

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.8

第40卷 第8期

目次

2016年京津冀地区红色预警时段PM _{2.5} 污染特征与浓度控制效果	张冲, 郎建奎, 程水源, 王晓琦 (3397)
北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析	徐冉, 张恒德, 杨孝文, 程水源, 张天航, 江琪 (3405)
合肥市PM _{2.5} 和PM ₁₀ 中元素组成特征及重污染成因分析	刘可可, 张红, 刘桂建 (3415)
濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析	陈楚, 王体健, 李源昊, 马红磊, 陈璞琰, 王德羿, 张元勋, 乔琦, 李光明, 王文红 (3421)
关中地区细颗粒物碳组分特征及来源解析	康宝荣, 刘立忠, 刘煥武, 李养养, 艾双双, 曹宁, 雷颖 (3431)
长春季细颗粒物中有机气溶胶组成特征及来源	吴瑕, 曹芳, 翟晓瑶, 范美益, 张世春, 章炎麟 (3438)
中国城市扩张及空间特征变化对PM _{2.5} 污染的影响	王桂林, 张炜 (3447)
不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂PM _{2.5} 排放的影响	邓建国, 马子珍, 李振, 段雷, 蒋靖坤 (3457)
浙江省合成革行业挥发性有机物污染特征及排放系数	徐佳琦, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 姚轶 (3463)
生活垃圾填埋场细菌气溶胶粒径分布及种群特征	马嘉伟, 杨凯雄, 柴风光, 王莹, 郭雪松, 李琳 (3470)
青岛近海生物气溶胶中总微生物的分布特征	官静, 祁建华, 李鸿涛 (3477)
广州饮用水水源地多环芳烃分布、来源及人体健康风险评价	宋玉梅, 王畅, 刘爽, 潘佳钊, 郭鹏然 (3489)
截污调水后滇池表层沉积物中16种PAHs的分布特征	胡昕怡, 高冰丽, 陈坦, 王洪涛, 金军, 饶竹, 朱雪芹, 王雪郡, 魏抱楷, 战楠, 刘彦廷, 戚敏 (3501)
黄河三角洲石油开采区盐渍化农田土壤多环芳烃的分布特征与源解析	邱慧, 刘月仙, 解小凡, 张萌, 王伟 (3509)
风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响	余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 权秋梅, 许海, 朱梦圆, 丁文浩, 李未, 吴挺峰 (3519)
向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应	王耀耀, 吕林鹏, 纪道斌, 方海涛, 朱晓声, 张庆文, 霍静, 何金艳 (3530)
外源输入对底泥疏浚新生表层磷恢复及迁移的影响	李鑫, 耿雪, 王洪伟, 龚琬晴, 文帅龙, 钟继承, 李大鹏 (3539)
新疆喀什三角洲地下水SO ₄ ²⁻ 化学特征及来源	魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (3550)
黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析	李洲, 李晨曦, 华琨, 李志 (3559)
北京市河流秋季浮游动物群落特征分析	王海邻, 刘玉飞, 任玉芬, 贺玉晓, 王思琪, 张红星, 王效科, 李紫鑫 (3568)
三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系	刘黎, 贺新宇, 付君珂, 杨燕君, 米文梅, 施军琼, 吴忠兴 (3577)
渭河流域水体细菌群落的环境响应及生态功能预测	万甜, 何梦夏, 任杰辉, 闫幸幸, 程文 (3588)
汾河下游水体nirS型反硝化细菌群落组成与无机氮关系	汪银龙, 冯民权, 董向前 (3596)
饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析	胡万超, 赵琛, 王巧娟, 刘锐平, 柏耀辉 (3604)
基于污水厂污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶水质控制效果	彭航宇, 李田, 齐悦, 何云鹏, 黄楚玉, 张卓然 (3612)
植被对绿色屋顶径流量和水质影响	章孙逊, 张守红, 张英, 吴思婷 (3618)
光催化/活性炭/纳滤组合工艺处理二级出水及对膜污染的控制	范科文, 李星, 杨艳玲, 周志伟 (3626)
多种材料对水中氨氮的吸附特性	焦巨龙, 杨苏文, 谢宇, 金位栋, 闫玉红, 徐彬 (3633)
不同氨氮浓度对4株常见藻株生长及酶活性的影响	常婷, 许智慧, 程鹏飞, 徐继林, 周成旭 (3642)
3种基质材料对高浓度养殖废水处理效果及降解过程	刘铭羽, 夏梦华, 李远航, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 李裕元, 吴金水 (3650)
铝污泥酸化提取液改性沸石的除磷特性及机制	韩芸, 胡玉洁, 连洁, 杨思哲, 齐泽宁 (3660)
缺氧MBBR耦合部分厌氧氨氧化强化城市生活污水深度脱氮	杨岚, 彭永臻, 李健伟, 高锐涛, 王茗, 李夕耀 (3668)
连续流系统中好氧段及沉淀段对污泥及其缺氧段脱氮能力的影响	薛欢婷, 袁林江, 刘小博, 孙恒锐 (3675)
FeS自养反硝化与厌氧氨氧化的耦合脱氮机制	马景德, 潘建新, 李泽敏, 王一显, 吴海珍, 韦朝海 (3683)
ANAMMOX体系中氨与硫酸盐的同步转化条件	董石语, 毕贞, 张文静, 黄勇 (3691)
全国城市污水处理厂中微生物群落的溯源分析	张冰, 吴林蔚, 文湘华 (3699)
不同溶解氧浓度下硝化工艺中微生物种群结构对比	刘文如, 顾广发, 宋小康, 杨殿海 (3706)
异养硝化细菌Acinetobacter junii NP1的同步脱氮除磷特性及动力学分析	杨奎, 陈宁, 任勇翔, 崔坤, 汪旭晖, 肖倩, 郭淋凯 (3713)
Type 0092丝状菌污泥微膨胀在短程硝化中的实现	高春娣, 安冉, 韩徽, 张娜, 任浩, 赵楠, 焦二龙, 彭永臻 (3722)
高盐高碱环境下硝化反硝化过程及N ₂ O产生特征	代伟, 赵剑强, 丁家志, 刘双 (3730)
生物炭对盐碱土壤氨挥发的影响	王一宇, 王圣森, 戴九兰 (3738)
两种土壤增效剂对稻田氨挥发排放的影响	周玉玲, 侯朋福, 李刚华, 王绍华, 杨林章, 薛利红, 丁艳锋 (3746)
承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征	孙厚云, 卫晓峰, 甘凤伟, 王恒, 何泽新, 贾凤超, 张竞 (3753)
厦门某旱地土壤垂直剖面中重金属迁移规律及来源解析	张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (3764)
宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析	张军, 董洁, 梁青芳, 杨宁宁, 耿雅妮 (3774)
铁铈氧化物对土壤As(V)和P的稳定化效果	林龙勇, 阎秀兰, 杨硕 (3785)
铁锰氧化物在不同水分条件下对土壤As的稳定化作用	周海燕, 邓一荣, 林龙勇, 曹梦华, 钟立荣 (3792)
生物质炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响	刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 沈健林, 吴金水 (3799)
有机物料对紫色土微生物量碳、氮及氮素供应的影响	汪月, 张名豪, 赵秀兰 (3808)
土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响	罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 高明 (3816)
宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响	高涵, 肖礼, 牛丹, 倪银霞, 黄懿梅 (3825)
不同浸提剂条件下生物炭吸附性有机物的浸出规律	何品晶, 张昊昊, 仇俊杰, 邵立明, 吕凡 (3833)
基于成组生物毒性测试的PM _{2.5} 毒性	江晓栋, 薛银刚, 魏永, 许霞, 刘菲, 薛柯, 施昕澜, 顾铭 (3840)
《环境科学》征订启事 (3587)	
《环境科学》征稿简则 (3595)	
信息 (3611, 3705, 3745)	

风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响

余茂蕾^{1,2}, 洪国喜³, 朱广伟^{1*}, 权秋梅², 许海¹, 朱梦圆¹, 丁文浩¹, 李未¹, 吴挺峰¹

(1. 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, 南京 210008; 2. 西华师范大学环境科学与工程学院, 南充 637009; 3. 江苏省水文水资源勘测局无锡分局, 无锡 214124)

摘要: 为了解风场对湖泊表层蓝藻水华及营养盐空间分布的影响, 以太湖梅梁湾为例, 在蓝藻水华期间开展表层粒子漂流实验, 研究风场对水体表层物质的推移规律, 并开展全水域水体表、中、底层密集布点采样, 测定水体藻类叶绿素a、氮、磷、高锰酸盐指数、溶解性有机碳、溶解氧等水质指标, 探讨风场驱动下大型浅水湖泊蓝藻水华及营养盐时空分布特征。结果表明, 在平均风速 $1.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $2.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的情况下, 表层粒子的平均漂移速度分别为 $3.0 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $5.0 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$; 风场对表层水体蓝藻水华的空间分布具有决定性影响, 能够引起蓝藻水华在空间上较高的异质性; 蓝藻水华物质的空间变化对水体颗粒态氮、磷、有机质和溶解氧等水质指标产生较大影响, 表、中、底层颗粒态氮和磷、高锰酸盐指数与叶绿素 a 浓度的空间分布一致, 而溶解态氮、磷浓度及溶解性有机碳的分布与叶绿素 a 浓度分布不尽相同; 蓝藻水华物质在风场作用下的再分配对水体溶解氧产生复杂的影响, 底层溶解氧平均值低于表层与中层, 可能对沉积物营养盐释放产生影响; 依据高密度布点调查估算, 仅表层 20 cm, 梅梁湾水域的蓝藻干物质赋存量约 396 t, 远大于蓝藻打捞工程的清除量。研究表明, 鉴于水华期间风场作用下对蓝藻水华漂移的巨大影响, 在湖泊水质调查采样方法及数据分析时应充分考虑蓝藻水华漂移的影响因素; 防控湖泛灾害的蓝藻打捞作业对湖体蓝藻水华赋存量的清除能力有限, 只能对岸边带湖泛的预防产生影响。

