

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

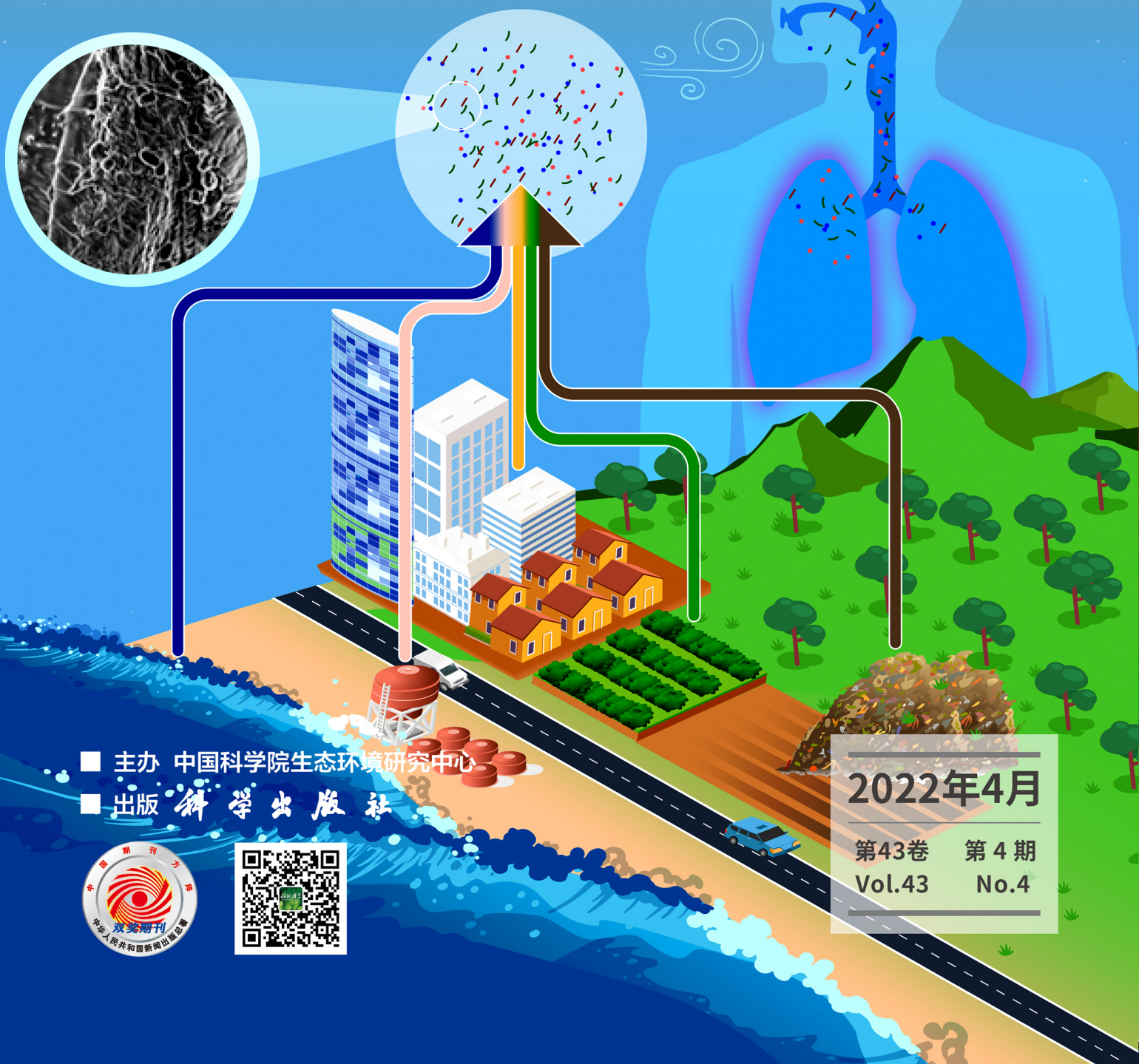
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性

涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年4月

第43卷 第4期
Vol.43 No.4

目次

2015~2019年河南省PM _{2.5} 时空特征与驱动因素分析	葛昱序, 刘岩, 杨洪, 郭恒亮 (1697)
郑州市大气PM _{2.5} 中重金属的污染特征、来源及健康风险评估: 基于高分辨数据	曲光辉, 孙俊苹, 王申博, 姜楠, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 马双良 (1706)
宁波市春节期间水溶性离子污染来源和特征分析	杨梦蓉, 潘勇, 黄仲文, 张晶晶, 黄显军, 何萌萌, 肖航 (1716)
上海城区PM _{2.5} 中有机组分及硝基芳香化合物分布特征	庄旻, 马英歌, 程玉璜, 周敏, 戴海夏, 黄成, 郁建珍, 朱书慧, 乔利平, 童张法 (1725)
南京北郊大气细粒子硝基苯酚类化合物污染特征与来源	陈美娟, 钱姿合, 顾陈娟, 张书萌, 刘智艺, 王新峰, 盖鑫磊 (1738)
春节与疫情管控期间珠三角VOCs的组成和来源变化	江明, 袁鸾, 温丽容, 张莹, 方洪波, 杨满芽, 李成柳 (1747)
重庆市主要工业源VOCs组分排放清单及其臭氧生成潜势	李陵, 李振亮, 方维凯, 王晓宸, 蒲茜, 汪凌韬, 袁睿, 张卫东, 翟崇治 (1756)
珠三角石化园区VOCs排放特征及影响评价	张雪驰, 沙青娥, 陆梦华, 王毓铮, 饶思杰, 明桂英, 李勤勤, 吴淑珠, 郑君瑜 (1766)
基于隧道测试的机动车VOCs排放特征及源解析	刘鑫会, 朱仁成, 金博强, 梅慧, 祖雷, 尹沙沙, 张瑞芹, 胡京南 (1777)
基于多通道分布式VOCs在线监测质谱系统精准识别企业污染源	韦啸, 张永杰, 王沛涛, 洪燕, 夏瑞, 高伟 (1788)
基于SOA和O ₃ 生成潜势的杭州市PM _{2.5} 和O ₃ 协同控制	林旭, 严仁婧, 金嘉佳, 许凯儿 (1799)
超低排放燃煤电厂中湿式电除尘器对可凝结颗粒物排放特性的影响	王鹏程, 袁畅, 梁胜文, 蒋鹭翔, 成海容, 许睿光, 虞晓晗, 王祖武 (1808)
西安市住宅室内空气污染物实测分析与叠加效应	王秀茹, 樊灏, 范洁, 沈振兴 (1814)
大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性	涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明 (1821)
基于在线观测本地因子的长三角家禽养殖氨排放时空分布特征	高宗源, 徐昶, 倪远之, 沈根祥, 苗文亮, 王振旗, 付侃, 钱晓雍, 曹国民 (1829)
西宁市农牧源氨排放清单及其分布特征	杨益, 姬亚芹, 高玉宗, 林孜, 林宇, 马妍 (1844)
“三水”统筹视角下京津冀地区城市水生态环境保护策略分析	廖雅, 侯晓妹, 任晓红 (1853)
中国居民饮用水镉暴露非致癌风险的年龄分层权重	秦宁, 阿依博塔·吐尔逊别克, 刘运炜, 侯荣, 徐翔宇, 官家丞, 段小丽 (1863)
新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系	雷米, 周金龙, 张杰, 陈亚鹏, 滕杰, 吴彤, 徐东升, 孙英, 纪媛媛 (1873)
珠江源区小黄泥河流域地表水水化学组成特征及控制因素	涂春霖, 尹林虎, 和成忠, 寸得欣, 马一奇, 令狐昌卫 (1885)
河套灌区浅层地下水NO ₃ ⁻ -N时空变化及驱动因素	袁宏颖, 杨树青, 张万峰, 王波, 韩天凯, 丁雪华 (1898)
盐城地区地下水溶质来源及其成因分析	王建, 张华兵, 许君利, 李永山 (1908)
白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义	王雨山, 尹德超, 祁晓凡, 徐蓉桢 (1920)
东部地区大型湖库有色可溶性有机物来源组成及潜在驱动因素	陈丽丽, 肖启涛, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 韩龙飞 (1930)
松花湖沉积物溶解性有机质荧光光谱特性	程云轩, 赵可, 张越, 张渝婷, 焦立新 (1941)
区域土地利用类型对水源水中溶解性有机物丰度和荧光组分的影响	高静, 蒲晓, 张玉虎, 程红光, 张瑞宁, 刘训良, 董雪, 许新瑶 (1950)
南北水调东线枢纽湖泊表层水体甲烷释放特征及潜在影响因素	朱俊羽, 彭凯, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 丁艳青 (1958)
千岛湖水体中邻苯二甲酸酯(PAEs)的分布特征及健康风险评价	弥启欣, 国晓春, 卢少勇, 邓义祥, 卢洪斌, 李响, 刘晓贺, 陈金明 (1966)
蓝藻越冬期湖湾沉积物磷吸附特征和释放风险	靳郑海, 涂成琪, 王书航, 陈俊伊, 卢昶雨, 黄威 (1976)
基于植物多样性的北京市湿地生态质量评价	李果, 孙光, 赵梓伊, 刘冬梅, 肖能文, 赵志平, 罗遵兰 (1988)
小清河专项治理对莱州湾环境和浮游植物的影响	张晶晶, 王玉珏, 李凡, 刘珂, 王英, 于洋, 高彦洁, 肖晓彤, 吕振波 (1997)
不同曝气方式对人工湿地细菌多样性、代谢活性及功能的影响	王飞鹏, 黄亚玲, 张瑞瑞, 岳琛, 李飞翔, 张超月, 穆景利 (2007)
南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析	岳桢桢, 李一平, 周玉璇, 郑可, 于珊, 伍彬 (2018)
老化作用对微塑料吸附铅的影响及其机制	王俊杰, 陈晓晨, 李权达, 金成俊, 黄艺佳, 范露健, 张剑宇, 刘宪华, 徐开钦 (2030)
碳化泡沫负载Co ₃ O ₄ 活化过硫酸盐降解罗丹明B	王渊源, 阎鑫, 艾涛, 李卓, 牛艳辉 (2039)
低总氮浓度下Fe ²⁺ 促进ANAMMOX生物膜反应器脱氮	郑旭文, 秦嘉富, 汪晓军, 陈浩川, 朱梓静, 陈振国 (2047)
污水管道增强通风作用下臭气气液传质特性	杨洲, 张志强, 杨静, 卢金锁 (2055)
长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价	张义, 周心功, 曾晓敏, 冯娇, 刘玉荣 (2062)
中国北方典型设施菜地土壤稀土元素分布特征及环境意义	王祖伟, 刘雅明, 王子璐, 苗钰婷 (2071)
贵州省典型铅锌矿区潜在有毒元素(PTEs)物源甄别、生态风险评价及控制因素	张富贵, 彭敏, 贺灵, 马宏宏 (2081)
地质高背景与污染叠加区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征	王雪雯, 刘鸿雁, 顾小凤, 涂宇, 于恩江, 吴攀 (2094)
矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价	王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 胡慧娟, 刘志恒, 王祯 (2104)
农田-泥炭藓系统重金属富集特征与生态风险评价	朱迪, 张朝晖, 王智慧 (2115)
安顺市土壤pH空间变异及影响因素分析	陈清霞, 陆晓辉, 涂成龙 (2124)
方解石基组配钝化剂与低积累玉米协同修复效果	任超, 任或仲, 李竞天, 王浩, 朱利文, 肖建辉, 赵瑞, 杜倩倩 (2133)
伯克氏菌Y4对水稻幼苗损伤和镉吸收的影响	张雅荟, 刘月敏, 王常荣, 刘雅萍, 庞杰, 黄永春, 刘仲齐, 张长波 (2142)
我国长江中下游平原典型稻田含碳温室气体通量变化特性	刘硕, 甄晓杰, 刘钢, 冯兆忠 (2151)
地膜覆盖和生物炭添加对菜地N ₂ O排放的影响	胡剑, 江长胜, 陈鑫童, 熊艳芳, 郝庆菊 (2163)
氮肥运筹对稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	郑梅群, 刘娟, 姜培坤, 吴家森, 李永夫, 李松果 (2171)
松花江下游滨岸带典型植被根际土壤细菌群落结构与功能多样性	王露莹, 孙慧珍, 杨雪 (2182)
棉秆还田对咸水滴灌棉田土壤酶活性和细菌群落结构多样性的影响	周永学, 陈静, 李远, 侯振安, 阎伟 (2192)
pH对水稻土全程氨氧化细菌丰度和群落结构组成影响	马瑞, 赵永鹏, 王智慧, 蒋先军 (2204)
生物炭对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤有机碳的影响	张健乐, 曾小英, 史东梅, 倪书辉, 夏蕊, 王荣浩 (2209)
有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响	林仕芳, 王小利, 段建军, 皮义均, 郭琴波, 龙大勇, 徐彬, 杨宏伟 (2219)
九龙江河口潮滩湿地土壤有机碳储量、活性组分及稳定性沿淹水梯度的分布特征	黄小清, 全川, 罗敏, 杨洋, 谭凤凤, 潘哲妍, 刘娜, 陈欣, 黄佳芳 (2226)
碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望	刘祥宏, 阎永军, 刘伟, 黄占斌 (2237)
《环境科学》征订启事(1929)	《环境科学》征稿简则(1975)
信息(1996, 2029, 2080)	

