

百方知库
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.2
第40卷 第2期

目次

冬季山谷风和海陆风对京津冀地区大气污染分布的影响 李青春, 李炬, 郑祚芳, 王耀庭, 于淼 (513)

珠三角地区利用 PM_{2.5} 反演气溶胶数浓度谱方法 李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邹宇, 刘礼, 蔡明甫, 张芷言, 周声圳 (525)

广州冬季气溶胶中水溶性有机物和类腐殖质的吸光性和荧光光谱特性 范行军, 余旭芳, 操涛, 王艳, 肖新, 谢越, 李飞跃, 宋建中, 彭平安 (532)

扬州市 PM_{2.5} 中重金属来源及潜在健康风险评估 董世豪, 谢扬, 皇甫延琦, 史旭荣, 易睿, 史国良, 冯银厂 (540)

聊城市冬季 PM_{2.5} 中正构烷烃和糖类的污染特征及来源解析 刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 衣雅男, 魏本杰, 伏梦璇 (548)

博斯腾湖流域大气多环芳烃污染特征、干沉降通量及来源 宋世杰, 黄韬, 赵留元, 毛潇萱, 穆熙, 高宏, 马建民 (558)

某集约化肉鸡饲养场 PM_{2.5} 中抗生素抗性基因的分布特征 刘菲, 许霞, 屠博文, 汪楚乔, 江晓栋, 王利平, 薛银刚 (567)

水汽源地和局地蒸发对大气降水氢氧稳定同位素组分的影响 胡勇博, 肖薇, 钱雨妃, 刘强, 谢成玉, 张秀芳, 张文庆, 温学发, 刘寿东, 李旭辉 (573)

滇池大气沉降氮磷形态特征及其入湖负荷贡献 任加国, 贾海斌, 焦立新, 王一茹, 杨苏文, 武倩倩, 高秋生, 崔志丹, 郝子峰 (582)

基于地统计学分析的太湖颗粒态和溶解态氮、磷营养盐时空分布特征及来源分析 吕伟伟, 姚昕, 张保华, 高光, 邵克强 (590)

湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响 余茂蕾, 洪国喜, 许海, 朱广伟, 朱梦圆, 权秋梅 (603)

异龙湖沉积物重金属人为污染与潜在生态风险 李小林, 刘恩峰, 于真真, 张恩楼, 林祺, 王荣, 沈吉 (614)

珠江河口悬浮物中重金属时空变化特征及其影响因素 杜佳, 王永红, 黄清辉, 戴琦, 杨远东 (625)

北运河粪源微生物分布特征及健康风险评估 陈磊, 李蕾芳, 郅晓沙, 张普, 戴莹, 肖月晨, 沈珍瑶 (633)

氧化还原循环过程中沉积物磷的形态及迁移转化规律 郝文超, 王从锋, 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 赵萍, 丹勇, 胡子龙 (640)

磁性赭铁改性膨润土添加对河道底泥磷迁移与形态转化的影响 王艳, 林建伟, 詹艳慧, 张宏华, 张志斌, 何思琪, 赵钰颖, 吴小龙, 俞阳 (649)

钙预处理对磁性赭铁改性膨润土吸附水中磷酸盐的影响 赵钰颖, 林建伟, 张宏华, 张志斌, 詹艳慧, 姜博汇, 何思琪, 俞阳, 吴小龙, 王艳, 陈璐, 李十盛 (658)

NH₄⁺ 对镁改性生物炭除磷效果的影响 郭蒙蒙, 王鹏飞, 侯泽英, 曹晶, 储昭升, 杨永哲 (669)

3种吸附剂对污水磷污染去除性能与机制比较 吴露, 刘锋, 龙睿, 罗沛, 肖润林, 陈向, 吴金水 (677)

硝酸纤维素膜光降解水中对硝基苯酚的机制 代志峰, 赵同谦, 阴永光, 余加平, 武俐, 郅超, 孙静阳, 罗玉俊 (685)

ZnTiO₂-TiO₂ 复合光催化剂的制备及光催化降解有机污染物机制分析 张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (693)

高指数晶面 TiO₂ 对铬的吸附及光催化去除 钟德健, 张建峰, 李尧, 谢晓丹 (701)

Fe⁰/海藻酸钙微球还原-Fenton 氧化协同降解酸性红 B 张环, 李爽爽, 魏俊富, 傅敏, 李雪曦, 丁琦, 白蓉 (708)

不同滤料滤池启动期内对铁锰离子的去除机制 蔡言安, 毕学军, 张嘉凝, 何静, 董杨, 王海港 (717)

SGO 改性复合纳滤膜的制备及分盐性能 张彦君, 张少峰, 赵长伟, 王军 (724)

一体式铝盐絮体-超滤膜净水效能与机制 薛文清, 李文江, 刘娟, 马百文 (730)

臭氧-CNT 膜改性联用工艺通量及膜污染分析 王凯伦, 刘芳, 关羽琪, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马燕林, 栾桂荣, 郭瑾 (738)

多环芳烃及其衍生物在 SBR/MBBR 工艺中的分布与去除 刘淑惠, 田伟君, 周建仁, 赵婧, 王喆 (747)

微气泡曝气生物膜反应器处理低 C/N 比废水脱氮过程 刘春, 王聪聪, 陈晓轩, 张静, 张瑞娜, 张磊 (754)

从枝菌根强化型生态浮床处理煤化工模拟含盐废水 袁文清, 何皓, 宋文萍, 王曙光, 戴东伟 (761)

夏季高温下污水处理厂生物处理系统的硝化性能及强化方法 宋天伟, 盛晓琳, 王家德, 刘锐, 陈吕军 (768)

硝化包埋菌颗粒氨吸附性能及动力学特性 于德爽, 吕廷廷, 陈光辉, 王晓霞, 唐鹏, 黄硕, 刘诚诚, 杜世明 (774)

乙酸钠作为碳源不同污泥源短程反硝化过程亚硝酸盐积累特性 毕春雪, 于德爽, 杜世明, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 巩秀珍, 都叶奇 (783)

DPR-SNED 系统处理低 C/N 城市污水与硝酸盐废水的运行特性 杜世明, 于德爽, 毕春雪, 王晓霞, 陈光辉, 袁梦飞, 甄建园, 张帆, 吕廷廷 (791)

间歇曝气连续流反应器同步硝化反硝化除磷 赵智超, 黄剑明, 李健, 张为堂, 张力航, 吴雪晴, 陈永志 (799)

ABR-MBR 反硝化除磷工艺的启动及稳定运行 韦佳敏, 蒋志云, 程诚, 朱琳, 刘文如, 沈耀良 (808)

进水 C/N 对 SNEDPR 系统脱氮除磷的影响 都叶奇, 于德爽, 甄建园, 王晓霞, 陈光辉, 唐鹏, 王钧, 毕春雪, 巩秀珍, 黄硕, 刘诚诚 (816)

ABR 除碳-CANON 耦合工艺除碳脱氮特性 李田, 印雯, 王昕竹, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (823)

不同曝气密度对 CANON 工艺启动的影响 李冬, 高雪健, 张杰, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (829)

调控温度和沉降时间实现 ANAMMOX 颗粒快速启动及其稳定运行 李海玲, 李冬, 张杰, 刘博, 李帅 (837)

C/N 和污泥浓度对以 pH 值调控的亚硝化系统影响 张敏, 韦佳敏, 黄慧敏, 姜滢, 郭萌蕾, 陈重军, 沈耀良 (845)

基于活性微生物特征的供水管壁生物膜生长特性 王杨, 朱斌, 董俊, 白晓慧 (853)

黄山土壤细菌群落和酶活性海拔分布特征 姚兰, 胡立煌, 张焕朝, 方炎明, 王良梅 (859)

基于高通量测序分析的生物修复石油污染土壤菌群结构变化 祁燕云, 吴蔓莉, 祝长成, 叶茜琼, 徐会宁 (869)

硝化作用对盐碱湿地 N₂O 排放的影响及其环境因子分析 杨曲, 高伟峰, 刘凤琴, 王文锋, 马建华, 徐卓, 梁红, 高大文 (876)

长期定位施用牛粪对夏玉米-冬小麦体系农田 N₂O 和 NO 排放的影响 聂皇华, 张家升, 和周明, 安梅, 杨学云, 顾江新 (885)

地膜覆盖和施肥对菜地 N₂O 排放的影响 倪雪, 郝庆菊, 陈世杰, 李晓茜, 石孝均, 江长胜 (893)

双季稻品种根际特征与甲烷排放差异及其关系 肖志祥, 傅志强, 徐华勤, 苏姗, 郭昱, 张浪, 唐剑武 (904)

多年施用生物炭对河南烤烟种植区土壤呼吸的影响 李亚森, 丁松爽, 殷金玉, 李佳轶, 周迪, 刘国顺 (915)

桂林毛村不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异特征 丁梦凯, 胡晓农, 曹建华, 吴夏, 黄芬, 王奇岗, 闵佳 (924)

工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析 李锋, 刘思源, 李艳, 史舟 (934)

膨润土对不同类型农田土壤重金属形态及生物有效性的影响 林海, 靳晓娜, 董颖博, 罗明科, 赵一鸣 (945)

缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征 陈仕奇, 吕盛, 高明, 黄容 (953)

复杂地形条件下根系对土壤有机碳的贡献 张彦军, 郭胜利 (961)

不同水平外源碳在稻田土壤转化与分配的微生物响应特征 王季斐, 童瑶瑶, 祝贞科, 陈珊, 邓悟悟, 葛东达, 吴金水 (970)

宝鸡市植被叶子重金属分布规律及生态风险评价 张俊辉, 林青, 姜珊, 刘滨, 李东兴, 王彦虎 (978)

生物炭对污泥堆肥及其利用过程重金属有效态的影响 周楫, 余亚伟, 蒋越, 杨雨滢, 张成 (987)

污泥停留时间对餐厨垃圾与剩余污泥中温厌氧混合发酵系统的影响 袁宏林, 马静, 邢保山, 温俊伟, 韩宇乐, 李倩, 王晓昌 (994)

热碱-分步酶水解-厌氧消化工艺处理秸秆畜粪混合物料及其甲烷高值化条件 卞爱琴, 远野, 张璐璐, 付强, 陈天明, 何磊, 丁成, 王爱杰 (1003)