关键词: 蓝藻水华; 风场; 流场; 营养盐; 粒子追踪法

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)08-3519-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201901184

Wind Field Influences on the Spatial Distribution of Cyanobacterial Blooms and Nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China

YU Mao-lei^{1,2}, HONG Guo-xi³, ZHU Guang-wei^{1*}, QUAN Qiu-mei², XU Hai¹, ZHU Meng-yuan¹, DING Wen-hao¹, LI Wei¹, WU Ting-feng¹

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, China West Normal University, Nanchong 637009, China; 3. Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Jiangsu Province Wuxi Branch, Wuxi 214124, China)

Abstract: Wind field is a very important physical factor controlling the formation of cyanobacteria blooms. A surface particle tracking drift experiment was carried out to study the influence of wind field on the surface current in Meiliang Bay of Lake Taihu during the algal bloom season. For this, chlorophyll-a, nitrogen, phosphorus, the permanganate index, dissolved organic carbon (DOC), and dissolved oxygen (DO) were measured in surface, middle, and bottom waters of the Meiliang Bay during the cyanobacteria bloom period to test how wind field affects the temporal and spatial distribution of cyanobacterial blooms and biomass stock in the water column. The results showed that the average drift velocities of surface particles were $3.0 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ and $5.0 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ when wind speed averaged $1.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and $2.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively. The wind field determined the spatial distribution of cyanobacterial blooms in surface waters and led to a high spatial heterogeneity of cyanobacterial blooms. The spatial redistribution of cyanobacterial blooms exerted an important influence on water quality indexes such as particulate nitrogen, phosphorus, organic matter, and dissolved oxygen. The concentrations of particulate nitrogen, phosphorus, the permanganate index, and chlorophyll-a showed a similar vertical distribution pattern. Cyanobacterial blooms were less influenced by the distribution of dissolved nitrogen and dissolved organic carbon from external pollution, while long-term legacy loading played a more important role. This meant that the spatial distributions of dissolved nitrogen and dissolved organic carbon were different from that of chlorophyll-a. Because the redistribution of cyanobacterial blooms, as affected by wind fields, has a complex effect on the dissolved oxygen in the water column, the dissolved oxygen concentration decreased with depth, which may affect the release of soluble nutrients from the sediment. The cyanobacterial biomass stock in the surface water was estimated according to the survey of high-density sites. The dry matter of cyanobacteria in the surface 20 cm of Meiliang Bay was approximately 396 tons on the day of sampling. The results from the present study indicated that the factors influencing cyanobacterial blooms should be considered in sampling methods and the analysis of lake water quality due to the significant influence of wind fields on bloom drift. The collection of cyanobacteria has limited effect on the removal of the algal bloom biomass in whole lake, only being effective at prevention of the event of black spots in lake shore.

Key words: cyanobacterial bloom; wind field; currents; nutrients; satellite-tracked drifter

收稿日期: 2019-01-22; 修订日期: 2019-03-09

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA23040201); 国家水体污染控制与治理重大科技专项(2017ZX07203-001); 国家自然科学基金项目(41679194); 中国科学院南京地理与湖泊研究所“一三五”项目(NIGLAS2017GH04)

作者简介: 余茂蕾(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水生态与水环境, E-mail: 15196779122@163.com

* 通信作者, E-mail: gwzhu@niglas.ac.cn

湖泊具有供水、渔业、旅游、维持区域生态系统平衡等功能^[1]。然而由于经济的快速发展、人们生活水平的不断提高,人为造成的污染物输入加速了湖泊富营养化的进程^[2]。在全球范围内,有害蓝藻水华(CyanoHABs)的扩张对内陆和沿海水域的生态完整性、生态系统服务、安全使用和可持续性构成严重威胁^[3~8]。我国是世界上蓝藻水华发生最严重、分布最广的国家之一^[1],蓝藻水华在浅水湖泊中产生机理在国内外已有诸多研究^[9~12],其中主要包括蓝藻本身的理化特性及相关环境因子如温度、光照、营养盐等的共同作用^[13]。在诸多影响因素中,风浪和湖流能直接作用使得蓝藻容易长距离快速漂移,大量聚集在岸边及局部湖区形成水华^[10, 14],是蓝藻水华情势的决定性物理因素之一。风场对蓝藻水华在水相中的垂直迁移也有影响,朱永春等^[15]就风场对太湖蓝藻漂移的动力学中研究发现,不同风场作用对藻类的水平垂直分布有很大的影响。因此,也可以说蓝藻水华的情势受特定的水文和气象条件影响,蓝藻群体的时空格局受风场、流场作用塑造^[16]。

梅梁湾是太湖最早出现蓝藻水华的湖区^[17],也是太湖富营养化最严重的湖湾之一^[18],自2005年以来一直处于中度营养化状态^[19]。2007年太湖蓝藻水华引起饮用水危机事件后,在国务院、水利部门及各级政府开展的一系列流域及湖泊综合治理措施^[20],蓝藻水华严重堆积区实施蓝藻打捞是其中一项重要的水质保障措施。梅梁湾是蓝藻水华打捞的重点区域,设立了多个藻水分离站处理、打捞蓝藻。此外,还实施了梅梁湖泵站调水工程以防控蓝藻水华在滨岸带过度堆积。然而,太湖蓝藻水华的情势还未得到根本控制。夏季6~7月以及秋季10~11月是太湖蓝藻暴发的主要时期^[17]。相关资料显示,自2007年蓝藻暴发引起饮用水危机事件以来^[21],梅梁湾秋季仍有不同程度的水华情况发生^[22]。由于梅梁湾独特的口袋形状及其地理位置和换水周期短,使污染物易进不易出^[23]。风场作为流场和散度场的一个主要驱动场^[24],对梅梁湾污染物迁移与输送、蓝藻的生长与分布起着重要的影响。

尽管针对风场对蓝藻水华的时空影响方面已开展了一些工作,然而,鉴于风场的多变性、风场作用于流场的滞后性及湖泊地貌的复杂性等原因,风场对大型湖泊蓝藻水华时空分布的影响特征尚不清楚,蓝藻水华堆积所伴随的营养盐时空变化也有待深入研究。为此,本文以太湖梅梁湾为研究对象,基于GPS粒子漂移追踪技术和蓝藻水华期间梅梁

湾全水域高密度布点监测,结合采样前风场条件,观测、研究风场作用下表层湖流的运动方向以及蓝藻水华漂移情况,分析蓝藻水华漂移对表、中、底层营养盐空间分布的影响,同时估算梅梁湾叶绿素a的赋存量,分析蓝藻水华打捞作业对湖泊蓝藻水华的效果,以期对蓝藻水华的预测预警和灾害防控科学决策提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

梅梁湾位于太湖最北部,北接无锡市,东北与五里湖相连,西与竺山湾相邻,南北长约14 km,东西长约10 km,水面面积129.3 km²,平均水深1.9 m^[25]。梅梁湾北部连接无锡市城市河道梁溪河,是太湖受城市污染最早、最重的区域之一,也使得该湖湾的蓝藻水华问题在全太湖最早出现。梅梁湾类似口袋形的地貌特征,易于蓝藻水华物质的堆积,是研究风场作用对蓝藻水华漂移影响的理想区域。

1.2 采样及实验方法

在太湖梅梁湾密集布点43个,在湾内形成横向12条及纵向8条监测剖面,同时在梅梁湾东北部布设9个监测点,在河口湖区形成3条监测剖面(图1)。2017年10月20日09:00~13:30通过乘坐快艇,使用便携式GPS确定采样点,沿监测断面由湾顶(梅梁湾北部沿岸区域)、河口湖区向湾口(梅梁湾南部与太湖中心湖区相连的区域)进行监测,每个点位采集表层(20 cm)、中层(100 cm)、底层(距底部20 cm)的水样分装、冷藏,用于带回实验室测定相关水质指标;同时使用YSI 6600 V2(美国Yellow Stone公司)多参数水质分析仪测定每个点位表、中、底的溶解氧(DO)指标。监测期间将15个浮动漂流粒子随机投放并记录抛出时间及GPS点位。

叶绿素a含量(Chl-a)采用热乙醇提取-分光光度法测定^[26];水体总氮(TN)、溶解性总氮(DTN)采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定(测定波长:210 nm);总磷(TP)、溶解性总磷(DTP)采用碱性过硫酸钾消解-钼锑抗显色分光光度法测定(测定波长:700 nm)^[27]。颗粒态氮(PN)为TN与DTN的差值,颗粒态磷(PP)为TP与DTP的差值,高锰酸盐指数采用酸性高锰酸钾滴定法测定^[28],溶解性有机碳(DOC)采用高温燃烧法(岛津2010型TOC仪)进行测定^[29]。相关风速风向数据来源于设置在梅梁湾东南角的中国科学院太湖生态系统研究站,测量高度10 m^[30]。

