

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.6  
第41卷 第6期

目次

基于SPAMS的天津市夏季环境受体中颗粒物的混合状态及来源..... 林秋菊,徐娇,李梅,王玮,史国良,冯银厂 (2505)

南京北郊降水无机离子和有机酸的化学特征及来源分析..... 杨笑影,曹芳,林煜棋,章炎麟 (2519)

西安市PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子的季节变化特征..... 黄舍舍,王羽琴,李升苹,陈庆彩 (2528)

新疆石化工业区颗粒物含水量和酸度对二次无机组分形成的影响..... 刘会斌,迪丽努尔·塔力甫,王新明,张潇潇,王威,阿布力克木·阿不力孜,买里克扎提·买合木提,刘伟 (2536)

长秋季生物质燃烧对PM<sub>2.5</sub>中WSOC吸光性的影响..... 孟德友,曹芳,翟晓瑶,张世春,章炎麟 (2547)

2019年5月上海复合污染过程中挥发性有机物的污染特征及来源..... 王倩 (2555)

南京工业区秋季大气挥发性有机物污染特征及来源解析..... 曹梦瑶,林煜棋,章炎麟 (2565)

郑州市春季大气污染过程VOCs特征、臭氧生成潜势及源解析..... 任义君,马双良,王思维,于世杰,李一丹,张瑞芹,尹沙沙 (2577)

上甸子区域背景站VOCs污染特征及其对臭氧生成贡献..... 韩婷婷,李颖若,邱雨露,何迪,王焱,马志强 (2586)

北京市餐饮业大气污染物排放特征..... 孙成一,白画画,陈雪,翟翼飞,高启天,何万清,聂磊,石爱军,李国傲 (2596)

北京市农业机械排放因子与排放清单..... 王凯,樊守彬,亓浩云 (2602)

北京市土壤风蚀扬尘排放因子本地化..... 李贝贝,黄玉虎,毕晓辉,刘李阳,秦建平 (2609)

基于MODIS\_C061的长三角地区AOD与Angström指数时空变化分析..... 张颖蕾,崔希民 (2617)

环渤海地区2,4,4'-三氯联苯的多介质归趋模拟..... 张毅,马艳飞,宋帅,吕永龙,张盛,吴强 (2625)

岗南水库沉积物间隙水有色溶解有机物的时空分布特征及差异分析..... 周石磊,孙悦,苑世超,彭瑞哲,刘世崇,岳奇丞,张航,王周强,李再兴,罗晓 (2635)

“河-湖”沉积物重金属环境特征及来源解析..... 李悦昭,陈海洋,孙文超 (2646)

伊通河(城区段)沉积物重金属形态分布特征及风险评价..... 姜时欣,翟付杰,张超,王蒙蒙,单保庆 (2653)

典型岩溶地下河流域水体中硝酸盐源解析..... 赵然,韩志伟,申春华,张水,涂汉,郭永丽 (2664)

沉积物参与下氮磷脉冲式输入对太湖水体营养盐浓度和藻类生长的影响..... 陈洁,许海,詹旭,许笛,朱广伟,朱梦圆,季鹏飞,康丽娟 (2671)

丰水期东洞庭湖超微型浮游藻类时空分布特征及其影响因素..... 李胜男,陈豪宇,彭华,李芸君,朱坚,简燕,纪雄辉 (2679)

胶网藻对水体中恩诺沙星的毒性响应及去除作用..... 王振方,韩子玉,王梦雪,马逸驰,王婷,王丽卿,张玮 (2688)

不同光照和磷水平下两种沉水植物磷富集和钙磷含量的比较..... 桑雨璇,杨珈乐,熊怡,尹文博,汪华,王和云 (2698)

过氧化钙复合片剂对水体修复和底泥磷控制的作用..... 张帅,李大鹏,丁玉琴,徐楚天,许鑫澎,孙培荣,赵哲豪,黄勇 (2706)

基于区域DNDC的稻田轮作氮素空间分异与驱动分析:以晋江流域为例..... 王亚楠,祝伟,祁新华,范水生 (2714)

不同铁锰浓度的低温铁锰氨地下水净化中氨氮去除途径..... 张杰,梅宁,刘孟浩,叶雪松,李冬 (2727)

高晶度Mn-Fe LDH催化剂活化过一硫酸盐降解偶氮染料RBK5..... 李立,吴丽颖,董正玉,王霖,张倩,洪俊明 (2736)

Fe-cyclam/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>体系催化降解罗丹明B机制..... 余雨清,陈翔宇,蔡权华,黄歆珏,陈曼 (2746)

微生物光电化学池去除硝酸盐氮:以PANl/TiO<sub>2</sub>-NTs为光阳极..... 卢忆,周海珊,彭瑞建,叶杰旭,陈建孟,宋爽,张士汉 (2754)

缺氧MBR-MMR处理海水养殖废水性能及膜污染特性..... 陈凡雨,徐仲,尤宏,柳锋,李之鹏,陈其伟,韩红卫 (2762)

HRT对改良式A<sup>2</sup>/O-BAF反硝化除磷脱氮的影响..... 赵凯亮,刘安迪,南彦斌,梁利民,王云霞,陈永志 (2771)

重金属Ni(II)对厌氧氨氧化脱氮性能的影响及其动力学特征变化..... 孙琪,赵白航,范飒,周邦磊,李玉琪 (2779)

异养硝化-好氧反硝化混合菌对尿素的去及重金属和盐度的影响..... 王萌萌,曹刚,张迪,冯乃亮,潘涌璋 (2787)

火山岩填料曝气生物滤池的SNAD工艺启动特性及功能菌丰度演替..... 薛嘉俊,张绍青,张立秋,李淑更,姚海楠,耿忠轩,李鸿,刘晓玲 (2796)

游离羟胺对两种典型亚硝态氮氧化菌活性的影响..... 沈琛,张树军,彭永臻 (2805)

死菌DNA对厌氧消化污泥中抗生素抗性基因及微生物群落分析的干扰..... 苏宇傲,刘宏波,毛秋燕,张慧旻,张衍,刘和 (2812)

中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价..... 陈文轩,李茜,王珍,孙兆军 (2822)

土壤环境质量预警体系构建与应用..... 李笑诺,丁寿康,陈卫平,王夏晖,吕斯丹,刘睿 (2834)

不同母质发育土壤团聚体分布对外源输入秸秆的响应及其与有机碳矿化的关系..... 毛霞丽,邱志腾,张爽,沈倩,章明奎 (2842)

长期施肥稻田土壤胞外酶活性对底物可利用性的响应特征..... 宁玉菲,魏亮,魏晓梦,祝贞科,袁红朝,葛体达,吴金水 (2852)

生物质炭对磷富集土壤中两种元素生物有效性及作物镉积累的影响..... 黄洋,郭晓,胡学玉 (2861)

基于田块尺度的农田土壤和小麦籽粒镉铅污染特征及健康风险评价..... 肖冰,薛培英,韦亮,刘成程,高培培,樊利敏,杜佳燕,刘文菊 (2869)

重构土壤垂直剖面重金属Cd赋存形态及影响因素..... 胡青青,沈强,陈飞,尹炳,邹宏光,庄红娟,张世文 (2878)

新乡市镉污染土壤细菌群落组成及其对镉固定效果..... 陈兆进,李英军,邵洋,林立安,徐鸽,陈彦,田伟,姚伦广,韩辉 (2889)

三峡消落带适生植物根系活动调控土壤养分与细菌群落多样性特征..... 李丽娟,李昌晓,陈春桦,杨治华,陈雪梅 (2898)

滇池水中细菌和古菌氮代谢功能基因的空间分布..... 张宇,左剑恶,王丝可,Alisa Salimova,李爱军,李玲玲 (2908)

模拟升温对冰川前缘地微生物种群的影响..... 王愉琬,马安周,种国双,谢飞,周汉昌,刘国华,庄国强 (2918)

水肥气耦合对温室番茄土壤N<sub>2</sub>O排放及番茄产量的影响..... 商子惠,蔡焕杰,陈慧,孙亚楠,李亮,朱艳,王晓云 (2924)

矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦的毒性作用..... 尚誉,杨丰隆,宁夏,董轶茹,桑楠 (2936)

海南省昌化江河口海域生物体中多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评价..... 汪慧娟,旷泽行,周贤,覃晓青,黄洪辉 (2942)

春季北京市河流大型底栖动物群落结构特征及影响因素分析..... 贺玉晓,李珂,任玉芬,王思琪,方文颖 (2951)

热解温度和时问对香蒲生物炭性质的影响及生态风险评估..... 蔡朝卉,楚沉静,郑浩,罗先香,李锋民 (2963)

长江经济带交通碳排放测度及其效率格局(1985~2016年)..... 蒋自然,金环环,王成金,叶士琳,黄艳豪 (2972)

《环境科学》征订启事(2595) 《环境科学》征稿简则(2687) 信息(2697,2713,2811)

