

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.8

第40卷 第8期

目次

2016年京津冀地区红色预警时段PM _{2.5} 污染特征与浓度控制效果	张冲, 郎建奎, 程水源, 王晓琦 (3397)
北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析	徐冉, 张恒德, 杨孝文, 程水源, 张天航, 江琪 (3405)
合肥市PM _{2.5} 和PM ₁₀ 中元素组成特征及重污染成因分析	刘可可, 张红, 刘桂建 (3415)
濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析	陈楚, 王体健, 李源昊, 马红磊, 陈璞琰, 王德羿, 张元勋, 乔琦, 李光明, 王文红 (3421)
关中地区细颗粒物碳组分特征及来源解析	康宝荣, 刘立忠, 刘煥武, 李养养, 艾双双, 曹宁, 雷颖 (3431)
长春季细颗粒物中有机气溶胶组成特征及来源	吴瑕, 曹芳, 翟晓瑶, 范美益, 张世春, 章炎麟 (3438)
中国城市扩张及空间特征变化对PM _{2.5} 污染的影响	王桂林, 张炜 (3447)
不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂PM _{2.5} 排放的影响	邓建国, 马子珍, 李振, 段雷, 蒋靖坤 (3457)
浙江省合成革行业挥发性有机物污染特征及排放系数	徐佳琦, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 姚轶 (3463)
生活垃圾填埋场细菌气溶胶粒径分布及种群特征	马嘉伟, 杨凯雄, 柴风光, 王莹, 郭雪松, 李琳 (3470)
青岛近海生物气溶胶中总微生物的分布特征	官静, 祁建华, 李鸿涛 (3477)
广州饮用水水源地多环芳烃分布、来源及人体健康风险评价	宋玉梅, 王畅, 刘爽, 潘佳钊, 郭鹏然 (3489)
截污调水后滇池表层沉积物中16种PAHs的分布特征	胡昕怡, 高冰丽, 陈坦, 王洪涛, 金军, 饶竹, 朱雪芹, 王雪郡, 魏抱楷, 战楠, 刘彦廷, 戚敏 (3501)
黄河三角洲石油开采区盐渍化农田土壤多环芳烃的分布特征与源解析	邱慧, 刘月仙, 解小凡, 张萌, 王伟 (3509)
风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响	余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 权秋梅, 许海, 朱梦圆, 丁文浩, 李未, 吴挺峰 (3519)
向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应	王耀耀, 吕林鹏, 纪道斌, 方海涛, 朱晓声, 张庆文, 霍静, 何金艳 (3530)
外源输入对底泥疏浚新生表层磷恢复及迁移的影响	李鑫, 耿雪, 王洪伟, 龚琬晴, 文帅龙, 钟继承, 李大鹏 (3539)
新疆喀什三角洲地下水SO ₄ ²⁻ 化学特征及来源	魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (3550)
黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析	李洲, 李晨曦, 华琨, 李志 (3559)
北京市河流秋季浮游动物群落特征分析	王海邻, 刘玉飞, 任玉芬, 贺玉晓, 王思琪, 张红星, 王效科, 李紫鑫 (3568)
三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系	刘黎, 贺新宇, 付君珂, 杨燕君, 米文梅, 施军琼, 吴忠兴 (3577)
渭河流域水体细菌群落的环境响应及生态功能预测	万甜, 何梦夏, 任杰辉, 闫幸幸, 程文 (3588)
汾河下游水体nirS型反硝化细菌群落组成与无机氮关系	汪银龙, 冯民权, 董向前 (3596)
饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析	胡万超, 赵琛, 王巧娟, 刘锐平, 柏耀辉 (3604)
基于污水厂污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶水质控制效果	彭航宇, 李田, 齐悦, 何云鹏, 黄楚玉, 张卓然 (3612)
