PCA axes one and two with significant environmental factors in Fuxian Lake, respectively

基于线性响应模式的冗余分析(RDA)进一步识别了影响硅藻群落组合变化的主要环境因子[图 4(b)]. RDA 主轴 1 解释了硅藻群落结构变化的 27.7%, 主轴 2 解释了 11.9%. 结果表明,对抚仙湖水体表层硅藻群落演替作用最显著的为物理因子且主要为受气温影响的水温、风速和透明度,其次为离子与营养盐. 分组变差分解结果显示(图 7),物理因子解释了抚仙湖表层水体硅藻群落变化的 27.6%, 水化学离子解释了 21.2%, 营养盐解释了 9.4%.

### 3 讨论

#### 3.1 时间尺度上硅藻群落与环境因子间关系

已有研究表明,水体热平衡下的湖泊热力分层特征能够直接影响硅藻群落的构建及分布<sup>[32,33]</sup>. 当表层水温较高时,表层水和底层水产生的密度差加强,湖泊水体稳定性增加,从而导致湖泊热力分层的形成与加强. 因此,温度的下降与上升可以分别促进冬季水体的混合和夏季水体的热力分层<sup>[34,35]</sup>. 在全球变暖的背景下,北半球中高纬度深水湖泊热力

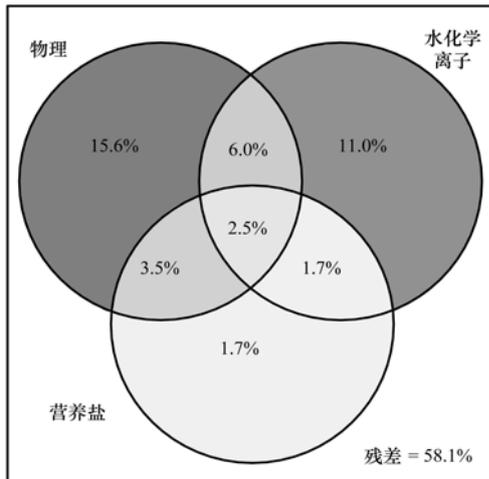


图7 抚仙湖硅藻群落结构与显著环境因子变差分解分析  
Fig. 7 Summary of variation partitioning showing the explanatory power of significance of environmental factors in accounting for the diatom community changes in Fuxian Lake

分层的加强促进了表体比大、硅质壳体较轻的小环藻 *Cyclotella* 丰度显著增加, 而重硅质的直链藻 *Aulacoseria* 丰度降低<sup>[36,37]</sup>。抚仙湖1月上旬~3月中旬期间, 水体50 m范围内混合明显且 *A. granulata* 等硅藻占据竞争优势, 而从2015年3月下旬开始热力分层逐步形成, 使得小个体的 *C. ocellata* 逐渐成为优势种。 *A. granulata* 具有较厚的硅质壳体、易于沉降, 因此在稳定水体中很容易下沉到真光层以下, 导致其生长受到限制, 所以该种通常分布在混合较强, 易扰动的水体中<sup>[38,39]</sup>。此外, *A. granulata* 对风速和径流引起的水体扰动较为敏感, 并且只有当扰动足够大的情况下才能出现较为明显的优势<sup>[40]</sup>。而本研究结果中, *A. granulata* 在水体混合强烈的3月占优势与前人研究结果一致。相反, 表层水体温度较高时湖泊热力分层稳定, 体表比较小的 *C. ocellata* (直径约5~10 μm) 的优势度增加 (图3)。RDA 结果显示 [图5(b)], *F. crotonensis* 与表层水体温度反向, 并与风速相关, 与该种指示低水温、水体混合的研究一致<sup>[41]</sup>。表层水体温度与硅藻群落 PCA 主轴1得分的相关性较高 (图6), 表明了水温可能是影响硅藻群落分布和演替的主要驱动因素。

营养盐和水化学离子浓度同样可以对硅藻群落的构建产生重要影响。在许多中营养的温带湖泊中, 硝酸盐经过冬季的大量累积, 在次年春季浓度达到高峰, 而生物可获取的氮主要是以硝酸盐的形式为主<sup>[21]</sup>。已有研究表明 *F. crotonensis* 在 N 含量高而 P 含量相对较低的水体中比其他硅藻种类更有