《环境科学》征订启事(547) 《环境科学》征稿简则(828) 信息(581, 933, 952)

湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响

余茂蕾^{1,2}, 洪国喜³, 许海², 朱广伟^{2,4}, 朱梦圆², 权秋梅^{1*}

(1. 西华师范大学环境科学与工程学院, 南充 637009; 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, 南京 210008; 3. 江苏省水文水资源勘测局无锡分局, 无锡 214124; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为认知湖泊蓝藻水华灾害对连通河道的影响强度及其变化因素,以太湖梅梁湾连通河道梁溪河为例,在夏季水华期开展河道蓝藻颗粒物及氮磷和溶解氧等水质指标的逐日监测,结合河道水质指标空间变化调查,以及同期流量、温度和风场特征等水文气象因子数据,分析湖泊蓝藻水华物质对连通河道水质的影响特征. 结果发现,夏季蓝藻水华暴发期间,水华颗粒物能够随水流大量进入连通的河道,进入河道的藻颗粒通量总量可观,夏季3个月梅梁湾进入梁溪河的蓝藻水华颗粒物总量达到9 733 t,与当年全湖的工程打捞量相近;由湖泊进入连通河道的水华颗粒物通量日变化很大,夏季调查期间进入梁溪河的藻颗粒通量介于75~496 t·d⁻¹,平均值为105 t·d⁻¹,通量大小主要受水文气象条件控制,水量、温度、风向是最主要的影响因素;携带大量蓝藻水华颗粒物的湖水进入河道后,在显著改善城市河道水体溶解氧、氨氮等指标的同时,也显著增加了河道颗粒态氮、磷等营养盐含量,对溶解态氮磷的影响较小;空间上,因蓝藻颗粒物带来的氮、磷浓度随离湖距离增加而下降,水体叶绿素浓度也迅速下降,汇入7 km之后的运河后,蓝藻颗粒物基本分解,水体颗粒态藻体叶绿素a含量由刚入河的152.93 μg·L⁻¹下降到1.99 μg·L⁻¹. 结果表明,受蓝藻水华问题困扰的湖泊对周边河道水质影响也很大,河湖连通过程尽管能有效缓解湖泊的湖泛灾害,解决城市河道黑臭的问题,但是对河道的营养盐等指标会产生较大影响;管理上应因河道和湖泊不同的保护目标,充分考虑湖泊水华情势及水文气象因素,制定机动灵活的调水方案,优化湖泊及河道的水生态服务功能.

关键词:蓝藻水华; 黑臭河道; 水质; 调水工程; 气象条件

中图分类号: X52 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2019)02-0603-11 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.201804047

Effects of Cyanobacterial Blooms in Eutrophic Lakes on Water Quality of Connected Rivers

YU Mao-lei^{1,2}, HONG Guo-xi³, XU Hai², ZHU Guang-wei^{2,4}, ZHU Meng-yuan², QUAN Qiu-mei^{1*}

(1. College of Environmental Science and Engineering, China West Normal University, Nanchong 637009, China; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Jiangsu Province Wuxi Branch, Wuxi 214124, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The location at which the Liangxi River meets Meiliang Bay of Lake Taihu was selected to explore the influence and controlling factors of algal blooms on the connected rivers. The cyanobacterial particulates and water quality parameters including nitrogen, phosphorus, and dissolved oxygen were monitored daily during the summer bloom season. The spatial variation in water quality parameters along the river were also surveyed, and data from hydrological and meteorological factors such as discharge, temperature, and wind field characteristics over the same period were collected to help investigate the effects of cyanobacterial blooms on the water quality of connected rivers. The results showed that the total fresh biomass of algal blooms entering Liangxi River for three months during the summer cyanobacterial bloom period in Meiliang Bay was 9 733 t, which was similar to the amount harvested from the entire lake throughout the year. The flux of water bloom particles to the river varied widely, ranging from 75-496 t·d⁻¹, with an average of 105 t·d⁻¹. The flux was primarily controlled by hydrological and meteorological conditions. Water volume, temperature, and wind direction were the most important influencing factors. Lake water with a large amount of cyanobacterial particles entering the river can significantly improve the dissolved oxygen, ammonia-nitrogen, and other qualities of the river water in the city. It also significantly increased the concentrations of nutrients such as particulate nitrogen and phosphorus in the river, while it had a relatively weak effect on dissolved nitrogen and phosphorus. Spatially, the chlorophyll a concentration rapidly decreased with increasing distance from the lake, and the concentration of nitrogen and phosphorus exist as particulate cyanobacteria also declined. Upon being discharged into the canal 7 km away, the cyanobacterial particles were largely decomposed, and chlorophyll a content from the phytoplankton collected from the river by a 67 μm net decreased from 152.93 μg·L⁻¹ to 1.99 μg·L⁻¹. The results indicated that lakes plagued with cyanobacterial blooms have a great impact on the water quality of surrounding rivers. Although the connection between rivers and lakes can effectively relieve black spots and solve the black and odorous phenomenon in urban rivers, it had a great impact on nutrients

收稿日期: 2018-04-07; 修订日期: 2018-08-02

基金项目: 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: meimeiq@163.com

concentration in the rivers. Depending on the different protection targets of rivers and lakes, lake water blooms and hydro-meteorological factors should be considered during water transfer management to optimize the water ecological services of lakes and rivers.

Key words: algal bloom; odorous black river; water quality; water diversion project; weather conditions

河湖连通性是一个湖泊自我修复能力及服务周边城市能力的重要表征^[1]。在污染湖泊的水环境治理过程中,调水引流、提升河湖的水力流通性等水循环优化工程是一项常用措施,同时也是治理污染负荷较重、水体自净能力较差的浅水湖泊、在短时间内消除河流黑臭、改善水环境的有效方式之一^[2~7]。调水引流一方面可以从水质相对较好的水源引水,稀释受水水体污染物浓度,使之初步满足生态治理的基本条件^[8,9];另一方面可以提高水系的大气复氧能力,增加水体的溶解氧浓度,加快污染物的降解,达到提升水体自净能力并最终改善水质的目的^[10]。优化水循环的河道治理方法在国际上也有广泛的应用,如德国鲁尔河^[11]、荷兰 Veluvemeer 湖^[12]、美国华盛顿 Moses 湖^[13]、日本中川、俄罗斯莫斯科河等的引水修复工程均取得了不错效果。由于调水工程实施的复杂性及调水、受水水体本身的水质特性,使得引水调水工程在有效改善水质的情况下也具有一定风险性,如防洪风险^[14]、污染物转移及滞留风险^[15]、浮游植物群落及结构变化风险等^[7,16,17]。

然而对于暴发蓝藻水华的湖泊而言,蓝藻水华的滨岸带堆积、腐烂发臭等问题^[18]不可避免地影响河湖连通、交换过程。蓝藻水华大量聚集死亡后与底泥发生化学反应后致使水体黑臭并产生严重异味,是太湖、巢湖、滇池乃至美国伊利湖等大型湖泊面临的水域生态问题^[19~21],在蓝藻水华暴发期间,湖泊岸边带集聚的大量蓝藻水华物质携带大量有机物、营养盐^[22,23],对连通河道水质及生态环境造成较大的风险。在当前我国许多湖泊治理,乃至长江中下游湖泊、湿地生态修复过程中普遍考虑的“再自然化”措施背景下,研究暴发蓝藻水华湖泊对连通河道水质的影响强度、变化因素及可能的应对策略,具有重要的应用价值。

梅梁湾是太湖北部靠近无锡市的湖湾,是太湖蓝藻水华暴发历史最长、堆积最严重的湖湾之一^[24]。特别是夏季蓝藻水华在风场的作用下漂移,使得北部沿岸带、河口区水华堆积严重,甚至诱发湖泛等灾害^[25]。梁溪河是无锡市区沟通梅梁湾的最大河道,西起梅梁湾东北角,东起京杭大运河,全长 7.97 km,通过梁溪河船闸与太湖相通。梁溪河两岸是无锡最早的工业区,污染较重,沿途有 21 条支浜入河,水质黑臭问题严重,这些支浜多为闸

控,常年关闭,河流的自然连通性极差。2007 年以来,为缓解梅梁湾梁溪河口区域蓝藻水华过量堆积及梁溪河的黑臭问题,启动了梅梁湖泵站^[24],以平均 $31 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 的流速从梅梁湾向梁溪河排水。沟通工程大大加强了梁溪河的水体流动性,有效缓解梁溪河水体黑臭问题,取得明显的环境与生态效益。然而,在蓝藻水华暴发期,梅梁湾排水常将大量蓝藻水华颗粒物带入梁溪河,严重影响了梁溪河的景观,降低了梁溪河水利调度的生态环境效益。类似的权衡水系连通和蓝藻水华颗粒物入侵河道的问题,在太湖、巢湖等蓝藻水华严重湖区十分普遍,亟待开展专项调查研究以探索解决途径。

本文以梅梁湾连通河道梁溪河为研究对象,通过夏季蓝藻水华暴发期间梁溪河水水质断面蓝藻水华颗粒物及相关水质指标的逐日监测,结合梁溪河水水质和藻类颗粒物的空间分布调查及同期水文气象资料的分析,研究河湖水文交换过程中蓝藻水华进入河流藻颗粒物通量的变化规律及其驱动因素,探索河湖良性互动的水利调控方案,以为富营养化湖泊流域一体化水环境综合管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 监测方案

调查点位布置如图 1。其中,梁溪河景宜桥为逐日蓝藻颗粒通量及水质监测断面,于 2017 年 6 月 7 日至 9 月 7 日实施逐日连续监测。现场利用 YSI 6600 V2(美国 Yellow Stone 公司)多参数水质分析仪对每个采样点测定表层 50 cm 水温(WT)、电导率(EC)、溶解氧(DO)、浊度(Turb)、酸碱度(pH)等指标。由于蓝藻具有漂浮能力,容易聚集在水表产生分层现象,且在水表面也因水流而左右分布不均。因此,为了使采样具有代表性,在该断面河中心及两侧靠岸各设置一个采样点,将自行设计的长度 1 m、直径 20 cm 有机玻璃柱状采水器,自表面放下,采集 1 m 深的柱状水样,将河道左、中、右这 3 个断面的样品混合于采样桶中,混匀,分装冷藏,用于水华颗粒物分离及测定,以及室内水质指标测定。