# 丰水期东洞庭湖超微型浮游藻类时空分布特征及其影响因子

李胜男<sup>1,2</sup>, 陈豪宇<sup>1,3</sup>, 彭华<sup>1</sup>, 李尝君<sup>1</sup>, 朱坚<sup>1</sup>, 简燕<sup>1</sup>, 纪雄辉<sup>1,3\*</sup>

(1. 湖南省农业科学院湖南省农业环境生态研究所, 农业部长江中游平原农业环境重点实验室, 长沙 410125; 2. 湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 3. 湖南大学研究生院隆平分院, 长沙 410125)

**摘要:** 超微型浮游藻类 (<3 μm) 主要包括超微蓝藻 (PCY) 和超微真核藻 (PPEs), 是浮游生态系统的重要组成部分, 在水体物质循环和能量流动中起着重要作用。为了解通江湖泊中超微藻动态变化特征及其关键影响因子, 于2019年洞庭湖丰水期(5~8月)每月对东洞庭湖进行采样调查, 研究了丰水期间东洞庭湖超微藻生物量和丰度的时空演变规律及其与环境因子的关系。结果表明, 东洞庭湖丰水期超微藻生物量和丰度均表现出显著的时空演变规律 ( $P < 0.05$ )。整个丰水期间, 超微藻 Chla 平均浓度为  $8.52 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 其对总浮游藻类 Chla 的贡献率平均为 41.6%; 从5~8月, 随着水温的增加, 超微藻 Chla 浓度不断增加, 尤其是东洞庭湖北部湖区和南部湖区; 东部行洪道超微藻 Chla 浓度全湖最低。PCY 是东洞庭湖超微藻的主要优势藻, 其丰度平均是 PPEs 的 3.4 倍。PCY 和 PPEs 丰度表现出相似的时空分布规律: 时间上, 从5~8月均呈现先增加后降低的趋势; 空间上, 随着丰水期的推移, 超微藻丰度峰值由北部湖区向南部湖区迁移, 到8月丰水期末期超微藻丰度逐渐降低, 北部湖区超微藻丰度最高。分析结果表明, 丰水期超微藻表现出了显著的时空分布规律, 水位和 N:P 比是影响东洞庭湖 PCY 和 PPEs 丰度组成比例变化最重要的因子。

**关键词:** 东洞庭湖; 超微蓝藻 (PCY); 超微真核藻 (PPEs); 时空分布; 环境因子; 通江湖泊

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)06-2679-09 DOI: 10.13227/j.hjx.201912223

## Temporal and Spatial Variation Patterns of Picophytoplankton and Their Correlations with Environmental Factors During the Wet Season in East Lake Dongting

LI Sheng-nan<sup>1,2</sup>, CHEN Hao-yu<sup>1,3</sup>, PENG Hua<sup>1</sup>, LI Chang-jun<sup>1</sup>, ZHU Jian<sup>1</sup>, JIAN Yan<sup>1</sup>, JI Xiong-hui<sup>1,3\*</sup>

(1. Key Laboratory of Agro-Environment in Midstream of Yangtze Plain, Ministry of Agriculture, Hunan Institute of Agro-Environment and Ecology, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125, China; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing 210008, China; 3. Longping Branch of Graduate School of Hunan University, Changsha 410125, China)

**Abstract:** Picophytoplankton (<3 μm), comprising picocyanobacteria (PCY) and photosynthetic picoeukaryotes (PPEs), are considerably important in the material circulation and energy flow of aquatic ecosystems. To explore the temporal and spatial variation patterns of picophytoplankton and their correlations with environmental factors in lotic Yangtze-connected lakes, field *in-situ* investigations were performed on a monthly basis during the wet season (May to August) in 2019 in East Lake Dongting, a Yangtze-connected lake. The results indicated that both the Chla biomass and abundances of picophytoplankton exhibited significant spatial and temporal variability ( $P < 0.05$ ). The picophytoplankton Chla biomass showed an average concentration of  $8.52 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  and accounted for 41.6% to total phytoplankton on an average. From May to August, Chla biomass of picophytoplankton kept increasing with increasing temperature, especially in the north and south of the lake, and it was the lowest in the east of the lake. PCY dominated picophytoplankton abundance in East Lake Dongting and was 3.4 times the abundance of PPEs on an average. Similar spatial and temporal variation patterns were observed between PCY and PPEs. The abundances of PCY and PPEs both increased first and then decreased during the wet season. Spatially, picophytoplankton showed a trend to migrate from the northern lake to the southern lake from May to July, and the abundance significantly declined in August and peaked mainly in the north of the lake. The analysis results showed that picophytoplankton in East Lake Dongting exhibited significant spatial and temporal variability during the wet season; the water level and N:P ratio were determined to be the most important factors explaining the variation of the abundance proportion of PCY and PPEs.

**Key words:** East Lake Dongting; picocyanobacteria (PCY); photosynthetic picoeukaryotes (PPEs); temporal and spatial distribution; environmental factors; Yangtze-connected lake

收稿日期: 2019-12-26; 修订日期: 2020-01-07

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(31800388); 湖南省自然科学基金项目(2019JJ50314); 湖泊与环境国家重点实验室开放基金项目(2018SKL008); 湖南省农业科技创新基金项目(2018QN34)

作者简介: 李胜男(1989~), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为湖泊生态学及农业环境, E-mail: lishengnan@hunaas.cn

\* 通信作者, E-mail: jixionghui@hunaas.cn

超微型浮游藻类[ picophytoplankton,  $\leq 3 \mu\text{m}$ , 超微藻(PPP)],是浮游生态系统的重要组成部分,在水体物质循环和能量流动中起着重要作用.超微藻细胞微小,具有更高的  $\text{CO}_2$  固定效率,其对水体初级生产力的贡献量最高可达 90%<sup>[1~4]</sup>.不同于大型藻类,超微藻所固定的碳主要通过微食物环被异养微生物代谢分解,微食物环中呼吸量高,可供更高营养级别生物利用或输出的有机物很少;已有研究表明,水体总浮游生物的生产力和呼吸比与超微藻对总生产力的贡献量呈显著负相关关系<sup>[5]</sup>.因此,它们在推动水体生态系统的物质循环和能量流动,维持系统平衡等方面起着非常重要的作用<sup>[6,7]</sup>,了解湖泊中超微藻生物量及其主要的影响因子对深入研究整个湖泊生态学功能具有重要作用和意义.

根据细胞结构,超微藻可分为超微蓝藻(picocyanobacteria, PCY)和真核超微藻(Photosynthetic picoeukaryotes, PPEs).不同类型超微藻所含特异性色素不同:PCY除含有叶绿素(Chlorophyll a, Chla)外,还含有藻胆蛋白<sup>[8]</sup>;根据其所含藻胆蛋白的不同可将其分为富含藻蓝素(phycoyanin, PC)和富含藻红素(phycoerythrin, PE)的细胞<sup>[7]</sup>;而PPEs主要富含叶绿素.由于不同色素所发出的特异性荧光不同,根据这种特性,利用流式细胞仪即可快速区分出不同类型超微藻;相对于传统显微镜计数法,流式细胞仪不仅分析速度快,而且具有更高的准确性和精确度,样品预处理也更简单<sup>[9,10]</sup>.

目前有关超微藻的研究都主要集中在海洋和寡营养湖泊生态系统<sup>[11,12]</sup>,直到近十年来,关注内陆中、富营养水体超微藻的研究才开始逐渐增加<sup>[13]</sup>.国内有关内陆淡水超微藻的研究主要集中在长江中下游地区,如武汉东湖<sup>[14]</sup>、太湖<sup>[15]</sup>以及巢湖<sup>[16]</sup>等,这些湖泊大都为半封闭型稳定水体;而有关通江湖泊和河流等流动型水体超微藻的研究则鲜见,这些水体水动力条件十分复杂,环境因子波动频繁,显著区别于其他稳态湖泊.已有研究表明,在通江湖泊鄱阳湖中,营养条件并非影响浮游藻类时空分布的关键因素,而水体透明度的影响更为重要<sup>[17]</sup>.因此,对这些水体中超微藻进行研究能更好地揭示不同水体中超微藻的分布和演替规律.

洞庭湖是我国第二大淡水湖,是承纳湘、资、沅、澧“四水”和吞吐长江的过水性洪道型湖泊,丰、枯水期水位波动大,江湖关系十分复杂<sup>[18]</sup>.本研究聚焦于洞庭湖泊群中最大、保存最完好的主体湖盆东洞庭湖,通过在丰水期(5~8月)逐月采样调查,结合流式细胞计数技术,明确大型通江湖泊洞庭湖超微藻生物量和丰度的时空分布特征及其关键影响因

子,本研究结果将有助于深入认识超微藻在不同生境类型水体中维持机制及生态意义.