优势, 在高山湖泊的研究中 *F. crotonensis* 的增加指示了水体中 N 的富集<sup>[42]</sup>; 对北美落基山脉贫营养的高山湖泊进行营养盐添加, 实验结果表明 *A. formosa* 和 *F. crotonensis* 对氮 (N) 的增加响应显著, 而对磷 (P) 和硅 (Si) 的添加响应不明显<sup>[43]</sup>。抚仙湖春季硝酸盐氮含量较高, 为 *F. crotonensis* 和 *A. formosa* 提供了营养盐; *A. granulata* 主要分布在富含碳酸盐的中-富营养水体中以及矿物质含量较高的水域<sup>[44,45]</sup>。例如在长江中下游地区的黄湖、武昌湖等湖泊中 *A. granulata* 广泛分布<sup>[46]</sup>; 季风边缘区的高山湖泊沉积物硅藻结果表明, 过去2000年来季风增强时期降雨增多使得进入湖泊的总磷浓度增加, 而同期浮游硅藻种 *S. hantzschii* 含量显著增加, 表明了该种对磷 (P) 响应敏感<sup>[47]</sup>。RDA 结果显示 [图5(b)], *A. granulata* 及 *S. hantzschii* 与总磷、可溶性正磷酸盐及钙具有正相关关系, 对应抚仙湖3月总磷、可溶性正磷酸盐及钙浓度相对较高。

### 3.2 水体水质和硅藻群落的空间尺度特征

抚仙湖南北湖区水深差异大, 同时南北湖区的流域开发类型和强度不同, 人类活动导致的污染源存在空间差异<sup>[4,5]</sup>。例如, 环境异质性是造成抚仙湖不同湖区浮游植物群落和密度出现空间差异的重要原因<sup>[6]</sup>。本次调查中抚仙湖3个采样点水质参数表现出较为一致的变化, 反映了水环境特征的空间异质性不大 (图2)。同时, 抚仙湖硅藻的优势属种分布具有较好的空间一致性, 仅在相对丰度上存在一定差异 (图3), 这一结果和前人研究发现的空模存在一定差异。虽然抚仙湖南中北湖区生境差异相对较大, 北部营养水平和水深总体高于中、南部, 但是由于本研究采样点设置在离受人类干扰小的敞水区, 并采集湖水表层 (0~0.5 m) 的水质和硅藻样品, 因此研究结果中并没有体现营养水平和水深等环境梯度的影响。同时, 在抚仙湖盛行风向影响下硅藻等浮游生物在水体中的扩散能力较强<sup>[48,49]</sup>, 导致了硅藻群落结构的空相相似性较高。

### 3.3 湖泊特有硅藻种与多重环境压力评价

物种的迁移幅度在很大程度上取决于对环境条件变化的适应能力<sup>[50]</sup>。生态幅较窄、适应能力较低的物种会因为环境条件的改变而发生物种迁移甚至灭绝, 影响物种的地理分布模式, 进而造成物种多样性降低和生态系统功能衰退。作为全球生物多样性的热点地区之一, 云南境内分布着众多特有物种。抚仙湖作为大型深水湖泊, 相对封闭的地形隔离特征孕育了该湖较为多样的水生物种分布。 *Cyclotella*

*rhomboideo-elliptica* 属于浮游藻类中的硅藻门,是云南高原湖泊特有物种之一<sup>[51]</sup>,历史上曾广泛分布于程海、泸沽湖、洱海、抚仙湖、滇池等湖泊<sup>[11,52~54]</sup>。在 *C. rhomboideo-elliptica* 的个体生态学意义上,已有研究表明该种主要指示水体寡营养水平,但对中营养水平的水体也具备一定耐受性<sup>[55,56]</sup>。同时对水体盐度适应性较好<sup>[3]</sup>。然而,近年来在人类活动和气候变化的持续干扰下,该种在上述湖泊的表层沉积物记录中已接近消失<sup>[3]</sup>。本次研究随机镜检了2015年来自不同湖区的水体样品合计14 400个硅藻壳体,未发现 *C. rhomboideo-elliptica* 现生壳体,表明了该硅藻特有种在抚仙湖可能已近灭绝。因此,营养盐的持续富集和气候变暖下水体热力分层的增强可能为影响该种生长的关键环境因子<sup>[11,57]</sup>。相似的生态环境变化模式也存在于拥有丰富特有物种和生物多样性的贝加尔湖等大型深水湖泊。如硅藻群落的多元回归分析表明,贝加尔湖在持续的气候变暖下,冬季无冰期缩短,夏季升高的水温加强了水体热力分层,造成生长缓慢、喜冷水的特有种 *Aulacoseira baicalensis* 和 *Cyclotella minuta* 显著减少<sup>[58]</sup>。因此,在气候变暖和人类活动扰动的影响下,特有种的基本消失和优势硅藻属种的变化指示了抚仙湖生态系统近几十年来可能经历了群落快速演替和功能结构转变的特征。