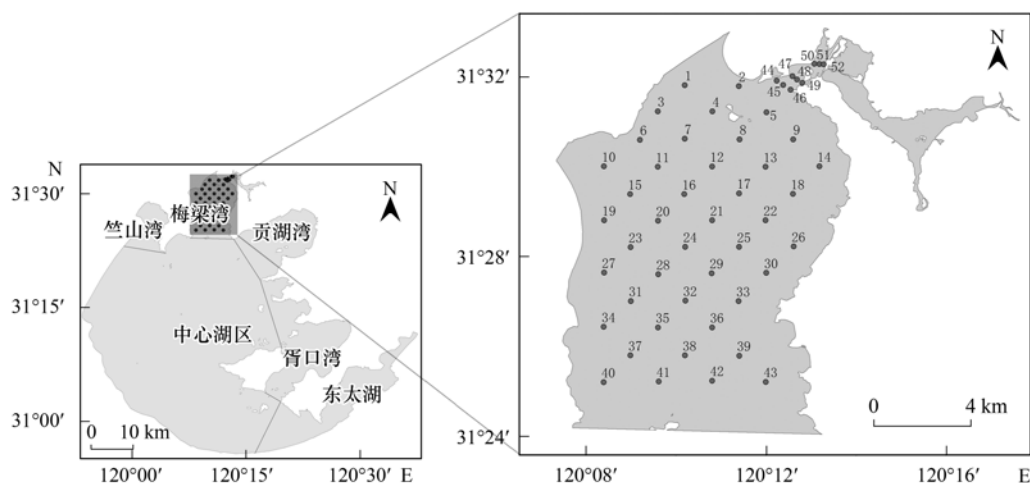


图1 梅梁湾在太湖中的位置及采样布点示意

Fig. 1 Location of Meiliang Bay and the sampling sites in Lake Taihu

1.3 数据处理方法

粒子漂移采用 GPS 定时定位原理, 通过接收卫星信号将当时所在的经纬度信息和时间保存在设备的储存卡、并发送到岸上的控制设备中^[31]. 通过 Arc GIS 10.2 将经纬度坐标转化为平面坐标 (X , Y), 利用三角函数计算出每次记录时间内粒子相应移动的距离, 求出漂移速度.

运用 Arc GIS 10.2 中克里金插值法, 绘制营养盐、叶绿素 a 、有机物和溶解氧的空间插值图. 在表层叶绿素 a 的空间差值基础上利用 Arc GIS 10.2 绘制泰森多边形, 计算出每个采样点代表的面积^[32], 根据表层采样 20 cm 深度以及监测点叶绿素 a 浓度, 计算梅梁湾表层叶绿素 a 赋存量. 其余所有数据的统计分析、处理及制图用 SPSS 23.0、Origin 8、R 等软件进行.

2 结果与分析

2.1 表层流方向及速度的表征

15 个粒子 2017 年 10 月 20 ~ 21 日的漂移轨迹如图 2, 对应期间的风场过程如图 3. 其中, 10 月 20 日粒子总体上往西南方向漂移, 靠近梅梁湾东岸的两个粒子可能受到岸边回流影响, 在漂移过程中方向由西南转为西北. 10 月 21 日粒子总体往偏南漂移, 部分粒子漂移方向由东南转为西南. 15 个粒子整体呈湾内至湾口的位移方向. 粒子漂移期间风场稳定, 10 月 20 日的主要风向为东北偏北, 10 min 最大风速为 $5.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 平均风速 $1.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 10 月 21 日的主要风向为西北偏北, 10 min 最大风速为 $7.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 平均风速 $2.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 根据每个粒子移动距离与漂移时间算出 15 个粒子的漂移速度在 $1.0 \sim 12.0 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间, 10 月 20 日平均漂移速度为 $3.0 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 10 月 21 日平均漂移速度 5.0

$\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$. 可以看出, 漂流粒子的移动方向与风场的方向密切相关.

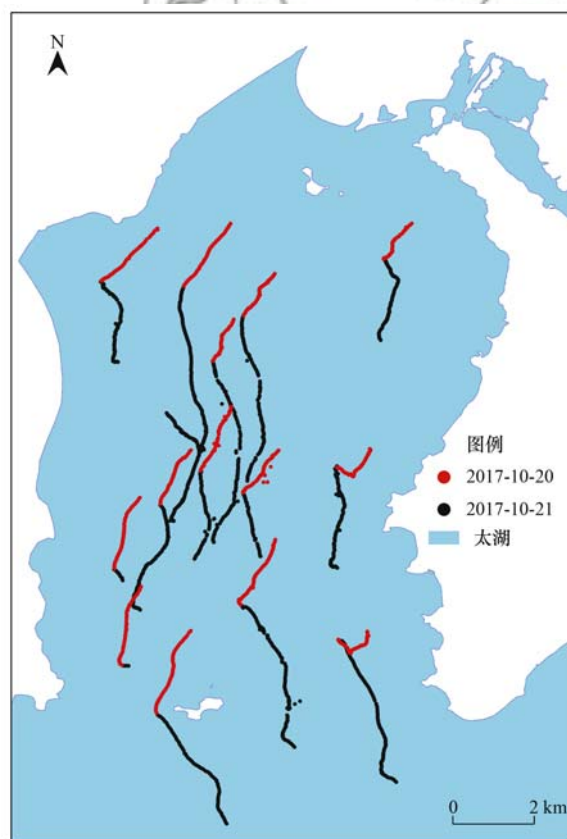


图2 2017 年 10 月 20 ~ 21 日粒子在太湖梅梁湾的漂移轨迹

Fig. 2 Trajectories of fifteen satellite-tracked surface-following drifters during October 20 to 21, 2017 in Lake Taihu

通过计算各粒子每个时段的漂移速度方向与对应时段风向的顺时针夹角与风速如图 4. 大部分顺时针偏转角落在 $0 \sim 90^\circ$ 间, 当风速大于 $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 较多的偏转角度数处于 $0 \sim 45^\circ$ 之间. 根据 Ekman 理论^[33], 在北半球, 理想情况下, 表面流的方向与风向的夹角应该是按顺时针方向转 45° , 在

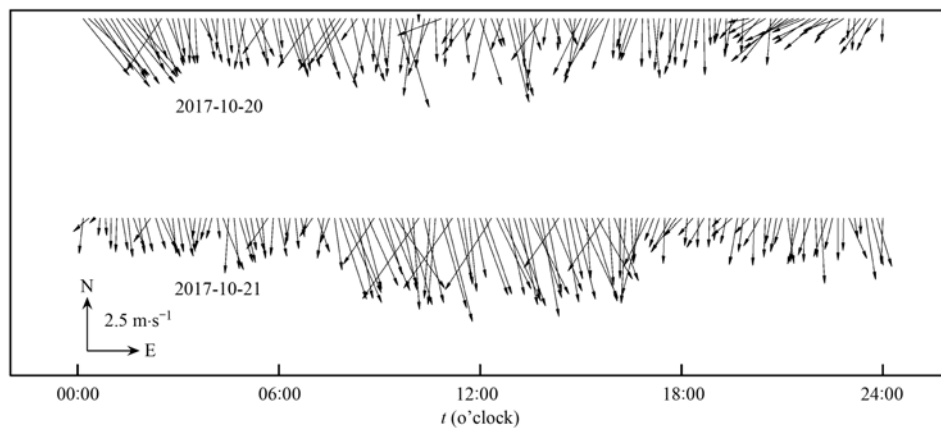


图3 2017年10月20~21日风速风向过程

Fig. 3 Wind speed and direction process during October 20 to 21, 2017

现实中, 由于湖泊沿岸存在回流及地形的斜压过程影响, 偏转角应该小于 45° . 本实验中 63% 的顺时针夹角介于 $0 \sim 45^\circ$ 之间, 基本能满足 Ekman 理论, 说明本次大部分粒子的漂移方向能表现出与风向的较高匹配度, 且在风速为 $1.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $2.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 下, 梅梁湾表层流的流速分别为 $3.0 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $5.0 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$.

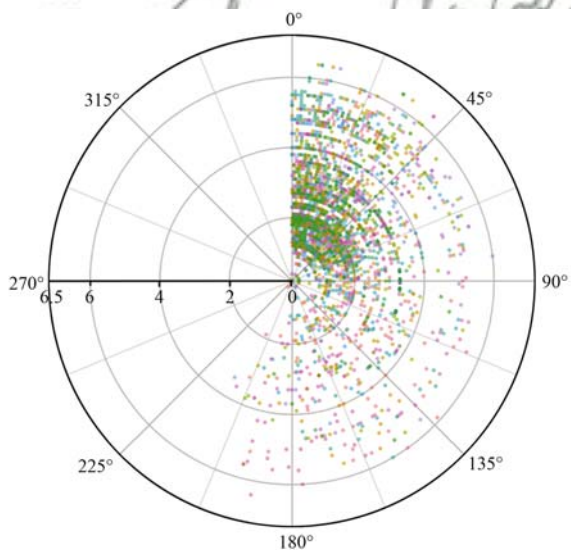
半径轴表示风速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), 角度轴表示顺时针偏转角

图4 风速和风向与漂流速度方向之间的顺时针偏转角的极坐标散点图

Fig. 4 Polar scatterplot of wind speed and clockwise deflection angle between wind direction and drifter velocity direction

2.2 叶绿素 a 及营养盐空间分层分布

本实验布点密度较大, 能清晰地表征出梅梁湾叶绿素 a 及营养盐浓度的空间分布特征. 除 18 号点位由于渔业拦网养殖, 无法采样, 数据缺失外, 其余点位各指标的表、中和底层空间分布如图 5. 其中, 表层 Chl-a 平均浓度为 $264.62 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 介于 $10.71 \sim 3808.35 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 最高值出现在 41 号点; 中层 Chl-a 平均浓度为 $83.77 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 浓度介