蓝藻越冬期湖湾沉积物磷吸附特征和释放风险

靳郑海¹, 涂成琪¹, 王书航², 陈俊伊², 卢昶雨³, 黄威^{1*}

(1. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620; 2. 中国环境科学研究院湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室, 北京 100012; 3. 河北地质大学水资源与环境学院, 河北省水资源可持续利用与开发重点实验室, 石家庄 050031)

摘要: 越冬过程是蓝藻暴发的前置阶段, 该时期沉积物内源磷是蓝藻水华发生的主要磷源之一。在调查藻型湖湾蓝藻越冬两个时期(休眠期和复苏期)水质和沉积物污染物指标的基础上, 进一步分析了水平和垂直方向上沉积物磷吸附特征, 阐明沉积物磷释放风险及微生物群落结构变化。结果表明, 研究区域两个时期湖湾基本为中度富营养水平, 并且水质和沉积物氮磷污染较为严重, 越冬期叶绿素 a 含量(Chl-a) 仍然处于较高水平。准二级动力学模型和修正后的 Langmuir 模型能分别较好地描述沉积物对磷的动力学和等温吸附行为, 沉积物理论磷最大吸附量($Q_{\max}$) 呈现: 底层 > 中层 > 表层的规律, 最高可达 1.648 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 且底层对磷的吸附速率较高, 其准二级动力学模型吸附常数达 6.292 $\text{g} \cdot (\text{mg} \cdot \text{min})^{-1}$, 其吸附参数($Q_{\max}$ 、NAP 和 EPC_0) 主要受沉积物自身理化性质和湖体营养水平影响。休眠期沉积物主要扮演着磷汇角色, 而复苏期部分沉积物扮演着磷源角色, 存在较高的内源磷释放的风险。沉积物微生物群落结构分析结果显示, 蓝藻休眠期沉积物中微生物多样性高于复苏期, 且部分具有解磷功能的微生物门类相对丰度较高。

关键词: 蓝藻; 沉积物; 磷; 释放; 微生物

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)04-1976-12 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202106101

Phosphorus Adsorption Characteristics and Loss Risk in Sediments of Lake Bay During the Overwinter Period of Cyanobacteria

JIN Zheng-hai¹, TU Cheng-qi¹, WANG Shu-hang², CHEN Jun-yi², LU Chang-yu³, HUANG Wei^{1*}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. Hebei Province Key Laboratory of Sustained Utilization & Development of Water Recourse, School of Water Resource and Environment, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: The overwinter period is the pre-stage of the algal bloom, and the endogenous phosphorus (P) in sediments is one of the main P sources of algal blooms during this period. Based on the investigation of the water quality and sediment pollutants during the overwinter period of cyanobacteria (recruitment period and dormancy period), this study analyzed the P release characteristics of sediments in the horizontal and vertical directions and clarified the P release risk of sediments and the change in microbial community structures. The results showed that the lake bay was moderately eutrophic in the two periods of the study area, and the water quality and sediment nitrogen and P pollution were more serious, and the chlorophyll a content (Chl-a) was still at a high level in the overwinter period. The pseudo-second order model and the modified Langmuir model could respectively describe the P kinetics and sorption isotherm behavior in the sediment. The theoretical maximum P sorption capacities ($Q_{\max}$) of sediments were bottom layer > middle layer > surface layer, and the highest value was 1.648 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ with the highest P sorption rate constant of the pseudo second-order kinetic model of 6.292 $\text{g} \cdot (\text{mg} \cdot \text{min})^{-1}$. Additionally, the P adsorption parameters ($Q_{\max}$, NAP, and EPC_0) were mainly affected by the physical and chemical properties of the sediment itself and the nutritional level of the lake bay. The surface sediments from the dormancy period mainly played the role of P sinks, and the part of sediments from the recruitment period played the role of P sources, in which existed the risk of endogenous P release. The analysis of the microbial community structure in sediments indicated that the microbial diversity in the sediments during the dormancy period was higher than that during the recruitment period, and some microbial categories with phosphate-solubilizing function of relative abundance was high.

Key words: cyanobacteria; sediment; phosphorus; release; microbe

水体富营养化一直是主要的水环境问题之一。近年来,我国东部部分浅水湖湾水体长期处于中度富营养化状态,夏秋之际蓝藻水华暴发日趋频繁,造成水质恶化同时也极大地威胁到水体生态系统的功能安全和人类的生命健康。磷被认为既是水体富营养化的限制性因子之一^[1],也是藻华生物的关键营养元素^[2]。湖湾的磷源分为外源磷和内源磷^[3]。在限制外源磷汇入的前提下,沉积物高负荷内源磷,成为了延缓水生生态系统恢复的主要原因之一。此外,沉积物释放的可溶性无机磷供藻类生长,且不断维持着上覆水营养状态,加速

了蓝藻暴发。

据孔繁翔等^[4]的四阶段理论假说,蓝藻生长与水华形成经历了4个阶段(越冬休眠、春季复苏、生长和集聚上浮)。其中,蓝藻越冬期约为11月至次年的2月,这一时期蓝藻受低温影响和黑暗环境影响较大,此时下沉底泥表面,将底泥作为其越冬场

收稿日期: 2021-06-12; 修订日期: 2021-09-14

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(52000024); 上海市青年科技英才扬帆计划项目(20YF1400300); 中央高校基本科研业务费专项

作者简介: 靳郑海(1996~),男,硕士研究生,主要研究方向为湖泊污染过程与控制, E-mail: 737143697@qq.com

* 通信作者, E-mail: huangwei@dhru.edu.cn

所,直到春季伊始,蓝藻细胞迅速繁殖,并上浮聚集,在适当条件下形成水华^[5~6]。目前,对于表层沉积物内源磷的释放特征在水华暴发衰亡阶段已有较多研究^[7~11],但是,有关在富营养化湖湾蓝藻越冬期沉积物内源磷释放特征研究相对较少,李森^[12]的研究也聚焦于低温期磷释放对查干湖富营养化的影响。因此,蓝藻越冬休眠这一时期的沉积物的内源磷释放特征亟待研究。

微生物在沉积物磷素生物地球化学循环过程中扮演着重要作用,细菌不仅改变沉积物-水界面的氧化还原环境,同时也通过有机质的矿化和降解作用影响内源磷释放。此外, Maitra 等^[13]和范乐等^[14]的研究发现沉积物的磷在解磷菌作用下有较高的释放风险;有研究发现解磷功能细菌种属在富营养湖库具有高丰度和多样性 (Shannon 指数均值为 6.80)^[15],且对上覆水体营养盐有较大影响;魏烈群等^[16]的研究发现在藻华暴发情况下微生物对内源磷释放影响更为显著。诠释越冬期微生物群落演替在内源磷释放的贡献以及与环境因子的响应有利于反映富营养前置阶段沉积物的生物特征。

本文选取典型的以浮游藻类为导向的浊水型湖湾(梅梁湾)为研究区域,在详细调研研究区域水质和沉积物污染时空分布的基础上,进一步分析不同沉积物在垂直方向的吸附特征,阐明湖湾内源磷释放风险,并对蓝藻越冬过程中沉积物微生物群落结构变化以及限制群落变异环境因子进行分析,以期对藻华治理和控制富营养化提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区域及样品采集

本研究以藻型湖湾梅梁湾为研究区域,选取 6 个采样位点,记为 S1~S6,如图 1 所示,分别于 12 月(蓝藻休眠期, Ow 期)和次年 3 月(蓝藻复苏期, Re 期)用柱状采泥器采取柱状沉积物样品,现场用分泥器切割成表(0~15 cm)、中(15~30 cm)和底(30~45 cm)这 3 层,装于聚乙烯自封袋密封,12 h 内运回实验室进行低温保存及预处理。其中,用于微生物分析的沉积物样品装入密封袋,放置于 -80℃ 冰箱内保存,用于提取泥样 DNA。同时用聚乙烯塑料瓶现场收集各位点水下 30 cm 处上覆水送回实验室测试。

1.2 样品常规指标测试

水样常规理化指标使用便携式多参数水质分析仪现场测定。上覆水氮磷相关指标 (SRP、TP、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 和 TN) 用国标法^[17]测定。孔隙水可

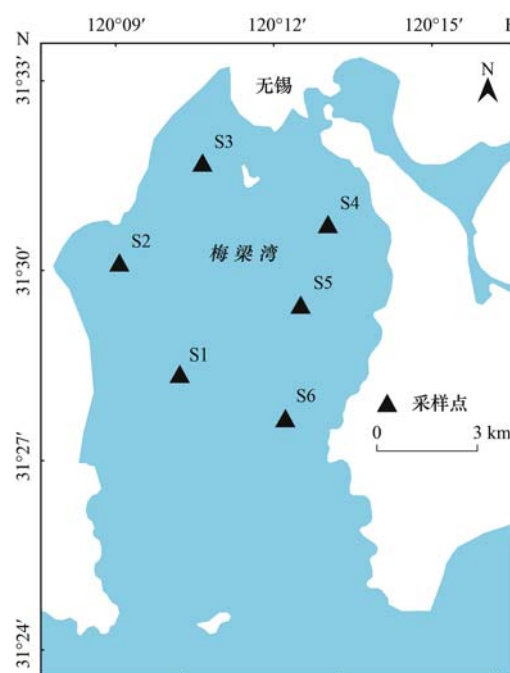


图 1 采样点分布示意
Fig. 1 Map of sampling sites

溶性正磷酸盐 SRP_p 浓度为国标法测定沉积物样品在 $>10\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 15 min 条件下离心后的上清液磷素浓度^[18]。叶绿素 a (Chl-a) 采用热乙醇法^[19]测定。

沉积物样品实验室自然风干后,剔除表面砾石贝壳等杂质,研磨过 100 目筛。沉积物样品的 TP 和藻类可利用性磷 (AAP) 按文献^[20,21]的方法测定。沉积物中的 OM (有机质) 含量通过灼烧失量法 (550°C , 4 h)^[22]测定;沉积物中氧化物含量组成通过 X 射线分析仪测定,具体结果见图 2。

1.3 试验设计

沉积物样品对磷的吸附动力学试验:在锥形瓶放置每个位点表、中、底这 3 个样品各 1.0 g,并加入 50 mL 磷浓度为 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 KH_2PO_4 溶液,将锥形瓶置于 25°C , $220\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件的温控摇床中,在不同振荡时间进行取样,每次振荡结束后取上清液过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜用钼锑抗分光光度法测定滤液磷酸根浓度。

沉积物样品对磷的吸附等温线试验:在锥形瓶放置每个位点表、中、底这 3 个样品各 1.0 g,并加入 50 mL 不同初始磷浓度的 KH_2PO_4 溶液,将锥形瓶置于 25°C , $220\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件的温控摇床中,在 480 min 进行取样,每次振荡结束后取上清液过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜用钼锑抗分光光度法测定滤液磷酸根浓度。