#### 4 结论

(1)时间尺度上,抚仙湖表层水体硅藻群落结构的逐月变化呈现明显的季节演替。

(2)空间尺度上,抚仙湖硅藻的优势属种分布具有较好的空间一致性,仅在相对丰度上存在一定差异。

(3)影响抚仙湖表层水体硅藻群落结构时空变化的环境因素主要包括物理因子(水温、风速、透明度)、水化学离子和营养盐,其中水温等物理条件的变化是驱动硅藻群落演替的主要环境因子;此外,水化学离子和营养盐在硅藻群落演替中也具有一定的驱动作用。

#### 参考文献:

- [1] 高伟,陈岩,徐敏,等. 抚仙湖水质变化(1980-2011年)趋势与驱动力分析[J]. 湖泊科学, 2013, 25(5): 635-642.  
Gao W, Chen Y, Xu M, et al. Trend and driving factors of water quality change in Lake Fuxian (1980-2011) [J]. Journal of Lake Sciences, 2013, 25(5): 635-642.
- [2] 覃剑晖. 太湖新银鱼入侵高原深水贫营养湖泊——抚仙湖的生态学效应[D]. 武汉:中国科学院水生生物研究所, 2005. 20-25.
- Qin J H. Ecological effects of the invasive icefish *Neosalanx taihuensis* in a deep oligotrophic plateau lake, Lake Fuxian [D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2005. 20-25.
- [3] Li Y L, Gong Z J, Shen J. Effects of eutrophication and temperature on *Cyclotella rhomboideo-elliptica* Skuja, endemic diatom to China [J]. Phycological Research, 2012, 60(4): 288-296.
- [4] 玉溪市人民政府. 抚仙湖流域水污染综合防治“十二五”规划[R]. 2012.
- [5] 杨加林,李杰,李经纬,等. 抚仙湖-星云湖水生生物与水环境研究综述[J]. 云南地理环境研究, 2012, 24(2): 98-102, 109.  
Yang J L, Li J, Li J W, et al. Summarize on the research of the hydro-bios and aquatic environment in Fuxian lake and Xingyun lake [J]. Yunnan Geographic Environment Research, 2012, 24(2): 98-102, 109.
- [6] 潘继征,熊飞,李文朝,等. 抚仙湖浮游植物群落结构、分布及其影响因子[J]. 生态学报, 2009, 29(10): 5376-5385.  
Pan J Z, Xiong F, Li W C, et al. Structure, distribution and its impact factors of phytoplankton community in Fuxian Lake [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5376-5385.
- [7] 此里能布,毛建忠,赵华刚,等. 2011年抚仙湖浮游植物群落结构研究[J]. 环境科学导刊, 2013, 32(3): 26-30.  
Cilinengbu, Mao J Z, Zhao H G, et al. The phytoplankton community structure in Fuxian lake in the autumn of 2011 [J]. Environmental Science Survey, 2013, 32(3): 26-30.
- [8] 蒋伊能,张涛,陈丽,等. 抚仙湖冬-春季浮游植物群落结构变化及其影响因子识别[J]. 海洋湖沼通报, 2016, (6): 87-98.  
Jiang Y N, Zhang T, Chen L, et al. Identification of phytoplankton community changes and environmental factors during the winter-spring transition in Fuxian Lake [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2016, (6): 87-98.
- [9] Zhang X, Xie P, Chen F Z, et al. Driving forces shaping phytoplankton assemblages in two subtropical plateau lakes with contrasting trophic status [J]. Freshwater Biology, 2007, 52(8): 1463-1475.
- [10] Shi H B, Chen G J, Lu H B, et al. Regional pattern of *Bosmina* responses to fish introduction and eutrophication in four large lakes from Southwest China [J]. Journal of Plankton Research, 2016, 38(3): 443-445.
- [11] 陈小林,陈光杰,卢慧斌,等. 抚仙湖和滇池硅藻生物多样性与生产力关系的时间格局[J]. 生物多样性, 2015, 23(1): 89-100.  
Chen X L, Chen G J, Lu H B, et al. Long-term diatom biodiversity responses to productivity in lakes of Fuxian and Dianchi [J]. Biodiversity Science, 2015, 23(1): 89-100.
- [12] Reynolds C S. The ecology of phytoplankton [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006.
- [13] Smol J P, Birks H J B, Last W M, et al. Tracking environmental change using lake sediments. Volume 4: zoological indicators [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [14] Charles D F, Battarbee R W, Renberg I, et al. Paleocological analysis of lake-acidification trends in North America and Europe using diatoms and chrysophytes. Draft report (Final) [J]. Anaesthesia & Intensive Care, 1990, 4(21): 207-276.

