

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.9  
第41卷 第9期

目次

2020年天津市两次重污染天气污染特征分析.....肖致美,徐虹,蔡子颖,李鹏,刘彬,元洁,郑乃源,唐迦,陈魁,邓小文(3879)

基于高分辨率MARGA分析成都市PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子污染特征.....尹寒梅,陈军辉,冯小琼,姜涛,钱骏,刘政(3889)

宿迁市PM<sub>2.5</sub>中水溶性无机离子的季节特征和来源分析.....  
.....马红璐,赵欣,陆建刚,王辉,许纯领,欧阳琰,朱新胜,殷堂兵,漆丹,陆亚秋,汪玖阳,陆声兴(3899)

鼎湖山大气颗粒物中OC与EC的浓度特征及粒径分布.....李安娜,温天雪,华维,杨员,孟泽,胡波,辛金元(3908)

鞍山市道路扬尘碳组分特征及来源解析.....林孜,姬亚芹,林宇,国纪良,马妍,赵静琦(3918)

西安市冬季PM<sub>2.5</sub>中WSOC的光谱特性和来源解析.....杨毅,张亚楠,刘焕武,田萍萍,李亚飞,雷颖,王一博(3924)

长三角地区气溶胶光学性质与新粒子生成观测.....  
.....杜盈盈,陈军,张家洛,甘桂城,刘瑜存,苏明旭,楼晟荣,周敏,陶士康,乔利平(3932)

连云港市挥发性有机化合物的组分特征及来源解析.....崔金梦,王体健,李秋潼,董立文,黄丛吾,曹云擎(3941)

成都市城区大气VOCs季节污染特征及来源解析.....王成辉,陈军辉,韩丽,徐晨曦,王波,李英杰,刘政,钱骏(3951)

德州市夏季臭氧敏感性特征及减排方案.....严茹莎(3961)

超低改造下中国火电排放清单及分布特征.....屈加豹,王鹏,伯鑫,薛晓达,董广霞,崔磊,康明雄,王彤,汤铃,朱法华,李时蓓(3969)

浙江省人为源氨排放清单建立及分布特征.....赵睿东,于兴娜,侯新红,沈丽(3976)

垃圾焚烧烟气中二噁英控制技术的评估与筛选.....赵思岚,奚鹏飞,郭凤艳,邓双,贾建丽(3985)

兰州市两场典型降水事件稳定同位素特征及其水汽来源.....韩婷婷,张明军,王圣杰,杜勤勤,马转转,郭蓉,曹晏风(3993)

然乌湖流域地表水水化学特征及控制因素.....张涛,王明国,张智印,刘廷,何锦(4003)

河套灌区地下水化学演变特征及形成机制.....崔佳琪,李仙岳,史海滨,孙亚楠,安海军,邢进平(4011)

石期河流域地下水化学特征及物质来源分析.....李笑,于爽,李亮,郭永丽(4021)

长江中下游湖泊水体氮磷比时空变化特征及其影响因素.....季鹏飞,许海,詹旭,朱广伟,邹伟,朱梦圆,康丽娟(4030)

2016~2017年长荡湖流域湖库系统营养盐时空分布机制分析.....李新艳,李恒鹏,姜三元,马培,赖锡军,邓建才,陈东强,耿建伟(4042)

菹草对湖泊水质及浮游植物群落结构的影响.....康丽娟,许海,邹伟,朱广伟,朱梦圆,季鹏飞,陈洁(4053)

金泽水库库区细菌群落构建过程与关键驱动因子分析.....刘明坤,童俊,朱慧峰,白晓慧(4062)

典型氟工业园周边河流沉积物中全(多)氟化合物的分布特征.....孙琳婷,赵祯,唐建辉(4069)

微塑料对河水抗生素抗性基因的影响.....周昕原,王言仔,苏建强,黄福义(4076)

莲花水库水体中抗生素污染特征及生态风险评价.....廖杰,魏晓琴,肖燕琴,李青松,范洪勇,刘学军,庄马展,刘超翔(4081)

拟柱胞藻生长及碱性磷酸酶活性对不同磷浓度和磷形态响应的株系间差异.....叶金梅,赵莉,罗旭,彭亮,雷腊梅(4088)

奶水河湿地植物作用及调水水质响应模拟.....李亚娟,杜彦良,毕二平,王亮,陈翠柏(4095)

浅基质层干植草沟运行效果的现场实验.....张佳炜,李田,张庭秀(4105)

海绵城市地块汇水区颗粒污染物的传输.....李佳,谢文霞,姜智绘,单溪环,廖云杰,赵洪涛,李叙勇(4113)

天然黄铁矿吸附去除水中Sb(V):性能与机制.....石松,吴乾元,李新正,黄满红(4124)

过硫酸盐氧化处理含砷磷酸废水.....章晋门,卢钧,刘晓琛,陈泉源(4133)

温度对城市污水厌氧生物滤池运行效果与菌群结构的影响.....刘智斌,刘秀红,周桐,章世勇,李健敏,杨庆(4141)

ABR-MBR耦合工艺启动及优化反硝化除磷性能.....缪新年,汪倩,郭凯成,刘文如,沈耀良(4150)

低温下全自养脱氮颗粒污泥适应低基质效能.....刘雨馨,王建芳,钱飞跃,陈倩苗,乔伟,沈聪(4161)

雄安新区土壤重金属地球化学监测关键问题探讨.....郭志娟,周亚龙,杨峥,赵传冬,成杭新,孔牧,彭敏(4169)

基于土壤重金属及PAHs来源的人体健康风险定量评价:以北京某工业污染场地为例.....  
.....吴志远,张丽娜,夏天翔,贾晓洋,李慧颖,王世杰(4180)

基于乡镇尺度的西南重金属高背景区土壤重金属生态风险评价.....  
.....张富贵,彭敏,王惠艳,马宏宏,徐仁廷,成晓梦,侯召雷,陈子万,李括,成杭新(4197)

云南兰坪铅锌矿区优势植物重金属富集特性及应用潜力.....张龙,张云霞,宋波,吴勇,周子阳(4210)

水培试验下水稻Pb吸收累积关键生育期.....胡雨丹,周航,辜娇峰,霍洋,邓鹏辉,魏宾缤,刘俊,廖柏寒(4218)

田间条件下养分调控八宝景天Cd修复效率.....郭俊梅,杨俊兴,杨军,郑国砥,周小勇,陈同斌,卞建林,孟晓飞,李玉峰(4226)

桉树枝条生物炭输入对桂北桉树人工林酸化土壤的作用效果.....  
.....段春燕,沈育伊,徐广平,滕秋梅,张德楠,何成新,张中峰,周龙武,孙英杰(4234)

秸秆直接还田和炭化还田对红壤酸度、养分和交换性能的动态影响.....杨彩迪,卢升高(4246)

土壤微生物群落结构对生活源和工业源再生水灌溉的差异化响应.....王燕,程东会,檀文炳,余红,席北斗,姜永海,党秋玲(4253)

粪肥和有机肥施用对稻田土壤微生物群落多样性影响.....理鹏,吴建强,沙晨燕,叶春梅,黄沈发(4262)

松花江下游沿江湿地土地利用变化对土壤细菌群落多样性的影响.....张拓,徐飞,怀宝东,杨雪,隋文志(4273)

黄土高原草地土壤细菌群落结构对于降水变化的响应.....李娜,王宝荣,安韶山,焦峰,黄倩(4284)

土地利用方式对会仙岩溶湿地土壤真菌群落和功能类群的影响.....程跃扬,靳振江,王晓彤,贾远航,袁武,周军波(4294)

黑土真菌群落互作及其与梯度有机质碳分子结构的关系.....尚秋彤,黄瑞林,倪浩为,隋跃宇,孙波,梁玉婷(4305)

贵州茂兰喀斯特森林不同演替下土壤真核微生物多样性.....王显,龙健,李娟,刘灵飞,廖洪凯,李宜蓉,杨睿(4314)

玉米秸秆生物炭固化细菌对镉砷吸附.....刘玉玲,朱虎成,彭鸥,李丹阳,杨蕊蕊,彭晶,铁柏清(4322)

无机态氮素转化机制及水土体氮源识别方法.....梁杏,孙立群,张鑫,张洁,付鹏宇(4333)

《环境科学》征订启事(4061) 《环境科学》征稿简则(4132) 信息(4233, 4293, 4304)

# 长江中下游湖泊水体氮磷比时空变化特征及其影响因素

季鹏飞<sup>1,2</sup>, 许海<sup>2</sup>, 詹旭<sup>1\*</sup>, 朱广伟<sup>2</sup>, 邹伟<sup>2</sup>, 朱梦圆<sup>2</sup>, 康丽娟<sup>2</sup>

(1. 江南大学环境与土木工程学院, 无锡 214122; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与环境国家重点实验室, 太湖湖泊生态系统研究站, 南京 210008)

**摘要:** 为弄清长江中下游浅水湖泊水体氮磷比(TN/TP)对湖泊富营养化状况及水系连通性的指示意义, 对该区域26个湖泊开展了春、夏两季的水质调查, 比较了不同水文、水质状况湖泊之间TN/TP差异, 探讨了影响湖泊TN/TP的主要因素. 结果发现, 长江中下游湖泊TN/TP存在较大的时空差异性, 春季TN/TP平均值为 $21.52 \pm 14.28$ , 过水性湖泊、深水湖泊以及富营养化湖泊3种类型水体中, 富营养化湖泊的TN/TP较低, 为 $14.38 \pm 7.40$ , 深水湖泊的TN/TP最高, 为 $40.97 \pm 33.37$ ; 夏季调查湖库的TN/TP平均值为 $21.73 \pm 23.78$ , 其中深水湖泊的TN/TP仍为最高, 达 $96.38 \pm 45.91$ , 富营养化湖泊的TN/TP仍为最低, 达 $10.91 \pm 4.44$ . 春、夏相比, 过水性湖泊和深水湖泊夏季的TN/TP显著上升, 而富营养化湖泊却明显下降, 且降幅随富营养化程度升高而加大. 相关性分析发现, 无论是春季还是夏季, 湖泊TN/TP都与水体深度显著正相关. 此外, 湖泊富营养化程度越高, TN/TP与浮游植物生物量的关系就越弱, 富营养化程度越低, TN/TP越高, 磷对浮游植物生长的限制越明显. 研究表明, 长江中下游湖泊富营养化治理营养盐策略上, 多数湖泊控磷更为重要, 在一些富营养化较为严重的湖泊, 局部疏浚、合理挖深、外源控制和调整渔业生产方式等是值得探索的修复途径.