## 1 材料与方法

### 1.1 采样点布置及样品采集

本研究在东洞庭湖区共设置 14 个采样点(图 1),其中 1 和 10~12 号点位于东洞庭湖东部湖区湘江行洪道上;2~5 和 13~14 号点位于东洞庭湖北部湖区;6~9 号点位于东洞庭湖南部湖区.洞庭湖为典型的过水性洪道型湖泊,受水位影响,不同季节水深变化明显;于 2019 年 5 月~2019 年 8 月丰水期每月采集东洞庭湖水样,对超微型浮游藻类展开研究.采样通过 GPS 系统定位,利用采水器采集 0~1.2 m 范围内的表层水样,混合均匀后,装入无菌塑料瓶,冷藏运回实验室进行分析.现场采用多参数水质分析仪(Aquaread AP-2000, UK)原位测定水温( $T$ )、pH、溶解氧(DO)、浊度(NTU)、氧化还原电位(ORP)和电导率(EC)等指标;并利用塞氏黑白盘法测定水体透明度(SD);利用便携式水深探测仪(Speedtech SM-5A, Unionville, VA, USA)测定水深(depth).用采样当日洞庭湖城陵矶站水位表示水位(WL)变化.

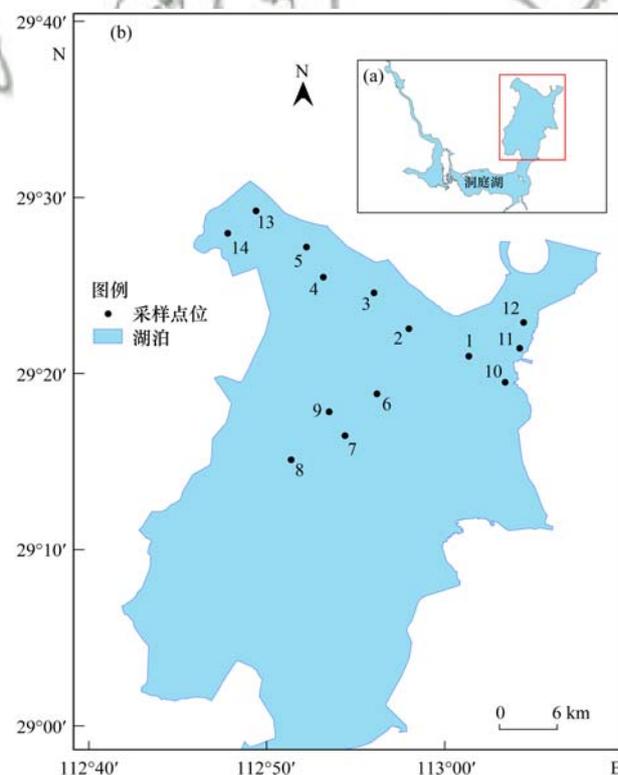


图 1 东洞庭湖位置及采样点位示意

Fig. 1 Location of East Lake Dongting and distribution of the sampling sites

### 1.2 水质及色素分析

总氮(TN)、总磷(TP)及高锰酸盐指数通过硫

酸盐氧化法测定<sup>[19]</sup>. 水样通过 GF/C 玻璃纤维滤膜 (0.8  $\mu\text{m}$  孔径, Whatman) 过滤后滤液用于硝氮 ( $\text{NO}_3^-$ -N)、氨氮 ( $\text{NH}_4^+$ -N)、磷酸盐 ( $\text{PO}_4^{3-}$ -P) 和溶解性有机碳 (DOC) 测定. 利用 Skalar 自动分析系统测定  $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 浓度, 采用高温氧化法利用 Shimadzu TOC 分析仪 (Model 5000, Tokyo, Japan) 测定 DOC 浓度. 水样通过 GF/C 滤膜过滤后滤膜用于藻蓝素 (PC, 表征蓝藻含量) 测定, 采用 Tris-HCl 提取法, 利用荧光分光光度计测定<sup>[20]</sup>.

### 1.3 超微藻生物量测定

利用藻类叶绿素 (Chla) 浓度表征其生物量. 采用分级过滤法, 分别测定超微藻和其他浮游藻类 Chla 浓度. 取部分水样首先用 3  $\mu\text{m}$  孔径的聚碳酸酯滤膜 (Merck Millipore Ltd., Tullagreen, Carrigtwohill Co. Cork, IRL) 过滤, 滤液再通过 0.2  $\mu\text{m}$  孔径的 Isopore<sup>TM</sup> 滤膜过滤. 滤膜用 90% 丙酮提取, 于暗处  $-4^\circ\text{C}$  静置提取至少 12 h, 离心取上清液, 再用 90% 丙酮定容, 利用荧光分光光度计 (RF-5301) 测定 Chla 含量<sup>[20]</sup>. 0.2  $\mu\text{m}$  和 3  $\mu\text{m}$  滤膜代表超微藻 Chla (pico-Chla) 和非超微藻浮游藻类 Chla 浓度, 二者之和即为总浮游藻类 Chla 浓度.

### 1.4 流式细胞分析

利用流式细胞仪 (FACSJazz<sup>SM</sup>, Becton Dickinson, USA) 分析水体中超微型浮游藻类丰度. 水样经 300 目绢筛过滤去除大颗粒及杂质以防止其堵塞流式细胞仪喷嘴. 利用 3  $\mu\text{m}$  标准小球 (SPHERO, URFP-30-2, 3.0  $\mu\text{m}$ , Spherotech, CA, USA) 作为内标, 根据前向散射光信号 (FSC) 筛选出 3  $\mu\text{m}$  以下超微型颗粒; 再根据超微真核藻和超微蓝藻所含特异性色素发出的自发荧光信号区进行区分不同超微藻并分别计数和分选. 利用 Chla 荧光信号设定阈值. 样品混合均匀后, 通过流式细胞仪计数 60 s, 同时用已知浓度的标准计数小球通过流式细胞仪计数相同时间计算超微藻细胞浓度, 计算公式如下:

$$c_i = N_i \times c_s / N_s$$

式中,  $c_i$  为超微藻细胞浓度,  $N_i$  为计数时间内超微藻细胞总数;  $c_s$  和  $N_s$  分别为标准计数小球浓度及相同计数时间内其计数数量.

### 1.5 数据统计分析

通过双因素方差分析 Two-way ANOVAs 对洞庭湖环境因子及超微藻生物量和丰度的时空分布进行差异显著性分析. 利用 Pearson 相关系数分析超微生物量和丰度与主要水环境因子的相关性. 通过多元逐步回归分析影响 PPEs 和 PCY 丰度组成变化的关键环境因子, 利用方差膨胀因子 (VIF) 检验变量之

间的自相关性, 当  $\text{VIF} > 10$  时, 则认为存在共线性问题; 利用矫正  $R^2$  判定系数表征回归模型中环境因子变异对超微藻丰度变异的解释率. 所有统计分析均在 R (version 3.5.3, <http://cran.r-project.org>) 环境下完成, 利用 ArcGIS 10.2 软件分析超微藻丰度空间变化特征.

## 2 结果与分析

### 2.1 丰水期东洞庭湖理化特性分析

洞庭湖丰水期平均水位 12.5 m (11.02 ~ 13.51 m), 从 5 ~ 8 月每月平均水温不断增加, 由  $22.0^\circ\text{C}$  增加到  $31.5^\circ\text{C}$ ; 水体 pH 值与温度呈现相似的增加趋势, 但东部行洪道 pH 值显著低于北部和南部湖区 ( $P < 0.05$ ). 总体上, 东部行洪道水体理化性质与北部和南部湖区差异明显, 东部行洪道水深最深, 但水体透明度、溶解氧和电导率等显著低于 ( $P < 0.05$ ) 其他湖区, 而浊度和氧化还原电位均稍高于其他湖区 (图 2). 东洞庭湖丰水期水体 TN 和 TP 均值分别为  $1.37 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $0.14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 已经达到发生富营养化条件 ( $\text{TN} > 0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{TP} > 0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )<sup>[21]</sup>. 从北部湖区、南部湖区到东部湖区 TN 和  $\text{NO}_3^-$ -N 逐渐升高, 但不同湖区  $\text{NH}_4^+$ -N、磷营养盐及氮磷比均无显著差异, 其中水体  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{PO}_4^{3-}$ -P 和氮磷比分别在  $0.01 \sim 0.55 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.01 \sim 0.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $1.2 \sim 63.0$  范围内波动, 均值分别为  $0.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.04 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和 16 (图 2).

### 2.2 丰水期超微藻叶绿素 a 浓度及其对总浮游藻类的贡献率

东洞庭湖丰水期超微藻 Chla 的平均浓度为  $8.52 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 变化范围为  $0.58 \sim 38.99 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 时空分布差异明显. 从 5 ~ 8 月, 随着水温的增加, 超微藻 Chla 浓度不断增加, 尤其是东洞庭湖北部湖区和南部湖区 [图 3(a)]. 东部行洪道超微藻 Chla 浓度最低, 显著低于北部湖区和南部湖区 ( $P < 0.05$ ). 整个丰水期东洞庭湖超微藻对总浮游藻类 Chla 的贡献率平均为 41.6%, 变化范围为 23.73% ~ 67.91%. 时间上, 7 ~ 8 月超微藻对总浮游藻类 Chla 的贡献率显著高于 5 ~ 6 月; 空间上, 南部湖区超微藻对总浮游藻类 Chla 的贡献率最高, 东部和北部湖区超微藻对总浮游藻类 Chla 的贡献率无显著性差异 [图 3(b)].