- [15] Bernes C. Climate and the natural environment[R]. Stockholm: National Environmental Protection Board, 1989.
- [16] 刘霞, 陆晓华, 陈宇炜. 太湖浮游硅藻时空演化与环境因子的关系[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(4): 821-827.  
Liu X, Lu X H, Chen Y W. Long-term evolution of planktonic diatoms and their relationships with environmental factors in Lake Taihu[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, **32**(4): 821-827.
- [17] Lotter A F, Birks H J B, Hofmann W, *et al.* Modern diatom, cladocera, chironomid, and chrysophyte cyst assemblages as quantitative indicators for the reconstruction of past environmental conditions in the Alps. II. Nutrients [J]. Journal of Paleolimnology, 1997, **19**(4): 443-463.
- [18] Reynolds C S. The ecology of freshwater phytoplankton [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.
- [19] Anderson N J. Miniview: diatoms, temperature and climatic change[J]. European Journal of Phycology, 2000, **35**(4): 307-314.
- [20] Chen C H, Zhao L Y, Zhu C, *et al.* Response of diatom community in Lugu Lake (Yunnan-Guizhou Plateau, China) to climate change over the past century [J]. Journal of Paleolimnology, 2014, **51**(3): 357-373.
- [21] 李小平. 湖泊学[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [22] 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. 12.
- [23] Battarbee R W, Jones V J, Flower R J, *et al.* Diatoms[A]. In: Smol J P, Birks H J B, Last W M (Eds.). Tracking Environmental Change Using Lake Sediments (3rd ed.) [M]. New York: Kluwer Academic Publishers, 2002. 155-202.
- [24] Krammer K, Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae [A]. In: Ettl H, Gerloff J, Heynig H, *et al.* (Eds.). Süßwasserflora von Mitteleuropa [M]. Stuttgart: Fischer-Verlag, 1986-1991.
- [25] Li Y L, Metzeltin D, Gong Z J. Two new species of *Sellaphora* (Bacillariophyta) from a deep oligotrophic plateau lake, Lake Fuxian in subtropical China [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2010, **28**(6): 1160-1165.
- [26] Gong Z J, Metzeltin D, Li Y L, *et al.* Three new species of *Navicula* (Bacillariophyta) from lakes in Yunnan Plateau (China) [J]. Phytotaxa, 2015, **208**(2): 135-146.
- [27] Li Y L, Gong Z J, Wang C C, *et al.* New species and new records of diatoms from Lake Fuxian, China [J]. Journal of Systematics and Evolution, 2010, **48**(1): 65-72.
- [28] Gong Z J, Li Y L. *Cymbella fuxianensis* Li and *Gong* sp. nov. (Bacillariophyta) from Yunnan Plateau, China [J]. Nova Hedwigia, 2011, **92**(3-4): 551-556.
- [29] Bennion H. A diatom-phosphorus transfer function for shallow, eutrophic ponds in southeast England [J]. Hydrobiologia, 1994, **275-276**(1): 391-410.
- [30] Ter Braak C J F, Smilauer P. CANOCO reference manual and user's guide to Canoco for Windows: software for canonical community ordination (version 4) [M]. New York: Centre for Biometry Wageningen, 1998. 351.
- [31] Ju L H, Yang J, Liu L M, *et al.* Diversity and distribution of freshwater testate amoebae (protozoa) along latitudinal and trophic gradients in China [J]. Microbial Ecology, 2014, **68**(4): 657-670.