**关键词:** 长江中下游; 氮磷比; 富营养化; 水深; 浮游植物

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)09-4030-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202002017

## Spatial-temporal Variations and Driving of Nitrogen and Phosphorus Ratios in Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River

Ji Peng-fei<sup>1,2</sup>, Xu Hai<sup>2</sup>, Zhan Xu<sup>1\*</sup>, Zhu Guang-wei<sup>2</sup>, Zou Wei<sup>2</sup>, Zhu Meng-yuan<sup>2</sup>, Kang Li-juan<sup>2</sup>

(1. School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Taihu Laboratory for Lake Ecosystem Research, State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** In spring and summer of 2018, 26 lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River were studied to determine the temporal and spatial characteristics of nitrogen and phosphorus ratios (TN/TP) and their influencing factors. The differences in nitrogen and phosphorus ratios in different types of lakes (including water-passing lakes, deep reservoirs and eutrophic lakes) and in different seasons were analyzed in terms of the sources of the lakes, lake depth, suspended particulate matter concentrations, and phytoplankton levels. The average TN/TP was  $21.52 \pm 14.28$  in spring and  $21.73 \pm 23.78$  in summer. The TN/TP varied significantly in different types of lakes. The TN/TP ratios in water-passing lakes, deep reservoirs and eutrophic lakes were  $20.41 \pm 9.25$ ,  $40.97 \pm 33.37$ , and  $14.38 \pm 7.40$  during spring, and were  $22.62 \pm 6.48$ ,  $96.38 \pm 45.91$ , and  $10.91 \pm 4.44$  during summer, respectively. The TN/TP of the water-passing lakes and deep reservoirs increased significantly in summer, while that of the eutrophic lakes decreased significantly, which indicates that TN/TP changes and lake nutritional status are closely related. The source of nutrients in lakes and reservoirs affects the TN/TP. The TN/TP of lakes and reservoirs had a significant correlation with the lake depth in both spring and summer, indicating that lake depth is a key factor affecting the ratio of nitrogen and phosphorus. In addition, in eutrophic lakes with higher absolute nutrient concentrations, TN/TP has less effect on phytoplankton, while in deep-water lakes with lower absolute nutrient concentrations, TN/TP can determine the growth of phytoplankton limited by phosphorus. Therefore, the governance strategy of lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River should prioritize phosphorus control. Local digging, controlling non-point source pollution, sediment dredging, and changing fishery production methods can be applied to improve the ecological quality of the eutrophic lakes.

**Key words:** middle and lower reaches of Yangtze River; nitrogen-phosphorus ratio; eutrophication; water depth; phytoplankton

湖泊是水资源的重要载体, 是生态系统重要的组成部分, 长江中下游是我国湖泊分布最密集的区域, 湖泊面积在 $1 \text{ km}^2$ 以上的湖泊共有651个<sup>[1]</sup>, 面

积大于 $100 \text{ km}^2$ 的有18个, 但湖泊深度大多较浅, 平均深度在 $1 \sim 6 \text{ m}$ . 在人口增长、城市化和农业生产集约化的推动下, 大量的氮、磷营养物质随着生活

收稿日期: 2020-02-04; 修订日期: 2020-03-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41573076, 41671494); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07203-001); 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-DQC008)

作者简介: 季鹏飞(1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊营养盐循环及生态效应, E-mail: denitrification20@163.com

\* 通信作者, E-mail: xuzhan@jiangnan.edu.cn

污水、工业废水以及农业废水排入其中,导致长江中下游很多湖泊出现富营养化和蓝藻水华暴发等问题<sup>[2]</sup>。

氮磷营养盐是湖泊初级生产力的物质基础,是引起湖泊蓝藻暴发的关键因素<sup>[3~5]</sup>。作为限制性资源,除了绝对浓度外,氮磷的比率(TN/TP)也是影响浮游植物生物量以及藻类群落结构的重要因素<sup>[6,7]</sup>。一般来说,浮游植物的生长以及生理平衡所需的TN/TP为16,即Redfield值<sup>[8]</sup>。但不同的浮游植物其元素组成具有种群间的差异性,且生长所需要的营养盐比例也各不相同<sup>[9]</sup>。水体中的TN/TP变化会改变浮游植物体内营养盐含量以及酶活性,从而限制了浮游植物的生长,并且改变浮游植物的群落组成<sup>[10]</sup>。目前TN/TP逐渐成为判定水体中限制性元素以及评价水体营养结构最常用的工具。国内外诸多学者提出湖泊水体中营养盐的限制标准<sup>[11~13]</sup>: ①当TN/TP < 7~10时,水体中的浮游植物表现为氮限制状态,有可能为调节TN/TP而发生生物固氮作用,以消纳水体中相对较多的磷; ②当TN/TP > 23~30时,水体中的浮游植物表现为磷限制,较低的磷含量会抑制氮素的有机合成; ③当TN/TP介于两者之间时,为浮游植物生长的最佳范围,加速浮游植物对氮素有机合成,促进藻类爆发性生长。Dolman等<sup>[14]</sup>使用分段模型测试了德国369个浅水湖泊,发现不同形态的氮磷比值对预测浮游植物生物量具有重要意义。Vanderhoef等<sup>[15]</sup>的研究则发现TN/TP对浮游植物群落结构的影响主要体现在对固氮藻类的影响,即TN/TP减少有利于固氮藻类的生长。著名的加拿大安大略实验湖区实验<sup>[16]</sup>,通过对全湖区只施加磷肥或施加缺氮肥料来降低TN/TP,结果导致固氮鱼腥藻和束丝藻的大量生长; Vrede<sup>[17]</sup>在瑞典富营养化湖泊Limmaren湖进行围隔实验,同样也得出低TN/TP会引起固氮蓝藻的生长。Smith等<sup>[12]</sup>在总结大量湖泊的水质调查结果时,发现当TN/TP < 29时,固氮蓝藻更容易成为优势,因此认为低TN/TP有利于蓝藻在水体中形成优势,即氮磷比假设。然而,水体中TN/TP的高低与固氮蓝藻是否占优势存在较大的不确定性,一些学者通过野外调查研究显示,TN/TP与固氮蓝藻的优势度没有相关性<sup>[18,19]</sup>。另外,Xie等<sup>[20]</sup>在武汉东湖进行的氮磷添加实验发现,在保证氮磷营养盐浓度充足的情况下,TN/TP < 29或者TN/TP > 29都发生了蓝藻水华,而在蓝藻暴发的过程中极大激活了沉积物中磷的释放,因此认为低TN/TP不是蓝藻水华暴发的原因,而是蓝藻暴发的结果。

国内外众多学者收集了许多湖泊的TN和TP

浓度,结果发现TN/TP变化范围相当广范,水体中TN/TP的变化受诸多因素影响<sup>[21~24]</sup>。吴世凯等<sup>[25]</sup>基于2003~2004年对长江中下游33个浅水湖泊生长季节和非生长季节的TN/TP进行研究,结果发现TN/TP的变化与TP密切相关,但在生长季节,TN的降低是TN/TP降低的重要原因;曾海鳌等<sup>[26]</sup>于2002~2004年对长江中下游49个湖泊的TN/TP进行了研究,结果发现尽管TN/TP随TP的季节变化比较明显,但各个季节的TN/TP与TN的相关性优于TP,因此认为TN是引起TN/TP季节变化的关键因子。而这些研究主要是基于十几年前的调查结果,在过去的10几年,长江中下游富营养化水平有了显著的变化<sup>[27]</sup>,而已有的研究主要分析了浅水湖泊生物地球化学本身对TN/TP比的影响,没有考虑湖泊通江与否对TN/TP比的影响,也没有对比分析浅水湖泊与深水湖泊TN/TP的差异及其原因。因此,本研究于2018年春季和夏季对长江中下游的浅水湖泊进行水质调查,并选择3个深水水库作为深水湖泊进行对比研究,分析长江中下游不同类型湖泊的TN/TP时空变化特征,揭示长江中下游湖泊TN/TP的影响因素,并探究TN/TP与蓝藻优势之间的关系,以期对长江中下游湖泊富营养化的治理以及生态环境的保护提供科技支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

长江中下游地区是我国浅水湖泊分布最为集中的区域,5个淡水湖中,鄱阳湖、洞庭湖、太湖和巢湖都分布于此。但由于经济的发展以及人类的活动,极大程度改变了湖泊的循环规律,导致生态系统结构、功能的退化,水质恶化,蓝藻水华频发,严重制约了社会以及经济的可持续发展。本次采样从湖北荆州长湖到上海淀山湖,主要以长江中下游的23个浅水湖泊和3个深水水库为研究对象(图1)。

根据换水周期、湖泊深浅和富营养化程度,将湖泊较浅、富营养化程度较低以及换水周期较快的洞庭湖、梁子湖、鄱阳湖、石臼湖、军山湖、珠湖、阳澄湖、淀山湖、高邮湖和黄大湖划为过水性湖泊;将换水周期较慢、富营养化程度较低以及湖泊较深的太平湖水库、柘林水库和花亭湖水库划为深水湖泊;将换水周期较慢、湖泊较浅以及富营养化程度较高的长湖、大通湖、黄盖湖、洪湖、武山湖、龙感湖、武昌湖、巢湖、淠湖、岳阳南湖、武昌东湖、磁湖以及太湖划为富营养化湖泊。

### 1.2 样品的采集

于2018年春季(4月)、夏季(7月),对长江中



世界经济合作与开发组织(OECD)制定的超富营养水平标准( $TP > 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ),并且过水性湖泊和深水湖泊 TP 在夏季都有所下降,而富营养化湖泊却有着明显的上升.在春季,过水性湖泊、深水湖泊和富营养化湖泊的叶绿素浓度分别为( $11.61 \pm 9.92$ )、( $2.48 \pm 1.50$ )和( $37.51 \pm 35.94$ )  $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,夏季的叶绿素浓度分别为( $24.34 \pm 13.94$ )、( $4.12 \pm 1.61$ )和( $107.68 \pm 114.83$ )  $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,可见,无论是春季还是夏季,富营养化湖泊的叶绿素浓度都显著高于其他类型的湖库.同时,夏季作为蓝藻暴发的高频季节,3种类型的湖泊叶绿素浓度均有所上升,其中,富营养化湖泊上升幅度较大.此外,春季过水性湖泊和深水湖泊的硝态氮浓度较高,分别为( $0.72 \pm 0.51$ )  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和( $0.74 \pm 0.35$ )  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,而与春季相比,夏季各个湖泊的硝态氮浓度均有显著的下降.从春季和夏季调查的富营养化指数来看,深水湖泊的水质较好,均未达到富营养化水平( $TLI < 50$ ),过水性湖泊两季的富营养化指数变化不大,分别为  $49.45 \pm 5.8$  和  $50.92 \pm 8.00$ ,而富营养化湖泊污染较为严重,春季和夏季的富营养化指数分别为  $58.23 \pm 6.04$  和  $63.23 \pm 6.26$ ,分别达到了轻度富营养化水平和中度富营养化水平,其中夏季漏湖、巢湖以及武山湖更是达到了重度富营养化水平.