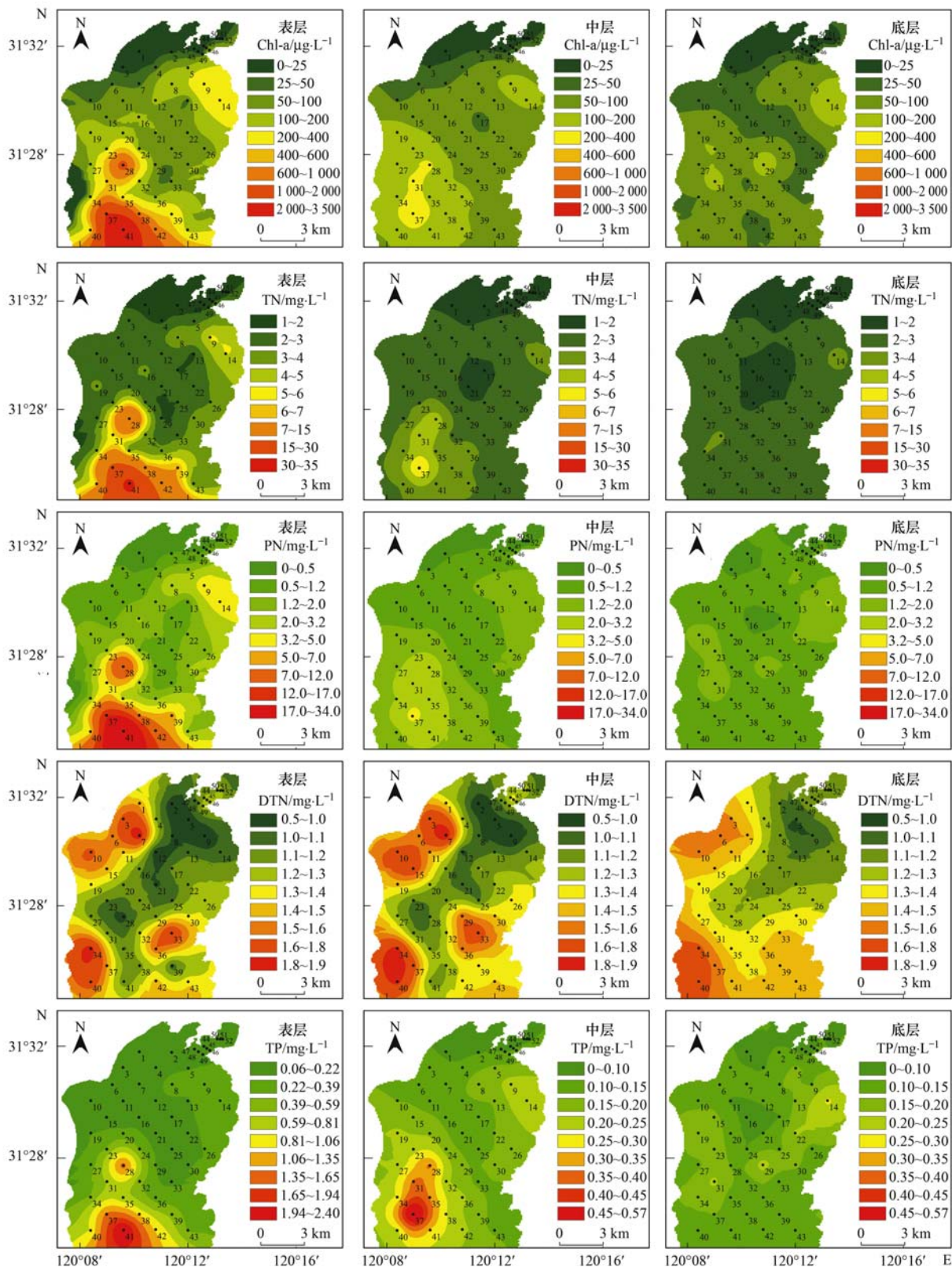
于 $8.50 \sim 515.76 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 高值出现在 28、31 与 37 号点; 底层 Chl-a 平均浓度为 $52.89 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 介于 $7.40 \sim 168.74 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 较高值出现在 14、31、29 与 23 号点位. 空间上, 表、中和底层均呈北部浓度低, 南部靠近湾口区高的分布状态. 不同水层叶绿素 a 浓度沿水深呈减小趋势, 表层 Chl-a 浓度高值分别是中层和底层叶绿素 a 最高值的 7 倍和 22 倍, 存在显著的分层现象.

TN 表、中和底层的平均值分别为 4.17、2.55 和 $2.14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 浓度范围分别是 $1.46 \sim 35$ 、 $1.37 \sim 7.52$ 和 $1.44 \sim 3.27 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; PN 表、中和底层的平均值分别为 2.91、1.24 和 $0.84 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 浓度范围分别是 $0.27 \sim 33.93$ 、 $0.17 \sim 5.84$ 和 $0.19 \sim 2.13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; DTN 表、中和底层平均值分别为 1.26、1.31 和 $1.30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 浓度范围分别是 $0.89 \sim 1.94$ 、 $0.84 \sim 1.96$ 和 $0.89 \sim 2.06 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. TN 与 PN 表、中和底层的浓度分布均与 Chl-a 一致, 均呈北部浓度低, 南部靠近湾口区高的分布状态, 而 DTN 表、中和底层的高浓度区域出现在西北沿岸带、西南沿岸带及东南部. 说明 TN、PN 受蓝藻水华空间分布的影响较大.

TP 表层浓度范围介于 $0.083 \sim 3.313 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 平均值 $0.363 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 中层平均浓度 $0.177 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 浓度最低为 $0.080 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 浓度最高为 $0.849 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 高浓度区域位于 37 号点周围, 底层平均浓度为 $0.132 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 范围在 $0.075 \sim 0.259 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 间. PP 表层平均值 $0.320 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 浓度介于 $0.008 \sim 3.287 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 中层平均浓度为 $0.133 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 37 号点浓度最高 ($0.803 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、44 号点浓度最低 ($0.006 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 底层平均值为 $0.087 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 浓度介于 $0.012 \sim 0.219 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间. TP 与 PP 在表、中和底层的浓度分布均与 Chl-a 一致. 而 DTP 表层的高浓度分布区域在北部, DTP

中层和底层自北向南均呈高→低→高浓度的分布。其中 DTP 表层浓度介于 $0.024 \sim 0.075 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 平均值为 $0.043 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 中层浓度范围为 $0.031 \sim 0.075 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 $0.045 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 底层浓度介于 $0.033 \sim 0.071 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 平均值为 $0.045 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 中层和底层 DTP 的平均浓度相同且高于表层。

梅梁湾表、中和底层的高锰酸盐指数平均值分别为 10.8、6.3 和 $5.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 浓度范围分别为 $4.28 \sim 88.86$ 、 $4.16 \sim 18.96$ 和 $4.04 \sim 8.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 空间上, 高锰酸盐指数表层呈北部浓度低, 南部靠近湾口区高的分布状态, 与叶绿素 a 空间分布一致; 中层浓度分布差异较小, 浓度较高区域与表层一致, 底层浓度远低于表层且分布较均匀。DOC



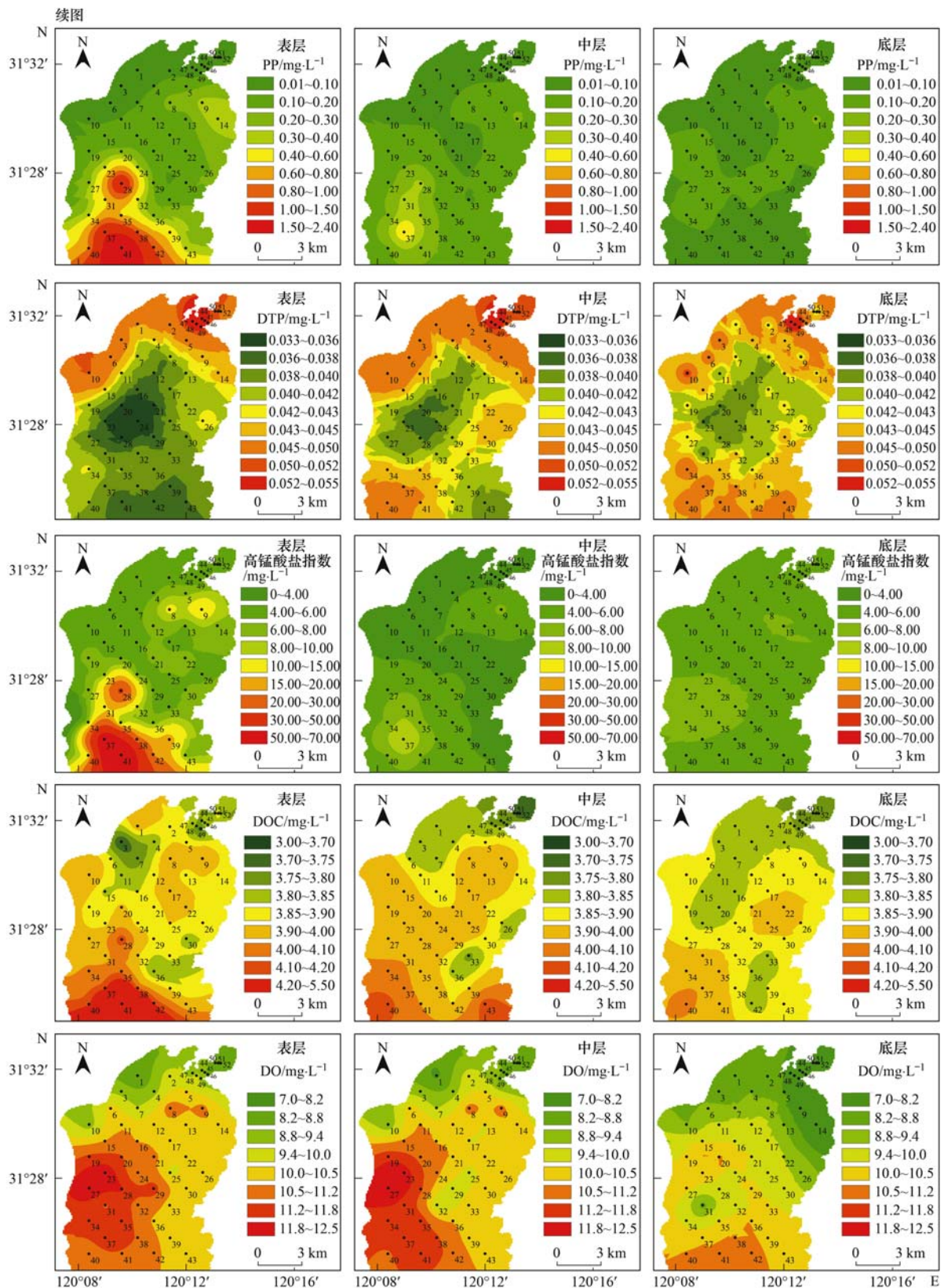


图5 梅梁湾表、中和底层各指标的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of indicators in surface, middle, bottom waters of Meiliang Bay

表、中和底层高锰酸盐指数的平均值分别为 3.94、3.89 和 3.85 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 差异较小; 表、中和底层的浓度空间分布基本一致, 表现为北部浓度最低, 南部靠近梅梁湾湾口处浓度最高. DO 表、中和底层

的浓度分别为 10.2、10.1 和 9.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 随着深度增加, 溶解氧浓度逐渐下降; 空间分布基本表现为西南部区域及湾口浓度高于东部, 北部 DO 浓度最低.