1.4 数据处理及统计分析

单位质量沉积物不同时间对磷的吸附量 Q_t

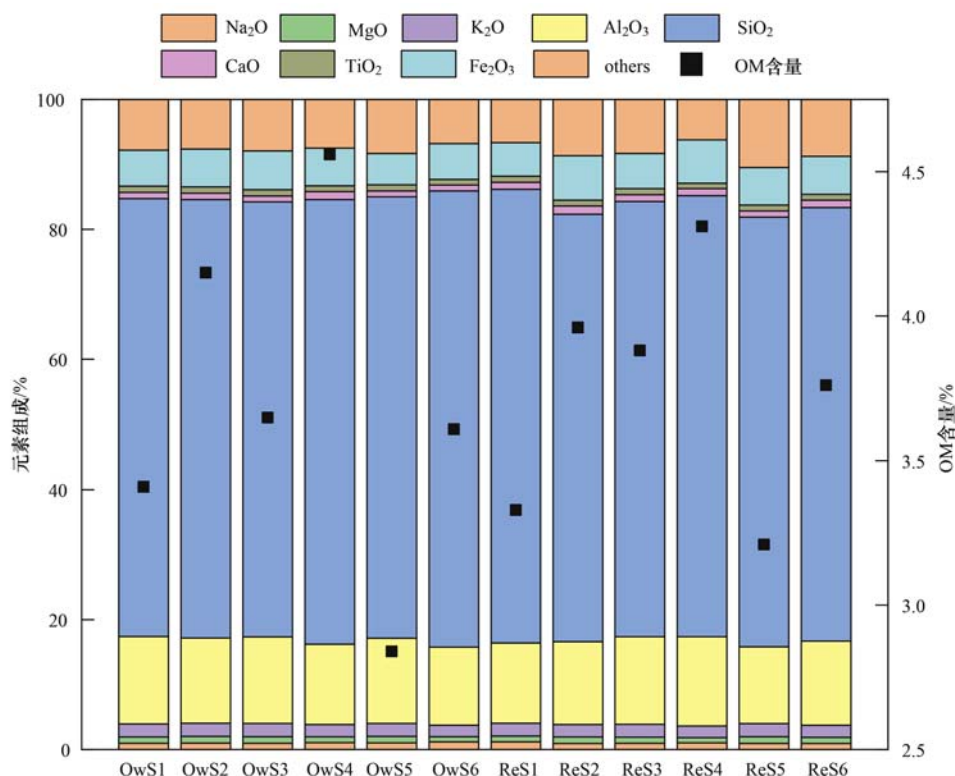


图2 休眠期和复苏期表层沉积物元素组成及 OM 含量

Fig. 2 Composition and OM content of surface sediment elements during dormancy and recovery

($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 计算方法如下式:

$$Q_t = (c_0 - c_t) V / W$$

式中, c_0 为初始磷的浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; c_t 为空白校正后 t 时刻的磷浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; V 为试样体积, L ; W 为样品质量, g ; 当磷吸附达到平衡时, 此时式中的 Q_t 和 c_t 分别用 Q_e 和 c_e 表示, 分别为磷吸附平衡时沉积物对磷的吸附量和磷的吸附平衡浓度。

磷在多孔介质沉积物中的吸附/解吸过程中的动力学行为和扩散机制通常用准一级动力学模型和准二级动力学模型^[23] 来进行评价, 采用修正后的 Langmuir 等温吸附模型和 Freundlich 等温吸附模型描述磷素等温吸附特征, 理论最大吸附量 ($Q_{\max}$)、沉积物本底磷含量 (NAP) 和吸附解吸平衡浓度 (EPC_0) 的计算方法见文献[24]。

该湖湾富营养化状况评价方法采用综合营养状态指数法 $\text{TLI} \left(\sum \right)$ ^[25]。

本研究基于 Illumina MiSeq PE300 测序平台进行样品的 16S rRNA 高通量测序, 得到有效序列后进行生物信息学分析。利用 Mothur (Version 1.33.3) 进行 α 多样性分析 (Chao 指数和 ACE 指数等) 物种丰富度统计。

为保证数据准确性均做 3 次平行试验。试验数据均用 Excel 2018 处理, 采用 Origin 2018 绘制图表, 采用 IBM SPSS Statistics 25 进行相关性分析, 采

用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 评估水体底质及细菌群落差异在统计学意义的显著性, 并通过 Canoco 5.0 作冗余分析 (RDA) 研究群落与环境因子的关系。

2 结果与讨论

2.1 污染物时空分布特征

研究区域越冬期水质和沉积物理化指标分布如图 3 和表 1 所示。湖湾上覆水 pH 值在 8.25 ~ 9.24, 呈现弱碱性; 水温在 1.4 ~ 13.0℃; DO 为 10.3 ~ 14.04 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 溶解氧充足; ORP 为 -84.9 ~ -59.9 mV, 水体环境呈现还原状态。显著性检验表明, 在不同时期 pH 值、水温、DO 和 SRP_p 差异极明显 ($P < 0.01$), Chl-a 差异明显 ($P < 0.05$), 其他水质指标差异不显著 ($P > 0.05$)。

两时期 $\rho(\text{SRP})$ 和 $\rho(\text{TP})$ 分别介于 0.054 2 ~ 0.217 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 0.073 0 ~ 0.226 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均值分别为 0.051 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 0.134 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。除休眠期 S1 和 S5 位点为 IV 类水质, 其它为 V 类或 > V 类水质。整体上, 前者数值有所降低, 后者略微增加, 这主要是由于越冬期湖湾水位稳定, 水体滞留时间增加, 使得底栖生物有充足时间利用 SRP , $\rho(\text{TP})$ 略微增加主要是由于春季扰动频繁造成颗粒态磷的上浮。 $\rho(\text{TP})$ 两时期呈现空间异质性, 休眠期整体东南部较低, 而复苏期东南部较高。湖湾 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 、

$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 和 $\rho(\text{TN})$ 分别介于0.61~2.558、0.106~0.344和0.915~2.809 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值分别为1.293、0.191和1.850 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.除复苏期S4水质为Ⅲ类,其它区域水质为Ⅳ~Ⅴ类水质.由此可见,研究区域氮磷污染十分严重.

研究区域两时期 $\rho(\text{Chl-a})$ 分别为20.91~34.21 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和29.62~36.78 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,且复苏期普遍高于休眠期($P<0.05$),体现了蓝藻开始

复苏的趋势;同时复苏期气温仍较低,水体藻类含量却处于较高水平,湖体存在较高的富营养化风险. Chl-a与上覆水指标进行相关性分析结果显示, Chl-a与TP和pH呈显著正相关($P<0.05$),相关系数分别为0.622和0.606,而与TN相关性较低,这说明藻类生长过程中能提升水体pH,同时说明了磷元素可能是限制藻类生长代谢的关键因素.

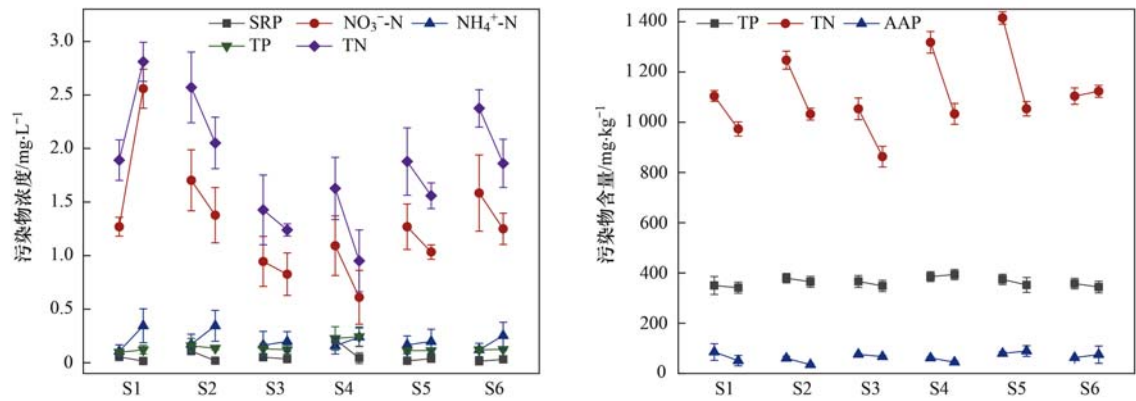


图3 蓝藻越冬过程中水质和沉积物污染指标变化
Fig. 3 Changes in water quality and sediment pollutant indicators during cyanobacteria wintering

表1 不同位点水质主要指标

Table 1 Main index of water quality at different sites								
项目	$T/^{\circ}\text{C}$	pH 值	$\text{DO}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	ORP/mV	$\rho(\text{SRP}_p)/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\rho(\text{Chl-a})/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{TLI}(\sum)$	富营养程度
OwS1	1.4	8.29	13.72	-62.9	0.184	25.88	60.60	中度
OwS2	1.9	8.42	14.04	-70.1	0.247	31.21	63.86	中度
OwS3	1.7	8.36	13.24	-66.7	0.194	34.21	61.89	中度
OwS4	3.1	8.25	13.12	-61.6	0.211	20.91	62.97	中度
OwS5	2.1	8.53	13.95	-76.0	0.208	19.24	57.80	轻度
OwS6	2.1	8.40	13.60	-68.9	0.193	29.71	63.02	中度
均值	2.1	8.38	13.61	-67.7	0.206	32.12	61.69	中度
ReS1	12.8	8.79	10.43	-59.9	0.126	32.12	62.41	中度
ReS2	12.6	9.18	10.99	-81.2	0.174	35.76	64.03	中度
ReS3	12.8	9.12	10.72	-78.2	0.183	33.21	60.79	中度
ReS4	13.0	8.95	10.30	-68.8	0.131	34.62	62.85	中度
ReS5	12.9	9.18	10.93	-81.7	0.142	29.62	60.99	中度
ReS6	12.8	9.24	10.90	-84.9	0.165	36.78	63.29	中度
均值	12.8	9.08	10.71	-75.8	0.154	33.69	62.39	中度

两时期湖湾沉积物 $\omega(\text{TP})$ 和 $\omega(\text{TN})$ 的范围分别在341.43~393.47 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和863.23~1415.58 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均值分别为363.08 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和1123.54 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (如图3),根据EPA制定的底泥分类标准,分别为轻度和中度污染.两个时期研究区域沉积物中TP和TN含量空间分布差异较大;除S4位点,其它区域复苏期沉积物TP含量略高于休眠期;除S6位点,整体上复苏期TN含量显著低于休眠期($P<0.01$).研究区域沉积物中藻类可利用性磷(AAP),均低于100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,且占TP的质量分数为9.06%~25.31%,在S5和S6位点的复苏期有所升高,其他

位点降低.综上蓝藻越冬过程中,休眠期研究区域氮磷负荷仍然较高.

利用综合营养指数法(TLI)对这两个时期的水质进行了评价,休眠期和复苏期的综合营养状态指数分别为61.69和62.39,都评估为中度富营养水平,在低温期受纳水体的外源输入逐渐减小的情况下,研究区域营养水平仍处于较高水平,内源污染尤其是内源磷释放便成为了造成该区域营养水平异常的关键因素之一.