- [32] Sommer U. Factors controlling the seasonal variation in phytoplankton species composition. -A case study for a deep, nutrient rich lake (Lake Constance) [J]. Progress in Phycological Research, 1987, **5**: 123-178.
- [33] Padisák J, Borics G, Fehér G, *et al.* Dominant species, functional assemblages and frequency of equilibrium phases in late summer phytoplankton assemblages in Hungarian small shallow lakes [J]. Hydrobiologia, 2003, **502**(1-3): 157-168.
- [34] Smol J P, Cumming B F. Tracking long-term changes in climate using algal indicators in lake sediments [J]. Journal of Phycology, 2000, **36**(6): 986-1011.
- [35] Sorvari S, Korhola A, Thompson R. Lake diatom response to recent Arctic warming in Finnish Lapland [J]. Global Change Biology, 2002, **8**(2): 171-181.
- [36] Smol J P, Wolfe A P, Birks H J B, *et al.* Climate-driven regime shifts in the biological communities of arctic lakes [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2005, **102**(12): 4397-4402.
- [37] Rühland K, Paterson A M, Smol J P. Hemispheric-scale patterns of climate-related shifts in planktonic diatoms from North American and European Lakes [J]. Global Change Biology, 2008, **14**(11): 2740-2754.
- [38] Talling J F. The phytoplankton population as a compound photosynthetic system [J]. New Phytologist, 1957, **56**(2): 133-149.
- [39] Kilham S S, Theriot E C, Fritz S C. Linking planktonic diatoms and climate change in the large lakes of the Yellowstone ecosystem using resource theory [J]. Limnology and Oceanography, 1996, **41**(5): 1052-1062.
- [40] Hötzel G, Croome R. Population dynamics of *Aulacoseira granulata* (EHR.) SIMONSON (Bacillariophyceae, Centrales), the dominant alga in the Murray River, Australia [J]. Archiv für Hydrobiologie, 1996, **136**(2): 191-215.
- [41] Rühland K M, Smol J P. Freshwater diatoms from the Canadian Arctic treeline and development of paleolimnological inference models [J]. Journal of Phycology, 2002, **38**(2): 249-264.
- [42] Interlandi S J, Kilham S S. Assessing the effects of nitrogen deposition on mountain waters: a study of phytoplankton community dynamics [J]. Water Science and Technology, 1998, **38**(10): 139-146.
- [43] Saros J E, Michel T J, Interlandi S J, *et al.* Resource requirements of *Asterionella formosa* and *Fragilaria crotonensis* in oligotrophic alpine lakes: implications for recent phytoplankton community reorganizations [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2005, **62**(7): 1681-1689.
- [44] Gómez N, Riera J L, Sabater S. Ecology and morphological variability of *Aulacoseira granulata* (Bacillariophyceae) in Spanish reservoirs [J]. Journal of Plankton Research, 1995, **17**(1): 1-16.
- [45] Kilham S S, Kilham P. *Melosira granulata* (Ehr.) Ralfs: morphology and ecology of a cosmopolitan freshwater diatom [J]. Internationale Vereinigung Für Theoretische und Angewandte Limnologie: Verhandlungen, 1975, **19**(4): 2716-2721.
- [46] 董旭辉, 羊向东, 王荣. 长江中下游地区湖泊富营养化的硅藻指示性属种 [J]. 中国环境科学, 2006, **26**(5): 570-574.  
Dong X H, Yang X D, Wang R. Diatom indicative species of eutrophication of the lakes in the middle and lower reach regions of Yangtze River [J]. China Environmental Science, 2006, **26**