总体上, 梅梁湾不同形态的氮、磷营养盐以及高锰酸盐指数、DOC 和 DO 浓度的空间分布具有一定的差异。其中, TN、TP、PN、PP 和高锰酸盐指数的空间分布与水华物质的空间分布高度一致, 表现为北部浓度低, 南部靠近湾口区高的分布状态。但溶解性营养盐等相关指标则与蓝藻水华物质的空间格局具有较大的差异性, 是由于采样期间在东北偏北风的作用下, 由于蓝藻黏滞系数较大^[34], 且 PN 和 PP 来源于蓝藻颗粒自身储存^[35], 使 TN、TP、PN 和 PP 分布易受湖流影响, 表层及中层的蓝藻水华往湾口漂移, 造成 PN、PP 在西南偏南及湾口区域浓度高; 而 DTN 和 DTP 黏滞系数低, 受流场影响小, 其来源于底泥释放、蓝藻腐烂和外源污染。DTN 浓度分布表现出与长期水华物质易堆积区域的一致性; 而 DTP 浓度分布表现出与底泥空间分布的关联性。高锰酸盐指数是表征水体的受还原性有机及无机物质的污染程度, 其浓度分布与叶绿素 a 分布一致, 说明蓝藻水华物质是梅梁湾主要的还原性有机物质; 而 DOC 是表征水体中溶解性有机物的值, DOC 浓度在湾口浓度较高, 表、中和底层浓度依次降低但差异不大, 整体分布与 Chl-a 分布具有差异, 受湖流影响较小, 入湖污染对 DOC 分布影响比较大^[36]。

3 讨论

3.1 风场对漂浮蓝藻水华物质空间格局及动态变化具有重要影响

表层湖流是蓝藻水华漂移的重要载体^[31], 而风驱动力是大型浅水湖泊湖流的主要动力因子之一^[37], 而水动力条件在特殊风场(如台风)高峰期后的短期内蓝藻形成起决定性作用^[38]。风场对表层蓝藻水华物质空间分布的重要作用表现在叶绿素 a 浓度表层空间分布上, 对表层蓝藻水华的动态变化表现在因风速大小使粒子漂移速度不同。由于风场会推动漂浮蓝藻水华物质空间上的堆积, 使其成为推动湖泛形成的环境因子之一^[39]。诸多对梅梁湾的流场及风场的实测与模拟表明, 表层流对风场变化响应敏感且水动力条件对叶绿素 a 浓度空间分布有较大影响。比如, 梅梁湾在夏季偏南风、冬季西北风的作用下, 表层产生的顺时针环流使叶绿素在梅梁湾东北部浓度高于其他区域^[40], 前期在东北风的作用下梅梁湾表、中和底层流均顺风由湾内流向湾外, 且由于地貌等的影响, 不同区域流场对风场的响应强度不同^[30]。丁文浩^[31]在对太湖水动力特征的观察及分析中发现, 风速加大会直接导致上层流速增加, 使蓝藻随稳定的湖流迁移; 风速

较小时虽然无法形成稳定的环流, 但使蓝藻水华容易在表面聚集。本次粒子漂流观察实验及对表层叶绿素 a 的空间分布表明, 梅梁湾表层湖流对同步风场变化响应迅速且湖流方向与风向有较高匹配度, 当平均风速为 $1.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $2.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 用粒子平均漂移速度表征出表层流速分别为 $3.0 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $5.0 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 表层叶绿素 a 在空间上呈南部浓度低, 北部靠近湾口区域浓度高的分布, 这是由于在偏北风的作用下表层蓝藻水华往偏南的湾口方向漂移, 并且在采样当天及前一周持续偏北风的作用下, 太湖形成围绕洞庭西山的顺时针环流, 在其北面存在一条从梅梁湾西部流入、东部流出的稳定湖流, 引起梅梁湾与太湖的水交换^[41], 在梅梁湾北部靠近湾口区域处于环流顶托, 蓝藻水华容易滞留在该区域, 同时, 梅梁湾连接太湖的湾口中间部分存在 0.22 km^2 大小的拖山岛也会在一定程度上影响水体运动, 对湖流产生一定的影响。

3.2 风场作用下蓝藻水华物质迁移对关键水质指标的巨大影响

通过叶绿素 a 及营养盐浓度的表层空间分布情况看, 总氮、总磷、颗粒态氮磷与高锰酸盐指数表层的空间分布与表层叶绿素 a 一致, 说明粒子追踪方法能够较好表征蓝藻水华物质在风场作用下的移动特征。由于蓝藻生长过程中会吸收大量氮磷营养盐, 漂浮蓝藻是颗粒态氮磷的主要存在形式, 尤其在高密度蓝藻聚积未腐烂的水体中, 氮磷营养盐主要赋存在藻体内^[42]。因此, 风场在影响表层蓝藻的漂移速度与方向的同时, 也对颗粒态氮磷、水体有机质及叶绿素 a 等关键水质指标的表层空间分布、时空再分配过程均有决定性作用。

以往研究发现, 梅梁湾河口湖区存在小环流, 容易成为蓝藻聚集区^[37]。同时, 位于梅梁湾东北部的梁溪河入湖时携带大量污染物质, 使梅梁湾东北部 Chl-a、TN 和 TP 等指标的浓度高于其他区域^[34]。2007 年以来, 对梁溪河安置闸阀并设立泵站, 阻止其污染物的排入的同时将聚集的蓝藻水华泵至河道, 在偏北风的作用下, 梅梁湾东北部除 DTP 以外的指标浓度低于其他水域, 说明泵站的设立能有效改善河口湖区水质。丁文浩^[31]对太湖湖流及风速风向的分析发现, 在低风速($2.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)和中等风速($3.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)情况下, 上下层湖流分异比较明显, 当风速达到 $6.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 上下层湖流流向一致。采样当天平均风速较小($1.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 不利于水动力垂向混合^[43], 大部分蓝藻漂浮在水体表面, 致使表层叶绿素 a 及 TN、TP、PN 和 PP 在表层浓度远高于中层; 底泥的释放也是造成水质在

垂直方向上产生差异的原因之一。因此对梅梁湾采样点布设时,也应考虑到由于蓝藻漂移造成梅梁湾叶绿素 a 及营养盐空间分布的异质性,合理布设具有代表性的采样点位,才能更加客观反映调查期间湖泊水体的真实水质情况。

3.3 风场变化对连通河道配水工程的水质效益产生影响

调水、补水和排水等工程手段在湖泊和河道治理上已有较多应用。根据不同调水目标针对性地考虑调水水质、实施流量管理、注重水生态功能平衡与资源的保护是科学实施调水、配水工程管理的重点。在我国,已有很多以水质改善和水华控制为目标的调水工程,如“引江济太”工程^[44],三峡水库库区支流调度工程^[45],巢湖调水治理河道水质及蓝藻工程^[46]等。本研究表明,风场会影响梅梁湾泵站水域的水质情况,当河道水质和梅梁湾水质作为不同考虑对象时,风场是优化调水方案应考虑的重要因素。由于梅梁湖泵站位于梅梁湾河口湖区,在西南方向风场作用会使梅梁湾漂浮在水面的藻颗粒往梁溪河河口方向及沿岸堆积^[47],东南风条件下,藻的输移也会使西北部及北部湖区叶绿素 a 偏高^[48];本次叶绿素 a 及营养盐的空间差值分布说明,偏北风的风场条件下,有利于避开蓝藻水华在河口沿岸堆积。因此,当以梁溪河水质为主时,在偏北风的风场条件下进行泵水调水作业,有利于河湖水力交换,增加河道生态需水量、提高溶解氧水平;当东南风的吹动下太湖蓝藻向梅梁湾漂移,容易引发“湖泛”灾害时,在有利于蓝藻往河口漂移的西南风向风场下,加大调水力度,有助于湾内蓝藻排出,降低灾害发生的风险。

3.4 梅梁湾蓝藻赋存量估算及其对蓝藻水华打捞工程的指示意义

蓝藻打捞是一种借助工程技术清除藻类污染的物理措施^[49, 50],在水华发生季节进行藻类人工清除是非常有效且无负面影响的一种方法^[51]。经过2007年太湖供水危机,无锡市政府就已经把打捞蓝藻作为治理太湖蓝藻水华的一种长期举措^[52]。微囊藻(*Microcystis*)是太湖蓝藻水华的主要藻种^[53],也是主要的打捞对象。相关资料显示,2008年江浙两省在太湖打捞的富藻水总量约68万t,宜兴市与无锡市是江苏省主要打捞点,其中在太湖无锡区域设立的打捞点最多,而梅梁湾打捞量占无锡市打捞量的三分之一^[54]。随着蓝藻机械化打捞的能力提升、打捞效率的提高,江苏省富藻水的打捞量从2008年60万t上升至2016年160万t左右^[55]。2017年无锡市共计打捞富藻水214万t,由富藻水