为了解梁溪河水质的空间分布,于 2017 年 8 月 1 日分别在梁溪河上的大渲桥、景宜桥、鸿桥、隐秀桥、蠡溪桥、青祁桥、蠡桥,以及梁溪河与京杭运河交汇处的梁韵大桥、运河上的梁溪大桥和盛

兴大桥等 10 个断面采集河道水下 0.5 m 的水样(图 1), 测定总氮(TN)、溶解态总氮(DTN)、颗粒态氮(PN)、总磷(TP)、溶解态(DTP)、颗粒态磷(PP)、氨氮(NH_4^+-N)、磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$)、叶绿素 a(Chl-a)。

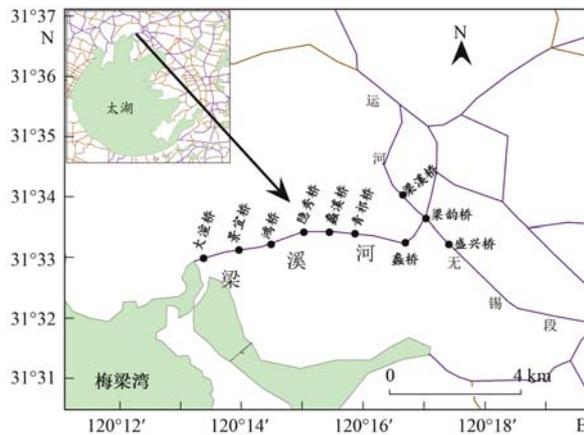


图 1 梁溪河监测点位示意

Fig. 1 Monitoring sites along the Liangxi River

1.2 水质测定方法

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); 氨氮(NH_4^+-N)、磷酸根离子($\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$)测定采用 Skalar 流动注射光度法(荷兰 Skalar 公司, SAN⁺⁺型)^[26]. 颗粒态氮(PN)为 TN 与 DTN 的差值, 颗粒态磷(PP)为 TP 与 DTP 的差值. 浮游植物叶绿素 a 含量(Chl-a)采用热乙醇提取-分光光度法测定^[27].

1.3 河道水华藻颗粒物通量测定与估算

将采集的原水量取 500 mL, 用 25 目浮游生物网快速过滤, 并将留在滤网上的颗粒物定义为颗粒态藻量, 而原水所含的所有藻生物量定义为总藻量. 留在滤网上颗粒藻用纯水冲洗转移至滤器后, 用 GF/F 玻璃纤维滤膜(英国 Whatman 公司, 孔径约 0.7 μm)过滤, 并提取滤膜上的叶绿素, 测定叶绿素 a, 定义为颗粒藻叶绿素 a[Chl-a(P)], 原水测定的叶绿素 a 则定义为水体总叶绿素 a[Chl-a(T)]. 将过滤颗粒叶绿素 a 的滤膜进行烘干、称重, 获得的干物质为藻颗粒干重, 根据取样体积可以估算出采样时水体水华物质藻颗粒的含量(W_{pa}). 根据当日梅梁湖泵站水量, 估算出当日梅梁湖经由梁溪河进入无锡内河系统的总颗粒态藻物质的干重通量. 由于叶绿素 a 在很大程度上能够反映浮游植物的现存量、表征藻的生物量及密度^[28,29], 而根据 W_{pa} 与 Chl-a(P) 的关系, 通过 Chl-a

(T), 推测出河道总藻生物量 W_{ta} , 进而也可以根据梅梁湖泵站水量获得当日总藻生物量的通量。

1.4 水文气象数据来源及处理

样品采集期间的气温、风向、风速等气象数据来自于中国科学院太湖湖泊生态系统研究站. 由于梁溪河口处于梅梁湾东北角, 因此将所有风向条件下的风速, 折算成东北方向上的风速矢量值, 定义为水华堆积有效风速. 也即将 NNW、N、NNE、ENE、E、ESE 等风向作为不利于藻堆积在梁溪河口的风向, 转化为其余弦值作为有效 NE 方向, 命为负值; 将 WNW、W、WSW、SSW、S、SSE 作为有利于藻在河口堆积的风, 同样按余弦转化为有效的 SW 方向, 命为正值. NW、SE 方向的风垂直于 NE、SW 的方向, 因此其余弦值为 0.

监测期间的逐日梅梁湖泵站调水量数据来自江苏省水文水资源勘测局无锡分局.

所有数据的相关关系统计分析、处理及制图等采用 Excel 2010、SPSS 23.0、Origin 8 等软件进行.

2 结果与分析

2.1 梁溪河水质的逐日变化

采样期间梁溪河景宜桥监测断面理化指标情况如表 1, 主要水质指标逐日变化如图 2. 采样期间水温在 23.12 ~ 35.66 $^{\circ}\text{C}$ 之间, 7、8 月水温高于 6 月; 水体电导率变幅较大, 介于 189.58 ~ 594.00 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 之间; pH 平均 8.3; PN、PP、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 平均浓度分别为 2.71、0.27、0.06 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 需要说明的是, 本调查中的水样前处理方法未采用水质调查规范中取样前静置 30 min 的操作, 为的是更好地获得藻类水华颗粒物的营养盐输入状况, 因此, 本测定中的 TP 含有漂浮颗粒藻中的磷, 与环境监测部门所监测的 TP 有所不同.

整体上, 河道水体 TN、TP 的日变化幅度很大, 且二者变化趋势类似. TN、TP 均在 6 月中旬、7 月初至 7 月中旬出现较高值; 其中 TN 在 1.81 ~ 14.63 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围波动, 平均浓度 3.92 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TP 在 0.15 ~ 1.07 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内波动, 平均浓度 0.35 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

监测期间景宜桥断面 DTN、DTP 的均值分别为 1.21 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0.08 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其均值及变幅均远远小于 TN、TP, 特别是峰值明显小于 TN、TP. 监测期间 NH_4^+-N 浓度也有较大的起伏变化, 出现连续几日 NH_4^+-N 浓度急剧上升又急剧下降. 2017 年 7 月 1 日出现 NH_4^+-N 浓度最高值(1.96 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、2017 年 8 月 19 日出现最低值(0.13 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 平均浓度为 0.72 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 可能是梁溪河连通支浜的不定期排

入所致. 监测期间 DO 也具有较大变化幅度, 特别是 6 月期间变幅较大. 其中, DO 在 6 月 17 日达到最高值 $11.43 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 6 月 30 日及 7 月 1 日出现最

低值 $1.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值 $5.70 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 6 月 30 日至 7 月中旬的高温高藻量期间, 梁溪河水体溶解氧持续较低.

表 1 采样期间梁溪河景宜桥断面水质情况¹⁾

Table 1 Water quality of the Jingyi Bridge during the sampling period

因子 ¹⁾	Max	Min	AVR	GB 3838-2002	
				Ⅲ类标准	V类标准
T/C	35.66	23.12	29.69 ± 3.41	—	—
$\text{EC}/\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	594.00	189.58	509.32 ± 94.24	—	—
$\text{DO}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	11.43	1.02	5.70 ± 2.37	5.00	2.00
pH	9.34	7.23	8.30 ± 0.48	—	—
$\text{TN}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	14.63	1.81	3.92 ± 2.66	1.00	2.00
$\text{DTN}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2.45	0.61	1.21 ± 0.45	—	—
$\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1.96	0.13	0.72 ± 0.39	1.00	2.00
$\text{PN}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	13.14	0.61	2.71 ± 2.61	—	—
$\text{TP}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1.07	0.15	0.35 ± 0.20	0.20	0.40
$\text{DTP}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.15	0.03	0.08 ± 0.03	—	—
$\text{PP}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1.03	0.08	0.27 ± 0.21	—	—
$\text{PO}_4^{3-}-\text{P}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.12	0.01	0.06 ± 0.02	—	—

1) TN 参考湖库标准; TP 包括了颗粒藻中的磷

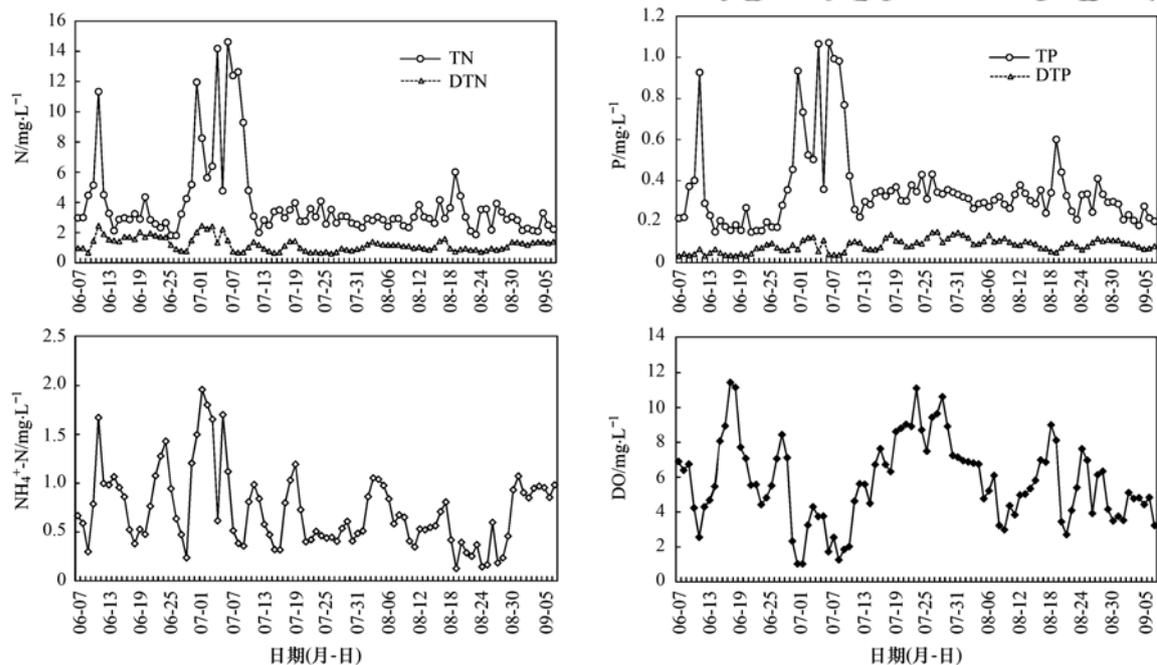


图 2 2017 年梁溪河水水质逐日变化

Fig. 2 Daily changes in the water quality of the Liangxi River in 2017

根据《国家地表水环境质量评价标准(GB 3838-2002)》中Ⅲ类、V类水标准, 采样期间 TP 均值达到 V 类水质标准, TN 均值高于 V 类水质标准, DO 平均值基本达到Ⅲ类水质, NH_4^+-N 均值达到Ⅲ类水质标准. 在黑臭水体评价中, 作为国内界定水体是否黑臭的单一化学指标, DO 在水体中的浓度小于 $2.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时表示出现黑臭^[30], 综合指标评价中, $\text{DO} \leq 2.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{NH}_4^+-\text{N} \geq 8.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{TP} \geq 0.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 是适合评价中小河道水体黑臭的关键指标^[31]. 根据单一化学评价指标和综合评价指标, 监测期间梁溪

河无“黑臭”情况发生, 相关表征指标均优于黑臭水体判断标准. 以上结果表明梅梁湾湖水外排入梁溪河后, 除 TN 外, 河道水体 DO、 NH_4^+-N 、TP 等水质指标均达到 V 类水标准, 部分指标还达到Ⅲ类及以上, 基本解决河道黑臭问题.