植被对绿色屋顶径流量和水质影响	章孙逊, 张守红, 张英, 吴思婷 (3618)
光催化/活性炭/纳滤组合工艺处理二级出水及对膜污染的控制	范科文, 李星, 杨艳玲, 周志伟 (3626)
多种材料对水中氨氮的吸附特性	焦巨龙, 杨苏文, 谢宇, 金位栋, 闫玉红, 徐彬 (3633)
不同氨氮浓度对4株常见藻株生长及酶活性的影响	常婷, 许智慧, 程鹏飞, 徐继林, 周成旭 (3642)
3种基质材料对高浓度养殖废水处理效果及降解过程	刘铭羽, 夏梦华, 李远航, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 李裕元, 吴金水 (3650)
铝污泥酸化提取液改性沸石的除磷特性及机制	韩芸, 胡玉洁, 连洁, 杨思哲, 齐泽宁 (3660)
缺氧MBBR耦合部分厌氧氨氧化强化城市生活污水深度脱氮	杨岚, 彭永臻, 李健伟, 高锐涛, 王茗, 李夕耀 (3668)
连续流系统中好氧段及沉淀段对污泥及其缺氧段脱氮能力的影响	薛欢婷, 袁林江, 刘小博, 孙恒锐 (3675)
FeS自养反硝化与厌氧氨氧化的耦合脱氮机制	马景德, 潘建新, 李泽敏, 王一显, 吴海珍, 韦朝海 (3683)
ANAMMOX体系中氨与硫酸盐的同步转化条件	董石语, 毕贞, 张文静, 黄勇 (3691)
全国城市污水处理厂中微生物群落的溯源分析	张冰, 吴林蔚, 文湘华 (3699)
不同溶解氧浓度下硝化工艺中微生物种群结构对比	刘文如, 顾广发, 宋小康, 杨殿海 (3706)
异养硝化细菌Acinetobacter junii NP1的同步脱氮除磷特性及动力学分析	杨奎, 陈宁, 任勇翔, 崔坤, 汪旭晖, 肖倩, 郭淋凯 (3713)
Type 0092丝状菌污泥微膨胀在短程硝化中的实现	高春娣, 安冉, 韩徽, 张娜, 任浩, 赵楠, 焦二龙, 彭永臻 (3722)
高盐高碱环境下硝化反硝化过程及N ₂ O产生特征	代伟, 赵剑强, 丁家志, 刘双 (3730)
生物炭对盐碱土壤氨挥发的影响	王一字, 王圣森, 戴九兰 (3738)
两种土壤增效剂对稻田氨挥发排放的影响	周玉玲, 侯朋福, 李刚华, 王绍华, 杨林章, 薛利红, 丁艳锋 (3746)
承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征	孙厚云, 卫晓峰, 甘凤伟, 王恒, 何泽新, 贾凤超, 张竞 (3753)
厦门某旱地土壤垂直剖面中重金属迁移规律及来源解析	张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (3764)
宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析	张军, 董洁, 梁青芳, 杨宁宁, 耿雅妮 (3774)
铁铈氧化物对土壤As(V)和P的稳定化效果	林龙勇, 阎秀兰, 杨硕 (3785)
铁锰氧化物在不同水分条件下对土壤As的稳定化作用	周海燕, 邓一荣, 林龙勇, 曹梦华, 钟立荣 (3792)
生物质炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响	刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 沈健林, 吴金水 (3799)
有机物料对紫色土微生物量碳、氮及氮素供应的影响	汪月, 张名豪, 赵秀兰 (3808)
土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响	罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 高明 (3816)
宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响	高涵, 肖礼, 牛丹, 倪银霞, 黄懿梅 (3825)
不同浸提剂条件下生物炭吸附性有机物的浸出规律	何品晶, 张昊昊, 仇俊杰, 邵立明, 吕凡 (3833)
基于成组生物毒性测试的PM _{2.5} 毒性	江晓栋, 薛银刚, 魏永, 许霞, 刘菲, 薛柯, 施昕澜, 顾铭 (3840)
《环境科学》征订启事 (3587)	
《环境科学》征稿简则 (3595)	
信息 (3611, 3705, 3745)	