产出的藻泥(含水率85%)13万t^[56],富藻水里蓝藻干物质(基本不含胞外水)的量为19500t。每年5~10月是蓝藻暴发主要时期,2017年梅梁湾打捞点平均每天打捞35t蓝藻干物质。蓝藻水华物质打捞已经成为治太工程中一项投资巨大、意义重大的日常工作。

在低风速的场景下,蓝藻水华物质主要存在于表层水体。按照表层20cm水体叶绿素a含量测定及相关关系分析估算,采样当天梅梁湾表层蓝藻干物质的赋存量约为396t。以此估算,平均每日打捞量占当日湖湾表层赋存量的8.8%,而90%的蓝藻水华物质仍存在于库湾表层水体中。这说明,即使在花费了巨大代价的情况下,管理部门尽全力实施的蓝藻打捞工程对湖泊水体蓝藻水华物质的去除能力有限。因此,蓝藻水华物质打捞的定位应该是滨岸带湖泛的防控,作为蓝藻聚集时的原位应急控制方法,而非蓝藻水华治理。打捞虽然能够防止蓝藻长时间堆积、控制藻源性有机物的释放^[57],但打捞蓝藻的方法只能去除少量漂浮在表层的蓝藻颗粒,与赋存量相比,打捞量不足10%;从管理角度来看,削减流域营养盐的输入才是长期现实有效控制蓝藻水华的策略^[58, 59]。

4 结论

(1)浅水湖泊水体中蓝藻水华物质的时空分配受风场的影响大,漂移堆积空间变化对风场变化响应敏感,在蓝藻水华风险预测、连通河道的配水工程管理上应予以充分考虑。

(2)风场作用下蓝藻水华物质空间再分配过程对水体颗粒态、溶解态营养盐的影响大,颗粒物营养盐与蓝藻水华变化的一致性高,溶解态营养盐与蓝藻水华物质空间格局的一致性较差,在水质调查方案中应加以关注。

(3)从调查期间水体蓝藻水华颗粒物的赋存量估算及其与太湖治理工程中蓝藻打捞能力的评估表明,目前的蓝藻打捞能力对区域水华物质的去除量不足水相表层赋存量的10%。打捞蓝藻的方法只能去除少量漂浮在表层的蓝藻颗粒;防控湖泛灾害的蓝藻打捞作业对湖体蓝藻水华赋存量的清除能力有限,只能对岸边带湖泛的预防产生影响。

致谢:感谢太湖湖泊生态系统研究站提供气象数据,感谢孙祥、王汉师兄们在采样方面的帮助,感谢薛静琛、笪文怡在样品分析中的帮助,感谢无锡市蓝藻治理办公室在调查工作中的支持。

参考文献:

[1] 吴庆龙,谢平,杨柳燕,等.湖泊蓝藻水华生态灾害形成机

- 理及防治的基础研究[J]. 地球科学进展, 2008, **23**(11): 1115-1123.
- Wu Q L, Xie P, Yang L Y, *et al.* Ecological consequences of cyanobacterial blooms in lakes and their countermeasures[J]. *Advances in Earth Science*, 2008, **23**(11): 1115-1123.
- [2] Qin B Q, Xu P Z, Wu Q L, *et al.* Environmental issues of Lake Taihu, China[J]. *Hydrobiologia*, 2007, **581**(1): 3-14.
- [3] Paerl H W, Xu H, McCarthy M J, *et al.* Controlling harmful cyanobacterial blooms in a hyper-eutrophic lake (Lake Taihu, China): the need for a dual nutrient (N & P) management strategy[J]. *Water Research*, 2011, **45**(5): 1973-1983.
- [4] Carmichael W W. Health effects of toxin-producing cyanobacteria: 'The CyanoHABs'[J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2001, **7**(5): 1393-1407.
- [5] Huisman J, Matthijs H C P, Visser P M. Harmful cyanobacteria[M]. Netherlands: Springer, 2005. 1-2.
- [6] Paul V J. Global warming and cyanobacterial harmful algal blooms[J]. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 2008, **619**: 239-257.
- [7] Paerl H W, Otten T G. Harmful cyanobacterial blooms: causes, consequences, and controls[J]. *Microbial Ecology*, 2013, **65**(4): 995-1010.
- [8] O'Neil J M, Davis T W, Burford M A, *et al.* The rise of harmful cyanobacteria blooms: the potential roles of eutrophication and climate change[J]. *Harmful Algae*, 2012, **14**: 313-334.
- [9] 马健荣, 邓建明, 秦伯强, 等. 湖泊蓝藻水华发生机理研究进展[J]. *生态学报*, 2013, **33**(10): 3020-3030.
- Ma J R, Deng J M, Qing B Q, *et al.* Progress and prospects on cyanobacteria bloom-forming mechanism in lakes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(10): 3020-3030.
- [10] 孔繁翔, 高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. *生态学报*, 2005, **25**(3): 589-595.
- Kong F X, Gao G. Hypothesis on cyanobacteria bloom-forming mechanism in large shallow eutrophic lakes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(3): 589-595.
- [11] Dokulil M T, Teubner K. Cyanobacterial dominance in lakes[J]. *Hydrobiologia*, 2000, **438**(1-3): 1-12.
- [12] 杨柳燕, 杨欣妍, 任丽曼, 等. 太湖蓝藻水华暴发机制与控制对策[J]. *湖泊科学*, 2019, **31**(1): 18-27.
- Yang L Y, Yang X Y, Ren L M, *et al.* Mechanism and control strategy of cyanobacterial bloom in Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(1): 18-27.
- [13] Shi K, Zhang Y L, Zhang Y B, *et al.* Phenology of phytoplankton blooms in a trophic lake observed from long-term MODIS data[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(5): 2324-2331.
- [14] 陈黎明, 王成林, 李褪来. 特殊风场条件对太湖蓝藻水华迁移的影响研究[J]. *环境监测管理与技术*, 2012, **24**(3): 29-34.
- Chen L M, Wang C L, Li T L. Study on movement of cyanobacteria bloom with special wind-field condition in Taihu Lake[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2012, **24**(3): 29-34.
- [15] 朱永春, 蔡启铭. 风场对藻类在太湖中迁移影响的动力学研究[J]. *湖泊科学*, 1997, **9**(2): 152-158.
- Zhu Y C, Cai Q M. The dynamic research of the influence of wind field on the migration of algae in Taihu Lake[J]. *Journal of Lake Sciences*, 1997, **9**(2): 152-158.
- [16] 王文兰, 曾明剑, 任健. 近地面风场变化对太湖蓝藻暴发影响的数值研究[J]. *气象科学*, 2011, **31**(6): 718-725.
- Wang W L, Zeng M J, Ren J. Numerical study of the impact of surface wind changes on the cyanobacteria bloom in Lake Taihu[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2011, **31**(6): 718-725.
- [17] 马荣华, 孔繁翔, 段洪涛, 等. 基于卫星遥感的太湖蓝藻水华时空分布规律认识[J]. *湖泊科学*, 2008, **20**(6): 687-694.
- Ma R H, Kong F X, Duan H T, *et al.* Spatio-temporal distribution of cyanobacteria blooms based on satellite imageries in Lake Taihu, China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, **20**(6): 687-694.
- [18] Lin L, Appiah-Sefah G, Li M. Using a laser particle analyzer to demonstrate relationships between wind strength and *Microcystis* colony size distribution in Lake Taihu, China[J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2015, **30**(3): 425-433.
- [19] 水利部太湖流域管理局, 江苏省水利厅, 浙江省水利厅, 等. 太湖健康状况报告(2016)[EB/OL]. <http://www.tha.gov.cn/contents/45/14731.html>, 2017-09-11.
- [20] 朱伟, 谈永琴, 王若辰, 等. 太湖典型区2010-2017年间水质变化趋势及异常分析[J]. *湖泊科学*, 2018, **30**(2): 296-305.
- Zhu W, Tan Y Q, Wang R C, *et al.* The trend of water quality variation and analysis in typical area of Lake Taihu, 2010-2017[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(2): 296-305.
- [21] 中国科学院南京地理与湖泊研究所. 太湖梅梁湾2007年蓝藻水华形成及取水口污水团成因分析与应急措施建议[J]. *湖泊科学*, 2007, **19**(4): 357-358.
- Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences. On the cause of cyanophyta bloom and pollution in water intake area and emergency measures in Meiliang Bay, Lake Taihu in 2007[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2007, **19**(4): 357-358.
- [22] 水利部太湖流域管理局, 江苏省水利厅, 浙江省水利厅, 等. 太湖健康状况报告(2014)[EB/OL]. <http://www.tha.gov.cn/contents/45/14729.html>, 2015-03-18.
- [23] 焦锋, 李新. 太湖梅梁湾富营养化相关问题探讨[J]. *环境污染与防治*, 2005, **27**(3): 214-217.
- Jiao F, Li X. Discussion on relative questions of eutrophication in Meiliang Lake[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2005, **27**(3): 214-217.
- [24] 逢勇, 濮培民. 非稳定风场作用下太湖梅梁湾流场、散度场的研究[J]. *南京气象学院学报*, 1996, **19**(2): 186-190.
- Pang Y, Pu P M. Study of flow and divergence fields under effect of unsteady wind at Meiliang Lake Taihu[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 1996, **19**(2): 186-190.
- [25] 黄清辉, 王东红, 王春霞, 等. 太湖梅梁湾和五里湖沉积物磷形态的垂向变化[J]. *中国环境科学*, 2004, **24**(2): 147-150.
- Huang Q H, Wang D H, Wang C X, *et al.* Vertical variation of the phosphorus form in the sediments of Meiliang Bay and Wuli Lake of Taihu Lake[J]. *China Environmental Science*, 2004, **24**(2): 147-150.
- [26] 陈宇炜, 陈开宁, 胡耀辉. 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. 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.
- [27] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 69-70.
- [28] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国