2.2 梁溪河水体藻颗粒及水质的空间变化

为了解从梅梁湾进入梁溪河的蓝藻水华颗粒物在梁溪河的沿途分布及其水质效应, 本研究对 8 月 1 日的梁溪河 10 个监测断面的藻类生物量状况(以叶绿素 a 参数表征)及水质进行了比较. 其叶绿素 a

及关键水质指标 TN、DTN、TP、DTP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的空间变化如图 3。结果表明, TN 在梁溪桥(运河)最高 ($3.80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 在大渲桥(梅梁湾梁溪河口)浓度次之($3.75 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 空间上从梅梁湾梁溪河口至运河交界处呈先降低后逐渐升高的趋势。这说明京杭大运河的 TN 污染程度高于梁溪河, 甚至高于藻颗粒含量较高的梅梁湾。DTN 浓度从大渲桥至梁溪桥逐渐上升, 在大渲桥断面浓度最低 ($0.53 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 梁溪桥断面浓度最高($2.73 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 说明京杭大运河中的溶解性氮含量比梁溪河高出更多。TP 浓度梁溪桥断面最高($0.46 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 在大渲桥断面次之($0.31 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 景宜桥至盛兴桥 TP 浓度出现小幅度波动; DTP 从河口至运河整体上浓度逐渐上升, 在蠡溪桥断面浓度最高 ($1.72 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 这也表明京杭大运河的磷污染程度高于含有大量藻颗粒的梁溪河。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、DO 是表征河道水体污染状况及自净能力的主要指标^[32], DO 从大渲桥断面至景宜桥断面迅速降低, 而后至梁溪桥断面总体保持在 $6.50 \sim 7.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 期间略有波动; 从大渲桥至盛兴桥断面, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度整体呈上升趋势, 梁溪桥断面 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度最低 (0.08

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。水体叶绿素浓度从梁溪河至运河迅速下降, 其中 Chl-a(P) 从梁溪河接近梅梁湾的 $152.93 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 迅速下降到京杭大运河的 $1.99 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 从梅梁湾进入梁溪河的藻颗粒物, 在进入京杭大运河之后分解迅速, 没有在运河中大量堆积。大渲桥作为梁溪河受水的第一站与景宜桥至梁韵桥断面水质相比, 大渲桥断面 TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、Chl-a(T)、Chl-a(P) 指标浓度高于河道, DTN、DTP、DO 浓度低于河道; 对比运河受水断面(盛兴桥)及背景断面(梁溪桥)水质, TN、DTN、TP、DTP、DO 指标的浓度高于盛兴桥断面, 而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、Chl-a(T)、Chl-a(P) 远低于盛兴桥断面。

梁溪河水质的空间变化说明湖水外排对梁溪河及运河水质均有一定改善效果, 蓝藻水华颗粒物在梁溪河至运河沿程逐渐降低, 调水对河道水质改善作用在靠近梅梁湾处效果最佳, 同时水质较差的运河对梁溪河水水质有一定冲击, 表现为靠近运河处受到冲击越大, 从而让调水改善水质效果有一定影响。运河来往船只螺旋桨的曝气作用有助于增加水体溶解氧、促进硝化作用, 从而使梁溪桥 DO 指标高于盛兴桥而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 远低于盛兴桥。

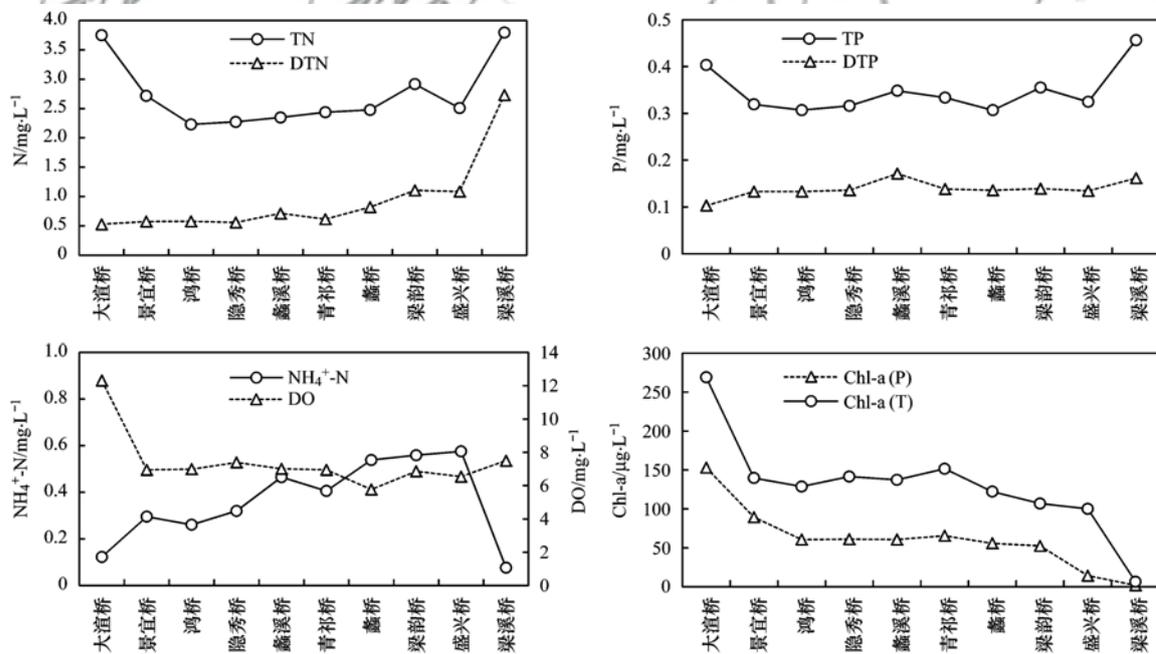


图3 梁溪河水水质空间变化

Fig. 3 Spatial changes in the water quality of the Liangxi River

2.3 梁溪河交换藻通量的估算

梅梁湾泵站每日泵水量 ($V_w, \text{t}\cdot\text{d}^{-1}$) 及河道总藻生物量 (W_{ta}, t) 的逐日变化如图 4, 除 2017 年 6 月 11 日未进行泵水以外, 监测期间泵水量在 6 月底到 7 月中下旬期间较多, 7 月底至 9 月初每日泵水量较为稳定, W_{ta} 随泵水量的变化而变化, 同样在 6 月底至 7 月中旬达到河道总藻生物量的峰值。

将监测期间前 7 日的 Chl-a(P) 值与 W_{pa} 实测值进行线性回归分析(图 5), 结果显示 W_{pa} 与 Chl-a(P) 呈高度线性正相关 ($P < 0.001$), 得到回归公式: $W_{\text{pa}} = 0.0003 \times \text{Chl-a(P)} + 0.02$ ($R^2 = 0.96$). 则当日梅梁湾经由梁溪河进入无锡内河系统的总颗粒态藻物质干重通量可通过每日 Chl-a(P) 值直接计算:

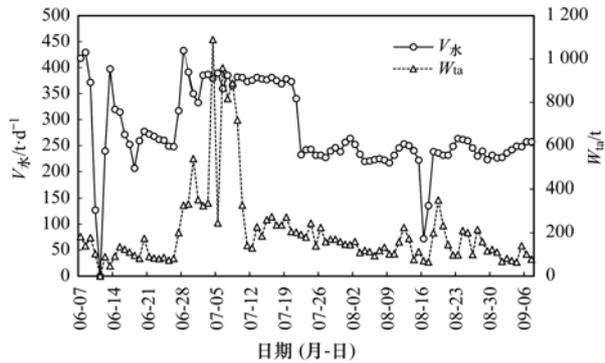


图4 泵水量与河道总藻生物量日变化

Fig. 4 Daily changes in pumping volume and total algae biomass channels

干重通量 (t) = $W_{pa} (g \cdot L^{-1}) \times \text{泵水量} (m^3 \cdot s^{-1}) \times 24 \times 60 \times 60 \times 10^{-3}$

监测期间, 梅梁湾泵站平均流量 $31 m^3 \cdot s^{-1}$, 2017年6月7日~2017年9月7日共计调水2.6亿 m^3 , 占2017年总调水量的26%。由湖泊进入连通通道的水华颗粒物通量日变化很大, 夏季调查期间进入梁溪河的藻颗粒通量介于 $75 \sim 496 t \cdot d^{-1}$, 平均值为 $105 t \cdot d^{-1}$ 。采样期间排入无锡市内河系统的总颗粒态藻物质干重通量约9733 t, 按照85%含水率的处置藻泥计算, 相当于排入64889 t藻泥。根据相关部门统计资料, 无锡市近年来蓝藻打捞量约为平均每年60000 t藻泥, 则2017年6月7日~2017年9月7日排入梁溪河及其连通通道的藻通量比无锡市全年的蓝藻打捞量还多。