对于悬浮颗粒物来说,春季过水性湖泊和富营养化湖泊的平均浓度较高,分别为( $26.19 \pm 20.30$ )  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和( $23.95 \pm 11.80$ )  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;在夏季,富营养化湖泊的 SS 浓度远远超过其他两种类型的湖泊,达( $35.10 \pm 34.30$ )  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;而深水湖泊无论是春季还是夏季都保持着较低的 SS 浓度,分别为( $9.52 \pm 6.06$ )  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和( $1.91 \pm 0.62$ )  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图3).与春季相比,过水性湖泊和深水湖泊夏季的 SS 浓度都有所下降,而富营养化湖泊却有着显著的上升.其中过水性湖泊和富营养化湖泊的 ISS/OSS 占比夏季均有所上升,而深水湖泊却有着显著的下降.

## 2.2 长江中下游湖泊 TN/TP 的时空分布特点

长江中下游湖泊春季各采样点的 TN/TP 介于 3.06 ~ 93.98,平均值为  $21.52 \pm 14.28$ ,3种类型湖泊中富营养化湖泊的 TN/TP 较低,为  $14.38 \pm 7.40$ ,深水湖泊的 TN/TP 较高,为  $40.97 \pm 33.37$ ;夏季各个采样点的 TN/TP 介于 0.93 ~ 162.63,平均值为  $21.73 \pm 23.78$ ,其中深水湖泊的 TN/TP 远远高于其余两类浅水湖泊为  $96.38 \pm 45.91$ ,而富营养化湖泊的氮磷比值较低,为  $10.91 \pm 4.44$ .与春季相比,夏季过水性湖泊和深水湖泊的 TN/TP 显著上升(图4),而富营养化湖泊却有明显下降,在调查的 26 个湖泊中,春季有 17 个湖泊的 TN/TP 的比值介于 10

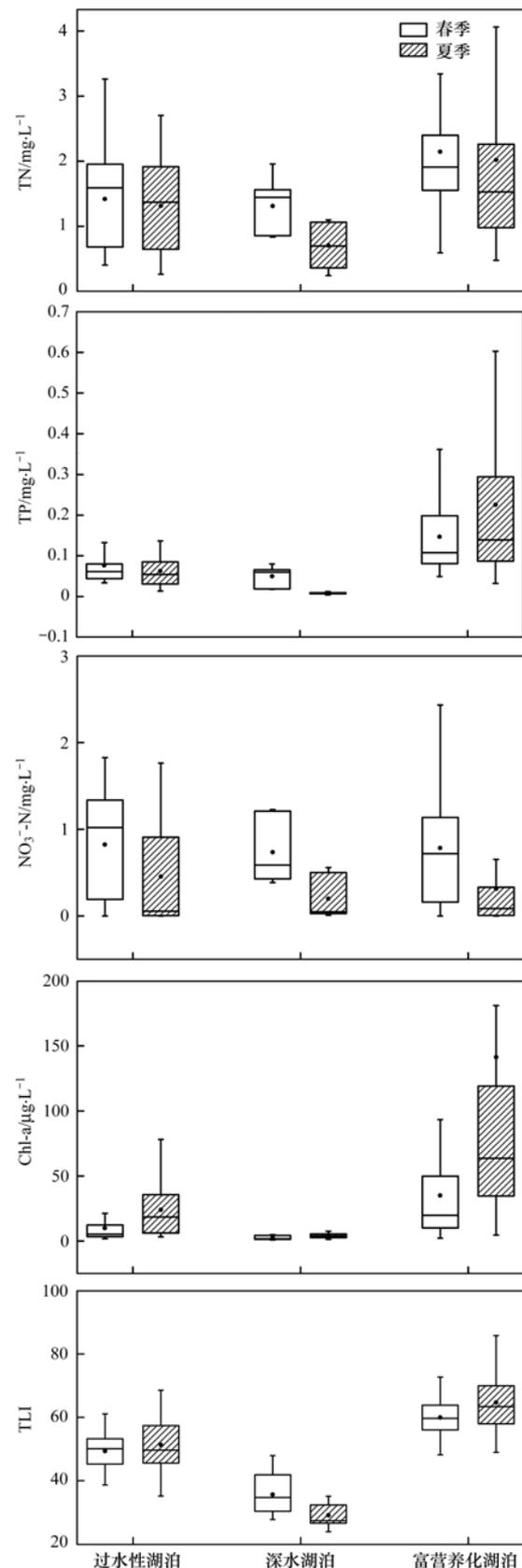


图2 长江中下游湖库春季、夏季营养盐指标以及富营养化指数  
Fig. 2 Nutrient index and eutrophication index of lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River in spring and summer

~ 30,占 65.38%,5 个湖泊的 TN/TP < 10,4 个湖泊的 TN/TP > 30;而在夏季有 18 个湖泊的 TN/TP 的

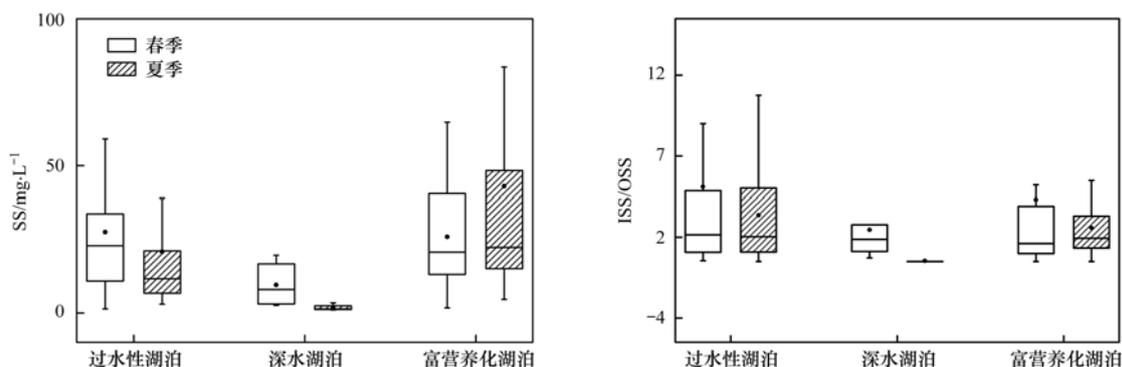


图3 长江中下游湖泊春季、夏季 SS 以及 ISS/OSS

Fig. 3 SS and ISS/OSS of lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River in spring and summer

比值介于 10~30, 占 69.23%, 4 个湖泊的 TN/TP < 10, 剩下的 4 个湖泊 TN/TP > 30, 表明无论是在春季还是夏季长江中下游各个湖泊中, 少数存在氮限制或者是磷限制的状态, 大多数湖泊适合藻类的生长, 容易引起蓝藻暴发等富营养化问题。

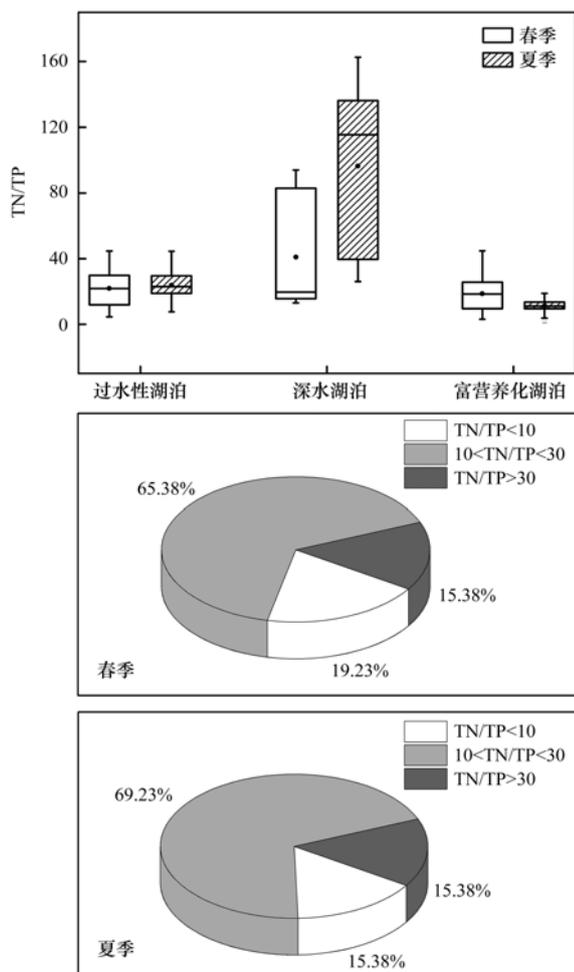


图4 长江中下游湖泊春季、夏季 TN/TP 以及 TN/TP 分类占比

Fig. 4 TN/TP classification of lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River in spring and summer