- (5): 570-574.
- [47] Liu J B, Rühländ K M, Chen J H, *et al.* Aerosol-weakened summer monsoons decrease lake fertilization on the Chinese Loess Plateau[J]. *Nature Climate Change*, 2017, **7**(1-3): 190-194.
- [48] Verleyen E, Vyverman W, Sterken M, *et al.* The importance of dispersal related and local factors in shaping the taxonomic structure of diatom metacommunities [J]. *Oikos*, 2009, **118**(8): 1239-1249.
- [49] Bennett J R, Cumming B F, Ginn B K, *et al.* Broad-scale environmental response and niche conservatism in lacustrine diatom communities [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2010, **19**(5): 724-732.
- [50] Thuiller W. Biodiversity: climate change and the ecologist[J]. *Nature*, 2007, **448**(7153): 550-552.
- [51] 齐雨藻. 中国淡水藻志-第四卷 硅藻门 中心纲[M]. 北京: 科学出版社, 1995. 104.
- [52] Li Y L, Gong Z J, Shen J. Diatom distribution in the surficial sediments of Lake Fuxian, Yunnan Plateau, China[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2011, **10**(76): 17499-17505.
- [53] Zhang X, Xie P, Chen F Z, *et al.* Present status and changes of the phytoplankton community after invasion of *Neosalanx taihuensis* since 1982 in a deep oligotrophic plateau lake, Lake Fuxian in the subtropical China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2005, **17**(3): 389-394.
- [54] Gong Z J, Li Y L, Shen J, *et al.* Diatom community succession in the recent history of a eutrophic Yunnan Plateau lake, Lake Dianchi, in subtropical China[J]. *Limnology*, 2009, **10**(3): 247-253.
- [55] 黎尚豪, 俞敏娟, 李光正, 等. 云南高原湖泊调查[J]. *海洋与湖沼*, 1963, **5**(2): 87-114.
- LI S H, Yu M K, Li K C, *et al.* Limnological survey of the lakes of Yunnan Plateau[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1963, **5**(2): 87-114.
- [56] Li Y L, Gong Z J, Shen J. Freshwater diatoms of eight lakes in the Yunnan plateau, China[J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2007, **22**(1): 169-171.
- [57] 王倩. 盛冰期以来云南泸沽湖生态环境演化及其对西南季风气候的响应[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.
- [58] Mackay A W, Ryves D B, Morley D W, *et al.* Assessing the vulnerability of endemic diatom species in Lake Baikal to predicted future climate change: a multivariate approach [J]. *Global Change Biology*, 2006, **12**(12): 2297-2315.