3 讨论

3.1 高藻湖水入河对河道溶解氧的影响

监测结果表明太湖梅梁湾调水增加了河道DO浓度, 有助于提高梁溪河的自净能力, 对改善和恢复梁溪河的生态系统、改善及治理黑臭问题具有积

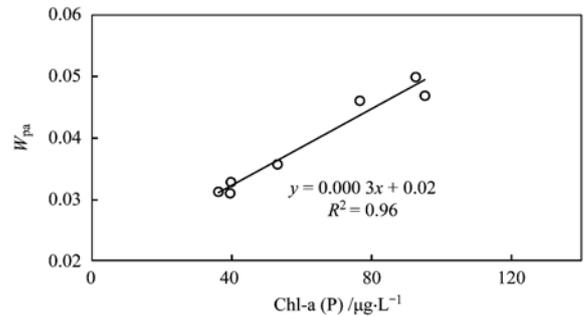
图5 Chl-a(P) 与 W_{pa} 实测值的线性回归

Fig. 5 Linear regression of Chl-a(P) and W_{pa} measured values

极作用。相关调水工程研究结果表明^[7, 33], 通过泵水的水力作用会增加水体的流动性进而提高复氧能力。梁溪河水体溶解氧持续较低情况出现在6月30日至7月中旬, 是太湖梅梁湾水华频繁暴发的时期^[34], 逐日监测结果也显示该时间段是达到河道总藻生物量的峰值。

监测表明, 不同藻颗粒含量的湖水对水体溶解氧的影响是不同的。河道 $Chl-a(T) \leq 200 \mu g \cdot L^{-1}$ 及 $> 200 mg \cdot L^{-1}$ 的情况下分别拟合与DO的关系发现, 当 $Chl-a(T) \leq 200 \mu g \cdot L^{-1}$ 时, 叶绿素浓度与DO含量显著正相关 ($P = 0.001$), 见图6(a)。说明此时藻体的光合作用大于藻体有机物排入引发的细菌分解呼吸作用, 藻类含量适当增高, 有助于水体DO改善; 而当 $Chl-a(T) > 200 \mu g \cdot L^{-1}$ 时, 叶绿素浓度与DO含量显著负相关 ($P = 0.04$), 见图6(b)。这种情况下, 由于藻颗粒的大量堆积, 其腐烂耗氧的作用强于表层藻类光合作用, 导致溶解氧总体下降。根据线性负相关拟合公式预测, $Chl-a(T)$ 浓度分别为800、900、1000 $\mu g \cdot L^{-1}$ 时, DO分别为1.9、1.3、0.7 $mg \cdot L^{-1}$ 。这与周莹^[35]研究不同藻密度、温度等因素下水体DO日变化规律, 发现生物量达到一定丰度后与DO呈显著负相关且DO

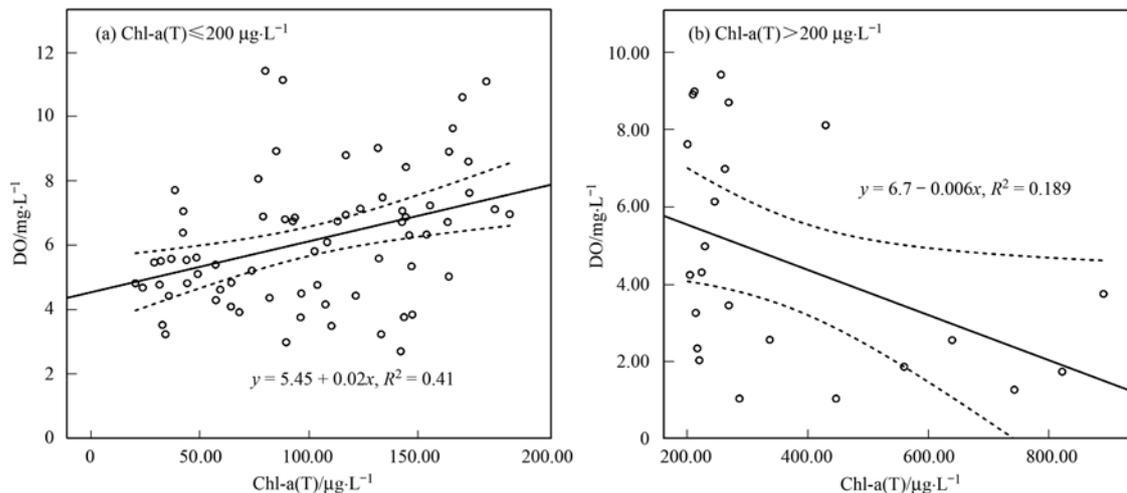


图6 不同浓度 Chl-a(T) 与 DO 的线性回归

Fig. 6 Linear regression of different Chl-a(T) with DO

会随着生物量增加而降低的结论基本一致。虽然蓝藻通过光合作用好氧呼吸会增加表层水体溶解氧^[36], 但过多蓝藻水华颗粒漂浮在河道表面, 不仅对景观方面产生的影响, 其次还会降低透光度从而影响浮游植物进行光合作用生成氧气的水体深度^[37], 同时高密度的藻堆积在一起如果发生腐烂分解也会造成水体溶解氧急剧下降^[38, 39]。因此通过调水、泵水将梅梁湾水调入梁溪河的水力作用能有效解决河道水体黑臭问题, 但蓝藻水华程度严重时排水, 会造成河道溶解氧降低, 影响调水治理河道水质的效果。

3.2 高藻湖水入河对河道营养盐的影响

有研究表明, 蓝藻水华期间, 水体颗粒态氮含量与颗粒态磷含量受水华的影响极大, 甚至是水体

氮、磷的主要存在形式^[40]。因此, 携带大量蓝藻水华颗粒物的湖水进入河道后, 必将显著增加河道颗粒态氮、磷等营养盐含量。从回归分析(图7)可以看出, 河道 Chl-a(P) 含量与 PN、PP 含量显著正相关($P < 0.001$), 相关系数分别为 0.91 和 0.89; Chl-a(T) 与 TN、TP 也呈高度线性正相关, 相关系数分别为 0.85 和 0.87。蓝藻生长会储存大量营养物质^[25], 如太湖优势种微囊藻类干物质含 N 量就比较高^[41]。调水带入大量颗粒藻给河道营养盐带来冲击。根据太湖蓝藻(干物质)含 N、P 率分别为 6.7%、0.68%^[42]计算, 监测期间总颗粒态藻物质干重通量约 9 733 t, 折合成 N、P 约为 652 t、66 t。如果不对梅梁湾泵站进行合理避藻泵水, 势必会对梁溪河产生高负荷营养盐冲击。

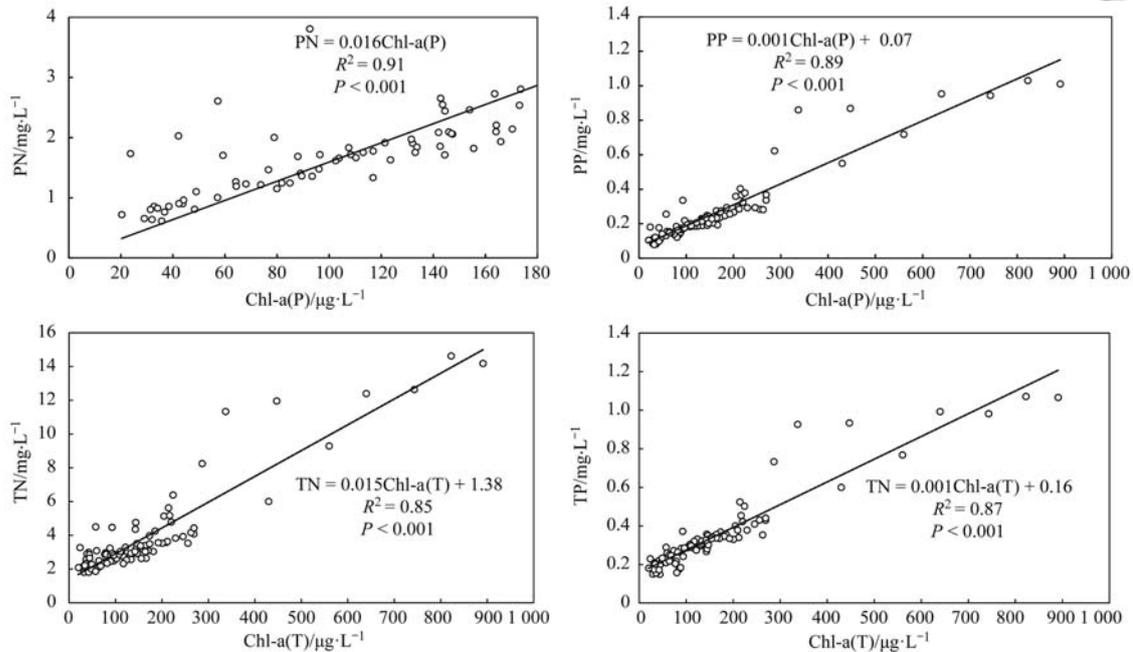


图7 叶绿素与营养盐拟合曲线

Fig. 7 Fitting curves of chlorophyll and nutrients

3.3 由湖入河的藻颗粒通量的影响因素

水体蓝藻产生、暴发、堆积取决于温度、风速风向、降雨等水文气象等因素的综合作用^[25]。据此, 对 Chl-a(T)、Chl-a(P) 与风速、温度、降雨等气象因子做皮尔逊相关性分析, 结果如表 2。其中 Chl-a(P)、Chl-a(T) 均与有效风速呈显著正相关($P < 0.05$), 与降雨均无显著相关性; Chl-a(P) 与温度呈显著正相关($P < 0.05$)。

温度是影响蓝藻生长、分布、水华暴发、衰亡关键环境因子之一^[43], 陈宇炜等^[44]对梅梁湾藻类与相关因子的逐步回归分析表明温度与梅梁湾藻类总生物量显著相关, 说明温度对梅梁湾藻类的生长有直接的影响。采样期间温度在 23 ~ 36℃ 范围内变化, 基本处于水体富营养化条件下蓝藻水华暴发的

温度范围^[45] (24 ~ 30℃)。

表 2 叶绿素与水文气象的相关性¹⁾

Table 2 Correlation between water quality indicators and hydro-meteorology

因子	Chl-a(P)	Chl-a(T)
有效风速	0.588 **	0.231 *
温度	0.524 **	0.167
降雨	0.114	0.020

1) ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

采样期间有效的 SW 方向风共有 54 d, 从颗粒藻叶绿素 a 变化与有效风向变化来看(图 8), 颗粒叶绿素值较高当日及前几日风向都为西南风, 颗粒叶绿素值较低期间风向则是东北风。并

且颗粒叶绿素高值当日风向为西南风而风速均小于 $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 表明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, 与朱永春等^[46]研究发现小于临界风速 ($2 \sim 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 下, 有利于藻颗粒顺着盛行风向

岸边漂移的结果一致. 大量研究也表明^[47,48], 微风、少降水有利于某一特定区域内的蓝藻上浮堆积、暴发. 因此梅梁湾进入梁溪河通量大小主要受水文气象条件控制, 水量、温度、风向是最主要的影响因素.