### 2.3 长江中下游蓝藻细胞丰度时空分布特点

调查结果表明, 在春季, 过水性湖泊中高邮湖和军山湖蓝藻细胞丰度在总藻细胞丰度中占有较高的

比例, 分别为 95.18% 和 89.73% (图 5), 高邮湖、阳澄湖以及鄱阳湖中出现的蓝藻都是固氮蓝藻, 另外像淀山湖、石臼湖和洞庭湖等 5 个湖泊, 虽有浮游植物的生长, 但是并未出现蓝藻; 相较于春季, 夏季过水性湖泊中除了高邮湖以外, 其他湖泊蓝藻细胞丰度均有明显的增长, 其中, 在阳澄湖、淀山湖和梁子湖等 6 个湖泊中蓝藻成为优势种属, 而且固氮蓝藻细胞丰度以及在蓝藻中所占比例也都有明显的增加。对于深水湖泊来说, 太平湖蓝藻在夏季有显著增长, 并且所生长的蓝藻均为固氮蓝藻, 而柘林水库以及花亭湖水库, 蓝藻和固氮蓝藻都有所下降, 柘林水库的蓝藻均为固氮蓝藻, 而花亭湖水库的蓝藻在夏季只占蓝藻细胞丰度的 56.85%, 但固氮蓝藻占总蓝藻细胞丰度的 83.64%; 就富营养化湖泊而言, 巢湖、涠湖和岳阳南湖等湖泊蓝藻细胞丰度较高, 分别为  $2.12 \times 10^8$ 、 $6.33 \times 10^6$  和  $1.23 \times 10^7$  cells·L<sup>-1</sup>, 巢湖、洪湖、岳阳南湖和武昌东湖蓝藻所占总藻的比值较高, 分别为 99.54%、83.72%、98.03% 和 81.25%, 而大通湖并未有蓝藻出现, 到了夏季, 大通湖总藻细胞丰度有所增加, 但蓝藻却依旧未出现, 其他湖泊的蓝藻已成为优势种属; 除了武山湖蓝藻细胞丰度有所下降以外, 其他湖泊均有所上升, 但是诸如巢湖和涠湖等 6 个湖泊固氮蓝藻的比例却下降了。

## 3 讨论

### 3.1 长江中下游湖泊 TN/TP 的影响因素

湖泊营养源的组成是湖泊 TN/TP 的主要决定因素, 其来源主要有 TN/TP 较高的降雨、地下水以及 TN/TP 较低的工农业废水、生活污水等<sup>[22]</sup>。深水湖泊的营养盐一方面主要来源于 TN/TP 较高的降雨或者是积雪融化, 并通过渗流的方式汇入土壤形成径流进入水库, 笱文怡等<sup>[31]</sup>通过高频监测, 发现降雨与水库中的各营养盐指标存在显著的正相关, 表明降雨对深层水库 TN/TP 具有一定的影响, 另一方面, 面源污染也是影响 TN/TP 变化的主要原因,

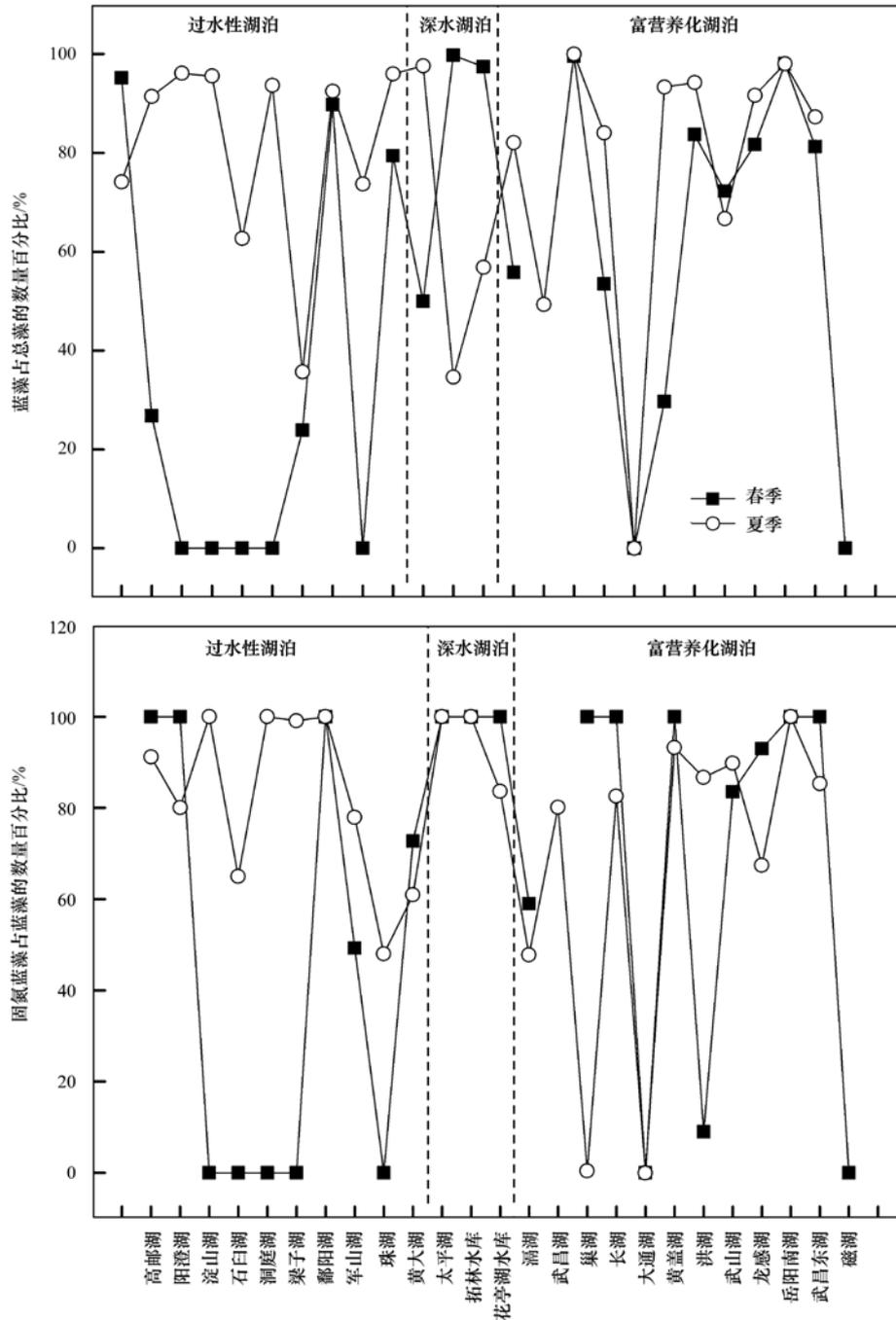


图 5 长江中下游湖泊春季、夏季蓝藻以及固氮蓝藻占比

Fig. 5 Proportions of cyanobacteria and nitrogen-fixing cyanobacteria in lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River in spring and summer

龚世飞等<sup>[32]</sup>对丹江口水库污染源进行探究,发现农业生活废水以及规模化畜禽养殖是增加污染负荷的主要原因。而对于富营养化湖泊来说,其外源来源于 TN/TP 较低的工农业废水以及生活污水,通过地表径流汇入湖泊,例如根据对巢湖 9 条入湖河流进行监测<sup>[33]</sup>,发现平均入湖 TN/TP 较低,为 10.92,再如蕲湖和长湖的入湖 TN/TP 分别为 9.39 和 5.54<sup>[34,35]</sup>,这都导致湖泊水体本身 TN/TP 的降低。此外,像大通湖、长湖和龙感湖等湖泊多用于水产养殖,而水产养殖对水体的 TN/TP 也有一定的影响,

Wang 等<sup>[36]</sup>就对中国淡水湖泊水产养殖进行研究,发现鱼类以及贝类氮磷释放比值为 8.00,这就会直接影响湖泊水体中的 TN/TP。

TN/TP 与湖泊性质以及湖泊营养盐浓度等 Pearson 相关性分析结果见表 1,从中可以得出在春季, TN/TP 与湖泊深度和 TN 呈显著正相关 ( $P < 0.01$ ),与 TP 以及 TLI 呈显著负相关 ( $P < 0.01$ ), TP 与 TN 具有显著正相关 ( $P < 0.01$ ), SS 与 TN 具有显著正相关 ( $P < 0.01$ ),而与 TP 不相关;在夏季, TN/TP 与湖泊深度呈显著正相关 ( $P < 0.01$ ),与

TP 呈显著负相关 ( $P < 0.01$ ), TP 与 TN 同样具有显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 而 SS 除了像春季一样与 TN 具有正相关外, 与 TP 也具有正相关关系 ( $P < 0.01$ ). 无论是春季还是夏季, 长江中下游湖泊的 TN/TP 与水深都呈显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 如图 6 所示, TN/TP 与湖泊深度拟合结果较好 ( $R^2 = 0.2756$ ,  $R^2 = 0.7390$ ). 长江中下游湖泊多为浅水湖泊, 而浅水湖泊的温度、溶解氧等理化性质分层不明显, 对磷的迁移和控制作用影响比较

大<sup>[37, 38]</sup>; 与深水湖泊相比, 浅水湖泊的单位水体具有更大的水-沉积物接触面积比例以及更高的真光层深度-水深比例, 风浪扰动也更容易引起沉积物再悬浮, 这就充分地引起沉积物与水体之间的磷交换, 沉积物也能更直接地影响水体中的磷<sup>[39~41]</sup>. 对于深水湖泊来说, 由于温跃层的存在, 沉积物中的磷补给无法供应到表层, 从而使水体中的磷浓度下降, 同时还有较高 TN/TP 的外源输入, 导致深水湖泊中的 TN/TP 偏高<sup>[42]</sup>.