- 环境科学出版社, 1998. 19-20.
- [29] 张运林, 杨龙元, 秦伯强, 等. 太湖北部湖区 COD 浓度空间分布及与其它要素的相关性研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(6): 1457-1462.
- Zhang Y L, Yang L Y, Qin B Q, *et al.* Spatial distribution of COD and the correlations with other parameters in the northern region of Lake Taihu [J]. Environmental Science, 2008, **29**(6): 1457-1462.
- [30] 吴挺峰, 朱广伟, 秦伯强, 等. 前期风场控制的太湖北部湖湾水动力及对蓝藻水华影响[J]. 湖泊科学, 2012, **24**(3): 409-415.
- Wu T F, Zhu G W, Qin B Q, *et al.* Prior wind field induced hydrodynamics and its influence on cyanobacterial bloom in northern bays of Lake Taihu, China [J]. Journal of Lake Sciences, 2012, **24**(3): 409-415.
- [31] 丁文浩. 太湖水动力特征及生态效应模拟[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018. 36-63.
- Ding W H. Study on the hydrodynamic characteristics and ecological effect simulation in Lake Taihu [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018. 36-63.
- [32] 金颖薇, 朱广伟, 许海, 等. 太湖水华期营养盐空间分异特征与赋存量估算[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 936-945.
- Jin Y W, Zhu G W, Xu H, *et al.* Spatial distribution pattern and stock estimation of nutrients during bloom season in Lake Taihu [J]. Environmental Science, 2015, **36**(3): 936-945.
- [33] Bao M, Guan W B, Yang Y, *et al.* Drifting trajectories of green algae in the western Yellow Sea during the spring and summer of 2012[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2015, **163**: 9-16.
- [34] 秦伯强, 胡维平, 陈伟民, 等. 太湖梅梁湾水动力及相关过程的研究[J]. 湖泊科学, 2000, **12**(4): 327-334.
- Qin B Q, Hu W P, Chen W M, *et al.* Studies on the hydrodynamic processes and related factors in Meiliang Bay, Northern Taihu Lake, China [J]. Journal of Lake Sciences, 2000, **12**(4): 327-334.
- [35] 李秉柏, 施德堂, 王志明. 太湖蓝藻暴发的原因及对策建议[J]. 江苏农业科学, 2007, (6): 336-339.
- Li B B, Shi D T, Wang Z M. Cause and strategy suggestion of Cyanophytes breaking out in Taihu lake[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2007, (6): 336-339.
- [36] 周业凯, 陈卫, 陶辉, 等. 太湖水源水中溶解性有机物特性分析[J]. 中国给水排水, 2017, **33**(5): 60-63.
- Zhou Y K, Chen W, Tao H, *et al.* Characteristics of dissolved organic matter in source water of Taihu Lake[J]. China Water & Wastewater, 2017, **33**(5): 60-63.
- [37] 许旭峰, 刘青泉. 太湖风生流特征的数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展, 2009, **24**(4): 512-518.
- Xu X F, Liu Q Q. Numerical study on the characteristics of wind-induced current in Taihu Lake [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2009, **24**(4): 512-518.
- [38] Qin B Q, Li W, Zhu G W, *et al.* Cyanobacterial bloom management through integrated monitoring and forecasting in large shallow eutrophic Lake Taihu (China) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, **287**: 356-363.
- [39] 刘俊杰, 陆隼, 朱广伟, 等. 2009-2017 年太湖湖泛发生特征及其影响因素[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(5): 1196-1205.
- Liu J J, Lu J, Zhu G W, *et al.* Occurrence characteristics of black patch events and their influencing factors in Lake Taihu during 2009 and 2017 [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(5): 1196-1205.
- [40] 罗澈葱, 秦伯强, 朱广伟, 等. 太湖梅梁湾冬季湖流特征[J]. 湖泊科学, 2004, **16**(1): 73-76.
- Luo L C, Qin B Q, Zhu G W, *et al.* Current circulation pattern in winter Meiliang Bay, Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2004, **16**(1): 73-76.
- [41] 孙顺才, 黄漪平. 太湖[M]. 北京: 海洋出版社, 1993. 112-113.
- [42] 陈丙法, 冯慕华, 尚丽霞, 等. 聚积蓝藻不同打捞强度下藻源污染物释放特征研究[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(11): 4077-4086.
- Chen B F, Feng M H, Shang L X, *et al.* The release characteristics of algae-derived pollutants in different salvage intensities after cyanobacteria accumulation [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(11): 4077-4086.
- [43] 范成新, 陈宇炜, 吴庆龙. 夏季盛行风对太湖北部藻类水华分布的影响[J]. 上海环境科学, 1998, **17**(8): 4-6.
- Fan C X, Chen Y W, Wu Q L. Effect of prevailing wind in summer on distribution of algal bloom in Lake Taihu [J]. Shanghai Environmental Science, 1998, **17**(8): 4-6.
- [44] 吴浩云, 周丹平, 何佳, 等. 引江济太工程综合效益的评估及方法探讨[J]. 湖泊科学, 2008, **20**(5): 639-647.
- Wu H Y, Zhou D P, He J, *et al.* Integrated benefit assessment of the project water diversion from Yangtze River to Lake Taihu and discussion on the methodology [J]. Journal of Lake Sciences, 2008, **20**(5): 639-647.
- [45] 陈森, 苏晓磊, 黄慧敏, 等. 三峡库区支流生境因子对库区蓄水的响应[J]. 生态学报, 2018, **38**(4): 1478-1486.
- Chen M, Su X L, Huang H M, *et al.* Response of habitat factors to reservoir impoundment in tributaries in the three gorges reservoir region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, **38**(4): 1478-1486.
- [46] 李飞鹏, 张海平, 陈玲, 等. 调水对巢湖市河道水质的改善效果及对浮游藻类的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2015, **26**(3): 30-34.
- Li F P, Zhang H P, Chen L, *et al.* Effect of water diversion on improvement of river water quality and phytoplankton in Chaohu [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2015, **26**(3): 30-34.
- [47] 余茂蕾, 洪国喜, 许海, 等. 湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(2): 603-613.
- Yu M L, Hong G X, Xu H, *et al.* Effects of cyanobacterial blooms in eutrophic lakes on water quality of connected rivers [J]. Environmental Science, 2019, **40**(2): 603-613.
- [48] 许遐祯, 钱昊钟, 赵巧华. 风场对太湖叶绿素 a 空间分布的影响[J]. 生态学杂志, 2012, **31**(5): 1282-1287.
- Xu X Z, Qian H Z, Zhao Q H. Effects of wind field on spatial distribution of chlorophyll-a concentration in Taihu Lake [J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, **31**(5): 1282-1287.
- [49] Henderson R, Parsons S A, Jefferson B. The impact of algal properties and pre-oxidation on solid-liquid separation of algae [J]. Water Research, 2008, **42**(8-9): 1827-1845.
- [50] Majsterek I, Sicinska P, Tarczynska M, *et al.* Toxicity of microcystin from cyanobacteria growing in a source of drinking water [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology, 2004, **139**(1-3): 175-179.
- [51] 周贝贝. 蓝藻打捞对水中氮磷及藻类生长的影响[D]. 南京: 南京师范大学, 2012.
- Zhou B B. The effect of cyanobacteria salvage on nitrogen and phosphorus in water and algae growth [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2012.
- [52] 朱喜. 太湖水环境治理措施和效果[C], 第三届全国河道治理与生态修复技术交流研讨会论文集. 深圳: 中国水利学

- 会, 中国水利技术信息中心, 2011.
- [53] 刘玲莉, 顾宇飞, 罗屿, 等. 一株自太湖微囊藻上分离到的细菌的生长及磷代谢[J]. 湖泊科学, 2000, **12**(4): 372-378.
- Liu L L, Gu Y F, Luo Y, *et al.* On the growth and phosphorous metabolism of bacterium isolated from *Microcystis Aeruginosu* in Taihu Lake[J]. Journal of Lake Sciences, 2000, **12**(4): 372-378.
- [54] 水利部太湖流域管理局, 江苏省水利厅, 浙江省水利厅, 等. 太湖健康状况报告(2008)[EB/OL]. <http://www.tba.gov.cn/contents/45/14723.html>, 2009-02-20.
- [55] 水利部太湖流域管理局, 江苏省水利厅, 浙江省水利厅, 等. 太湖健康状况报告(2015)[EB/OL]. <http://www.tba.gov.cn/contents/45/14730.html>, 2016-09-05.
- [56] 水利部太湖流域管理局, 江苏省水利厅, 浙江省水利厅, 等. 太湖健康状况报告(2017)[EB/OL]. <http://www.tba.gov.cn/contents/45/23627.html>, 2018-07-17.
- [57] 陈丙法, 冯慕华, 尚丽霞, 等. 秋季聚积蓝藻打捞对蓝藻生长及水质影响的原位实验[J]. 湖泊科学, 2016, **28**(2): 253-262.
- Chen B F, Feng M H, Shang L X, *et al.* Effects on cyanobacterial growth and water quality after harvesting accumulated cyanobacteria in autumn: an *in-situ* experiment in Lake Chaohu[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, **28**(2): 253-262.
- [58] Xu H, Paerl H W, Zhu G W, *et al.* Long-term nutrient trends and harmful cyanobacterial bloom potential in hypertrophic Lake Taihu, China[J]. Hydrobiologia, 2017, **787**(1): 229-242.
- [59] Paerl H W, Gardner W S, Havens K E, *et al.* Mitigating cyanobacterial harmful algal blooms in aquatic ecosystems impacted by climate change and anthropogenic nutrients[J]. Harmful Algae, 2016, **54**: 213-222.