2.2 沉积物磷吸附动力学特征

蓝藻越冬过程中沉积物垂直方向上磷的吸附动

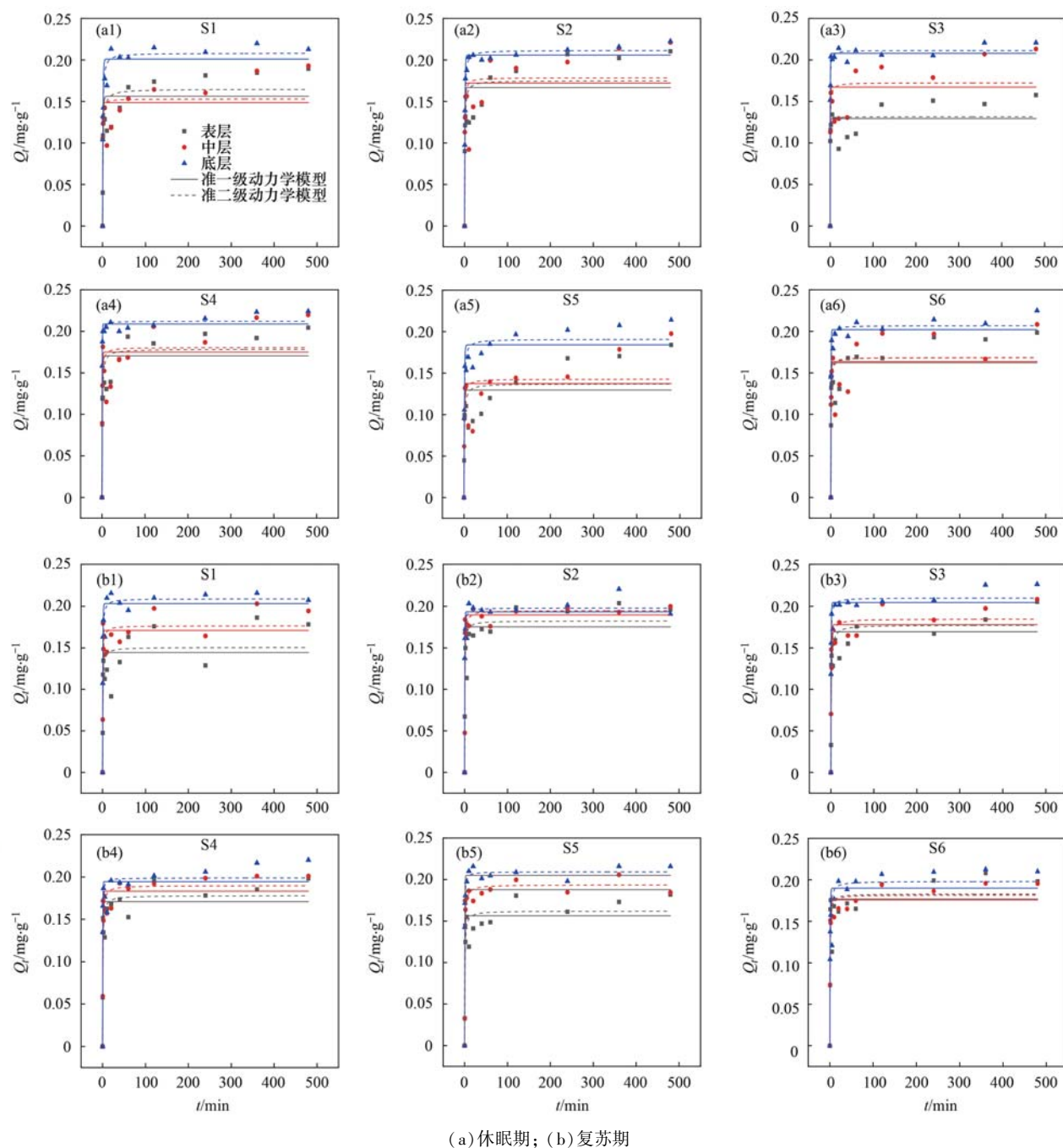


图 4 蓝藻越冬过程中各位点沉积物垂直方向上动力学曲线

Fig. 4 Vertical sorption kinetics of phosphorus on sediments during overwinter period of cyanobacteria

力学拟合曲线如图 4 所示。从中可知,准二级动力学模型能更好地拟合沉积物样品对磷的吸附。其中,底层沉积物对磷的吸附二级动力学相关系数 R^2 在 0.903 ~ 0.990 之间,沉积物对磷的吸附均在初期的 0 ~ 30 min,处于快吸附阶段,后期的 30 ~ 100 min 属于慢吸附阶段,在 100 min 后逐渐达到表观平衡,并伴随轻微的解吸,这与早期研究的结果一致^[26]。产生此类现象主要是由于:与吸附初期沉积物表面大量活性吸附位点被 PO_4^{3-} 和 H_2PO_4^- 占据,导致后期吸附位点迅速削减^[27]。随着沉积物垂向深度的增加,磷平衡吸附量有所增加,表明随着垂向深度的增

加,沉积物对磷的吸附能力有所增强,这与周小宁等^[28]的研究结果相同。此类现象主要是由于:①沉积物沉积环境随着深度升高而变得相对还原,矿化作用减弱可能导致 Fe/Al-P 解吸量降低^[29];②表层往下有机质含量越小以及微生物活性减弱抑制了磷释放;③有研究表明^[30],能与水进行磷交换的沉积物活动层厚度在 10 cm 左右,深层的沉积物由于压实和固化作用受到外界环境影响较小,其不同赋存态磷不容易再次析出参与吸附与解吸;④沉积物自身铁铝氧化物含量和钙碳酸盐含量也会影响沉积物对磷的吸附能力。综上所述,随着沉积物垂向深度的增

加,沉积物与上覆水交换容量变低,沉积物对磷的吸附容量和缓冲能力增高,导致了更高的最大吸附量。

动力学拟合结果如图 5 所示。结果表明,蓝藻复苏期沉积物具有较高的平衡最大吸附量,这主要是得益于复苏期上覆水磷浓度较高,导致沉积物对于磷的吸附能力增强,平衡吸附量变大,同时也对上覆水体营养水平升高有一定的缓冲能力。对比吸附常数,整体上休眠期高于复苏期,随着深度的增加,吸附常数大多逐渐上升,这与以往的研究结果相同^[31],最高值达到 $6.27 \text{ g} \cdot (\text{mg} \cdot \text{min})^{-1}$,这主要是由于底层沉积物沉积时间更长更稳定,细粒径比

重高,吸附速率较快。在空间分布上,两个时期表层和底层沉积物平衡最大吸附量表现出一定的空间异质性,整体 S2 和 S4 较高, S1 和 S5 较低。一方面,这主要是因为 S2 和 S4 表层拥有较高的 OM 含量(见图 1),有研究表明^[32,33],高 OM 含量有利于腐殖质与铁铝形成有机和无机复合物,释放 H^+ 促进沉积物对磷的吸附,较低的 OM 含量则削弱了 S1 和 S5 位点沉积物的磷吸附能力。另一方面, S2 和 S4 位点较高含量的铁氧化物增加了沉积物的比表面积,提供了更多的表面羟基位,从而增强了对磷的吸附^[34]。

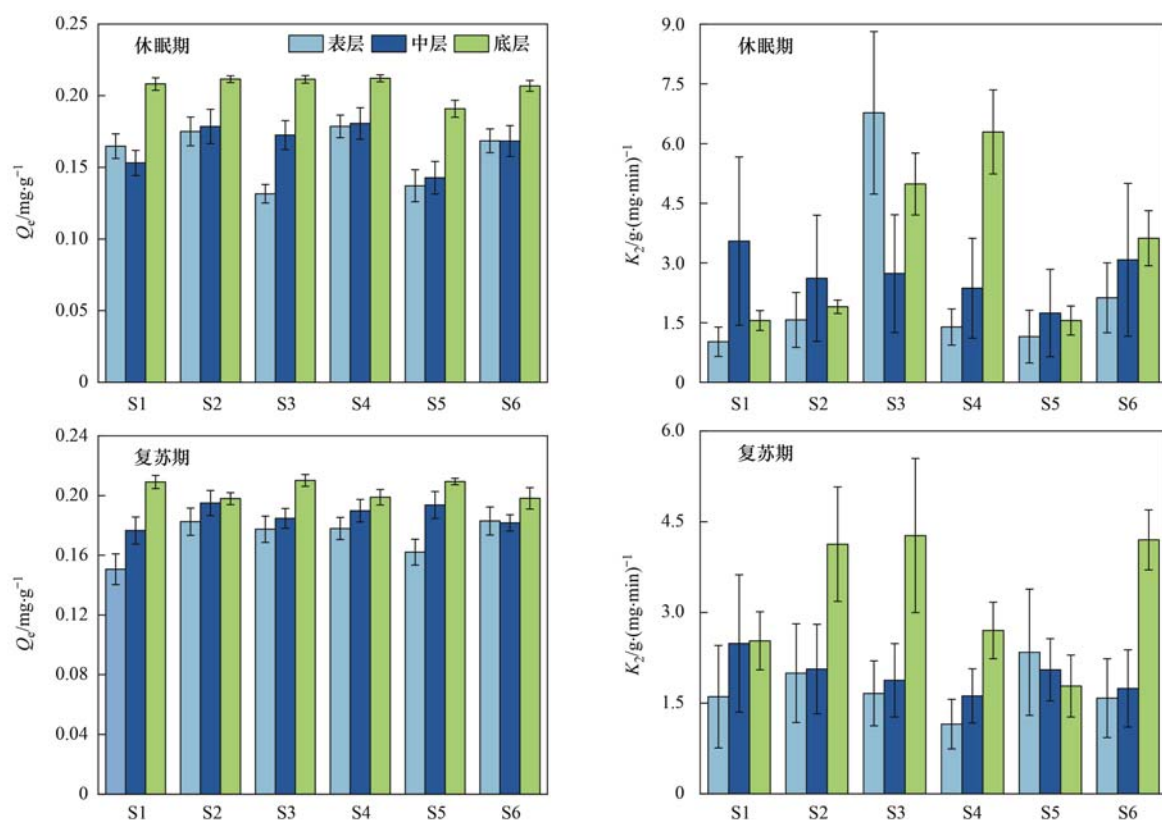


图 5 蓝藻越冬过程中各位点沉积物垂直方向上准二级动力学参数

Fig. 5 Vertical pseudo-second order model parameters of cyanobacteria sediment during overwinter period of cyanobacteria

2.3 沉积物磷吸附等温特征

本研究采用修正的 Langmuir 和 Freundlich 等温吸附模型来描述研究区域各沉积物样品对磷的吸附等温线,如图 6 所示。结果表明,在相同条件下,两个模型初始磷吸附量均为负值,存在解吸现象,随着平衡态浓度的增加,磷吸附量亦随之增加。总体上看,修正后的 Langmuir 模型(R^2 为 $0.777 \sim 0.959$)更好地描述柱状沉积物对磷的吸附等温线。个别沉积物位点则是 Freundlich 模型拟合较好,表明沉积物对磷的吸附机制比较复杂,可能考虑为均匀介质表面的单层吸附与不均匀表面的多层吸附共存^[35]。

在空间上,随着垂向深度的增加,不同分层沉积物对磷的理论最大吸附量 $Q_{\max}$ 均增加,表层和各层

最高值为 $0.856 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $1.648 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,表层数值介于前人研究结果之间(最小值 $0.709 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,最大值 $1.429 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[36,37],可能是由于底泥 pH 值的差异。亲和力常数 n 则显示逐渐增加和先减少后增加两种不同的变化特征,这与王贺等^[38]的研究结果一致。 $Q_{\max}$ 的变化主要是由于不同深度沉积物磷赋存形态变化和自身铁氧化物含量以及化学环境改变有关,亲和力常数变化说明不同层沉积物对磷的吸附能有所不同。此外,两个时期不同分层空间分布与动力学结果较为一致,产生这一现象原因是由于 S2 和 S4 具有较高 OM 含量和较高铁氧化物含量。因此,对比 6 个位点, S2 和 S4 对磷有更高的吸附容量和吸附能力,由此增加了这两个点位作为磷源的潜

在风险.

时间上,除了 S4,表层和中层沉积物 $Q_{\max}$ 数值复苏期高于休眠期,这与上覆水营养水平相对较高有关;底层 $Q_{\max}$ ($0.490 \sim 1.648 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 基本高于复苏期 ($0.571 \sim 0.926 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$),这个可能与底层的自身性质比如粒径有关.在 S4 位点区域沉积物受微生物活性和藻类萌发影响较大,促进了磷释放,使得复苏

期对磷吸附量小于休眠期.此外,经过计算,复苏期 Langmuir 模型亲和力常数 ($0.261 \sim 1.099 \text{ L} \cdot \text{mg}^{-1}$) 和 Freundlich 模型吸附系数 K_F ($0.278 \sim 3.062 \text{ L} \cdot \text{g}^{-1}$) 也高于休眠期 ($0.174 \sim 0.479 \text{ L} \cdot \text{mg}^{-1}$ 和 $0.256 \sim 0.645 \text{ L} \cdot \text{g}^{-1}$),这个可能是由于休眠期底层微生物活性低,底栖生物对底层干扰较少,细颗粒含量较高,吸附速率高,在相同时间容纳的磷升高.