表 1 长江中下游湖泊春季、夏季湖泊水质指标与 TN/TP 的相关关系<sup>1)</sup>

Table 1 Correlations between water quality indicators of lakes and TN/TP in the middle and lower reaches of Yangtze River in spring and summer

季节		深度	TP	TN	SS	TLI	TN/TP
春季	深度	1	-0.249**	-0.098	-0.141	-0.579**	0.530**
	TP		1	0.371**	0.173	0.604**	-0.475**
	TN			1	0.342**	0.574**	0.271**
	SS				1	0.305**	-0.021
	TLI					1	-0.320**
	TN/TP						1
夏季	深度	1	-0.248**	-0.140	-0.241**	-0.596**	0.861**
	TP		1	0.764**	0.676**	0.647**	-0.338**
	TN			1	0.797**	0.656**	-0.138
	SS				1	0.690**	-0.238**
	TLI					1	-0.615**
	TN/TP						1

1) \*\*表示  $P < 0.01$

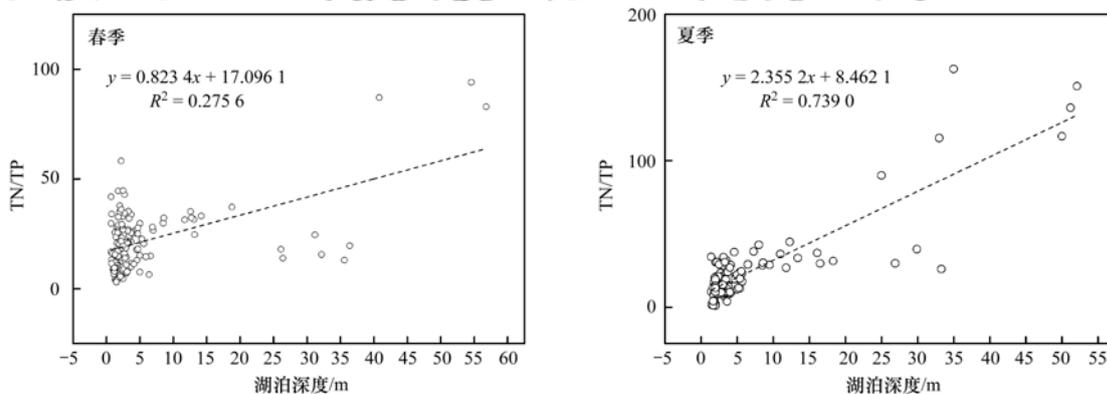


图 6 长江中下游湖泊春季、夏季湖泊深度与 TN/TP 的关系

Fig. 6 Relationship between lake depth and TN/TP in the middle and lower reaches of Yangtze River in spring and summer

另外, 在夏季过水性湖泊的 TN/TP 与 TP 呈负相关, 这可能是由于过水性湖泊 TP 与水体中的 SS 具有一定的相关性, 如图 7 所示, 长江中下游过水性湖泊 TP 与 SS 拟合效果较好, 而大量研究表明, 过水性湖泊中的磷浓度与水体中的 SS 关系密切, 丰水期间, 虽然入湖泥沙量显著增加, 但是湖区的水流速度相对缓慢, 入湖泥沙易于落淤, 导致水体以内 SS 形态存在的 TP 下降<sup>[43]</sup>, 此外入湖流量显著增大, 水体中的磷污染物也得到了稀释作用, 造成生长季节水体中磷浓度的降低, 在这两者的共同作用下, 使水体中的 TP 不升反降, 而夏季温度的升高有利于水体

进行反硝化脱氮, 使水体中的氮素浓度下降, 导致水体中的 TN/TP 并没有明显的变化, 保持在 10 ~ 30 之间, 反而让水体变得更适合浮游植物的生长。

相较于过水性湖泊以及深水湖泊, 长江中下游富营养化湖泊有着较高的叶绿素浓度, 尤其在夏季高达  $(107.68 \pm 114.83) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 但其 TN/TP 却相对较低。根据相关性分析显示 (表 2), 富营养化湖泊的 TN/TP 与温度、TP 呈显著负相关 ( $P < 0.01$ ), 而与 TN 呈正相关关系 ( $P < 0.05$ ), 这可能是由于夏季作为生长季节, 一方面, 温度的升高促使微生物活性的增强, 加剧了底泥中磷的释放, 另一方面, 藻类的

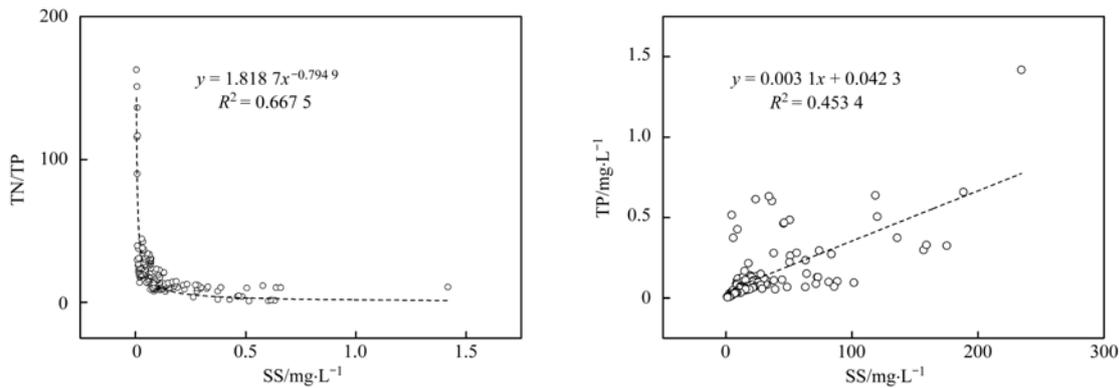


图7 长江中下游湖库夏季 SS 与 TN/TP 以及 TP 的关系

Fig. 7 Relationship between SS and TN/TP and TP in lakes and reservoirs in the middle and lower reaches of Yangtze River in summer

快速增长, 改变水体中的 pH 促使沉积物中磷的释放, 这两者都增加了上覆水中的磷含量<sup>[44]</sup>; 同时湖泊表层藻类的生长会降低透光度, 抑制水下藻类光合作用的发生, 降低水体中的溶氧, 而在沉积物-水界面处沉没的浮游植物通过生物降解或是呼吸作用消耗大量的氧气, 并且藻类分解产

生大量颗粒态或溶解态有机碳, 这些为反硝化提供理想条件, 增强水体中反硝化作用, 彻底去除水体中的部分氮素<sup>[45]</sup>, 而且温度的升高本身就有利于反硝化的进行, 因此富营养化湖泊在底泥磷释放以及反硝化的作用下, TN/TP 相较于春季, 有明显的下降。

表2 长江中下游富营养化湖泊各水质指标与 TN/TP 的相关关系<sup>1)</sup>

Table 2 Correlation between water quality indicators and TN/TP of eutrophic lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River

指标	WT	TP	DTP	TN	DTN	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	TLI
TN/TP	-0.594**	-0.458**	-0.477**	0.176*	0.548**	0.398**	-0.239**

1) \* 表示  $P < 0.05$ ; \*\* 表示  $P < 0.01$

### 3.2 TN/TP 与蓝藻优势的关系

蓝藻是引起水华暴发的主要藻类之一, 部分蓝藻诸如鱼腥藻属 (*Anabaena*) 和束丝藻属 (*Aphanizomenon*) 等丝状藻类具有固氮能力, 在其生长过程中以及死亡后向水体释放出大量氮素, 使水体中的 N 含量升高<sup>[46]</sup>. 在湖泊生态系统中, 固氮蓝藻可以在可利用性氮较低的情况下, 通过固氮作用以达到其生长的需求, 因此在低 TN/TP 的环境下, 有利于固氮蓝藻在水体中形成优势, 即经典的氮磷比假设. 我国巢湖、滇池和洱海等湖泊都发生过以鱼腥藻属、束丝藻属为优势种属的蓝藻水华<sup>[47, 48]</sup>; Havens 等<sup>[49]</sup>对亚热带浅水湖泊进行了一个为期 28 年的调查, 结果发现了低 TN/TP 有利于固氮蓝藻的繁殖. 然而, 固氮蓝藻能否形成优势的影响因素有很多, 不仅仅是低 TN/TP 这一单一条件, 如 Kosten 等<sup>[50]</sup>沿纬度梯度调查了 83 个湖泊, 结果发现 TN/TP 与固氮蓝藻的优势度并不相关; Lv 等<sup>[19]</sup>对武汉的 15 个浅水湖泊浮游植物群落结构和生物量进行研究, 结果发现即使在低 TN/TP ( $< 10$ ) 的情况下, 湖泊中固氮蓝藻也不一定成为优势种; 而在美国温带地区阿拉巴马州, 短期的营养盐添加围隔实验 (将 TN/TP 范围控制在 7 ~ 122), 结果表明无论

TN/TP 高低, 都是固氮蓝藻拟柱胞藻 (*Cylindrospermopsis raciborskii*) 占优势<sup>[51]</sup>. Liu 等<sup>[52]</sup>对太湖进行了一个为期 11a 的调查, 调查结果发现低 TN/TP 不仅有利于固氮蓝藻, 也有利于非固氮蓝藻的生长. 笔者在长江中下游湖泊调查中发现, 诸如夏季溇湖、巢湖和龙感湖等湖泊在夏季 TN/TP 较低, 分别为 10.63、9.32 和 12.78, 对应的蓝藻细胞丰度占比较高, 分别为 82.08%、99.99% 和 91.63%, 其中溇湖和龙感湖固氮蓝藻占蓝藻总细胞丰度的比值为 47.79% 和 67.46%, 而巢湖固氮蓝藻的占比只有 0.42%; 此外像武昌湖和武山湖 TN/TP 同样较低, 蓝藻并未形成优势种群; 其中大通湖为此次调查 TN/TP 最低的湖泊 (1.53), 甚至并未出现蓝藻. 相关性分析显示 (表 3), 无论是春季还是夏季蓝藻细胞丰度都与 TN/TP 无关, 而与 TN 和 TP 的绝对浓度相关, 这与许海等人研究相一致, 发现当水体中的氮、磷浓度较高时, TN/TP 对藻类的生长影响较小, 只有当水体中的氮或者磷成为限制因子时, TN/TP 才会对藻类的生长产生影响. 因此 TN/TP 不是影响浮游植物群落的唯一影响因子, 浮游植物群落结构应是营养盐的绝对浓度以及物理水文等因素共同影响的结果。