环境科学

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution and the Efficiency of Concentration Control During a Red Alert in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, 2016	ZHANG Chong, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (3397)
Concentration Characteristics of PM _{2.5} and the Causes of Heavy Air Pollution Events in Beijing During Autumn and Winter	XU Ran, ZHANG Heng-de, YANG Xiao-wen, <i>et al.</i> (3405)
Elemental Composition Characteristics of PM _{2.5} and PM ₁₀ , and Heavy Pollution Analysis in Hefei	LIU Ke-ke, ZHANG Hong, LIU Gui-jian (3415)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Autumn and Winter in Puyang, China	CHEN Chu, WANG Ti-jian, LI Yuan-hao, <i>et al.</i> (3421)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Components in PM _{2.5} in the Guanzhong Area	KANG Bao-rong, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3431)
Molecular Composition and Source Apportionment of Fine Organic Aerosols in Autumn in Changchun	WU Xia, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Urban Expansion and Changes in Urban Characteristics on PM _{2.5} Pollution in China	WANG Gui-lin, ZHANG Wei (3447)
Effect of a Wet Flue Gas Desulphurization System on the Emission of PM _{2.5} from Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (3457)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients for Volatile Organic Compounds from the Synthetic Leather Industry in Zhejiang Province	XU Jia-qí, WANG Zhe-míng, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3463)
Particle Size Distribution and Population Characteristics of Airborne Bacteria Emitted from a Sanitary Landfill Site	MA Jia-wei, YANG Kai-xiong, CHAI Feng-guang, <i>et al.</i> (3470)
Distribution of Total Microbes in Atmospheric Bioaerosols in the Coastal Region of Qingdao	GONG Jing, QI Jian-hua, LI Hong-tao (3477)
Distribution, Sources, and Health Risk Assessment of PAHs in Water Supply Source Regions of Guangzhou	SONG Yu-mei, WANG Chang, LIU Shang, <i>et al.</i> (3489)
Distribution of 16 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Dianchi Lake Surface Sediments After the Integrated Water Environment Control Project	HU Xin-yi, GAO Bing-li, CHEN Tan, <i>et al.</i> (3501)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Salinized Farmland Soil from the Oil Mining Area of the Yellow River Delta	QIU Hui, LIU Yue-xian, XIE Xiao-fan, <i>et al.</i> (3509)
Wind Field Influences on the Spatial Distribution of Cyanobacterial Blooms and Nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (3519)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and the Retention Effects of Nutrients in Xiangjiaba Reservoir	WANG Yao-yao, LÜ Lin-peng, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (3530)
Effects of Exogenous Inputs on Phosphorus Recovery and Transport in Newborn Surface Layers from Sediment Dredging	LI Xin, GENG Xue, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (3539)
Chemical Characteristics and Sources of Groundwater Sulfate in the Kashgar Delta, Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (3550)
Groundwater Chemistry Characteristics and the Analysis of Influence Factors in the Luochuan Loess Tablelands	LI Zhou, LI Chen-xi, HUA Kun, <i>et al.</i> (3559)
Analysis of River Zooplankton Community Characteristics in Autumn in Beijing	WANG Hai-lin, LIU Yu-fei, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (3568)
Benthic Diatom Communities in the Main Stream of Three Gorges Reservoir Area and Its Relationship with Environmental Factors	LIU Li, HE Xin-yu, FU Jun-ke, <i>et al.</i> (3577)
Environmental Response and Ecological Function Prediction of Aquatic Bacterial Communities in the Weihe River Basin	WAN Tian, HE Meng-xia, REN Jie-hui, <i>et al.</i> (3588)
Community Composition of <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria in the Waters of the Lower Reaches of the Fenne River and Its Relationship with Inorganic Nitrogen	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (3596)
Metabolic Functional Analysis of Dominant Microbial Communities in the Rapid Sand Filters for Drinking Water	HU Wan-chao, ZHAO Chen, WANG Qiao-juan, <i>et al.</i> (3604)
Control Measure Effects on the Effluent Quality from Extensive Green Roofs Based on Stabilized Sludge Recycling	PENG Hang-yu, LI Tian, QI Yue, <i>et al.</i> (3612)
Impacts of Vegetation on Quantity and Quality of Runoff from Green Roofs	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3618)
Organic Matter Removal and Membrane Fouling Control of Secondary Effluents Using a Combined Nanofiltration Process	FAN Ke-wen, LI Xing, YANG Yan-ling, <i>et al.</i> (3626)
Adsorption Properties of Ammonia Nitrogen in Aqueous Solution by Various Materials	JIAO Ju-long, YANG Su-wen, XIE Yu, <i>et al.</i> (3633)
Effects of Different Concentrations of Ammonia Nitrogen on the Growth and Enzyme Activity of Four Common Algae Strains	CHANG Ting, XU Zhi-hui, CHENG Peng-fei, <i>et al.</i> (3642)
Treatment of Highly Concentrated Swine Wastewater and Its Degradation Processes Using Three Matrix Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, LI Yuan-hang, <i>et al.</i> (3650)
Phosphorus Removal Performance and Mechanism of Modified Zeolite Using Alum Sludge Acidified Extraction Liquid	HAN Yun, HU Yu-jie, LIAN Jie, <i>et al.</i> (3660)
Advanced Denitrification of Municipal Wastewater Achieved via Partial ANAMMOX in Anoxic MBBR	YANG Lan, PENG Yong-zhen, LI Jian-wei, <i>et al.</i> (3668)
Effect of an Aerobic Unit and a Sedimentation Unit on Sludge and Nitrogen Removal in an Anoxic Unit in a Continuous-flow System	XUE Huan-ting, YUAN Lin-jiang, LIU Xiao-bo, <i>et al.</i> (3675)
Performance and Mechanisms of Advanced Nitrogen Removal via FeS-driven Autotrophic Denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Jing-de, PAN Jian-xin, LI Ze-min, <i>et al.</i> (3683)
Simultaneous Conversion Conditions of Ammonia and Sulfate in ANAMMOX Systems	DONG Shi-yu, BI Zhen, ZHANG Wen-jing, <i>et al.</i> (3691)
Potential Source Environments for Microbial Communities in Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in China	ZHANG Bing, WU Lin-wei, WEN Xiang-hua (3699)
Comparison of the Microbial Community Structure in Nitrifying Processes Operating with Different Dissolved Oxygen Concentrations	LIU Wen-ru, GU Guang-fa, SONG Xiao-kang, <i>et al.</i> (3706)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Kinetics by the Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Acinetobacter junii</i> NP1	YANG Lei, CHEN Ning, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (3713)
Realization of Limited Filamentous Bulking with Type 0092 Filamentous Bacteria as the Dominant Filamentous Bacteria in Shortcut Nitrification	GAO Chun-di, AN Ran, HAN Hui, <i>et al.</i> (3722)
Nitrification, Denitrification, and N ₂ O Production Under Saline and Alkaline Conditions	DAI Wei, ZHAO Jian-qiang, DING Jia-zhi, <i>et al.</i> (3730)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization in Saline-Alkali Soil	WANG Yi-yu, WANG Sheng-sen, DAI Jiu-lan (3738)
Effect of Two Soil Synergists on Ammonia Volatilization in Paddy Fields	ZHOU Yu-ling, HOU Peng-fu, LI Gang-hua, <i>et al.</i> (3746)
Determination of Heavy Metal Geochemical Baseline Values and Its Accumulation in Soils of the Luanhe River Basin, Chengde	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, GAN Feng-wei, <i>et al.</i> (3753)
Migration and Source Analysis of Heavy Metals in Vertical Soil Profiles of the Drylands of Xiamen City	ZHANG Wei-hua, YU Rui-lian, YANG Yu-jie, <i>et al.</i> (3764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Influencing Factors in Baoji Urban Soils	ZHANG Jun, DONG Jie, LIANG Qing-fang, <i>et al.</i> (3774)
Stabilizing Effects of Fe-Ce Oxide on Soil As(V) and P	LIN Long-yong, YAN Xiu-lan, YANG Shuo (3785)
Stabilization of Arsenic-Contaminated Soils Using Fe-Mn Oxide Under Different Water Conditions	ZHOU Hai-yan, DENG Yi-rong, LIN Long-yong, <i>et al.</i> (3792)
Effects of Biochar Amendment on Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Dissolved Organic Carbon, Nitrogen in Paddy Soils	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, TANG Hong, <i>et al.</i> (3799)
Effects of Organic Amendments on Microbial Biomass Carbon and Nitrogen Uptake by Corn Seedlings Grown in Two Purple Soils	WANG Yue, ZHANG Ming-hao, ZHAO Xiu-lan (3808)
Effects of Land Use Type on the Content and Stability of Organic Carbon in Soil Aggregates	LUO Xiao-hong, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (3816)
Effects of Converting Farmland into Forest and Grassland on Soil Nitrogen Component and Conversion Enzyme Activity in the Mountainous Area of Southern Ningxia	GAO Han, XIAO Li, NIU Dan, <i>et al.</i> (3825)
Leaching Behavior of Dissolved Organic Matter in Biochar with Different Extracting Agents	HE Pin-jing, ZHANG Hao-hao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i> (3833)
Toxicity of PM _{2.5} Based on a Battery of Bioassays	JIANG Xiao-dong, XUE Yin-gang, WEI Yong, <i>et al.</i> (3840)