## CONTENTS

Spatial-Temporal Change Evolution of PM <sub>2.5</sub> in Typical Regions of China in Recent 20 Years	LUO Yi, DENG Qiong-fei, YANG Kun, <i>et al.</i>	(3003)
Evaluation the Extent of Health Damage Caused by PM <sub>2.5</sub> Particulate in Xi'an City	WEI Guo-ru, SHI Xing-min	(3014)
Analysis of Chemical Composition, Source and Evolution of Submicron Particles in Xianghe, Hebei Province	JIANG Qi, WANG Fei, SUN Ye-le	(3022)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Components of PM <sub>2.5</sub> During Autumn in the Northern Suburb of Nanjing	XU Zu-fei, CAO Fang, GAO Song, <i>et al.</i>	(3033)
Comparison of Chemical Components Characteristics of PM <sub>2.5</sub> Between Haze and Clean Periods During Summertime in Lin'an	LIANG Lin-lin, SUN Jun-ying, ZHANG Yang-mei, <i>et al.</i>	(3042)
Characteristics and Sources of Carbon Components in PM <sub>2.5</sub> During Autumn and Winter in Panjin City	ZHANG Lei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i>	(3051)
Aerosol Optical Properties and Light Absorption Enhancement of EC During Wintertime in Nanjing	HUANG Cong-cong, MA Yan, ZHENG Jun	(3057)
Concentration, Solubility, and Dry Deposition Flux of Trace Elements in Fine and Coarse Particles in Qingdao During Summer	LI Peng-zhi, LI Qian, SHI Jin-hui, <i>et al.</i>	(3067)
Characteristics and Sources of Dissolved Heavy Metals in Summer Precipitation of Taiyuan City, China	YE Ai-ling, CHENG Ming-chao, ZHANG Lu, <i>et al.</i>	(3075)
Characteristics of and Factors Affecting Atmospheric CO <sub>2</sub> Concentration in Hangzhou	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, JIANG Yu-jun, <i>et al.</i>	(3082)
Treatment Status and Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industrial Sources	JING Sheng-ao, WANG Hong-li, ZHU Hai-lin, <i>et al.</i>	(3090)
Characteristics of Industrial VOCs Emission Sources and Control Technology Application in a Prefecture-level City Region-Based on Qinhuangdao City	..... HU Xu-ru, HU Xiao-yu, WANG Can	(3096)
Pollution Condition and Health Risk Assessment of VOCs in Fermentation Exhaust from Penicillin Production	GUO Bin, YAO Rui-jing, ZHANG Shuo, <i>et al.</i>	(3102)
Measurements of OC and EC Emission Factors for Light-duty Gasoline Vehicles	HUANG Cheng, HU Qing-yao, LU Jun	(3110)
Pollution Levels and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Nanjing	TIAN Chun-hui, YANG Ruo-zhu, Gulizhaer Yilihamu, <i>et al.</i>	(3118)
Contamination Levels and Source Analysis of Heavy Metals in the Finer Particles of Urban Road Dust from Xi'an, China	SHI Dong-qí, LU Xin-wei	(3126)
pCO <sub>2</sub> in the Main Rivers of the Three Gorges Reservoir and Its Influencing Factors	LUO Jia-chen, MAO Rong, LI Si-yue	(3134)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Surface Water and Groundwater of the Jinghe River	KOU Yong-chao, KUA Kun, LI Zhou, <i>et al.</i>	(3142)
Urban Runoff Phosphorus Removal Pathways in Bioretention Systems	LI Li-qing, LIU Yu-qing, YANG Jia-min, <i>et al.</i>	(3150)
Succession Characteristics of Phytoplankton Functional Groups and Their Relationships with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai	..... YANG Li, ZHANG Wei, SHANG Guang-xia, <i>et al.</i>	(3158)
Spatio-temporal Variations of Diatom Community and Their Relationship with Water Environment in Fuxian Lake	LI Rui, CHEN Guang-jie, KANG Wen-gang, <i>et al.</i>	(3168)
Effects of Algal Blooms and Their Degradation on the Sediment-water Micro-interface	WANG Yong-ping, XIE Rui, CHAO Jian-ying, <i>et al.</i>	(3179)
Effect of Biochar on Root Morphological Characteristics of Wetland Plants and Purification Capacity of Constructed Wetland	XU De-fu, PAN Qian-cheng, LI Ying-xue, <i>et al.</i>	(3187)
Preparation of Mn-Co/Ceramic Honeycomb Catalyst and Its Performance on Catalytic Ozonation of Hydroquinone	ZHANG Lan-he, GAO Wei-wei, CHEN Zi-cheng, <i>et al.</i>	(3194)
Degradation Mechanism of Tetracycline Using Fe/Cu Oxides as Heterogeneous Activators of Peroxymonosulfate	LI Jing, BAO Jian-guo, DU Jiang-kun, <i>et al.</i>	(3203)
Behavior and Mechanisms of Cd(II) Adsorption from Water by Niobate-Modified Titanate Nanosheets	KANG Li, LIU Wen, LIU Xiao-na, <i>et al.</i>	(3212)
Trace Amounts of Phosphorus Removal Based on the in-suit Oxidation Products of Iron or Manganese in a Biofilter	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i>	(3222)
Effect of Preparation Methods on Phosphate Adsorption by Iron-Titanium Binary Oxide: Coprecipitation and Physical Mixing	ZHONG Yan, WANG Jiang-yan, CHEN Jing, <i>et al.</i>	(3230)
Effects of Conductivity on Performance of a Combined System of Anaerobic Acidification, Forward Osmosis, and a Microbial Fuel Cell	LU Yu-qin, LIU Jin-meng, WANG Xin-hua, <i>et al.</i>	(3240)