表3 长江中下游湖泊春季和夏季总藻细胞丰度、蓝藻细胞丰度、固氮蓝藻细胞丰度与 TN、TP、SS、TN/TP、TLI 的相关关系<sup>1)</sup>

Table 3 Correlations between total algal cell abundance, cyanobacterial cell abundance, nitrogen-fixing cyanobacterial cell abundance, and TN, TP, SS, TN/TP, and TLI in lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River in spring and summer

季节	细胞丰度	TP	TN	SS	TN/TP	TLI
春季	蓝藻细胞丰度	0.297 **	0.644 **	0.177 *	-0.017	0.306 **
	总藻细胞丰度	0.300 **	0.646 **	0.177 *	-0.019	0.312 **
	固氮蓝藻细胞丰度	0.295 **	0.645 **	0.178 *	-0.015	0.304 **
夏季	蓝藻细胞丰度	0.690 **	0.840 **	0.582 **	-0.098	0.485 **
	总藻细胞丰度	0.690 **	0.840 **	0.582 **	-0.099	0.486 **
	固氮蓝藻细胞丰度	-0.090	-0.046	-0.042	-0.134	0.249 **

1) \* 表示  $P < 0.05$ ; \*\* 表示  $P < 0.01$ 

### 3.3 TN/TP 的管理启示

目前,富营养化湖泊治理的关键就是控制营养盐的输入,但是控制营养盐的输入投资巨大,因此,对于控磷、还是控氮、或是两者都控的问题上一直存在争议<sup>[53,54]</sup>. 长期以来,水体中 TN/TP 一直被用于判别浮游植物生长的营养盐限制类型,当 TN/TP 高于 Redfield 值时认为藻类受 P 限制,当 TN/TP 低于 Redfield 值时认为藻类受 N 限制<sup>[55]</sup>. 但是营养盐对浮游植物生长的限制主要体现在两个方面,一方面是水体中 N、P 营养盐的绝对浓度对浮游植物生长的影响,通过判断营养盐的绝对浓度是否低于浮游植物生长的阈值,从而判断是否限制浮游植物的生长;另一方面水体中营养盐的相对浓度(即 TN/TP)判断对浮游植物生长的影响,但是通过营养盐的相对浓度只能表明,相较于其中一种营养盐,另一种营养盐首先消耗到低值,但并不代表这一营养盐低于浮游植物生长的阈值,或许远远高于浮游植物生长的阈值,满足浮游植物的生长需要. 另外,利用 TN/TP 作为判断湖泊水体中浮游植物生长的限制因子,会忽视浮游植物对 N、P 营养盐的存储以及水体中 N、P 营养盐的再生速率等问题<sup>[56]</sup>. 因此仅仅通过营养盐的相对浓度来判断营养盐的限制因子往往存在一定的局限性. Paerl 等<sup>[46]</sup>认为 TN/TP 理论难以满足对富营养化湖泊蓝藻水华暴发机制的解释,因为富营养湖泊中水体的 N、P 负荷较大, N、P 营养盐水平可能远远高于浮游植物生长的阈值. 所以对于湖泊富营养化的治理,需要加强外源的控制. 其中像太湖、巢湖和巢湖等湖泊富营养化指数较高,属于中度甚至是重度富营养化水平,通过对排放的浓度进行设限,控制排入的物质种类,严格把控水体附近的点源以及农业面源,并结合引清调度、底泥疏浚和物理除藻等方式进行治理;而像大通湖、长湖和龙感湖等渔场型湖泊应从个体散养向规范化集中养殖转变,控制其养殖规模,规范投饵方式,推行生态养殖,以达到控制渔业对生态的污染;而对于岳阳南湖、武昌东湖和黄石磁湖等城市湖泊来说,应控制

工业废水以及生活污水的排放,并利用生态工程方式对湖泊的水质进行修复和改善,采用清淤的方式对内源污染进行清除,以达到恢复生态环境的目的. 而对于水库而言,水体中的 N、P 浓度较低,可以通过 TN/TP 判断为水体中浮游植物的生长受到磷的限制,因此,只需对磷加以控制便可以防止水库富营养化的发生<sup>[57]</sup>.

## 4 结论

(1)本研究选取的 3 种不同类型的 26 个湖泊 TN/TP 空间分布以及季节变化差异性较大. 在春季 3 种类型湖泊中富营养化湖泊的 TN/TP 较低,深水湖泊的 TN/TP 较高;夏季深水湖泊的 TN/TP 远远高于其余两类浅水湖泊,而富营养化湖泊的 TN/TP 比值较低;与春季相比,夏季过水性湖泊和深水湖泊的 TN/TP 显著上升,而富营养化湖泊却有明显下降.

(2)湖库营养盐来源是影响 TN/TP 的主要因素,另外,浅水湖泊中因为深度较浅,风浪扰动易引起沉积物再悬浮,导致水体中的 P 浓度增加,引起 TN/TP 的变化;深水湖泊则因为深度较深,沉积物中的磷难以影响上覆水中磷的含量;对于过水性湖泊,水体中的颗粒态磷易于堆积,降低水体中的磷含量;而在富营养化湖泊中,藻类不仅会刺激底泥磷释放,也会促进水体中的脱氮效果. 因此水体中的磷沉积,沉积物磷释放,以及浮游植物导致的氮的减少是引起 TN/TP 变化的重要原因.

(3)对于过水性湖泊来说,局部挖深不仅可以减少水体中的磷负荷,还可以降低底泥磷的内源风险,抑制富营养化的发生;对于深水湖泊来说,可以通过控磷来调节浮游植物的生长;对于富营养化湖泊来说,一方面调控江湖关系,将受阻隔的湖泊实现通江或半通江,降低湖泊内污染物的堆积,另一方面应控制污染源,并结合引清调度、底泥疏浚、优化渔业产业结构等方式进行治理,可以提高长江中下游湖泊生态质量.

致谢: 样品采集得到了李娜、笪文怡、石玉、史鹏程、陈业、郭锐和徐轩等人的大力帮助, 样品分析由余茂蕾、胡林娜、胡春华、薛静琛、钱荣树、张成英和叶小锐等人协助完成, 在此一并表示感谢!

#### 参考文献:

- [1] 秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探[J]. 湖泊科学, 2002, **14**(3): 193-202.  
Qin B Q. Approaches to mechanisms and control of eutrophication of shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangze River[J]. Journal of Lake Sciences, 2002, **14**(3): 193-202.
- [2] 李娜, 黎佳茜, 李国文, 等. 中国典型湖泊富营养化现状与区域性差异分析[J]. 水生生物学报, 2018, **42**(4): 854-864.  
Li N, Li J X, Li G W, et al. The eutrophication and its regional heterogeneity in typical lakes of China[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2018, **42**(4): 854-864.
- [3] 罗建波, 王科朴, 李应仁, 等. 长江中下游三个湖泊型保护区富营养化状况评价[J]. 湖北农业科学, 2019, **58**(16): 28-31, 48.  
Luo J B, Wang K P, Li Y R, et al. Assessment on eutrophication level of three lake-type conservation zones in the middle and lower Yangtze River [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2019, **58**(16): 28-31, 48.
- [4] 吴丰昌, 金相灿, 张润宇, 等. 论有机氮磷在湖泊水环境中的作用和重要性[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(1): 1-7.  
Wu F C, Jin X C, Zhang R Y, et al. Effects and significance of organic nitrogen and phosphorus in the lake aquatic environment [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, **22**(1): 1-7.
- [5] 吴桢, 吴思枫, 刘永, 等. 湖泊氮磷循环的关键过程与定量识别方法[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2018, **54**(1): 218-228.  
Wu Z, Wu S F, Liu Y, et al. Key processes and mechanisms of nitrogen and phosphorus cycling in lakes[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2018, **54**(1): 218-228.
- [6] 孙凌, 金相灿, 钟远, 等. 不同氮磷比条件下浮游藻类群落变化[J]. 应用生态学报, 2006, **17**(7): 1218-1223.  
Sun L, Jin X C, Zhong Y, et al. Changes of algal communities in water body with different proportions of nitrogen and phosphorus[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, **17**(7): 1218-1223.
- [7] 张骁栋, 崔丽娟, 王金枝, 等. 氮磷比对固氮和非固氮蓝藻种间关系的影响[J]. 水利水电技术, 2017, **48**(9): 29-34, 83.  
Zhang X D, Cui L J, Wang J Z, et al. Influence from nitrogen-phosphorus ratio on interspecific relationship between N-fixing and non N-fixing cyanobacterias[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, **48**(9): 29-34, 83.
- [8] Redfield A C. The biological control of chemical factors in the environment[J]. American Scientist, 1958, **46**(3): 230A, 205-221.
- [9] 宋玉芝, 秦伯强, 高光. 氮及氮磷比对附着藻类及浮游藻类的影响[J]. 湖泊科学, 2007, **19**(2): 125-130.  
Song Y Z, Qin B Q, Gao G. Effect of nutrient on periphytic algae and phytoplankton[J]. Journal of Lake Sciences, 2007, **19**(2): 125-130.
- [10] Kilham S, Kreeger D, Goulden C, et al. Effects of nutrient limitation on biochemical constituents of *Ankistrodesmus falcatus* [J]. Freshwater Biology, 1997, **38**(3): 591-596.
- [11] Cuvin-Aralar M L, Focken U, Becker K, et al. Effects of low nitrogen-phosphorus ratios in the phytoplankton community in Laguna de Bay, a shallow eutrophic lake in the Philippines[J]. Aquatic Ecology, 2004, **38**(3): 387-401.
- [12] Smith V H. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton[J]. Science, 1983, **221**(4611): 669-671.
- [13] Zhang Y, Song C L, Ji L, et al. Cause and effect of N/P ratio decline with eutrophication aggravation in shallow lakes [J]. Science of the Total Environment, 2018, **627**: 1294-1302.
- [14] Dolman A M, Mischke U, Wiedner C. Lake-type-specific seasonal patterns of nutrient limitation in German lakes, with target nitrogen and phosphorus concentrations for good ecological status[J]. Freshwater Biology, 2016, **61**(4): 444-456.
- [15] Vanderhoef L N, Huang C Y, Musil R, et al. Nitrogen fixation (acetylene reduction) by phytoplankton in Green Bay, Lake Michigan, in relation to nutrient concentrations[J]. Limnology and Oceanography, 1974, **19**(1): 119-125.
- [16] Schindler D W. Evolution of phosphorus limitation in lakes[J]. Science, 1977, **195**(4275): 260-262.
- [17] Vrede T, Ballantyne A, Mille-Lindblom C, et al. Effects of N:P loading ratios on phytoplankton community composition, primary production and N fixation in a eutrophic lake[J]. Freshwater Biology, 2009, **54**(2): 331-344.
- [18] 许海, 朱广伟, 秦伯强, 等. 氮磷比对水华蓝藻优势形成的影响[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(10): 1676-1683.  
Xu H, Zhu G W, Qin B Q, et al. Influence of nitrogen-phosphorus ratio on dominance of bloom-forming cyanobacteria (*Microcystis aeruginosa*) [J]. China Environmental Science, 2011, **31**(10): 1676-1683.
- [19] Lv J, Wu H J, Chen M Q. Effects of nitrogen and phosphorus on phytoplankton composition and biomass in 15 subtropical, urban shallow lakes in Wuhan, China [J]. Limnologia, 2011, **41**(1): 48-56.
- [20] Xie L Q, Xie P, Li S X, et al. The low TN: TP ratio, a cause or a result of *Microcystis* blooms? [J]. Water Research, 2003, **37**(9): 2073-2080.
- [21] Downing J A. Marine nitrogen: phosphorus stoichiometry and the global N: P cycle[J]. Biogeochemistry, 1997, **37**(3): 237-252.
- [22] Downing J A, McCauley E. The nitrogen: phosphorus relationship in lakes[J]. Limnology and Oceanography, 1992, **37**(5): 936-945.
- [23] Hamilton D, Mitchell S. Wave-induced shear stresses, plant nutrients and chlorophyll in seven shallow lakes[J]. Freshwater Biology, 1997, **38**(1): 159-168.
- [24] Xiao J, Wang S Y, Zhou Z J, et al. An enzymatic mechanism for balancing the stoichiometry of nitrogen and phosphorus in a shallow Chinese eutrophic lake [J]. Science of the Total Environment, 2018, **630**: 1071-1077.
- [25] 吴世凯, 谢平, 王松波, 等. 长江中下游地区浅水湖泊群中无机氮和 TN/TP 变化的模式及生物调控机制[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2005, **35**(S2): 111-120.  
Wu S K, Xie P, Wang S B, et al. Changes in the patterns of inorganic nitrogen and TN/TP ratio and the associated mechanism of biological regulation in the shallow lakes of the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Science in China Series D, 2006, **49**(1): 126-134.
- [26] 曾海鳌, 吴敬禄. 长江中下游不同营养水平湖泊水体环境变化特征及机制[J]. 水科学进展, 2007, **18**(6): 834-841.  
Zeng H A, Wu J L. Characteristics and mechanisms of water