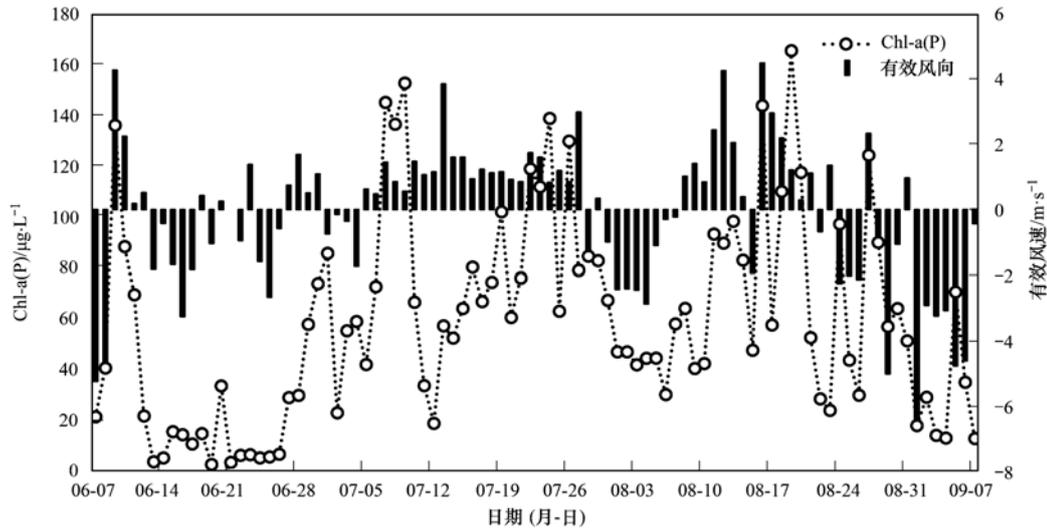


图 8 采样期间颗粒叶绿素与有效风速的变化

Fig. 8 Changes in chlorophyll and effective wind speed

3.4 基于藻情考虑的调水方案优化分析

我国太湖、巢湖、滇池等大型湖泊与流域河道的沟通十分密切. 以太湖为例, 连通太湖的河道超过 200 条, 其中相关部门重点监控的河道有 23 条, 因此, 湖泊与连通河道的水系连通管理是湖泊管理中的一项基本任务. 近年来, 随着湖泊生态环境治理的推进, 恢复河湖连通, 增加湖泊及其连通河道, 乃至整个流域水系的污染物自净能力, 提升湖泊及其流域的生态健康程度, 成为许多湖泊水环境、水生态综合治理中重要的技术途径.

对于蓝藻水华暴发严重的湖泊而言, 河湖的水力交换具有两方面的目的: ①加快湖泊滨岸带蓝藻水华易堆积区域的水力交换, 避免蓝藻水华长期大量堆积而诱发湖泛; 据 Zhang 等^[49]对太湖湖泛形成的气象条件调查发现, 持续 5 d 以上的蓝藻水华堆积, 湖泛的发生概率大增; ②加快河道的水体流动性, 提升水体溶解氧, 改善河道水质. 在蓝藻水华大量存在的情况下, 这两个目的可能是矛盾的. 此时根据湖泊和河道的相对重要性, 可以选择尽量提高通过河道排出滨岸带的蓝藻颗粒物, 或者尽量降低由湖入河携带藻颗粒量等不同的调控需求.

根据本研究揭示的蓝藻水华物质入河通量影响因素及其水质效应, 可以根据不同的目的对梅梁湖泵站调水方案进行优化: 当梅梁湾梁溪河口有湖泛发生风险时, 应当加大西南风向期间的调水力度, 加快岸边带堆积蓝藻水华颗粒物在湖边的堆积, 同

时, 应当加大梁溪河沿河水体曝气系统的运行, 避免诱发河道缺氧; 当梅梁湾梁溪河口没有湖泛风险时, 应当以提高梁溪河的水质改善效果为主要目的, 提高西北风向期间的调水力度. 当然, 考虑到相关水质的影响因素, 还可以因水质、景观等需求, 设置不同的调水方案. 以提升泵水给梁溪河带来改善水质的效果. 另外, 在太湖的其他连通河道管理中, 如“引江济太”工程, 也可以结合蓝藻水华期间的河道水质效应, 优化调水方案, 改善太湖水质、增加湖体环境容量.

4 结论

(1) 蓝藻水华期间, 河湖水力交换过程中, 湖泊蓝藻水华物质能大量进入连通河道, 总量可观. 夏季 3 个月梅梁湾排入梁溪河的颗粒态藻物质通量可达 9 733 t, 与无锡市全年打捞藻泥量相当.

(2) 蓝藻水华暴发期间, 河湖水力交换的环境效应因藻情不同而异. 中等水华强度下梅梁湾调水对连通河道黑臭改善明显, 但对河道氮、磷含量等水质指标产生较大影响; 过高藻颗粒物入河导致水体溶解氧下降, 颗粒态氮、磷含量剧增.

(3) 气象条件是梅梁湾进入梁溪河的漂浮颗粒藻通量的关键影响因素. 低风速、有利于河口水华聚集的西南风向、以及适合蓝藻生长的气温等气象条件显著加大了藻颗粒入河的通量. 管理上, 应因湖泊、河道不同的水质和景观管理目标而实施更加

机灵活的调水方案, 以提升河湖连通的生态环境效益。

致谢: 感谢无锡市太湖蓝藻打捞工作协调领导小组办公室陈旭清主任在基础数据支撑方面的帮助, 感谢太湖湖泊生态系统研究站提供气象数据, 感谢薛静琛、钱树荣、夏丽萍实验员、田伟、李进京、刘志迎同学在样品采集与分析中的帮助。

参考文献:

- [1] 刘海滢. 河湖水系连通及生态健康评估指标体系研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2015.
Liu H Y. Study on interconnected river system network and ecosystem health assessment index system [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2015.
- [2] 徐祖信. 河流污染治理技术与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. 498-545.
Xu Z X. Technology and practice of river pollution rehabilitation [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2003. 498-545.
- [3] 部会彩, 李义天, 何用, 等. 改善汉阳湖群水环境的调水方案研究[J]. 水资源保护, 2006, 22(5): 41-44.
Gao H C, Li Y T, He Y, *et al.* Research on water diversion project to improve water environment of Hanyang lakes [J]. Water Resources Protection, 2006, 22(5): 41-44.
- [4] 张利民, 夏明芳, 王春, 等. 江苏省12大湖泊水环境现状与污染控制建议[J]. 环境监测管理与技术, 2008, 20(2): 46-50.
Zhang L M, Xia M F, Wang C, *et al.* Water environment status of the 12 largest lakes of Jiangsu province and corresponding suggestions on the pollution control measures [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2008, 20(2): 46-50.
- [5] 姚凌伟, 逢勇. 秦淮新河引水量对断面水质达标影响的研究[J]. 四川环境, 2017, 36(4): 118-122.
Yao L W, Pang Y. Study on the impact of new Qinhuai River water diversion on the cross sections water quality [J]. Sichuan Environment, 2017, 36(4): 118-122.
- [6] 华祖林, 顾莉, 刘晓东. 调水对改善浅水型湖泊水体的置换率研究[J]. 水资源保护, 2009, 25(1): 9-13, 17.
Hua Z L, Gu L, Liu X D. Improving water exchange rate of shallow lakes through water diversion works [J]. Water Resources Protection, 2009, 25(1): 9-13, 17.
- [7] 杨倩倩, 吴时强, 戴江玉, 等. 夏季短期调水对太湖贡湖湾湖区水质及藻类的影响[J]. 湖泊科学, 2018, 30(1): 34-43.
Yang Q Q, Wu S Q, Dai Y J, *et al.* Effects of short-term water diversion in summer on water quality and algae in Gonghu Bay, Lake Taihu [J]. Journal of Lake Science, 2018, 30(1): 34-43.
- [8] 徐贵泉, 褚君达. 上海市引清调水改善水环境探讨[J]. 水资源保护, 2001, (3): 26-30.
Xu G Q, Chu J D. Water environment improvement by clean water diversion in Shanghai city [J]. Water Resources Protection, 2001, (3): 26-30.
- [9] 李发荣, 陈云进, 李晓铭, 等. 牛栏江调水对滇池湖泊水质影响的分析研究[A]. 见: 2014 中国环境科学学会学术年会论文集[C]. 成都: 中国环境科学学会, 2014.
- [10] 徐祖信, 卢士强, 刘立坤. 综合调水对苏州河 DO 影响作用的数值分析[J]. 上海环境科学, 2003, 22(S1): 39-42.
Xu Z X, Lu S Q, Liu L K. Numerical analysis on the effluent of flow augmentation on dissolved oxygen in Suzhou creek [J]. Shanghai Environmental Sciences, 2003, 22(S1): 39-42.
- [11] Bode H, Evers P, Albrecht D R. Integrated water resources management in the Ruhr River basin, Germany [J]. Water Science and Technology, 2003, 47(7-8): 81-86.
- [12] Hoesper H, Meyer M L. Control of phosphorus loading and flushing as restoration methods for Lake Veluwe, The Netherlands [J]. Hydrobiological Bulletin, 1986, 20(1-2): 183-194.
- [13] Welch E B, Barbiero R P, Bouchard D, *et al.* Lake trophic state change and constant algal composition following dilution and diversion [J]. Ecological Engineering, 1992, 1(3): 173-197.
- [14] 王水, 胡开明, 周家艳. 望虞河引清调水改善太湖水环境定量分析[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(7): 993-998.
Wang S, Hu K M, Zhou J Y. Quantitative analysis on water environment improvement by clean water diversion from Wangyu River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(7): 993-998.
- [15] 吴时强, 范子武, 周杰, 等. 引江济太措施对太湖西北部湖区污水滞留和转移风险评估[J]. 水利水运工程学报, 2009, (2): 1-8.
Wu S Q, Fan Z W, Zhou J, *et al.* Simulation of sewage detention and transfer owing to water diversion measures and its risk analysis [J]. Hydro-Science and Engineering, 2009, (2): 1-8.
- [16] 杨倩倩, 吴时强, 吴修锋, 等. 引水对梅梁湾水质及浮游藻类影响的模拟研究[J]. 水生态学杂志, 2015, 36(4): 42-49.
Yang Q Q, Wu S Q, Wu X F, *et al.* Effects of simulated water diversion on water quality and phytoplankton community in Meiliang Bay [J]. Journal of Hydroecology, 2015, 36(4): 42-49.
- [17] 秦伯强, 杨桂军, 马健荣, 等. 太湖蓝藻水华“暴发”的动态特征及其机制[J]. 科学通报, 2016, 61(7): 759-770.
Qin B Q, Yang G J, Ma J R, *et al.* Dynamics of variability and mechanism of harmful cyanobacteria bloom in Lake Taihu, China [J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(7): 759-770.
- [18] 李柯. 蓝藻分解所释放营养盐在沉水植被区的归趋[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.
Li K. The fate of nutrients released during the decomposing of cyanobacterial detritus in submerged macrophytes zones [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011.
- [19] 王成林, 张咏, 张宁红, 等. 太湖藻源性“湖泛”形成机制的气象因素分析[J]. 环境科学, 2011, 32(2): 401-408.
Wang C L, Zhang Y, Zhang N H, *et al.* Analysis of meteorological factors of forming feculent and anaerobic water aggregation induced by algal bloom in Taihu Lake [J]. Environmental Science, 2011, 32(2): 401-408.
- [20] Michalak A M, Anderson E J, Beletsky D, *et al.* Record-setting algal bloom in Lake Erie caused by agricultural and meteorological trends consistent with expected future conditions [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(16): 6448-6452.
- [21] 汪明, 武晓飞, 李大鹏, 等. 太湖梅梁湾不同形态磷周年变化规律及藻类响应研究[J]. 环境科学, 2015, 36(1): 80-86.
Wang M, Wu X F, Li D P, *et al.* Annual variation of different phosphorus forms and response of algae growth in Meiliang Bay of Taihu Lake [J]. Environmental Science, 2015, 36(1): 80-86.
- [22] 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.
- [23] 陈丙法. 湖岸带蓝藻聚积污染物特性变化及控制研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2015.
- Chen B F. Research on characteristic variations and the controll of contaminants from accumulative blue-green algae in lakeshore [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2015.
- [24] 吕振霖. 太湖水环境综合治理的实践与思考[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, **40**(2): 123-128.
- Lv Z L. Practice and thoughts on comprehensive treatment of water pollution in Taihu Lake[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2012, **40**(2): 123-128.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 杜胜蓝, 黄岁樑, 臧常娟, 等. 浮游植物现存量表征指标间相关性研究 I: 叶绿素 a 与生物量[J]. *水资源与水工程学报*, 2011, **22**(1): 40-44.
- Du S L, Huang S L, Zang C J, *et al.* Correlation research between the indicators of phytoplankton standing stock I: chlorophyll a and biomass [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2011, **22**(1): 40-44.
- [29] 杜胜蓝, 黄岁樑, 臧常娟, 等. 浮游植物现存量表征指标间相关性研究 II: 叶绿素 a 与藻密度[J]. *水资源与水工程学报*, 2011, **22**(2): 44-49.
- Du S L, Huang S L, Zang C J, *et al.* Correlation research between the indicators of phytoplankton standing stock II: chlorophyll a and algal density [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2011, **22**(2): 44-49.
- [30] 王旭, 王永刚, 孙长虹, 等. 城市黑臭水体形成机理与评价方法研究进展[J]. *应用生态学报*, 2016, **27**(4): 1331-1340.
- Wang X, Wang Y G, Sun C H, *et al.* Formation mechanism and assessment method for urban black and odorous water body: a review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(4): 1331-1340.
- [31] 程江, 吴阿娜, 车越, 等. 平原河网地区水体黑臭预测评价关键指标研究[J]. *中国给水排水*, 2006, **22**(9): 18-22.
- Cheng J, Wu E N, Che Y, *et al.* Study on key indicators for judging black and odorous water in area of plain river system [J]. *China Water & Wastewater*, 2006, **22**(9): 18-22.
- [32] 刘浏, 王其珍, 王旭东. 南京明御河综合整治工程对黑臭水质指标的影响[J]. *低碳世界*, 2017, (3): 20-21.
- [33] 许益新, 王文才, 曾伟峰, 等. 调水引流改善平原河网水环境质量模拟[J]. *水资源保护*, 2018, **34**(1): 70-75.
- Xu Y X, Wang W C, Zeng W F, *et al.* Simulation on improvement of water environment in plain river network by water diversion [J]. *Water Resources Protection*, 2018, **34**(1): 70-75.
- [34] 张晓峰, 孔繁翔, 曹焕生, 等. 太湖梅梁湾水华蓝藻复苏过程的研究[J]. *应用生态学报*, 2005, **16**(7): 1346-1350.
- Zhang X F, Kong F X, Cao H S, *et al.* Recruitment dynamics of bloom-forming cyanobacteria in Meiliang Bay of Taihu Lake [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, **16**(7): 1346-1350.
- [35] 周莹. 水生生物对水体溶解氧日变化规律影响[D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2016.
- [36] 李扬扬. 蓝藻暴发对湖泊生态系统中内源营养盐的影响[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- Li Y Y. Effect of algal bloom on endogenous nutrient of lake ecosystem [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2017.
- [37] 潘腾飞, 齐树亭, 武洪庆, 等. 影响池塘养殖水体溶解氧的主要因素分析[J]. *安徽农业科学*, 2010, **38**(17): 9155-9157.
- Pan T F, Qi S T, Wu H Q, *et al.* Analysis of main factor which influenced dissolved oxygen of aquicultural pond water [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, **38**(17): 9155-9157.
- [38] 王亚蕊, 陈向超, 陈丙法, 等. 藻屑堆积对沉积物-水界面污染物的释放效应[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(1): 142-153.
- Wang Y R, Chen X C, Chen B F, *et al.* The release of pollutants in sediment-water interface after algal-debris accumulated in sediments [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(1): 142-153.
- [39] 饶胡敏, 黄旺银. 影响水体中溶解氧含量因素的探讨[J]. *盐科学与化工*, 2017, **46**(3): 40-43.
- Rao H M, Huang W Y. Discussion on influencing factor of content of dissolved oxygen in water [J]. *Journal of Salt Science and Chemical Industry*, 2017, **46**(3): 40-43.
- [40] 朱广伟, 秦伯强, 张运林, 等. 2005-2017 年北部太湖水体叶绿素 a 和营养盐变化及影响因素[J]. *湖泊科学*, 2018, **30**(2): 279-295.
- Zhu G W, Qin B Q, Zhang Y L, *et al.* Variation and driving factors of nutrients and chlorophyll-a concentrations in northern region of Lake Taihu, China, 2005-2017 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(2): 279-295.
- [41] 许玲, 张无敌, 尹芳, 等. 蓝藻综合利用研究现状[J]. *现代农业科技*, 2010, (8): 283-284.
- Xu L, Zhang W D, Ying F, *et al.* Research status on integrated utilization of blue algae [J]. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, 2010, (8): 283-284.
- [42] 王惠, 朱喜. 太湖蓝藻打捞和资源化利用的实践与思考[J]. *江苏水利*, 2009, (7): 35, 37.
- [43] 王得玉, 冯学智, 周立国, 等. 太湖蓝藻爆发与水温的关系的 MODIS 遥感[J]. *湖泊科学*, 2008, **20**(2): 173-178.
- Wang D Y, Feng X Z, Zhou L G, *et al.* Relationship between blue algal bloom and water temperature in Lake Taihu based on MODIS [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, **20**(2): 173-178.
- [44] 陈宇炜, 秦伯强, 高锡云. 太湖梅梁湾藻类及相关环境因子逐步回归统计和蓝藻水华的初步预测[J]. *湖泊科学*, 2001, **13**(1): 63-71.
- Chen Y W, Qin B Q, Gao X Y. Prediction of blue-green algae bloom using stepwise multiple regression between algae & related environmental factors in Meiliang Bay, Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2001, **13**(1): 63-71.
- [45] 王成林. 太湖蓝藻水华及藻源性“湖泛”形成机制的气象因

- 素研究[D]. 南京: 南京大学, 2010.
- Wang C L. Analysis of meteorological factors of the formation mechanism of algae bloom and algae-derived 'Hufan' in Taihu Lake[D]. Nanjing: Nanjing University, 2010.
- [46] 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.
- [47] 钱昊钟. 风场对太湖叶绿素 a 空间分布的影响规律研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- Qian H Z. The influence of wind field to the spatial distribution of chlorophyll-a concentration[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2012.
- [48] 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.
- [49] Zhang Y L, Shi K, Liu J J, *et al.* Meteorological and hydrological conditions driving the formation and disappearance of black blooms, an ecological disaster phenomena of eutrophication and algal blooms[J]. Science of the Total Environment, 2016, 596-570: 1517-1529.