### 2.3 丰水期东洞庭湖超微藻丰度时空变化特征

通过流式分析发现, 丰水期东洞庭湖超微藻主要为超微真核藻 (PPEs) 和富含 PC 的超微蓝藻 (PCY), 并未检测到富含 PE 的超微蓝藻; 其中 PPEs 和 PCY 的平均丰度 ( $\text{cells}\cdot\mu\text{L}^{-1}$ ) 分别为 25.90

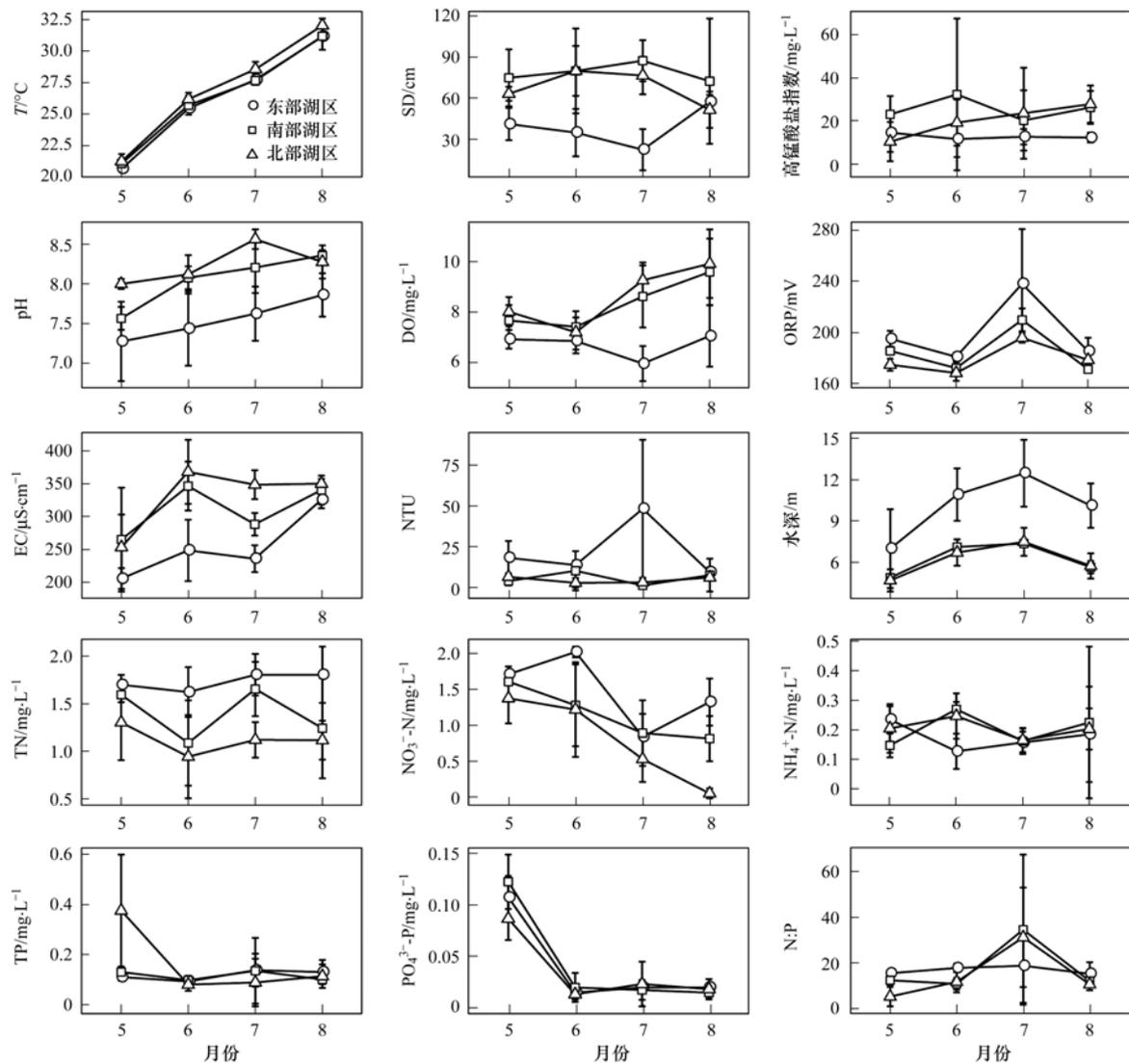


图 2 东洞庭湖主要水环境因子时空差异

Fig. 2 Temporal and spatial variations of the main physicochemical parameters in East Lake Dongting

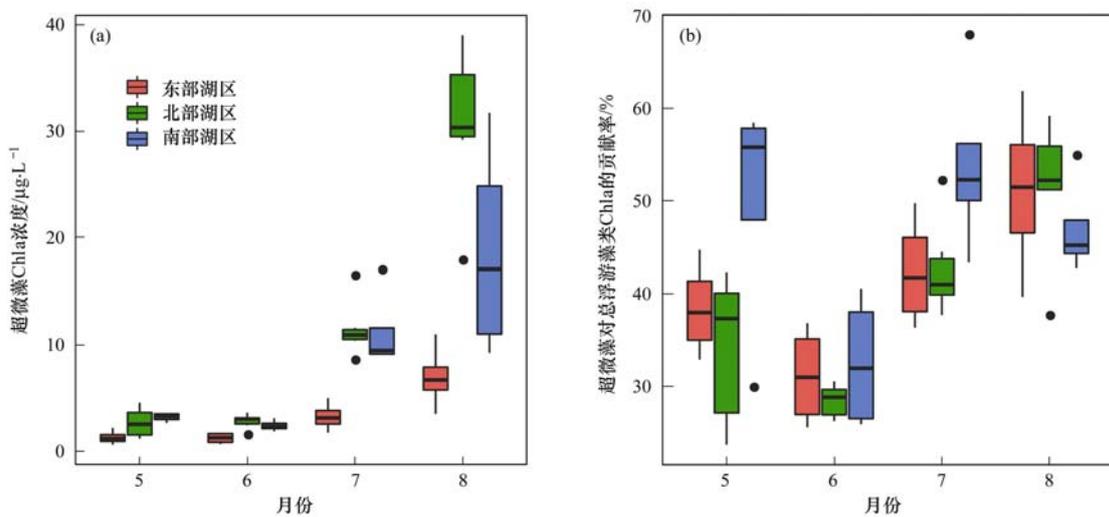


图 3 丰水期东洞庭湖不同湖区超微藻 Chla 浓度及其对总浮游藻类贡献量的变化趋势

Fig. 3 Variation of picophytoplankton chlorophyll a concentration and its contribution to total phytoplankton during the wet season

(1.30 ~ 117.09) 和 108.39 (1.92 ~ 551.07), 均表现出显著的时空变化差异 ( $P < 0.05$ ). 从 5 ~ 8 月,

PPEs 和 PCY 丰度均表现属先增加后降低的时间变化特征, 尤其是部分湖区 PCY 丰度在 6、7 月剧烈升

高,最高达到  $551.07 \text{ cells} \cdot \mu\text{L}^{-1}$ ,到 8 月重新恢复到 5 月水平甚至更低(表 1). 此外,PPEs 和 PCY 丰度在丰水期还表现出明显的空间演变特征(图 4). 5 月 PPEs 主要集中在北部湖区,6 月开始逐渐向南部湖区迁移,7 月南部湖区 PPEs 丰度达到峰值,到 8 月南部湖区 PPEs 丰度降低,并显著低于东部行洪

道和东北部. 而 PCY 表现出与 PPEs 相似的空间演变特征,从 5~7 月由北部湖区向南部湖区逐渐迁移,但到 8 月重新迁移到北湖湖区,东部行洪道 PCY 丰度始终显著低于其他湖区. 通过比较发现,丰水期超微藻主要以 PCY 为主,PCY:PPEs 平均比值为 3.4,最高为 12.8(表 1).