外源输入对底泥疏浚新生表层磷恢复及迁移的影响

李鑫^{1,2}, 耿雪¹, 王洪伟², 龚琬晴², 文帅龙², 钟继承^{2*}, 李大鹏^{1*}

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215011; 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)

摘要: 外源输入对底泥疏浚新生表层磷恢复及迁移转化的影响尚不清楚, 阐明该问题对于底泥疏浚实施后流域尺度上的外源控制及管理具有重要的意义. 本研究以太湖梅梁湾沉积物为研究对象, 采用野外原位模拟疏浚的方法研究在有外源颗粒物输入条件下, 疏浚前后新生泥水界面磷的迁移转化过程, 并探讨疏浚对内源磷释放的控制效果. 结果表明, 疏浚后阻止外源颗粒物输入对沉积物总磷 (TP) 和总氮 (TN) 的控制产生着积极的影响; 疏浚显著降低了表层沉积物潜在可移动磷的含量, 有外源颗粒物输入组潜在可移动态磷 (Mobile-P) 含量显著高于无外源组, 变化的 Mobile-P 以铁结合态磷 (Fe-P) 为主, 有机磷 (Org-P) 次之, 弱结合态磷 (Lb-P) 含量较低不足总磷的 1%; 实验 210d 后, 有外源颗粒物输入疏浚组间隙水 PO_4^{3-} -P 浓度低于未疏浚组, 无外源疏浚组显著低于未疏浚组 ($P < 0.05$); 无外源疏浚组间隙水 PO_4^{3-} -P 浓度保持着较低的水平, 其余组间隙水中 PO_4^{3-} -P 浓度呈现先增加后减小的趋势, 间隙水 PO_4^{3-} -P 浓度与其对应分层沉积物中 Fe-P 含量显著正相关; 冬春季间沉积物的源-汇功能发生了转变, 沉积物对上覆水由汇转变成成为源; 疏浚措施降低了底泥内源磷释放速率, 可有效控制其内源磷释放, 阻止外源颗粒物输入对疏浚控制内源磷负荷起到了较好的促进作用.

关键词: 太湖; 疏浚; 泥水界面; 磷; 外源颗粒物输入

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)08-3539-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201901222

Effects of Exogenous Inputs on Phosphorus Recovery and Transport in Newborn Surface Layers from Sediment Dredging

LI Xin^{1,2}, GENG Xue¹, WANG Hong-wei², GONG Wan-qing², WEN Shuai-long², ZHONG Ji-cheng^{2*}, LI Da-peng^{1*}

(1. School of Environment Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Science, Nanjing 210008, China)

Abstract: The effect of external pollution inputs on phosphorus recovery, transport, and transformation in newborn surface layers from sediment dredging remains unclear. Clarifying this issue is important for the control and management of external pollution loads at the watershed scale, particularly after the implementation of sediment dredging activities. In this study, sediments in Meiliang Bay of Lake Taihu were investigated. In-situ dredging simulation was used to study the transport and transformation of phosphorus at the sediment-water interface, before and after dredging, with either external or non-external particulate matter inputs, and to explore the effect of dredging on phosphorus release as part of internal loading. The results showed that limiting the inputs of external particulate matter and dredging had positive impacts on the control of TP and TN in the sediments. Dredging significantly reduced the content of potentially mobile phosphorus (Mobile-P) in surface sediments. Iron-bound phosphorus (Fe-P) was the first main component of the reduced Mobile-P and Organic phosphorus (Org-P) was the second. The content of Loose-bound phosphorus (Lb-P) was less than 1% of the total phosphorus. After 210 days of the experiment, the concentration of PO_4^{3-} -P in the pore water of the dredged treatment was lower than that of the undredged treatment, and this difference was more pronounced without external particulate matter input. Furthermore, the concentration of PO_4^{3-} -P in the pore water of the dredged treatment (without external particulate matter input) was maintained at a low level, while this first increased and then subsequently decreased for the other treatments. The concentrations of PO_4^{3-} -P in pore water were positively correlated with Fe-P in the corresponding sediment layers. Source-sink transition took place between winter and spring, leading to the switch in sediment functioning as a sink to a source. The results indicated that dredging could reduce the release rate of internal phosphorus from sediments. Furthermore, limiting the input of external particulate matter plays an important role in facilitating the control of internal phosphorus loading by dredging.

Key words: Taihu Lake; dredging; sediment-water interface; phosphorus; external particulate matter input

水体沉积物作为自然界水生生态系统的重要组成部分, 既是水体污染物的“汇”, 亦是水环境污染潜在的“源”, 沉积物是磷元素在水生生态系统中迁移转化的载体, 在磷的地球化学循环中扮演着重要的角色^[1]. 沉积物-水界面是环境沉积相与水相间的转换区, 是溶解性物质在地球化学循环与生物

体系间进行耦合作用的最初场所, 也是水生生态系

收稿日期: 2019-01-25; 修订日期: 2019-03-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41771516, 51778393)

作者简介: 李鑫 (1994 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊生态环境与污染修复, E-mail: xlsjk@sina.cn