环境科学

CONTENTS

Influence of Mountain Valley Breeze and Sea Land Breeze in Winter on Distribution of Air Pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Qing-chun, LI Ju, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>	(513)
A Method of Aerosol Particle Number Size Distribution Inversed by PM _{2.5} Mass Concentration in PRD	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i>	(525)
Light Absorption and Fluorescence Characteristics of Atmospheric Water-soluble Organic Compounds and Humic-like Substances During the Winter Season in Guangzhou	FAN Xing-jun, YU Xu-fang, CAO Tao, <i>et al.</i>	(532)
Source Apportionment and Health Risk Quantification of Heavy Metals in PM _{2.5} in Yangzhou, China	DONG Shi-hao, XIE Yang, HUANGFU Yan-qi, <i>et al.</i>	(540)
Pollution Characteristics and Source Analysis of <i>n</i> -alkanes and Saccharides in PM _{2.5} During the Winter in Liaocheng City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i>	(548)
Pollution Characteristics, Dry Deposition Fluxes, and Sources for Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Bosten Lake Watershed	SONG Shi-jie, HUANG Tao, ZHAO Liu-yuan, <i>et al.</i>	(558)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in PM _{2.5} of a Concentrated Broiler Feeding Operation	LIU Fei, XU Xia, TU Bo-wen, <i>et al.</i>	(567)
Effects of Water Vapor Source and Local Evaporation on the Stable Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation	HU Yong-bo, XIAO Wei, QIAN Yu-fei, <i>et al.</i>	(573)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Formation in Atmospheric Deposition in Dianchi Lake and Their Contributions to Lake Loading	REN Jia-guo, JIA Hai-bin, JIAO Li-xin, <i>et al.</i>	(582)
Temporal-spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in Lake Taihu Based on Geostatistical Analysis	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i>	(590)
Effects of Cyanobacterial Blooms in Eutrophic Lakes on Water Quality of Connected Rivers	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, XU Hai, <i>et al.</i>	(603)
Contamination and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of Yilong Lake, Southwest China	LI Xiao-lin, LIU En-feng, YU Zhen-zhen, <i>et al.</i>	(614)
Temporal and Spatial Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particulate Matter in Pearl River Estuary and Its Influencing Factors	DU Jia, WANG Yong-hong, HUANG Qing-hui, <i>et al.</i>	(625)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Microorganism Pollutions in the Beiyun River	CHEN Lei, LI Lei-fang, ZHI Xiao-sha, <i>et al.</i>	(633)
Speciation and Transformation of Phosphorus in Sediments During the Redox Cycle	HAO Wen-chao, WANG Cong-feng, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i>	(640)
Effect of Magnetic Zirconium/Iron-Modified Bentonite Addition on Phosphorus Mobilization and Species Transformation in River Sediments	WANG Yan, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(649)
Influence of Calcium Ion Pre-treatment on Phosphate Adsorption onto Magnetic Zirconium/Iron-modified Bentonite	ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, ZHANG Hong-hua, <i>et al.</i>	(658)
Effect of Nitrogen on Magnesium Modified Biochar Adsorption to Phosphorus	ZHI Meng-meng, WANG Peng-fei, HOU Ze-ying, <i>et al.</i>	(669)
Removal Performance and Mechanism for Treating Phosphorus in Agricultural Wastewater by Three Adsorbents	WU Lu, LIU Feng, LONG Rui, <i>et al.</i>	(677)
Photolysis Mechanism of <i>p</i> -Nitrophenol by Nitrocellulose Membrane in Aqueous Solution	DAI Zhi-feng, ZHAO Tong-qian, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(685)
Preparation of ZnTiO ₃ /TiO ₂ Photocatalyst and Its Mechanism on Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i>	(693)
Adsorption and Photocatalytic Removal of Chromium on High-index TiO ₂ Facet	ZHONG De-jian, ZHANG Jian-feng, LI Yao, <i>et al.</i>	(701)
Reduction Cooperated Fenton Oxidation of Zero-valent Iron (ZVI) Immobilized in Alginate Microsphere for Degradation of Acid Red B	ZHANG Huan, LI Shuang-shuang, WEI Jun-fu, <i>et al.</i>	(708)
Mechanism of Removing Iron and Manganese from Drinking Water Using Manganese Ore Sand and Quartz Sand as Filtering Material	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i>	(717)
Preparation of Sulfonated Graphene Oxide Modified Composite Nanofiltration Membrane and Application in Salts Separation	ZHANG Yan-jun, ZHANG Shao-feng, ZHAO Chang-wei, <i>et al.</i>	(724)
Purification Efficiency and Mechanism of Integrated Al Salt Flocculation-ultrafiltration Membrane Process	XUE Wen-jing, LI Wen-jiang, LIU Jian, <i>et al.</i>	(730)
Threshold Flux and Membrane Fouling Analysis of the Hybrid Pre-ozonation and CNTs Membrane Modification Process	WANG Kai-lun, LIU Fang, GUAN Yu-qi, <i>et al.</i>	(738)
Distribution and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in SBR/MBBR Process	LIU Shu-hui, TIAN Wei-jun, ZHOU Jian-ren, <i>et al.</i>	(747)
Biological Nitrogen Removal Process in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor Treating Low C/N Wastewater	LIU Chun, WANG Cong-cong, CHEN Xiao-xuan, <i>et al.</i>	(754)
Treatment of Simulated Saline Wastewater from the Coal Chemical Industry Using Ecological Floating Beds Enhanced with Arbuscular Mycorrhiza	DOU Wen-qing, HE Hao, SONG Wen-ping, <i>et al.</i>	(761)
Nitrification and Bioaugmentation of Biological Treatment System of Sewage Treatment Plant at High Temperature in Summer	SONG Tian-wei, SHENG Xiao-lin, WANG Jia-de, <i>et al.</i>	(768)
Characteristics of Ammonia Adsorption and Kinetics by Nitrifying Sludge Immobilized Pellets	YU De-shuang, LÜ Ting-ting, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i>	(774)
Nitrite Accumulation Characteristics of Partial Denitrification in Different Sludge Sources Using Sodium Acetate as Carbon Source	BI Chun-xue, YU De-shuang, DU Shi-ming, <i>et al.</i>	(783)
Operating Characteristics of a DPR-SNED System Treating Low C/N Municipal Wastewater and Nitrate-containing Sewage	DU Shi-ming, YU De-shuang, BI Chun-xue, <i>et al.</i>	(791)
Simultaneous Nitrification and Denitrifying Phosphorus Removal in Continuous Flow Reactor with Intermittent Aeration	ZHAO Zhi-chao, HUANG Jian-ming, LI Jian, <i>et al.</i>	(799)
Start-up and Stable Operation of ABR-MBR Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, JIANG Zhi-yun, CHENG Cheng, <i>et al.</i>	(808)
Effect of Influent C/N Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of SNEDPR Systems	DU Ye-qi, YU De-shuang, ZHEN Jian-yuan, <i>et al.</i>	(816)
Carbon and Nitrogen Removal Characteristics of ABR Decarbonization-CANON Coupling Process	LI Tian, YIN Wen, WANG Xin-zhu, <i>et al.</i>	(823)
Effect of Aeration Density on Start-up of CANON Process	LI Dong, GAO Xue-jian, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(829)
Adjusting Temperature and Settling Time to Achieve ANAMMOX Particles Rapid Start-up and Stable Operation	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(837)
Effect of C/N and Sludge Concentration on the pH-Regulated Nitrosation System	ZHANG Min, WEI Jia-min, HUANG Hui-min, <i>et al.</i>	(845)
Growth Features of Water Supply Pipeline Biofilms Based on Active Microorganisms	WANG Yang, ZHU Bin, TONG Jun, <i>et al.</i>	(853)
Elevational Distribution Characteristics of Soil Bacterial Community and Enzyme Activities in Mount Huangshan	YAO Lan, HU Li-huang, ZHANG Huan-chao, <i>et al.</i>	(859)
Microbial Community Structure Shift during Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil Using High Throughput Sequencing	QI Yan-yun, WU Man-li, ZHU Chang-cheng, <i>et al.</i>	(869)
Effect of Nitrification on N ₂ O Emissions and Their Environmental Factors in Saline-alkali Wetlands	YANG Qu, GAO Wei-feng, LIU Feng-qin, <i>et al.</i>	(876)
Effect of Long-term Dairy Manure Amendment on N ₂ O and NO Emissions from Summer Maize-Winter Wheat Cropping Systems	NIE Huang-hua, ZHANG Jia-sheng, HE Zhou-ming, <i>et al.</i>	(885)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, HAO Qing-ju, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i>	(893)
Differences and Relationship Between Rhizosphere Characteristics and Methane Emissions of Double-cropping Rice Variety	XIAO Zhi-xiang, FU Zhi-qiang, XU Hua-qin, <i>et al.</i>	(904)
Effect of Long-Term Biochar Application on Soil Respiration in Flue-Cured Tobacco Planting Fields in Henan Province	LI Ya-sen, DING Song-shuang, YIN Quan-yu, <i>et al.</i>	(915)
Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Patterns in Maocun Village, Guilin	DING Meng-kai, HU Xiao-nong, CAO Jian-hua, <i>et al.</i>	(924)
Spatiotemporal Variability and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in a Industrially Developed City	LI Feng, LIU Si-yuan, LI Yan, <i>et al.</i>	(934)
Effects of Bentonite on Chemical Forms and Bioavailability of Heavy Metals in Different Types of Farmland Soils	LIN Hai, JIN Xiao-na, DONG Ying-bo, <i>et al.</i>	(945)
Characteristics of Soil Organic Carbon and Mineralization with Different Stands in Jinyun Mountain	CHEN Shi-qi, LÜ Sheng, GAO Ming, <i>et al.</i>	(953)
Contribution of Root Biomass to Soil Organic Carbon Under Complex Landforms Conditions	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li, <i>et al.</i>	(961)
Transformation and Distribution of Soil Organic Carbon and the Microbial Characteristics in Response to Different Exogenous Carbon Input Levels in Paddy Soil	WANG Ji-fei, TONG Yao-yao, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	(970)
Analysis of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Assessment on Vegetation Leaves in Baoji City	ZHANG Jun-hui, LIN Qing, JIANG Shan, <i>et al.</i>	(978)
Effect of Biochar on Available Heavy Metals During Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost	ZHOU Ji, YU Ya-wei, JIANG Yue, <i>et al.</i>	(987)
Influence of Sludge Retention Time on the Performance and Stability of Mesophilic Anaerobic Co-digestion of Food Waste with Waste Activated Sludge	YUAN Hong-lin, MA Jing, XING Bao-shan, <i>et al.</i>	(994)
Performance of Treating Straw and Animal Manure Mixture by an Integrated Process of Thermo-alkali-bi-enzyme Hydrolysis-anaerobic Digestion and Conditions of High Methane Yield	BIAN Ai-qin, YUAN Ye, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i>	(1003)