表 1 丰水期每月不同类群超微藻丰度均值比较

Table 1 Comparison of the monthly means of picophytoplankton groups during the wet season

项目	5 月	6 月	7 月	8 月
PPEs/cells· $\mu\text{L}^{-1}$	$22.53 \pm 19.22$	$33.65 \pm 20.17$	$43.18 \pm 34.63$	$4.25 \pm 3.44$
PCY/cells· $\mu\text{L}^{-1}$	$35.00 \pm 47.29$	$165.18 \pm 149.58$	$228.76 \pm 150.57$	$4.60 \pm 2.04$
PCY:PPEs	$1.32 \pm 0.68$	$4.72 \pm 2.78$	$5.91 \pm 2.71$	$1.44 \pm 0.60$

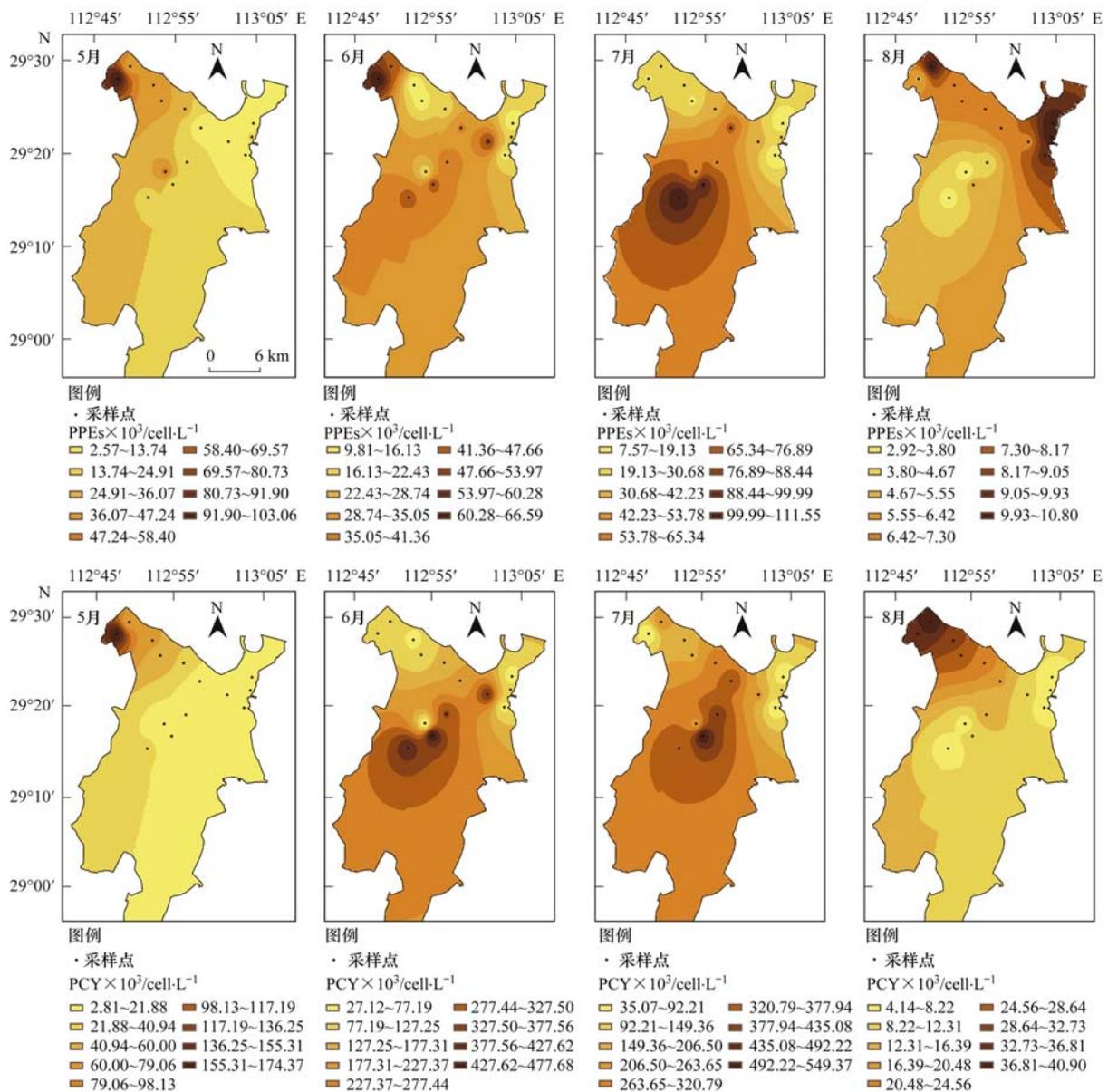


图 4 东洞庭湖丰水期(5~8 月)超微型真核藻和原核藻丰度空间变化

Fig. 4 Spatial variations of concentrations in East Lake Dongting

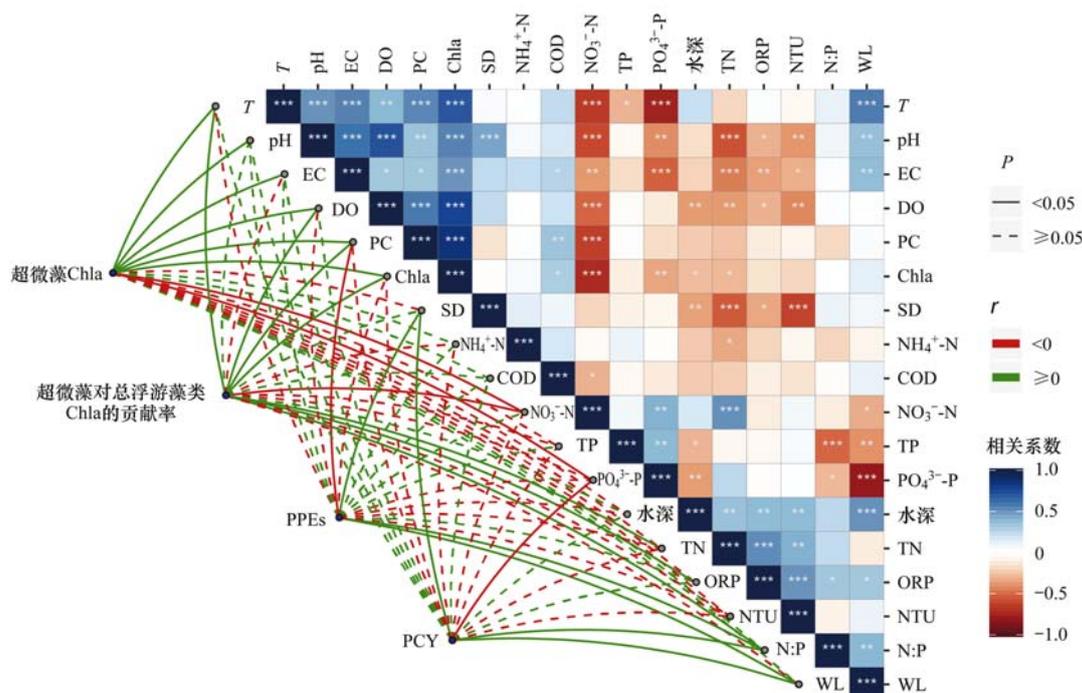
2.4 超微型浮游藻类及其贡献率与环境因子的关系  
相关分析表明(图 5),超微藻 Chla 浓度与  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  显著负相关,而与水温( $T$ )、pH、

EC、DO、PC 和 Chla 等显著正相关( $P < 0.05$ );超微藻对总浮游藻类的贡献量则与  $T$ 、DO、PC、Chla、TN、N:P 比和 ORP 等显著正相关,而与  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  显著

负相关( $P < 0.05$ ). 东洞庭湖丰水期 PPEs 丰度与 N:P 比、WL、SD 显著正相关, 与 PC 显著负相关( $P < 0.05$ ); 而 PCY 丰度也与 N:P 比、WL、SD 显著正相关, 但与  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  显著负相关。

为进一步分析对 PPEs 和 PCY 超微藻丰度组成解释度最高的关键环境因子, 运用多元逐步回归分

析得到关于 PCY:PPEs 比值的回归模型. 最终进入模型的因子为 TN、N:P、 $T$  和 WL, 它们对 PCY:PPEs 的解释率为 62.7% ( $P < 0.001$ ); 通过因子相对重要性分析发现, WL 对 PCY:PPEs 比值变化的解释率权重最高, 占比 51.0%, 其次为 N:P, 占比 27.5% (图 6).



\*\*\* 表示  $P < 0.001$ ; \*\* 表示  $P < 0.01$ ; \* 表示  $P < 0.05$ ; C 表示高锰酸盐指数

图 5 不同类群超微藻丰度、超微藻 Chla 生物量及其贡献量与环境因子相关性

Fig. 5 Pearson correlations of the abundances of different picophytoplankton groups, picophytoplankton Chla biomass, and their contributions with environmental parameters

项目	因子系数	标准误差	$t$	$P$	模型	
					校正 $R^2$	$P$
截距	-12.649	3.596	-3.517	<0.001		
TN	-2.362	0.594	-3.980	<0.001		
N:P	0.068	0.019	3.571	<0.001	0.627	<0.001
$T$	-0.270	0.074	-3.661	<0.001		
WL	2.036	0.333	6.116	<0.001		