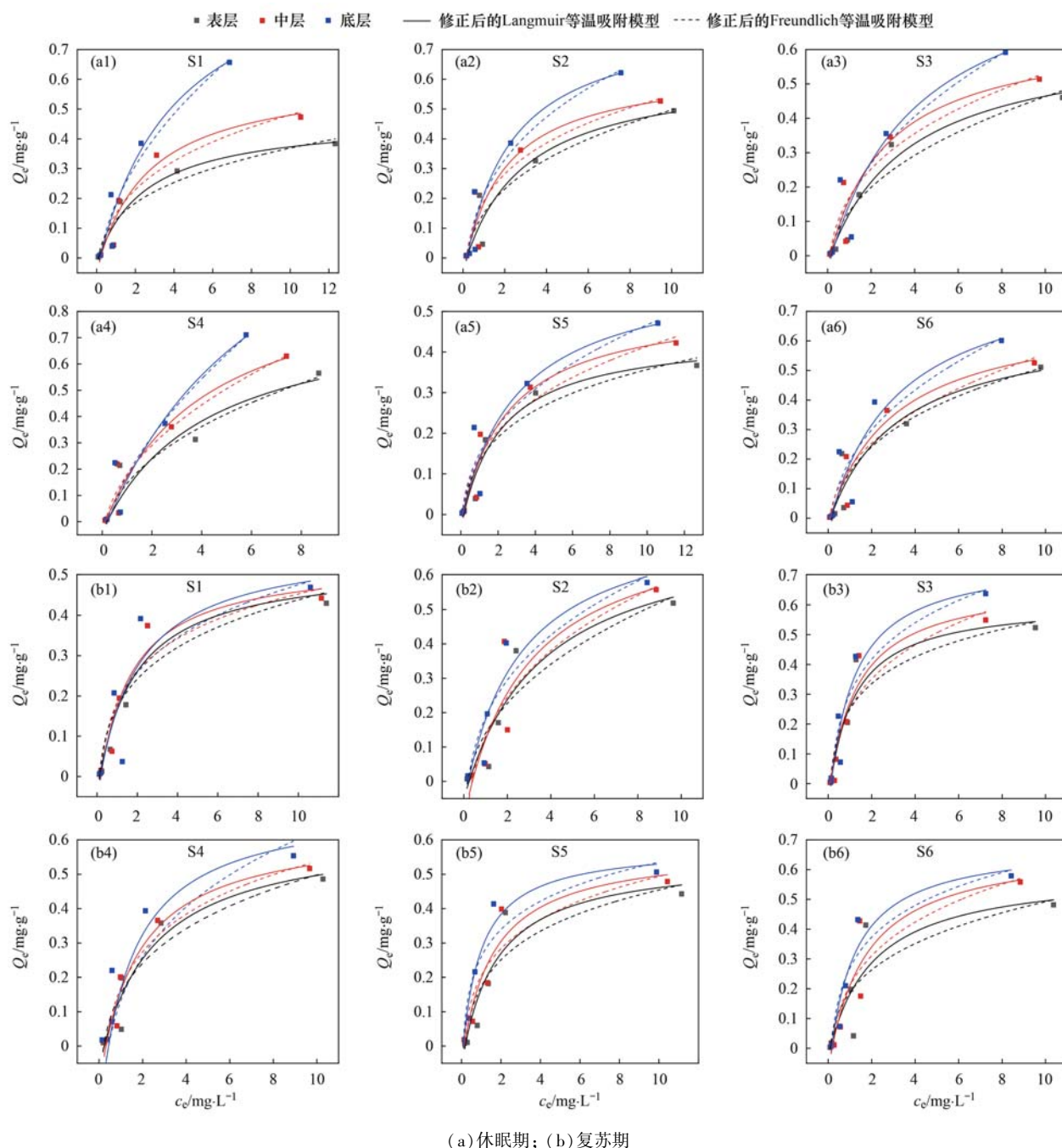


图 6 蓝藻越冬过程中各位点沉积物垂直方向上磷吸附等温曲线

Fig. 6 Vertical phosphorus sorption isotherms of sediments during overwinter period of cyanobacteria

2.4 沉积物磷吸附影响因素及“源汇”分析

计算所得的 EPC_0 和 NAP 值如图 7 所示.结果显示,蓝藻越冬过程中,两时期 EPC_0 介于 $0.074 \sim 0.233 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,均值为 $0.149 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,介于前

人关于太湖的研究结果之间^[39~41]. EPC_0 指示着缓冲外源磷和固定内源磷能力,其值越高,沉积物向水柱的释磷潜力也就越强,与沉积物 Fe/Al-P 和 $\text{CaCO}_3\text{-P}$ 含量有关.其中 S1、S2 和 S4 的 EPC_0 在

复苏期有所增加,表示它们比其他位点更高地释放风险. 沉积物本底磷 NAP 的存在是沉积物在低磷状态下存在解吸的主要原因,其含量介于 $0.019 \sim 0.065 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,均值为 $0.038 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,高于前人的研究结果^[31],其含量与水体富营养化程度密切相关.

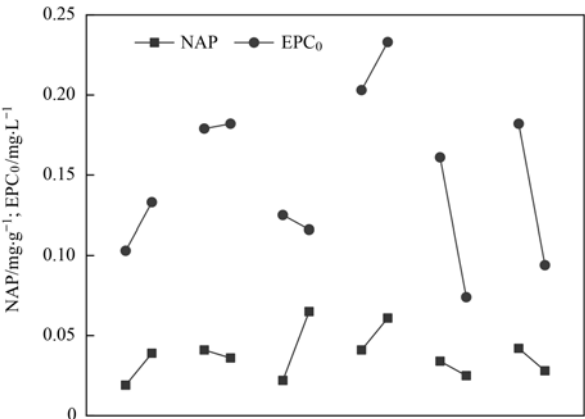


图7 蓝藻越冬过程中 EPC₀ 和 NAP 值

Fig. 7 Values of EPC₀ and NAP during overwinter period of cyanobacteria

2.4.1 吸附参数与环境条件相关性分析

两时期表层沉积物磷吸附等温参数与理化性质间相关性分析结果如表 2 所示. 沉积物磷容量因子 $Q_{\max}$ 与 OM 含量和铁钙氧化物含量呈显著正相关,

表 2 表层沉积物磷等温吸附参数与理化性质间的相关性 ($n = 12$)¹⁾

Table 2 Correlation between temperature adsorption parameters such as phosphorus and physical and chemical properties of surface sediments ($n = 12$)

	$Q_{\max}$	EPC ₀	NAP	TP	AAP	TN	OM	Na	K	Mg	Al	Si	Ca	Ti	Fe
$Q_{\max}$	1	0.687 *	0.620 *	0.476	-0.599 *	0.186	0.853 **	0.049	-0.508	-0.249	-0.070	0.014	0.557	-0.646 *	0.585 *
EPC ₀		1	0.614 *	0.725 **	-0.753 **	-0.109	0.595 *	0.536	-0.477	-0.467	-0.467	0.515	0.298	-0.484	0.277
NAP			1	0.256	-0.634 *	-0.070	0.539	0.489	-0.493	-0.640 *	0.118	0.459	0.256	-0.438	-0.088

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

两时期表层沉积物磷等温吸附参数与水体营养状况指标 (TP、TN 和 Chl-a) 相关性分析结果如表 3 所示. 结果表明,表层沉积物磷吸附参数与上覆水 TN 浓度相关性不大,与 TP 浓度相关性较好,说明 $Q_{\max}$ 、EPC₀ 和 NAP 与上覆水磷浓度联系密切. 本研究沉积物 TP 含量与上覆水 TP 浓度亦具有一定相关性 ($R^2 = 0.343$),表明当湖体磷含量增多时,沉积物磷含量相应增多,沉积物吸附磷含量增加,NAP 与 EPC₀ 和沉积物污染程度相关,NAP 与 EPC₀ 也随之增多,加大了内源磷释放的风险. $Q_{\max}$ 与 Chl-a 成正相关,说明沉积物吸附容量也受湖体营养水平的影响. 3 个参数与 TLI ($\sum$) 存在正相关性,说明湖湾营养水平越高,沉积物吸附容量和释放风险皆会增大,这与前人的研究结果一致^[38,46]. 综上所述,除

与镁钾钛氧化物含量呈较强负相关性. 有机质中的腐殖质可通过释 H^+ 和络合铁铝金属离子促进磷吸附^[32,33]. 此外,铁水合氧化物能提供更多羟基位点从而增强吸附,碱性条件下钙被认为是磷的主要吸附基质,如宋佳伟等^[42]的研究发现磷吸附 $Q_{\max}$ 与钙含量显著相关. 而沉积物有机质易黏附拥有良好硅氧四面体片和金属氧八面体片构成的层状结构的黏土矿物,矿物层间存在“同晶替代”的 Mg^{2+} 、 K^+ 和 Ti^{2+} ,与 PO_4^{3-} 竞争吸附位点,从而弱化了沉积物磷吸附能力^[43]. $Q_{\max}$ 与铝氧化物含量相关性较低,与之前研究有所不同,可能是由于铝氧化物活性较差,对磷的吸附影响不大或其他复杂因素如水动力和 Eh 所造成. $Q_{\max}$ 、EPC₀ 和 AAP 相关性表明吸附容量大的具有更高解吸的风险,且解吸磷形态主要以藻类可利用性磷存在.

沉积物 EPC₀ 与 NAP 呈正显著相关,表明本底磷较高的沉积物对水体富营养化贡献大; EPC₀ 与 AAP 呈极显著负相关,说明藻类可利用性磷是内源磷释放的主要来源之一,从而加大了越冬期后置阶段蓝藻复苏的效应. 结果表明,TP、OM 及金属氧化物含量对 EPC₀ 也有一定影响. 此外,NAP 含量与可指示污染程度的 TP 和 OM 含量也存在一定相关性,这与前人的研究结果相似^[44]. 综上,沉积物 NAP 和 EPC₀ 值越高,污染程度越高,与早期的研究结果相一致^[45].

了沉积物自身理化性质,湖体营养水平也是影响沉积物磷吸附解吸的关键因素之一.

表 3 表层沉积物磷等温吸附参数与上覆水营养状况指标间的相关性 ($n = 12$)¹⁾

Table 3 Correlation between temperature phosphorus adsorption parameters of surface sediments and nutrient status index in overlying water ($n = 12$)

参数	TP	TN	Chl-a	TLI ($\sum$)
$Q_{\max}$	0.776 **	-0.224	0.329	0.643 *
EPC ₀	0.504	0.088	-0.014	0.438
NAP	0.371	-0.091	0.126	0.284

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

2.4.2 沉积物“源汇”特征分析

EPC₀ 和 SRP_p 值的差值通常与沉积物磷的“源”和“汇”有着密切关系^[47],当 EPC₀ 值 $< \text{SRP}_p$

值,沉积物吸附磷,扮演磷汇角色,反之释磷,扮演磷源角色,两时期 EPC_0 与 SRP_p 的关系如图 8 所示,正值表示释放磷,负值表示吸附磷. 结果表明,除复苏期 S1、S2 和 S4,其它均为 EPC_0 小于 SRP_p ,表明复苏期部分沉积物扮演磷源的角色,存在内源磷释放的风险. 此外,采样期间湖湾结冰对氮磷污染物有浓缩效应,促使污染物向沉积物迁移,使得沉积物具有磷汇角色潜力^[48]. 休眠期采样适逢强寒潮,太湖部分湖面存在强冰冻. 复苏期水温逐渐升高,光照条件改善,藻类细胞活性增强,占据在底泥的细胞密度降低,同时上覆水 pH 升高也有利于藻类的生长,藻类适时上浮为水华形成奠定基础. 藻类和微生物消耗溶解氧和生物可利用性磷间接促进底泥释放内源磷. 此外,工农业兴起和降雨量增多易造成沉积物再悬浮引起磷素释放. 以上因素使得复苏期整体上有较高内源磷释放风险.

尽管两时期湖湾多数沉积物位点扮演着磷汇的角色,但湖湾综合营养指数仍然较高,因此在防治湖湾水质污染时,应着重控制内源污染,尤其是沉积物内源磷的污染. 对存在内源磷释放风险的区域(如 S2 和 S4)重点防控,加强对柱状沉积物的监测和研究,通过底泥疏浚和生态修复工程结合湖湾实际情况制定来削减内源磷,对仍然充当汇的区域谨慎采取底泥疏浚方法,外源污染控制仍然不容忽视.