- environmental changes in the lakes along the middle and lower reaches of Yangtze River[J]. *Advances in Water Science*, 2007, **18**(6): 834-841.
- [27] 朱广伟, 许海, 朱梦圆, 等. 三十年来长江中下游湖泊富营养化状况变迁及其影响因素[J]. *湖泊科学*, 2019, **31**(6): 1510-1524.
- Zhu G W, Xu H, Zhu M Y, *et al.* Changing characteristics and driving factors of trophic state of lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River in the past 30 years[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(6): 1510-1524.
- [28] 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. 248, 250, 368-370.
- [29] 陈宇炜, 陈开宁, 胡耀辉, 等. 浮游植物叶绿素 a 测定的“热乙醇法”及其测定误差的探讨[J]. *湖泊科学*, 2006, **18**(5): 550-552.
- Chen Y W, Chen K N, Hu Y H, *et al.* Discussion on possible error for phytoplankton chlorophyll-a concentration analysis using hot-ethanol extraction method[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, **18**(5): 550-552.
- [30] 张辉, 杨雄. 综合营养状态指数法在巢湖水体富营养化评价中的应用[J]. *安徽农学通报*, 2018, **24**(9): 84-87.
- Zhang H, Yang X. Application of comprehensive eutrophication state index method in evaluation of Chaohu Lake reservoir eutrophication[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2018, **24**(9): 84-87.
- [31] 笪文怡, 朱广伟, 黎云祥, 等. 新安江水库河口区水质及藻类群落结构高频变化[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 713-727.
- Da W Y, Zhu G W, Li Y X, *et al.* High-frequency dynamics of water quality and phytoplankton community in inflowing river mouth of Xin'anjiang reservoir, China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 713-727.
- [32] 龚世飞, 丁武汉, 肖能武, 等. 丹江口水库核心水源区典型流域农业面源污染特征[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(12): 2816-2825.
- Gong S F, Ding W H, Xiao N W, *et al.* Characteristics of surface runoff and agricultural non-point source pollution in the core water source area of the Danjiangkou Reservoir[J]. *Journal of Agro Environment Science*, 2019, **38**(12): 2816-2825.
- [33] 王书航, 姜霞, 金相灿. 巢湖入湖河流分类及污染特征分析[J]. *环境科学*, 2011, **32**(10): 2834-2839.
- Wang S H, Jiang X, Jin X C. Classification and pollution characteristic analysis for inflow rivers of Chaohu Lake [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(10): 2834-2839.
- [34] 蔡金榜, 孙旭, 苏良湖, 等. 巢湖污染源调查与分析[J]. *江苏农业科学*, 2018, **46**(5): 224-227.
- Cai J B, Sun X, Su L H, *et al.* Investigation and analysis of pollution sources of Gehu Lake [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, **46**(5): 224-227.
- [35] 余明勇, 张海林, 余向京. 长湖水环境需水量与引清济湖研究[J]. *中国农村水利水电*, 2013, (6): 21-25.
- Yu M Y, Zhang H L, Yu X J. Research on environmental water requirement and clean water diversion from rivers to Changhu Lake[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2013, (6): 21-25.
- [36] Wang J J, Beusen A H W, Liu X C, *et al.* Aquaculture production is a large, spatially concentrated source of nutrients in Chinese freshwater and coastal seas[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(3): 1464-1474.
- [37] 朱广伟, 高光, 秦伯强, 等. 浅水湖泊沉积物中磷的地球化学特征[J]. *水科学进展*, 2003, **14**(6): 714-719.
- Zhu G W, Gao G, Qin B Q, *et al.* Geochemical characteristics of phosphorus in sediments of a large shallow lake[J]. *Advances in Water Science*, 2003, **14**(6): 714-719.
- [38] 朱广伟, 秦伯强, 高光, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物中磷的形态及其与水相磷的关系[J]. *环境科学学报*, 2004, **24**(3): 381-388.
- Zhu G W, Qin B Q, Gao G, *et al.* Fractionation of phosphorus in sediments and its relation with soluble phosphorus contents in shallow lakes located in the middle and lower reaches of Changjiang River, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, **24**(3): 381-388.
- [39] 朱广伟, 秦伯强, 高光. 风浪扰动引起大型浅水湖泊内源磷暴发性释放的直接证据[J]. *科学通报*, 2005, **50**(1): 66-71.
- [40] 刘庆. 南四湖及其入湖河流底泥氮磷释放及其影响因素的研究[D]. 济南: 山东大学, 2009.
- [41] 张毅敏, 王宇, 杨飞, 等. 太湖不同生态型湖区悬浮颗粒磷空间分布和降解速率[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(7): 2128-2138.
- Zhang Y M, Wang Y, Yang F, *et al.* The spatial distribution and degradation characteristic of phosphorus in suspended particulate matter among different ecological types in Taihu [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(7): 2128-2138.
- [42] 刘辉, 胡林娜, 朱梦圆, 等. 沉积物有效态磷对湖库富营养化的指示及适用性[J]. *环境科学*, 2019, **40**(9): 4023-4032.
- Liu H, Hu L N, Zhu M Y, *et al.* Applicability of bioavailable phosphorus in sediments to indicating trophic levels of lakes and reservoirs[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(9): 4023-4032.
- [43] 杜广龙. 太湖沉积物再悬浮及营养盐释放规律机制研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2013.
- [44] 陈洁, 许海, 詹旭, 等. 湖泊沉积物-水界面磷的迁移转化机制与定量研究方法[J]. *湖泊科学*, 2019, **31**(4): 907-918.
- Chen J, Xu H, Zhan X, *et al.* Mechanisms and research methods of phosphorus migration and transformation across sediment-water interface [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(4): 907-918.
- [45] Shen Y S, Huang Y Y, Hu J, *et al.* The nitrogen reduction in eutrophic water column driven by *Microcystis* blooms[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **385**: 121578.
- [46] Paerl H W, Fulton R S, Moisaner P H, *et al.* Harmful freshwater algal blooms, with an emphasis on cyanobacteria[J]. *The Scientific World Journal*, 2001, **1**: 139109.
- [47] 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.
- [48] 吕兴菊, 朱江, 孟良. 洱海水华蓝藻多样性初步研究[J]. *环境科学导刊*, 2010, **29**(3): 32-35.
- LV X J, Zhu J, Meng L. Pilot study on diversity of cyanobacteria bloom in Erhai lake[J]. *Environmental Science Survey*, 2010, **29**(3): 32-35.
- [49] Havens K E, James R T, East T L, *et al.* N: P ratios, light limitation, and cyanobacterial dominance in a subtropical lake impacted by non-point source nutrient pollution [J].