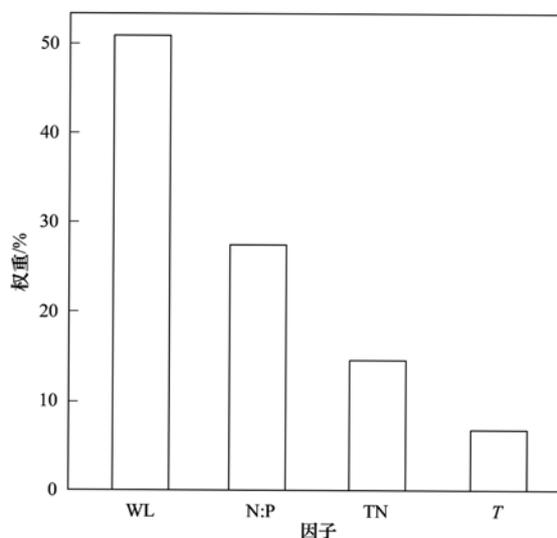


图 6 PCY:PPEs 逐步回归模型中各变量相对权重柱状图

Fig. 6 Bar plots of relative weights of the factors retained after stepwise regression analyses for PCY:PPEs values

### 3 讨论

超微藻是粒径最小的浮游藻类, 相对于细胞较

大的微型和小型藻类, 其比表面积大, 具有更高的营养吸收和利用率, 因此, 在寡营养水体中更具生长优势<sup>[22, 23]</sup>. 洞庭湖为典型的过水性洪道型湖泊, 湖水

流速、年净流量较大, 湖泊水循环周期短 ( $< 20$  d)<sup>[24]</sup>, 自净能力较强, 具有较大的水环境容量, 这种独特的水文情势导致湖水氮、磷滞留系数较小, 营养物质不易沉降<sup>[25]</sup>, 富营养化程度相对其他半封闭型大型浅水湖泊(如太湖、巢湖等)较低. 本研究结果发现, 丰水期东洞庭湖超微藻对总浮游藻类 Chla 的贡献率平均为 42%, 与同为通江湖泊的鄱阳湖(46%)相当<sup>[26]</sup>, 均显著高于富营养化的太湖和巢湖 ( $< 20%$ )<sup>[16]</sup>. 另一方面, 由于通江湖泊水动力条件十分复杂, 导致水环境条件(尤其是营养盐)波动频繁, 这进一步增加了具有高营养吸收速率超微藻的竞争优势<sup>[27]</sup>. 因此, 超微藻在通江湖泊中具有更重要的生态地位.

通过调查发现, 东洞庭湖东部行洪道湖区超微藻丰度和 Chla 浓度以及总浮游藻类 Chla 浓度均显著低于北部和南部湖区, 这与东部行洪道独特的水环境条件紧密相关; 其水体理化性质显著区别于北部和南部湖区, 水质最差, 具有更高的氮营养盐浓度、NTU 和 ORP, 而水体透明度、DO、EC 等均显著低于其他湖区(图 1); 这可能是由于东洞庭湖东部行洪道紧邻岳阳市主城区, 同时承载主航道功能, 受到来自于城市、船舶生活污水污染严重, 且污染物成分复杂, 因此不适于藻类生长. 而北部和南部湖区距离主城区较远, 主要污染源为周边种植业面源污染, 因此更适于藻类生长. 此外, 洞庭湖超微藻丰度主要由富含藻蓝素的超微蓝藻(PCY)为主, PCY:PPEs 比值最高达到 12.8, 这与在其他低营养水平淡水湖泊和海洋中的研究结果一致<sup>[28-37]</sup>, 这主要是由于 PPEs 细胞粒径更大, 其丰度通常比细胞更小的 PCY 低一个数量级. 但是在富营养化严重的太湖和巢湖的调查发现, 超微藻丰度却主要以 PPEs 细胞为主; 有研究表明, PPEs 细胞对营养盐的响应与其他较大藻类细胞的响应相似, 通过营养盐的添加可以显著促进 PPEs 的生长<sup>[38]</sup>, 因此, 在富营养化湖泊中 PPEs 更具竞争优势<sup>[16]</sup>.

整个丰水期间洞庭湖超微藻表现了显著的时空迁移特征, 而且 PPEs 和 PCY 具有相似时空迁移特征, 但是迁移速度和幅度差异明显. 例如, 7、8 月间东洞庭湖 PCY 丰度显著增加, 平均上升一个数量级; 而 PPEs 增加幅度不明显; 同时, 在空间上, PPEs 丰度峰值向南迁移的速度慢于 PCY. 以上结果均表明 PPEs 和 PCY 对环境因子具有相似的响应特征, 但响应能力不同. 相关分析结果也表明, PPEs 和 PCY 丰度具有相似的环境因子相关性, 均与 SD、N:P 比和水位 WL 显著正相关. 值得注意的是, 东洞庭湖超微藻丰度与水体 TN、TP 等主要营养指标相

关性均不显著; 在另一通江湖泊鄱阳湖中也发现了相似的规律<sup>[39]</sup>; 相反, 在半封闭型湖泊太湖、巢湖中的研究均发现营养盐是驱动超微藻(尤其是超微蓝藻)丰度变化的关键影响因子<sup>[16]</sup>. 这可能与通江湖泊复杂的水文动力条件紧密相关, 相关分析发现, 洞庭湖各营养盐浓度与水位和水深等均显著相关(图 5), 表明水体营养盐浓度受水动力条件变化影响显著. 逐步回归分析结果表明, 东洞庭湖中水位变化是影响 PPEs 和 PCY 丰度组成变化最重要的因子, 水位和 N:P 比越高 PCY 优势度越大; 高 TN:TP 比暗示着潜在磷限制的可能性<sup>[40]</sup>, 表明 PCY 在 P 限制水体中比 PPEs 更具竞争优势. 此外, 温度、光照条件等也是影响超微藻生长的重要因子<sup>[41,42]</sup>, 四季温度变化及水位波动引起的溶解氧、水体透明度和浊度等变化都会对浮游藻类的生长产生重要影响.

#### 4 结论

(1) 东洞庭湖东部行洪道区水环境因子显著区别于北部和南部湖区, 其超微藻生物量和丰度均最低.

(2) 丰水期超微藻占东洞庭湖总浮游藻类生物量的比例平均为 41.6%, 其中南部湖区显著高于北部和东部湖区.

(3) 洞庭湖超微藻主要以 PCY 为主, 其丰度平均是 PPEs 的 3.4 倍; PCY 和 PPEs 丰度表现出相似的时空分布规律, 但 PCY 丰度变化幅度显著高于 PPEs.

(4) 逐步回归分析结果表明, 水位是影响东洞庭湖 PCY 和 PPEs 浓度组成比例最重要的因子, 其次为 N:P.

#### 参考文献:

- [1] Grob C, Hartmann M, Zubkov M V, *et al.* Invariable biomass-specific primary production of taxonomically discrete picoeukaryote groups across the Atlantic Ocean [J]. *Environmental Microbiology*, 2011, **13**(12): 3266-3274.
- [2] Li W K W. Primary production of prochlorophytes, cyanobacteria, and eucaryotic ultraphytoplankton: measurements from flow cytometric sorting [J]. *Limnology and Oceanography*, 1994, **39**(1): 169-175.
- [3] Vörös L, Gulyás P, Németh J. Occurrence, dynamics and production of picoplankton in Hungarian shallow lakes [J]. *Internationale Revue der Gesamten Hydrobiologie und Hydrographie*, 1991, **76**(4): 617-629.
- [4] Jardillier L, Zubkov M V, Pearman J, *et al.* Significant CO<sub>2</sub> fixation by small prymnesiophytes in the subtropical and tropical northeast Atlantic Ocean [J]. *The ISME Journal*, 2010, **4**(9): 1180-1192.
- [5] Smith E M, Kemp W M. Size structure and the production/respiration balance in a coastal plankton community [J]. *Limnology and Oceanography*, 2001, **46**(3): 473-485.
- [6] Stockner J G. Phototrophic picoplankton: an overview from