2.5 蓝藻越冬过程中沉积物微生物群落结构分析

2.5.1 沉积物多样性及结构分布特征分析

本研究共收集来自蓝藻越冬过程中蓝藻休眠期和复苏期沉积物表、中、底层的 36 个沉积物样品,

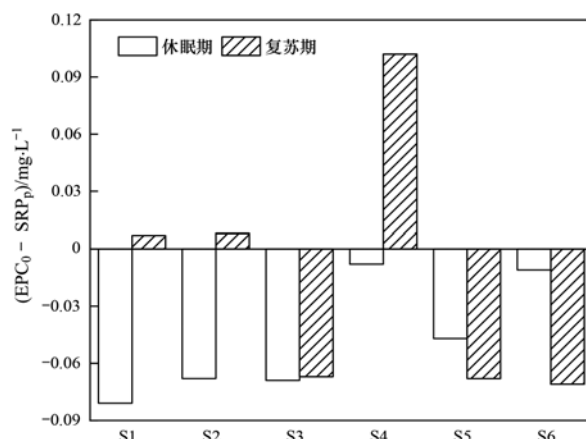
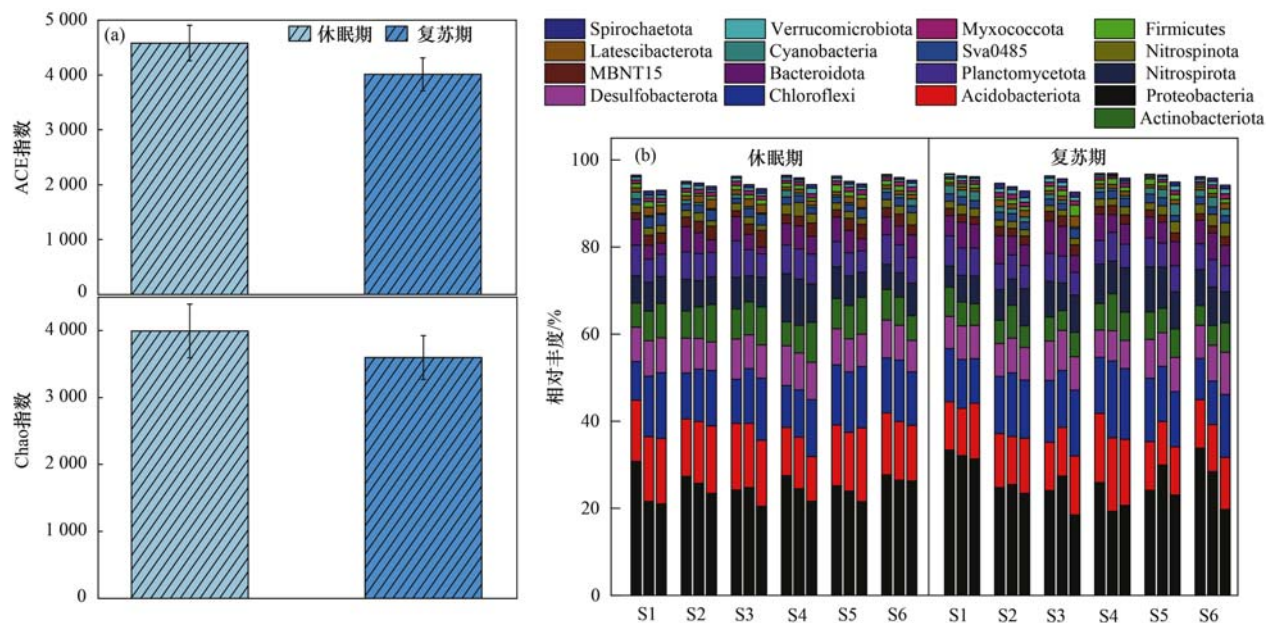


图 8 蓝藻越冬过程中沉积物磷释放风险特征

Fig. 8 Characteristics of phosphorus release risk of sediment during overwinter period of cyanobacteria

序列分析采用 Usearch 和 QIIME 原则,同时采用 UCHIME 演算法选择优质序列. 图 9(a) 显示了来自不同沉积物样品细菌群落多样性指数. 结果表明,蓝藻休眠期沉积物中微生物多样性和丰富度高于复苏期,ACE 和 Chao 指数分别达到 4 580.7 和 3 993.9,这主要是由于休眠期沉积物污染负荷较高所导致.

通过序列控制和择优后,在两个时期的沉积物样品中共分析出 55 个门级别的微生物,图 9(b) 显示了在门级别上的主要物种(相对丰度 >0.1%)分布. Proteobacteria(变形菌门)、Acidobacteria(酸杆菌门)、Chloroflexi(绿弯菌门)、Desulfobacterota(脱硫杆菌门)和 Actinobacteriota(放线菌门)是研究区域沉积物细菌中主要的门分类,所占比例分别为 18.5%~33.8%、10.2%~16.9%、8.9%~15.1%、



(a) 沉积物群落 ACE 和 Chao 指数; (b) 门水平的主要物种分布

图 9 蓝藻越冬过程中沉积物多样性指数和门水平级别上的微生物群落分布

Fig. 9 Diversity indices and microbial community distribution at the phylum level in sediment samples during overwinter period of cyanobacteria

6.2%~9.7%和4.5%~9.2%。Proteobacteria 是大型湖泊沉积物中存在最广泛的细菌,在生物脱氮除磷及有机物降解中发挥重要作用。Chloroflexi 固定 CO_2 参与氮硫等元素生物地球化学循环,薛银刚等^[49]的研究在太湖湖心区检测到其 34.78% 的高丰度,以及 Acidobacteria 通常被认为是指示沉积物污染程度的微生物。Desulfobacterota 是生存在厌氧异养条件下以 SO_4^{2-} 为能源的细菌,其高丰度表征底泥在越冬期的硫循环行为仍然活跃。

两个时期对比,复苏期表层沉积物的 Proteobacteria 相对丰度大于休眠期,这主要是由于复苏期沉积物表面蓝藻活跃,使得大多数细菌群落处于营兼性或专性厌氧及异养生活状态,从而直接导致了该地区的沉积物 Proteobacteria 的相对丰度升高。复苏期各层沉积物的 Acidobacteria 相对丰度普遍高于休眠期,这主要是由于藻类的复苏,导致水体营养状态和 pH 的改变,使得 Acidobacteria 相对丰度升高^[50,51]。结果显示,研究区域相对丰度 >0.1% 的菌门 [Proteobacteria、Actinobacteriota、Bacteroidota (拟杆菌门)和 Firmicutes (厚壁菌门)] 为具有解磷功能微生物门类^[52],而复苏期各层沉积物解磷细菌门类相对丰度 (30.6%~45.53%) 相比休眠期 (31.86%~43.29%) 有所提升,这说明复苏期沉积物的解磷潜力较强,对于水体富营养化的贡献更大。两时期相对丰度 >0.1% 的各层优势菌门在不同时期差异性分析结果显示,表层 Sva0485 差异显著 ($P < 0.05$), Cyanobacteria (蓝细菌门) 差异显著 ($P < 0.05$),底层 Actinobacteriota、Bacteroidota 差异显著 ($P < 0.02$),且都在复苏期丰度更高,这体现了复苏期在微生物介导下内源磷有较强的释放风险。

当沉积物作为磷源时,沉积物中一些具有解磷功能的微生物门类相对丰度升高,微生物活动一方面导致了沉积物-水界面出现氧化还原电位降低,同时将部分有机磷和不溶性无机磷转化成可溶性有机磷,沉积物-水相出现内源磷释放现象,上覆水磷浓度升高,从而降低了沉积物磷库负荷,藻类利用其释放到上覆水的内源磷生长代谢。复苏期的外界环境也有利于沉积物越冬藻类恢复代谢,藻类在一定条件下释放水柱促使 Chl-a 浓度显著增加,使蓝藻进入复苏阶段。此时底泥藻类生理状态改变,藻类恢复代谢释放水柱使上覆水无机磷减少又间接引起沉积物内源磷释放。

2.5.2 沉积物微生物群落环境因子影响分析

对两时期表层沉积物微生物群落结构与水体和沉积物环境因子进行基于向前选择的冗余分析 (RDA),结果如图 10 所示。排序轴 1 和排序轴 2 分

别解释了越冬期底泥细菌群落变异的 50.35% 和 19.23%。第一轴的主要影响因子是 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和 ORP,第二轴的主要影响因子是 SRP、TP(水)、T 和 pH。其中 NO_3^- -N 浓度与第一轴呈显著相关 ($P < 0.05$),说明 NO_3^- -N 是影响越冬期底泥细菌群落结果变异的重要因素。另外,上覆水 SRP、TP(水)、T 和 pH 也均对越冬期底泥细菌群落有一定影响,与文献^[49]的研究结果相似。然而, TN(泥)、TP(泥)和 Chl-a 对越冬期底泥细菌群落影响相对较小。

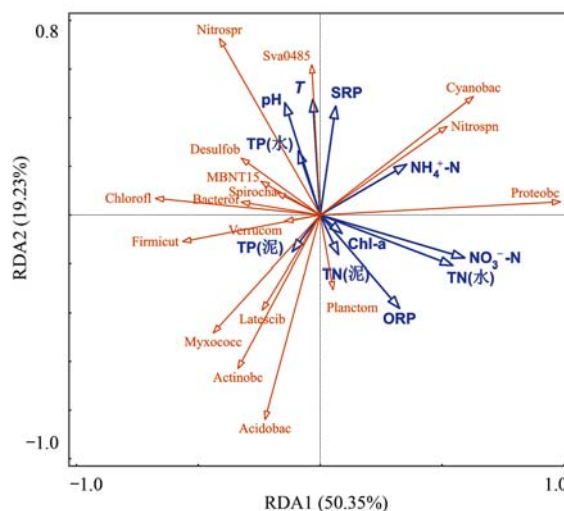


图 10 门水平下表层沉积物 RDA 分析

Fig. 10 RDA analysis of the surface sediments in the phylum of the sediment samples

3 结论

(1) 研究区域两个时期湖湾基本为中度富营养水平,并且水质和沉积物氮磷污染较为严重,低温期 $\rho(\text{Chl-a})$ 仍然处于较高水平。

(2) 准二级动力学模型和修正后的 Langmuir 模型能够分别较好地描述沉积物对磷的动力学和等温吸附行为,沉积物理论最大吸附量 ($Q_{\max}$) 呈现底层 > 中层 > 表层的规律,最高可达 $1.648 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,且底层对磷的吸附速率较高,其准二级动力学模型吸附常数达 $6.292 \text{ g} \cdot (\text{mg} \cdot \text{min})^{-1}$ 。吸附参数 ($Q_{\max}$ 、NAP、 EPC_0) 主要受沉积物自身理化性质 (OM 及铁氧化物含量等) 和湖体营养水平影响。

(3) 休眠期沉积物主要扮演磷“汇”角色,复苏期部分沉积物扮演磷“源”角色。此外,蓝藻在越冬过程中,微生物群落结构发生变化,多样性在蓝藻复苏过程中降低,部分具有解磷功能的微生物门类相对丰度升高, NO_3^- -N 是影响越冬期底泥细菌群落结构变异的重要因子。

参考文献:

- [1] Li X D, Zhang Z Y, Xie Q, et al. Effect of algae on phosphorus immobilization by lanthanum-modified zeolite[J]. Environmental Pollution, 2021, 276, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116713.