COD Requirement for Biological Phosphorus Removal Granule System Under Different Phosphorus Concentrations	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i>	(3247)
Effect of Substrate Concentration on SAD Collaborative Nitrogen and Carbon Removal Efficiency in an ABR Reactor	ZHANG Min, JIANG Ying, WANG Yao-qi, <i>et al.</i>	(3254)
Evaluation of Advanced Nitrogen Removal from Coking Wastewater Using Sulfide Iron-containing Sludge as a Denitrification Electron Donor	..... FU Bing-bing, PAN Jian-xin, MA Jing-de, <i>et al.</i>	(3262)
Stability of Nitrification Combined with Limited Filamentous Bulking Under Intermittent Aeration	GAO Chun-di, SUN Da-yang, AN Ran, <i>et al.</i>	(3271)
Filamentous Sludge Microbial Community of a SBR Reactor Based on High-throughput Sequencing	HONG Ying, YAO Jun-qin, MA Bin, <i>et al.</i>	(3279)
Impact of Nano Zero-Valent Iron (NZVI) on Methanogenic Activity, Physiological Traits, and Microbial Community Structure in Anaerobic Digestion	..... SU Run-hua, DING Li-li, REN Hong-qiang	(3286)
Effects of Gas/Water Ratio on the Characteristics of Nitrogen Removal and the Microbial Community in Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process	..... ZHANG Qian, JI Fang-ying, FU Xu-fang, <i>et al.</i>	(3297)
Comparison of Extraction Methods of Extracellular Polymeric Substances from Activated Sludge	SUN Xiu-yue, TANG Zhu, YANG Xin-ping	(3306)
Identification and Characterization of a Hypothermic Alkaliphilic Aerobic Denitrifying Bacterium <i>Pseudomonas monteilii</i> Strain H97	CAI Xi, HE Teng-xia, YE Qing, <i>et al.</i>	(3314)
Isolation, Identification, and Biodegradation Behaviors of a Perfluorooctane Sulfonic Acid Precursor (PreFOSs) Degrading Bacterium from Contaminated Soil	..... ZHAO Shu-yan, ZHOU Tao, WANG Bo-hui, <i>et al.</i>	(3321)
Microbial Community Distributions in Soils of an Oil Exploitation Site	CAI Ping-ping, NING Zhuo, HE Ze, <i>et al.</i>	(3329)
Characteristics of Soil Physicochemical Properties and Enzyme Activities over Different Reclaimed Years in a Copper Tailings Dam	WANG Rui-hong, JIA Tong, CAO Miao-wen, <i>et al.</i>	(3339)
Risk Analysis of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil Around a Bauxite Residue Disposal Area in Guangxi	GUO Ying, LI Yu-bing, XUE Sheng-guo, <i>et al.</i>	(3349)
Occurrence and Distribution of Phthalate Esters in Urban Soils of Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i>	(3358)
Profile Distribution of Paddy Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors in Chengdu Plain	LI Shan, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i>	(3365)
Correlation Between Soil Organic and Inorganic Carbon and Environmental Factors in Cotton Fields in Different Continuous Cropping Years in the Oasis of the Northern Tarim Basin	..... ZHAO Jing-jing, GONG Lu, AN Shen-qun, <i>et al.</i>	(3373)
Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Soil Physicochemical Factors in Four Different Land Use Types of the Northern Tarim Basin	..... AN Shen-qun, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i>	(3382)
Short-term Mechanism of Warming-induced Stability for Organic Carbon in the Karst Plateau Soil	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i>	(3391)
Effects of Boron Treatment on Arsenic Uptake and Efflux in Rice Seedlings	ZHU Yi, SUN Guo-xin, CHEN Zheng, <i>et al.</i>	(3400)
Comparative Analysis of Different Soil Amendment Treatments on Rice Heavy Metal Accumulation and Yield Effect in Pb and Cd Contaminated Farmland	..... HU Xue-fang, TIAN Zhi-qing, LIANG liang, <i>et al.</i>	(3409)
Seasonal Variation in Surface Ozone and Its Effect on the Winter Wheat and Rice in Nanjing, China	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, WEI Li, <i>et al.</i>	(3418)
Hair Mercury Concentrations in Residents of Fuling and Zhongxian in the Three Gorges Reservoir Region and Their Influence Factors	CHENG Nan, XIE Qing, FAN Yu-fei, <i>et al.</i>	(3426)
Removal of Typical Antibiotics During Aerobic Composting of Human Feces	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian	(3434)
Effect of COD/SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> Ratio on Anaerobic Digestion of Penicillin Bacterial Residues	QIANG Hong, LI Yu-yu, PEI Meng-fu	(3443)
Characteristics of Odor Emissions from Fresh Compost During Storage and Application	HE Pin-jing, JIANG Ning-ling, XU Xian, <i>et al.</i>	(3452)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on Ammonia Volatilization from a Paddy Field Treated with Conventional Synthetic Fertilizer and Manure	..... PANG Bing-kun, ZHANG Jing-sha, WU Jie, <i>et al.</i>	(3460)