- marine and freshwater ecosystems [J]. *Limnology and Oceanography*, 1988, **33**(4): 765-775.
- [7] Callieri C. Picophytoplankton in freshwater ecosystems; the importance of small-sized phototrophs [J]. *Freshwater Reviews*, 2008, **1**(1): 1-28.
- [8] 焦念志. 海洋微生物生态学 [M]. 北京: 科学出版社, 2006. 150-153, 363-364.  
Jiao N Z. Marine microbial ecology [M]. Beijing: Science Press, 2006. 150-153, 363-364.
- [9] 李胜男, 王秀娟, 周建, 等. 利用流式细胞仪计数微型浮游生物的方法 [J]. *湖泊科学*, 2015, **27**(5): 757-766.  
Li S N, Wang X J, Zhou J, *et al.* Application of flow cytometry to enumerate small plankton [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(5): 757-766.
- [10] Marie D, Rigaut-Jalabert F, Vaulot D. An improved protocol for flow cytometry analysis of phytoplankton cultures and natural samples [J]. *Cytometry Part A*, 2014, **85**(11): 962-968.
- [11] Vaulot D, Eikrem W, Viprey M, *et al.* The diversity of small eukaryotic phytoplankton ( $\leq 3 \mu\text{m}$ ) in marine ecosystems [J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2008, **32**(5): 795-820.
- [12] Triadó-Margarit X, Casamayor E O. Genetic diversity of planktonic eukaryotes in high mountain lakes (Central Pyrenees, Spain) [J]. *Environmental Microbiology*, 2012, **14**(9): 2445-2456.
- [13] Izaguirre I, Unrein F, Modenutti B, *et al.* Photosynthetic picoplankton in Argentina lakes [J]. *Advances in Limnology*, 2014, **65**: 343-357.
- [14] 王建, 林婉莲. 武汉东湖超微藻生态学的初步研究 [J]. *湖泊科学*, 1998, **10**(4): 71-76.  
Wang J, Lin W L. Ecological approaches of algal picoplankton in Donghu Lake, Wuhan [J]. *Journal of Lake Sciences*, 1998, **10**(4): 71-76.
- [15] Chen M J, Chen F Z, Zhao B Y, *et al.* Seasonal variation of microbial eukaryotic community composition in the large, shallow, subtropical Taihu Lake, China [J]. *Aquatic Ecology*, 2010, **44**(1): 1-12.
- [16] Li S N, Shi X L, Lepère C, *et al.* Unexpected predominance of photosynthetic picoeukaryotes in shallow eutrophic lakes [J]. *Journal of Plankton Research*, 2016, **38**(4): 830-842.
- [17] Wu Z S, Cai Y J, Liu X, *et al.* Temporal and spatial variability of phytoplankton in Lake Poyang; the largest freshwater lake in China [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2013, **39**(3): 476-483.
- [18] 王琦, 欧伏平, 张雷, 等. 三峡工程运行后洞庭湖水环境变化及影响分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 2015, **24**(11): 1843-1849.  
Wang Q, Ou F P, Zhang L, *et al.* Changes of water environment in Dongting Lake and its impact analysis after the Three Gorges project operation [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(11): 1843-1849.
- [19] 金相灿. 湖泊富营养化控制和管理技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2001. 143-245.
- [20] 阎荣, 孔繁翔, 韩小波. 太湖底泥表层越冬藻类群落动态的荧光分析法初步研究 [J]. *湖泊科学*, 2004, **16**(2): 163-168.  
Yan R, Kong F X, Han X B. Analysis of the recruitment of the winter survival algae on the sediments of Lake Taihu by fluorometry [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2004, **16**(2): 163-168.
- [21] Melack J M, Kilham P, Fisher T R. Responses of phytoplankton to experimental fertilization with ammonium and phosphate in an African soda lake [J]. *Oecologia*, 1982, **52**(3): 321-326.
- [22] Raven J A. The twelfth Tansley Lecture. Small is beautiful: the picophytoplankton [J]. *Functional Ecology*, 1998, **12**(4): 503-513.
- [23] Ward B A, Marañón E, Sauterey B, *et al.* The size dependence of phytoplankton growth rates; a trade-off between nutrient uptake and metabolism [J]. *The American Naturalist*, 2017, **189**(2): 170-177.
- [24] 黄代中, 万群, 李利强, 等. 洞庭湖近 20 年水质与富营养化状态变化 [J]. *环境科学研究*, 2013, **26**(1): 27-33.  
Huang D Z, Wan Q, Li L Q, *et al.* Changes of water quality and eutrophic state in recent 20 years of Dongting Lake [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26**(1): 27-33.
- [25] Liu X, Li Y L, Liu B G, *et al.* Cyanobacteria in the complex river-connected Poyang Lake; horizontal distribution and transport [J]. *Hydrobiologia*, 2016, **768**(1): 95-110.
- [26] 周建, 李胜男, 王秀娟, 等. 丰水期鄱阳湖超微型浮游植物空间分布特征及其影响因子 [J]. *湖泊科学*, 2016, **28**(3): 537-544.  
Zhou J, Li S N, Wang X J, *et al.* Spatial distribution characteristics of picophytoplankton and its impact factors during wet season in Lake Poyang [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, **28**(3): 537-544.
- [27] Stockner J G, Shortreed K S. Response of *Anabaena* and *Synechococcus* to manipulation of nitrogen: phosphorus ratios in a lake fertilization experiment [J]. *Limnology and Oceanography*, 1988, **33**(6): 1348-1361.
- [28] Malinsky-Rushansky N, Berman T, Dubinsky Z. Seasonal dynamics of picophytoplankton in Lake Kinneret, Israel [J]. *Freshwater Biology*, 1995, **34**(2): 241-254.
- [29] Crosbie N D, Teubner K, Weisse T. Flow-cytometric mapping provides novel insights into the seasonal and vertical distributions of freshwater autotrophic picoplankton [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2003, **33**: 53-66.
- [30] Mózes A, Présing M, Vörös L. Seasonal dynamics of picocyanobacteria and picoeukaryotes in a large shallow lake (Lake Balaton, Hungary) [J]. *International Review of Hydrobiology*, 2006, **91**(1): 38-50.
- [31] Callieri C, Modenutti B, Queimalinos C, *et al.* Production and biomass of picophytoplankton and larger autotrophs in Andean ultraoligotrophic lakes: differences in light harvesting efficiency in deep layers [J]. *Aquatic Ecology*, 2007, **41**(4): 511-523.
- [32] Winder M. Photosynthetic picoplankton dynamics in Lake Tahoe: temporal and spatial niche partitioning among prokaryotic and eukaryotic cells [J]. *Journal of Plankton Research*, 2009, **31**(11): 1307-1320.
- [33] Contant J, Pick F R. Picophytoplankton during the ice-free season in five temperate-zone rivers [J]. *Journal of Plankton Research*, 2013, **35**(3): 553-565.
- [34] Zhao Y, Zhao L, Xiao T, *et al.* Spatial and temporal variation of picoplankton distribution in the Yellow Sea, China [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2011, **29**(1): 150-162.
- [35] Bouman H A, Ulloa O, Barlow R, *et al.* Water-column stratification governs the community structure of subtropical marine picophytoplankton [J]. *Environmental Microbiology Reports*, 2011, **3**(4): 473-482.
- [36] Jiao N Z, Yang Y H, Hong N, *et al.* Dynamics of autotrophic picoplankton and heterotrophic bacteria in the East China Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2005, **25**(10): 1265-1279.
- [37] Worden A Z, Nolan J K, Palenik B. Assessing the dynamics and ecology of marine picophytoplankton; the importance of the

- eukaryotic component[J]. *Limnology and Oceanography*, 2004, **49**(1): 168-179.
- [38] Reynolds C S. The ecology of phytoplankton[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [39] 钱奎梅, 刘霞, 段明, 等. 鄱阳湖蓝藻分布及其影响因素分析[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(1): 261-267.  
Qian K M, Liu X, Duan M, *et al.* Distribution and its influencing factors of bloom-forming cyanobacteria in Poyang Lake [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(1): 261-267.
- [40] Guildford S J, Hecky R E. Total nitrogen, total phosphorus, and nutrient limitation in lakes and oceans: is there a common relationship? [J]. *Limnology and Oceanography*, 2000, **45**(6): 1213-1223.
- [41] Choi D H, An S M, Chun S, *et al.* Dynamic changes in the composition of photosynthetic picoeukaryotes in the northwestern Pacific Ocean revealed by high-throughput tag sequencing of plastid 16S rRNA genes [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2016, **92**(2): fiv170.
- [42] Stawiarski B. The physiological response of picophytoplankton to light, temperature and nutrients, including climate change model simulations[D]. Norwich: University of East Anglia, 2014. 137-141.

## 《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站([www.hjxx.ac.cn](http://www.hjxx.ac.cn))进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.
2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.
3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.
4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.
5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.
6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.
7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.
8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式,左起顶格书写,3 级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩 2 格书写.
9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.
10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:  
**期刊**:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.  
**图书**:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.  
**会议文集**:作者.论文名[A].见(In);编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.  
**学位论文**:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.  
**报告**:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.  
**专利**:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.
11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.
12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:[hjxx@rcees.ac.cn](mailto:hjxx@rcees.ac.cn);网址:[www.hjxx.ac.cn](http://www.hjxx.ac.cn)