- [2] Cao X, Wang Y Q, He J, *et al.* Phosphorus mobility among sediments, water and cyanobacteria enhanced by cyanobacteria blooms in eutrophic Lake Dianchi[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **219**: 580-587.
- [3] Wen S L, Zhong J C, Li X, *et al.* Does external phosphorus loading diminish the effect of sediment dredging on internal phosphorus loading? An in-situ simulation study[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **394**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122548.
- [4] 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.
- [5] 李茂兵, 陆晶, 杨国录. 蓝藻水华研究进展及预防控方法初探[J]. *环境工程*, 2016, **34**(3): 43-47.
Li M B, Lu J, Yang G L. Review of cyanobacteria bloom and a brief study on its preventive and control method [J]. *Environmental Engineering*, 2016, **34**(3): 43-47.
- [6] Ranjbar M H, Hamilton D P, Etemad-Shahidi A, *et al.* Individual-based modelling of cyanobacteria blooms: physical and physiological processes[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **792**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148418.
- [7] Yao Y, Li D J, Chen Y, *et al.* High-resolution distribution of internal phosphorus release by the influence of harmful algal blooms (HABs) in Lake Taihu[J]. *Environmental Research*, 2021, **201**, doi: 10.1016/j.envres.2021.111525.
- [8] 林玉清, 焦聪聪, 施鸿昊, 等. 蓝藻暴发对莫愁湖水体和沉积物营养盐的影响[J]. *环境科学与技术*, 2019, **42**(2): 1-11.
Lin Y Q, Jiao C C, Shi H H, *et al.* Effects of algae blooms on nutrients in the water and sediments of Mochou Lake [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **42**(2): 1-11.
- [9] Zhang L, Huang S Z, Peng X, *et al.* Potential ecological implication of *Cladophora oligoclora* decomposition: characteristics of nutrient migration, transformation, and response of bacterial community structure [J]. *Water Research*, 2021, **190**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116741.
- [10] Chen M S, Ding S M, Chen X, *et al.* Mechanisms driving phosphorus release during algal blooms based on hourly changes in iron and phosphorus concentrations in sediments[J]. *Water Research*, 2018, **133**: 153-164.
- [11] 邓洪, 包立, 杨浩瑜, 等. 蓝藻衰亡下滇池草海沉积物中各形态磷释放动态的模拟研究[J]. *湿地科学*, 2019, **17**(2): 249-254.
Deng H, Bao L, Yang H Y, *et al.* Simulation study on release dynamics of various forms of phosphorus in sediments of Caohai, Dianchi Lake under decline of cyanobacteria [J]. *Wetland Science*, 2019, **17**(2): 249-254.
- [12] 李森. 查干湖低温期内源磷的释放及其对富营养化的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
Li S. Internal phosphorus of Chagan Lake release and impact on eutrophication in low temperature period[D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [13] Maitra N, Manna S K, Samanta S, *et al.* Ecological significance and phosphorus release potential of phosphate solubilizing bacteria in freshwater ecosystems[J]. *Hydrobiologia*, 2015, **745**(1): 69-83.
- [14] 范乐, 华玉妹, 余芬芳, 等. 外源硫酸盐介入下沉积物磷释放、解磷微生物及磷酸酶活性的变化[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(1): 210-218.
Fan L, Hua Y M, Yu F F, *et al.* Effect of external sulfate on phosphorus release, phosphate-solubilizing microorganisms and phosphatase activity in Lake Donghu, Wuhan[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(1): 210-218.
- [15] Huang W, Chen X, Jiang X, *et al.* Characterization of sediment bacterial communities in plain lakes with different trophic statuses [J]. *MicrobiologyOpen*, 2017, **6**(5), doi: 10.1002/mbo3.503.
- [16] 魏烈群, 徐书童, 王效昌, 等. 微生物和硬毛藻对天鹅湖不同湖区沉积物氮磷释放的影响[J]. *生态环境学报*, 2020, **29**(3): 580-588.
Wei L Q, Xu S T, Wang X C, *et al.* Effects of microbial activity on nitrogen and phosphorus release from sediments in different lakes of Swan Lake [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, **29**(3): 580-588.
- [17] 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.
- [18] 王艳平, 徐伟伟, 韩超, 等. 巢湖沉积物氮磷分布及污染评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 699-711.
Wang Y P, Xu W W, Han C, *et al.* Distribution of nitrogen and phosphorus in Lake Chaohu sediments and pollution evaluation [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 699-711.
- [19] 徐鹏飞, 毛峰, 金平斌, 等. 基于GF1_WFV的千岛湖水体叶绿素a浓度时空变化[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(10): 4580-4588.
Xu P F, Mao F, Jin P B, *et al.* Spatial-temporal variations of chlorophyll-a in Qiandao lake using GF1_WFV data [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(10): 4580-4588.
- [20] Ruban V, López-Sánchez J F, Pardo P, *et al.* Development of a harmonised phosphorus extraction procedure and certification of a sediment reference material [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2001, **3**(1): 121-125.
- [21] 宋小君, 李大鹏, 黄勇. 易悬浮和外源输入下原位覆盖对生物有效磷形成的影响[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(1): 205-211.
Song X J, Li D P, Huang Y. Effects of in situ capping on bioavailable phosphorus formation under sediment resuspension and external phosphorus input [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(1): 205-211.
- [22] Osafo N O A, Jan J, Porcal P, *et al.* The effect of organic matter (OM) quality on the redox stability of OM-Fe association in freshwater sediments [J]. *Biogeosciences Discuss*, 2020, doi: 10.5194/bg-2020-296.
- [23] Zhu G R, Yang Y. Variation laws and release characteristics of phosphorus on surface sediment of Dongting Lake [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(13): 12342-12351.
- [24] Xu G, Song J W, Zhang Y, *et al.* Enhancement of phosphorus storage capacity of sediments by coastal wetland restoration, Yellow River Delta, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, **150**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.110666.
- [25] 中国环境监测总站. 湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定(总站生字[2001]090号)[R]. 北京: 中国环境监测总站, 2001.
- [26] 王圣瑞, 金相灿, 赵海超, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物对磷的吸附特征[J]. *环境科学*, 2005, **26**(3): 38-43.
Wang S R, Jin X C, Zhao H C, *et al.* Phosphate adsorption characteristics onto the sediments from shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Environmental Science*, 2005, **26**(3): 38-43.
- [27] 黄威, 刘星, 赵丽, 等. 岱海沉积物内源磷释放特征的研究[J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(9): 2094-2102.
Huang W, Liu X, Zhao L, *et al.* Release characteristics of phosphorus in sediment from Daihai Lake [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(9): 2094-2102.
- [28] 周小宁, 姜霞, 金相灿, 等. 太湖梅梁湾沉积物磷的垂直分布及环保疏浚深度的推算[J]. *中国环境科学*, 2007, **27**

- (4): 445-449.
- Zhou X N, Jiang X, Jin X C, *et al.* Vertical profiles of phosphorus in the sediments of Meiliang Bay of Taihu Lake in China and calculation of environmental dredging depth [J]. *China Environmental Science*, 2007, **27**(4): 445-449.
- [29] Queiroz H M, Ferreira T O, Barcellos D, *et al.* From sinks to sources: the role of Fe oxyhydroxide transformations on phosphorus dynamics in estuarine soils [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, **278**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111575.
- [30] di Toro D M. *Sediment flux modeling* [M]. New York: Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [31] 金相灿, 姜霞, 王琦, 等. 太湖梅梁湾沉积物中磷吸附/解吸平衡特征的季节性变化[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(1): 24-30.
- Jin X C, Jiang X, Wang Q, *et al.* Seasonal changes of P adsorption/desorption characteristics at the water-sediment interface in Meiliang Bay, Taihu Lake, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(1): 24-30.
- [32] Xie F Z, Dai Z L, Zhu Y R, *et al.* Adsorption of phosphate by sediments in a eutrophic lake: isotherms, kinetics, thermodynamics and the influence of dissolved organic matter [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2019, **562**: 16-25.
- [33] 赵海超, 王圣瑞, 张莉, 等. 有机质含量及其组分对洱海沉积物磷吸附-释放影响[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(9): 2346-2354.
- Zhao H C, Wang S R, Zhang L, *et al.* Effect of OM content and constituents on phosphorus adsorption-release of the sediment from Erhai Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(9): 2346-2354.
- [34] Wang S R, Yi W L, Yang S W, *et al.* Effects of light fraction organic matter removal on phosphate adsorption by lake sediments [J]. *Applied Geochemistry*, 2011, **26**(3): 286-292.
- [35] 黄利东. 湖泊沉积物对磷吸附的影响因素研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- Huang L D. Factors affecting phosphorus sorption by lake sediments[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [36] Huang W, Chen X, Wang K, *et al.* Seasonal characteristics of phosphorus sorption by sediments from plain lakes with different trophic statuses[J]. *Royal Society Open Science*, 2018, **5**(8), doi: 10.1098/rsos.172237.
- [37] 揣小明, 杨柳燕, 程书波, 等. 太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 951-957.
- Chuai X M, Yang L Y, Cheng S B, *et al.* Characteristics and influencing factors of phosphorus adsorption on sediment in Lake Taihu and Lake Hulun [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(3): 951-957.
- [38] 王贺, 路敏, 李苓, 等. 中国东海陆架海域柱状沉积物对磷的吸附行为[J]. *海洋湖沼通报*, 2019, (4): 72-80.
- Wang H, Lu M, Li L, *et al.* Behaviors of phosphorus sorption on the core sediments in eastern continental shelf seas of China [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2019, (4): 72-80.
- [39] 肖文娟, 曹秀云, 宋春雷, 等. 太湖不同营养类型湖区沉积物磷的形态与吸附行为的比较[J]. *环境工程学报*, 2015, **9**(7): 3525-3530.
- Xiao W J, Cao X Y, Song C L, *et al.* Comparison of fractions and sorption behaviors of sediment phosphorus between typical zones with different trophic states in Lake Taihu, China [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, **9**(7): 3525-3530.
- [40] Xu D, Ding S M, Sun Q, *et al.* Evaluation of in situ capping with clean soils to control phosphate release from sediments [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **438**: 334-341.
- [41] Yin H B, Han M X, Tang W Y. Phosphorus sorption and supply from eutrophic lake sediment amended with thermally-treated calcium-rich attapulgite and a safety evaluation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, **285**: 671-678.
- [42] 宋佳伟, 徐刚, 张扬, 等. 环渤海芦苇湿地磷的吸附容量及释放风险评估[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 728-733.
- Song J W, Xu G, Zhang Y, *et al.* Phosphorus storage capacity and loss risk in coastal reed wetland surrounding Bohai Sea [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 728-733.
- [43] 顾艳林, 宝冬润, 侯磊, 等. 洱海河口湿地沉积物对磷的吸附特征及影响因素[J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(10): 2358-2368.
- Gu Y L, Bao D R, Hou L, *et al.* Adsorption characteristics and influencing factors of phosphate to sediments in estuarine wetland of Erhai Lake [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(10): 2358-2368.
- [44] 高丽, 侯金枝, 宋鹏鹏. 天鹅湖沉积物对磷的吸附动力学及等温吸附特征[J]. *土壤*, 2013, **45**(1): 67-72.
- Gao L, Hou J Z, Song P P. Characteristics of adsorption kinetics and isotherms of phosphate on sediments in Swan Lake [J]. *Soils*, 2013, **45**(1): 67-72.
- [45] 姜霞, 王秋娟, 王书航, 等. 太湖沉积物氮磷吸附/解吸特征分析[J]. *环境科学*, 2011, **32**(5): 1285-1291.
- Jiang X, Wang Q J, Wang S H, *et al.* Characteristic analysis of the adsorption/desorption of nitrogen and phosphorus in the sediments of Taihu Lake [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(5): 1285-1291.
- [46] 李铭敏, 杨银, 丰桂珍, 等. 江西省不同营养类型湖泊底泥沉积物对磷的等温吸附特征[J]. *江西科学*, 2019, **37**(4): 491-496, 542.
- Li M M, Yang Y, Feng G Z, *et al.* Phosphorus adsorption characteristics in sediments of lakes of different nutritional types in Jiangxi Province [J]. *Jiangxi Science*, 2019, **37**(4): 491-496, 542.
- [47] Matarzyna M, Szwed A, Zablocka M, *et al.* In vitro PAMAM, phosphorus and viologen-phosphorus dendrimers prevent rotenone-induced cell damage [J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2014, **474**(1-2): 42-49.
- [48] 张岩, 李畅游, 高宁, 等. 结冰对乌梁素海水体富营养化的影响[J]. *湖泊科学*, 2017, **29**(4): 811-818.
- Zhang Y, Li C Y, Gao N, *et al.* Effect of freezing on eutrophication in Lake Ulansuhai [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, **29**(4): 811-818.
- [49] 薛银刚, 刘菲, 江晓栋, 等. 太湖不同湖区冬季沉积物细菌群落多样性[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(2): 719-728.
- Xu Y G, Liu F, Jiang X D, *et al.* The diversity of bacterial communities in the sediment of different lake zones of Lake Taihu in winter [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(2): 719-728.
- [50] Jones R T, Robeson M S, Lauber C L, *et al.* A comprehensive survey of soil acidobacterial diversity using pyrosequencing and clone library analyses [J]. *The ISME Journal*, 2009, **3**(4): 442-453.
- [51] Lauber C L, Hamady M, Knight R, *et al.* Pyrosequencing-based assessment of soil pH as a predictor of soil bacterial community structure at the continental scale [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, **75**(15): 5111-5120.
- [52] Kour D, Rana K L, Kaur T, *et al.* Biodiversity, current developments and potential biotechnological applications of phosphorus-solubilizing and -mobilizing microbes: a review [J]. *Pedosphere*, 2021, **31**(1): 43-75.