- Environmental Pollution, 2003, **122**(3): 379-390.
- [50] Kosten S, Huszar V L M, Mazzeo N, *et al.* Lake and watershed characteristics rather than climate influence nutrient limitation in shallow lakes[J]. *Ecological Applications*, 2009, **19**(7): 1791-1804.
- [51] Chislock M F, Sharp K L, Wilson A E. *Cylindrospermopsis raciborskii* dominates under very low and high nitrogen-to-phosphorus ratios[J]. *Water Research*, 2014, **49**: 207-214.
- [52] Liu X L, Wang G M, Ran Y N, *et al.* Overall supply level, not the relative supply of nitrogen and phosphorus, affects the plant community composition of a supratidal wetland in the Yellow River Delta[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **695**: 133866.
- [53] Carpenter S R. Phosphorus control is critical to mitigating eutrophication[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, **105**(32): 11039-11040.
- [54] Conley D J, Paerl H W, Howarth R W, *et al.* Controlling eutrophication; nitrogen and phosphorus[J]. *Science*, 2009, **323**(5917): 1014-1015.
- [55] Schanz F, Juon H. Two different methods of evaluating nutrient limitations of periphyton bioassays, using water from the River Rhine and eight of its tributaries[J]. *Hydrobiologia*, 1983, **102**(3): 187-195.
- [56] Piehler M F, Twomey L J, Hall N S, *et al.* Impacts of inorganic nutrient enrichment on phytoplankton community structure and function in Pamlico Sound, NC, USA [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, **61**(2): 197-209.
- [57] 王海军, 王洪铸. 富营养化治理应放宽控氮、集中控磷[J]. *自然科学进展*, 2009, **19**(6): 599-604.



## CONTENTS

Characterization of Two Heavy Pollution Episodes in Tianjin in 2020 .....	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3879)
Analysis of Characteristics of Water-soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> in Chengdu Based on the MARGA .....	YIN Han-mei, CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, <i>et al.</i> (3889)
Seasonal Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in PM <sub>2.5</sub> in Suqian City .....	MA Hong-lu, ZHAO Xin, LU Jian-gang, <i>et al.</i> (3899)
Characterization and Size Distribution of Carbonaceous Aerosols at Mountain Dinghu .....	LI An-na, WEN Tian-xue, HUA Wei, <i>et al.</i> (3908)
Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust in Anshan .....	LIN Zi, JI Ya-qin, LIN Yu, <i>et al.</i> (3918)
Spectral Characteristics and Source Analysis of WSOC of PM <sub>2.5</sub> in Winter of Xi'an .....	YANG Yi, ZHANG Ya-nan, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3924)
Observation of Aerosol Optical Properties and New Particle Formation in the Yangtze River Delta .....	DU Ying-ying, CHEN Jun, ZHANG Jia-luo, <i>et al.</i> (3932)
Component Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Lianyungang City .....	CUI Jin-meng, WANG Ti-jian, LI Qiu-tong, <i>et al.</i> (3941)
Seasonal Pollution Characteristics and Analysis of the Sources of Atmospheric VOCs in Chengdu Urban Area .....	WANG Cheng-hui, CHEN Jun-hui, HAN Li, <i>et al.</i> (3951)
Ozone Sensitivity Analysis and Emission Controls in Dezhou in Summer .....	YAN Ru-sha (3961)
Inventory and Distribution Characteristics of China's Thermal Power Emissions Under Ultra-Low Reconstruction .....	QU Jia-bao, WANG Peng, BO Xin, <i>et al.</i> (3969)
Establishment and Spatial Distribution of Anthropogenic Ammonia Emission Inventory in Zhejiang Province .....	ZHAO Rui-dong, YU Xing-na, HOU Xin-hong, <i>et al.</i> (3976)
Evaluation and Screening of Dioxin Control Technology in Waste Incineration Flue Gas .....	ZHAO Si-lan, XI Peng-fei, GUO Feng-yan, <i>et al.</i> (3985)
Characteristics of Stable Isotopes and Moisture Sources of Two Typical Precipitation Events in Lanzhou City .....	HAN Ting-ting, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (3993)
Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of the Surface Water in Ranwu Lake Basin .....	ZHANG Tao, WANG Ming-guo, ZHANG Zhi-yin, <i>et al.</i> (4003)
Chemical Evolution and Formation Mechanism of Groundwater in Hetao Irrigation Area .....	CUI Jia-qi, LI Xian-yue, SHI Hai-bin, <i>et al.</i> (4011)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Shiqi River Basin .....	LI Xiao, YU Shi, LI Liang, <i>et al.</i> (4021)
Spatial-temporal Variations and Driving of Nitrogen and Phosphorus Ratios in Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River .....	JI Peng-fei, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (4030)
Spatiotemporal Variations in Nutrient Loads in River-lake System of Changdang Lake Catchment in 2016-2017 .....	LI Xin-yan, LI Heng-peng, JIANG San-yuan, <i>et al.</i> (4042)
Influence of <i>Potamogeton crispus</i> on Lake Water Environment and Phytoplankton Community Structure .....	KANG Li-juan, XU Hai, ZOU Wei, <i>et al.</i> (4053)
Phylogenetic Processes and Key Driving Factors of Bacterial Communities in Jinze Reservoir .....	LIU Ming-kun, TONG Jun, ZHU Hui-feng, <i>et al.</i> (4062)
Distribution Characteristics of Per-/polyfluoralkyl Substances in River Sediments Around Typical Fluorine Industrial Parks .....	SUN Lin-ting, ZHAO Zhen, TANG Jian-hui (4069)
Microplastics-Induced Shifts of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in River Water .....	ZHOU Xin-yuan, WANG Yan-zi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4076)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Lianhua Reservoir .....	LIAO Jie, WEI Xiao-qin, XIAO Yan-qin, <i>et al.</i> (4081)
Intraspecific Variation in Growth and Alkaline Phosphatase Activity of <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> Strains in Response to Different Phosphorus Concentrations and Sources .....	YE Jin-mei, ZHAO Li, LUO Xu, <i>et al.</i> (4088)
Simulation of Water Quality Response of Guishui River Wetland Plants and Water Diversion .....	LI Ya-juan, DU Yan-liang, BI Er-ping, <i>et al.</i> (4095)
Performance Assessment of Field-scale Dry Grass Swale with Shallow Substrate Layer .....	ZHANG Jia-wei, LI Tian, ZHANG Ting-xiu (4105)
Transition of Particulate Pollutant in the Parcel-based Catchment of Sponge City .....	LI Jia, XIE Wen-xia, JIANG Zhi-hui, <i>et al.</i> (4113)
Adsorption of Sb(V) in Water by Natural Pyrite: Performance and Mechanism .....	SHI Song, WU Qian-yuan, LI Xin-zheng, <i>et al.</i> (4124)
Treatment of Wastewater Containing Naphthalene Sulfonic Acid by Persulfate Oxidation .....	ZHANG Jin-men, LU Jun, LIU Xiao-chen, <i>et al.</i> (4133)
Effect of Temperature on Performance and Microbial Community Structure of Anaerobic Biofilter-Treated Domestic Wastewater .....	LIU Zhi-bin, LIU Xiu-hong, ZHOU Tong, <i>et al.</i> (4141)
Start-up and Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal in ABR-MBR Coupling Process .....	MIAO Xin-nian, WANG Qian, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (4150)
Adaptability of Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Granular Sludge to Low-Strength at Low Temperature .....	LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4161)
Discussion on Key Issues of Geochemical Monitoring of Soil Heavy Metal in Xiongan New District .....	GUO Zhi-juan, ZHOU Ya-long, YANG Zheng, <i>et al.</i> (4169)
Quantitative Assessment of Human Health Risks Based on Soil Heavy Metals and PAHs Sources: Take a Polluted Industrial Site of Beijing As an Example .....	WU Zhi-yuan, ZHANG Li-na, XIA Tian-xiang, <i>et al.</i> (4180)
Ecological Risk Assessment of Heavy Metals at Township Scale in the High Background of Heavy Metals, Southwestern, China .....	ZHANG Fu-gui, PENG Min, WANG Hui-yan, <i>et al.</i> (4197)
Potential of Accumulation and Application of Dominant Plants in Lanping Lead-zinc Mine, Yunnan Province .....	ZHANG Long, ZHANG Yun-xia, SONG Bo, <i>et al.</i> (4210)
Key Growth Stage of Pb Accumulation in Rice Through a Hydroponic Experiment with Pb Stress .....	HU Yu-dan, ZHOU Hang, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Nutrient Regulation and Control on Cd Accumulation Efficiency of <i>Hylotelephium spectabile</i> Under Field Conditions .....	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i> (4226)
Effects of <i>Eucalyptus</i> Branches Biochar Application on Soil Physicochemical Properties of Acidified Soil in a <i>Eucalyptus</i> plantation in Northern Guangxi .....	DAUN Chun-yan, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, <i>et al.</i> (4234)
Dynamic Effects of Direct Returning of Straw and Corresponding Biochar on Acidity, Nutrients, and Exchangeable Properties of Red Soil .....	YANG Cai-di, LU Sheng-gao (4246)
Different Responses of Soil Microbial Community Structure to Irrigation with Treated Wastewater from Domestic and Industrial Sources .....	WANG Yan, CHENG Dong-hui, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (4253)
Effects of Manure and Organic Fertilizer Application on Soil Microbial Community Diversity in Paddy Fields .....	LI Peng, WU Jian-qiang, SHA Chen-yan, <i>et al.</i> (4262)
Effects of Land Use Changes on Soil Bacterial Community Diversity in the Riparian Wetland Along the Downstream of Songhua River .....	ZHANG Tuo, XU Fei, HUAI Bao-dong, <i>et al.</i> (4273)
Response of Soil Bacterial Community Structure to Precipitation Change in Grassland of Loess Plateau .....	LI Na, WANG Bao-rong, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (4284)
Effect of Land-use on Soil Fungal Community Structure and Associated Functional Group in Huixian Karst Wetland .....	CHENG Yue-yang, JIN Zhen-jiang, WANG Xiao-tong, <i>et al.</i> (4294)
Interactions of Fungi Community and Relationship with the Carbon Structure in Arable Mollisols with Gradient Organic Matter Content .....	SHANG Qiu-tong, HUANG Rui-lin, NI Hao-wei, <i>et al.</i> (4305)
Diversity of Soil Eukaryotic Microbes in Different Succession Stages in Maolan Karst Forest of Guizhou .....	WANG Xian, LONG Jian, LI Juan, <i>et al.</i> (4314)
Adsorption of Cadmium and Arsenic by Corn Stalk Biochar Solidified Microorganism .....	LIU Yu-ling, ZHU Hu-cheng, PENG Ou, <i>et al.</i> (4322)
Mechanism of Inorganic Nitrogen Transformation and Identification of Nitrogen Sources in Water and Soil .....	LIANG Xing, SUN Li-qun, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4333)