## CONTENTS

Mixed State and Sources of Fine Particulate Matter in the Summer in Tianjin City Based on Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS) .....	LIN Qiu-ju, XU Jiao, LI Mei, <i>et al.</i> (2505)
Characteristics and Sources of Inorganic Ions and Organic Acids in Precipitation in the Northern Suburb of Nanjing, China .....	YANG Xiao-ying, CAO Fang, LIN Yu-qi, <i>et al.</i> (2519)
Seasonal Variation of Water-soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> in Xi'an .....	HUANG Han-han, WANG Yu-qin, LI Sheng-ping, <i>et al.</i> (2528)
Effect of Liquid Water Content of Particles and Acidity of Particulate Matter on the Formation of Secondary Inorganic Components in Xinjiang Petrochemical Industrial Area .....	LIU Hui-bin, Dilinuer-Talifu, WANG Xin-ming, <i>et al.</i> (2536)
Effect of Biomass Burning on the Light Absorption Properties of Water Soluble Organic Carbon in Atmospheric Particulate Matter in Changchun .....	MENG De-you, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (2547)
Chemical Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Shanghai During an Ozone and Particulate Pollution Episode in May 2019 .....	WANG Qian (2555)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in the Nanjing Industrial Area in Autumn .....	CAO Meng-yao, LIN Yu-chi, ZHANG Yan-lin (2565)
Ambient VOCs Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of Air Pollution in Spring in Zhengzhou .....	REN Yi-jun, MA Shuang-liang, WANG Si-wei, <i>et al.</i> (2577)
Characteristics of VOCs and Their Roles in Ozone Formation at a Regional Background Site in Beijing, China .....	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, QIU Yu-lu, <i>et al.</i> (2586)
Emission Characteristics of the Catering Industry in Beijing .....	SUN Cheng-yi, BAI Hua-hua, CHEN Xue, <i>et al.</i> (2596)
Emission Factors and Emission Inventory of Agricultural Machinery in Beijing Under Real-world Operation .....	WANG Kai, FAN Shou-bin, QI Hao-yun (2602)
Localization of Soil Wind Erosion Dust Emission Factor in Beijing .....	LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (2609)
Spatial and Temporal Characteristics of AOD and Angström Exponent in the Yangtze River Delta Based on MODIS_C061 .....	ZHANG Ying-lei, CUI Xi-min (2617)
Fate Simulation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl in the Bohai Rim Using the Multimedia Model .....	ZHANG Yi, MA Yan-fei, SONG Shuai, <i>et al.</i> (2625)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Sediment Interstitial Water from Gangnan Reservoir .....	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUAN Shi-chao, <i>et al.</i> (2635)
Environmental Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in the Sediments of a River-Lake System .....	LI Yue-zhao, CHEN Hai-yang, SUN Wen-chao (2646)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Yitong River City Area .....	JIANG Shi-xin, ZHAI Fu-jie, ZHANG Han, <i>et al.</i> (2653)
Identifying Nitrate Sources in a Typical Karst Underground River Basin .....	ZHAO Ran, HAN Zhi-wei, SHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2664)
Influence of Nutrient Pulse Input on Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Algal Growth in the Sediment-Water System of Lake Taihu .....	CHEN Jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2671)
Temporal and Spatial Variation Patterns of Picophytoplankton and Their Correlations with Environmental Factors During the Wet Season in East Lake Dongting .....	LI Sheng-nan, CHEN Hao-yu, PENG Hua, <i>et al.</i> (2679)
Toxicological Effects of Enrofloxacin and Its Removal by Freshwater Micro-Green Algae <i>Dictyosphaerium</i> sp. ....	WANG Zhen-fang, HAN Zi-yu, WANG Meng-xue, <i>et al.</i> (2688)
Comparative Phosphorus Accumulation and Ca-P Content of Two Submerged Plants in Response to Light Intensity and Phosphorus Levels .....	SANG Yu-xuan, YANG Jia-le, XIONG Yi, <i>et al.</i> (2698)
Effect of Calcium Peroxide Composite Tablets on Water Remediation and Phosphorus Control in Sediment .....	ZHANG Shuai, LI Da-peng, DING Yu-qin, <i>et al.</i> (2706)
Spatial Differentiation and Driving Analysis of Nitrogen in Rice Rotation Based on Regional DNDC: Case Study of Jinjiang River Watershed .....	WANG Ya-nan, SHUI Wei, QI Xin-hua, <i>et al.</i> (2714)
Low Temperature Ammonia Nitrogen Removal from an Iron, Manganese, and Ammonia Groundwater Purification Process with Different Concentrations of Iron and Manganese .....	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i> (2727)
Degradation of RBKS by High Crystallinity Mn-Fe LDH Catalyst Activating Peroxymonosulfate .....	LI Li, WU Li-ying, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (2736)
Mechanisms of Fe-cyclam/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> System Catalyzing the Degradation of Rhodamine B .....	YU Yu-qing, CHEN Xiang-yu, CAI Quan-hua, <i>et al.</i> (2746)
Removal of Nitrate Nitrogen by Microbial Photoelectrochemical Cell; PANI/TiO <sub>2</sub> -NTs as a Photoanode .....	LU Yi, ZHOU Hai-shan, PENG Rui-jian, <i>et al.</i> (2754)
Performance and Membrane Fouling Characteristics of Mariculture Wastewater Treated by Anoxic MBR-MMR .....	CHEN Fan-yu, XU Zhong, YOU Hong, <i>et al.</i> (2762)
Effect of HRT on Denitrifying Phosphorus and Nitrogen Removal in Modified A <sup>2</sup> /O-BAF .....	ZHAO Kai-liang, LIU An-di, NAN Yan-bin, <i>et al.</i> (2771)
Effect of Ni(II) on Anaerobic Ammonium Oxidation and Changes in Kinetics .....	SUN Qi, ZHAO Bai-hang, FAN Sa, <i>et al.</i> (2779)
Removal of Urea by Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Mixed Strains and Effects of Heavy Metals and Salinity .....	WANG Meng-qing, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (2787)
Start-up Characteristics of SNAD Process and Functional Abundance Succession of Volcanic Rock Biological Aerated Filter .....	XUE Jia-jun, ZHANG Shao-qing, ZHANG Li-qiu, <i>et al.</i> (2796)
Effect of Free Hydroxylamine on the Activity of Two Typical Nitrite-oxidizing Bacteria .....	SHEN Chen, ZHANG Shu-jun, PENG Yong-zhen (2805)
Interference of Dead Cell DNA on the Analysis of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in Anaerobic Digestion Sludge .....	SU Yu-ao, LIU Hong-bo, MAO Qiu-yan, <i>et al.</i> (2812)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Arable Land Soil of China .....	CHEN Wen-xuan, LI Qian, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2822)
Construction and Application of Early Warning System for Soil Environmental Quality .....	LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2834)
Response of Aggregate Distribution to Input Straw and Their Linkages to Organic Carbon Mineralization in Soils Developed from Five Different Parent Materials .....	MAO Xia-li, QIU Zhi-teng, ZHANG Shuang, <i>et al.</i> (2842)
Response of Extracellular Enzyme Activities to Substrate Availability in Paddy Soil with Long-term Fertilizer Management .....	NING Yu-fei, WEI Liang, WEI Xiao-meng, <i>et al.</i> (2852)
Effects of Biochar on Bioavailability of Two Elements in Phosphorus and Cadmium-Enriched Soil and Accumulation of Cadmium in Crops .....	HUANG Yang, GUO Xiao, HU Xue-yu (2861)
Characteristics of Cd, As, and Pb in Soil and Wheat Grains and Health Risk Assessment of Grain-Cd/As/Pb on the Field Scale .....	XIAO Bing, XUE Pei-ying, WEI Liang, <i>et al.</i> (2869)
Reconstructed Soil Vertical Profile Heavy Metal Cd Occurrence and Its Influencing Factors .....	HU Qing-qing, SHEN Qiang, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2878)
Bacterial Community Composition in Cadmium-Contaminated Soils in Xixiang City and Its Ability to Reduce Cadmium Bioaccumulation in Pak Choi ( <i>Brassica chinensis</i> L.) .....	CHEN Zhao-jin, LI Ying-jun, SHAO Yang, <i>et al.</i> (2889)
Root Activities of Re-Vegetated Plant Species Regulate Soil Nutrients and Bacterial Diversity in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir .....	LI Li-juan, LI Chang-xiao, CHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2898)
Spatial Distribution of Nitrogen Metabolism Functional Genes of Eubacteria and Archaeobacteria in Dianchi Lake .....	ZHANG Yu, ZUO Jian-e, WANG Si-ke, <i>et al.</i> (2908)
Effect of Simulated Warming on Microbial Community in Glacier Forefield .....	WANG Yu-wan, MA An-zhou, CHONG Guo-shuang, <i>et al.</i> (2918)
Effect of Water-Fertilizer-Gas Coupling on Soil N <sub>2</sub> O Emission and Yield in Greenhouse Tomato .....	SHANG Zi-hui, CAI Huan-jie, CHEN Hui, <i>et al.</i> (2924)
Toxicity of Soil Leachate from Coal Gangue and Its Surrounding Village of Barley ( <i>Hordeum vulgare</i> ) .....	SHANG Yu, YANG Feng-long, NING Xia, <i>et al.</i> (2936)
Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Pollution in Marine Organisms from Estuaries of Changhua River in Hainan Province .....	WANG Hui-juan, KUANG Ze-xing, ZHOU Xian, <i>et al.</i> (2942)
Characteristics of Macrobenthos Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Rivers of Beijing in Spring .....	HE Yu-xiao, LI Ke, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2951)
Effect of Pyrolytic Temperature and Time on Characteristics of <i>Typha angustifolia</i> Derived Biochar and Preliminary Assessment of the Ecological Risk .....	CAI Zhao-hui, CHU Chen-jing, ZHENG Hao, <i>et al.</i> (2963)
Measurement of Traffic Carbon Emissions and Pattern of Efficiency in the Yangtze River Economic Belt (1985-2016) .....	JIANG Zi-ran, JIN Huan-huan, WANG Cheng-jin, <i>et al.</i> (2972)