CONTENTS

Analysis on Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of PM _{2.5} in Henan Province from 2015 to 2019	GE Qi-xu, LIU Yan, YANG Hong, <i>et al.</i>	(1697)
Pollution Characterization, Source Identification, and Health Risks of Atmospheric Particle-Bound Heavy Metals in PM _{2.5} in Zhengzhou City: Based on High-resolution Data	QU Guang-hui, SUN Jun-ping, WANG Shen-bo, <i>et al.</i>	(1706)
Source Analysis and Composition Characteristics of Water-soluble Ions During Spring Festival in Ningbo	YANG Meng-rong, PAN Yong, HUANG Zhong-wen, <i>et al.</i>	(1716)
Characteristics of Nitroaromatic Compounds in PM _{2.5} in Urban Area of Shanghai	ZHUANG Min, MA Ying-ge, CHENG Yu-huang, <i>et al.</i>	(1725)
Characteristics and Sources of Nitrated Phenols in Atmospheric Fine Particles of Northern Suburban Nanjing	CHEN Mei-juan, QIAN Zi-he, GU Chen-juan, <i>et al.</i>	(1738)
Variety of the Composition and Sources of VOCs During the Spring Festival and Epidemic Prevention in the Pearl River Delta	JIANG Ming, YUAN Luan, WEN Li-rong, <i>et al.</i>	(1747)
Speciated Emission Inventory of VOCs from Industrial Sources and Their Ozone Formation Potential in Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, FANG Wei-kai, <i>et al.</i>	(1756)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics and Influences Assessment of a Petrochemical Industrial Park in the Pearl River Delta Region	ZHANG Xue-chi, SHA Qing-e, LU Meng-hua, <i>et al.</i>	(1766)
Characteristics and Source Apportionment of Vehicular VOCs Emissions in a Tunnel Study	LIU Xin-hui, ZHU Ren-cheng, JIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1777)
Accurate Identification of Pollution Sources in a Chemical Enterprise Based on a Distributed Multi-channel VOCs Online Monitoring Mass Spectrometry System	WEI Xiao, ZHANG Yong-jie, WANG Pei-tao, <i>et al.</i>	(1788)
Coordinated Control of PM _{2.5} and O ₃ in Hangzhou Based on SOA and O ₃ Formation Potential	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i>	(1799)
Effect of WESP on Emission Characteristics of Condensable Particulate Matter from Ultra-low Emission Coal-fired Power Plants	WANG Peng-cheng, YUAN Chang, LIANG Sheng-wen, <i>et al.</i>	(1808)
Measurement Analysis and Superposed Effect of Residential Indoor Air Pollutants in Xi'an	WANG Xiu-ru, FAN Hao, FAN Jie, <i>et al.</i>	(1814)
Occurrence of Atmospheric (Micro)plastics and the Characteristics of the Plastic Associated Biofilms in the Coastal Zone of Dalian in Summer and Autumn	TU Chen, TIAN Yuan, LIU Ying, <i>et al.</i>	(1821)
Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emissions from Poultry Farming in the Yangtze River Delta Based on Online Monitoring Derived Local Emission Factors	GAO Zong-yuan, XU Chang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	(1829)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Distribution in Xining City	YANG Yi, JI Ya-qin, GAO Yu-zong, <i>et al.</i>	(1844)
Analysis of the Urban Water Eco-environment Protection Strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from "Three Waters" Overall Planning	LIAO Ya, HOU Xiao-shu, REN Xiao-hong	(1853)
Non-carcinogenic Risk Assessment of Cadmium Exposure Through Drinking Water in Chinese Residents Based on Age-stratification Weight	QIN Ning, Ayibota Tuexunbieke, LIU Yun-wei, <i>et al.</i>	(1863)
Hydrochemical Characteristics and Transformation Relationship of Surface Water and Groundwater in the Plain Area of Bortala River Basin, Xinjiang	LEI Mi, ZHOU Jin-long, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1873)
Hydrochemical Composition Characteristics and Control Factors of Xiaohuangni River Basin in the Upper Pearl River	TU Chun-lin, YIN Lin-hu, HE Cheng-zhong, <i>et al.</i>	(1885)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Driving Factors of Nitrogen of Shallow Groundwater in Hetao Irrigation District	YUAN Hong-ying, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i>	(1898)
Provenance of Groundwater Solute and Its Controlling Factors in Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i>	(1908)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics of Different Water and Indicative Significance in Baiyangdian Lake	WANG Yu-shan, YIN De-chao, QI Xiao-fan, <i>et al.</i>	(1920)
Optical Composition and Potential Driving Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Large Lakes and Reservoirs in the Eastern Region of China	CHEN Li-li, XIAO Qi-tao, YU Xiao-qin, <i>et al.</i>	(1930)
Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Songhua Lake Sediment	CHENG Yun-xuan, ZHAO Ke, ZHANG Yue, <i>et al.</i>	(1941)
Abundance and Fluorescent Components of Dissolved Organic Matter Affected by Land Use in a Drinking Water Source	GAO Jing, PU Xiao, ZHANG Yu-hu, <i>et al.</i>	(1950)
Emission of Methane from a Key Lake in the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project and the Corresponding Driving Factors	ZHU Jun-yu, PENG Kai, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(1958)
Distribution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Surface Water of Qiandao Lake, China	MI Qi-xin, GUO Xiao-chun, LU Shao-yong, <i>et al.</i>	(1966)
Phosphorus Adsorption Characteristics and Loss Risk in Sediments of Lake Bay During the Overwinter Period of Cyanobacteria	JIN Zheng-hai, TU Cheng-qi, WANG Shu-hang, <i>et al.</i>	(1976)
Ecological Quality Assessment of the Wetlands in Beijing: Based on Plant Diversity	LI Guo, SUN Guang, ZHAO Zi-yi, <i>et al.</i>	(1988)
Effects of Pollution Control of Xiaqing River on Environment Factors and Phytoplankton Community in the Laizhou Bay	ZHANG Jing-jing, WANG Yu-jue, LI Fan, <i>et al.</i>	(1997)
Effects of Different Aeration Treatments on Bacterial Diversity, Metabolic Activity, and Function in Constructed Wetlands	WANG Fei-peng, HUANG Ya-ling, ZHANG Rui-rui, <i>et al.</i>	(2007)
Analysis on the Source Tracing and Pollution Characteristics of Rainfall Runoff in the Old Urban Area of Nanning City	YUE Zhen-wu, LI Yi-ping, ZHOU Yu-xuan, <i>et al.</i>	(2018)
Effects of Aging on the Cd Adsorption by Microplastics and the Relevant Mechanisms	WANG Jun-jie, CHEN Xiao-chen, LI Qian-da, <i>et al.</i>	(2030)
Carbonized Foam Supported Co ₃ O ₄ Activated Peroxymonosulfate Towards Rhodamine B Degradation	WANG Yuan-yuan, YAN Xin, AI Tao, <i>et al.</i>	(2039)
Promoting Nitrogen Removal in ANAMMOX Biofilm Reactor by Fe ²⁺ Under Low Nitrogen Concentration	ZHENG Xu-wen, QIN Jia-fu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i>	(2047)
Investigation on Oxygen Gas-liquid Mass Transfer in Sewage Pipelines Under Enhanced Ventilation	YANG Zhou, ZHANG Zhi-qiang, YANG Jing, <i>et al.</i>	(2055)
Characteristics and Assessment of Heavy Metal Contamination in Soils of Industrial Regions in the Yangtze River Economic Belt	ZHANG Yi, ZHOU Xin-quan, ZENG Xian-min, <i>et al.</i>	(2062)
Distribution and Environmental Significance of Rare Earth Elements in Typical Protected Vegetable Soil, Northern China	WANG Zu-wei, LIU Ya-ming, WANG Zi-lu, <i>et al.</i>	(2071)
Sources Identification, Ecological Risk Assessment, and Controlling Factors of Potentially Toxic Elements in Typical Lead-Zinc Mine Area, Guizhou Province, Southwest China	ZHANG Fu-gui, PENG Min, HE Ling, <i>et al.</i>	(2081)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils Affected by Different Land Use Types in a Superimposed Pollution Area with High Geological Background	WANG Xue-wen, LIU Hong-yan, GU Xiao-feng, <i>et al.</i>	(2094)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Areas and Pollution Assessment	WANG Hai-yang, HAN Ling, XIE Dan-ni, <i>et al.</i>	(2104)
Concentration Characteristics of Heavy Metals in Farmland-Sphagnum System and Ecological Risk Assessment	ZHU Di, ZHANG Zhao-hui, WANG Zhi-hui	(2115)
Spatial Variation and Influencing Factors of Soil pH in Anshun City	CHEN Qing-xia, LU Xiao-hui, TU Cheng-long	(2124)
Synergistic Repair Effect of Calcite-Based Passivator and Low-Accumulation Maize	REN Chao, REN Yu-zhong, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(2133)
Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 on Cadmium Damage and Uptake in Rice Seedlings	ZHANG Ya-hui, LIU Yue-min, WANG Chang-rong, <i>et al.</i>	(2142)
Changing Characteristics of Carbon-Based Greenhouse Gas Fluxes in Paddy Field in the Middle-Lower Yangtze Plain in China	LIU Shuo, ZHEN Xiao-jie, LIU Gang, <i>et al.</i>	(2151)
Effects of Plastic Film Mulching and Biochar Application on N ₂ O Emission from a Vegetable Field	HU Jian, JIANG Chang-sheng, CHEN Xin-tong, <i>et al.</i>	(2163)
Effects of Nitrogen Fertilizer Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Paddy Field	ZHENG Mei-qun, LIU Juan, JIANG Pei-kun, <i>et al.</i>	(2171)
Structure and Functional Diversity of Bacterial Community in Rhizosphere Soil of Typical Vegetation in the Riparian Zone Along the Downstream of Songhua River	WANG Lu-ying, SUN Hui-zhen, YANG Xue	(2182)
Effects of Cotton Stalk Returning on Soil Enzyme Activity and Bacterial Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Saline Water Irrigation	ZHOU Yong-xue, CHEN Jing, LI Yuan, <i>et al.</i>	(2192)
Effect of pH on the Abundance and Community Structure of Comammox <i>Nitrospira</i> in Paddy Soils	MA Rui, ZHAO Yong-peng, WANG Zhi-hui, <i>et al.</i>	(2204)
Effects of Biochar on Soil Organic Carbon of Eroded Cultivated Layer of Slope Farmland in Purple Hilly Area	ZHANG Jian-le, ZENG Xiao-ying, SHI Dong-mei, <i>et al.</i>	(2209)
Effects of Organic Fertilizer Replacing Chemical Fertilizer on Organic Carbon Mineralization and Active Organic Carbon in Dryland Yellow Soil	LIN Shi-fang, WANG Xiao-li, DUAN Jian-jun, <i>et al.</i>	(2219)
Soil Organic Carbon Storage, Active Component Contents, and Stability Along a Flooding Gradient in the Tidal Wetland of the Jiulong River Estuary	HUANG Xiao-qing, TONG Chuan, LUO Min, <i>et al.</i>	(2226)
System Construction and the Function Improvement of Ecological Carbon Sink in Coal Mining Areas Under the Carbon Neutral Strategy	LIU Xiang-hong, YAN Yong-jun, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2237)