* 通信作者, E-mail: jczhong@niglas.ac.cn; ustldp@163.com

统物质循环不可或缺的环节^[2]。当湖泊环境中氧化还原电位、溶解氧含量、温度和微生物作用等条件发生改变时,均会引起赋存于沉积物中的磷污染物向水体释放。

底泥疏浚是沉积物污染修复的有效手段之一,因能通过去除富含污染物的表层沉积物来控制污染物的释放或减少污染物生物有效性而被广泛应用^[3]。底泥疏浚后新生表层与疏浚前表层沉积物相比,沉积物的物理、化学和生物的性质都发生了根本的变化^[4, 5],从而对沉积物中生源要素的循环过程产生重要的影响^[6]。许多研究已经对底泥疏浚所产生的环境效应问题进行了评价^[7, 8],底泥疏浚对内源负荷的控制并不都是成功的^[9, 10]。由于底泥疏浚效果受到多种因素的干扰,因而其控制效果饱受争议,主要影响因素包括疏浚过程中底泥的再悬浮、疏浚工程残留污染底泥、新生表层底泥污染物的释放以及外源污染物的持续汇入等^[11],其中,外源颗粒物的汇入对疏浚效果影响最大^[12]。悬浮颗粒物因其粒径小、比表面积大而极易吸附污染物质,颗粒物所吸附的污染物活性较大^[13, 14],在疏浚新生表层的长期累积会导致泥水界面污染的再恢复,使其重新成为湖泊的内源污染。

关于底泥疏浚对磷的控制效应及机制有学者已经开展了一些研究^[15~18],但这些研究通常是在实验室内进行的疏浚模拟实验,事实上室内的疏浚模拟实验不能完全模拟湖泊原位的环境条件,而且这些研究大多没有顾及到疏浚后外源颗粒物的输入对沉积物-水界面磷的迁移转化产生何种影响。根据现状,本文以太湖梅梁湾河口湖区污染沉积物为研究对象,采用野外原位疏浚模拟实验,分析疏浚后新生表层磷的迁移转化过程以及外源输入条件下对其的影响,探讨疏浚对内源磷释放的控制效果,以期对湖泊疏浚工程决策及疏浚后流域尺度上的外源控制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究点概述

太湖作为我国的第三大淡水湖泊,在整个流域的蓄洪、水产养殖、旅游及水资源供给等方面发挥着重要作用^[19]。本研究采样点(31°31′33.9″N, 120°12′35.2″E)位于太湖北部梅梁湾近鼋头渚风景区,研究湖区是无锡城市供水的重要水源地,但也是太湖富营养化最严重的湖湾之一。梅梁湾北通梁溪河,西接直湖港与武进港,其中,直湖港是太湖污染物汇入量最大的入湖河流之一,梁溪河横贯无锡市区,是城市生活污水等的主要输出路径^[20]。太湖流

域经济的高速发展,城市生活污水及工农业污废水等排入湖体,致使水体水质恶化,污染物于底泥大量蓄积,对饮用水源地水质安全构成严重威胁。

1.2 样品采集及预处理

本研究沉积物样品于2018年1月在太湖梅梁湾内湾采集(图1)。沉积物柱样利用大口径柱状采样器($\varphi 90\text{ mm} \times 500\text{ mm}$)采集,实验共采集42根泥柱,其中一半柱样用绞吸泵吸除表层30 cm,制作成模拟疏浚30 cm柱样(根据太湖梅梁湾实际疏浚深度确定),采用上顶法将表层20 cm沉积物移入有机玻璃管内($\varphi 90\text{ mm} \times 200\text{ mm}$),此部分为疏浚柱样,其余柱样直接利用上顶法制成未疏浚柱样。在部分未疏浚与疏浚柱样上覆800目筛绢(每隔30 d进行筛绢的更换),可有效阻绝悬浮颗粒物的进入,另外,利用悬浮颗粒物捕获器(8个口径为6 cm,高度为15 cm玻璃瓶)在柱样采集点原位采集悬浮颗粒物用于实验的相关研究。本实验共设置4个处理组:①U,无外源颗粒物输入的未疏浚柱样;②D,无外源颗粒物输入的疏浚柱样;③U+S,有外源颗粒物输入的未疏浚柱样;④D+S,有外源颗粒物输入的疏浚柱样。经处理后的柱样重新置于太湖湖泊生态系统研究站(太湖站)所在湖体还原真实湖泊环境,以实现湖泊原位培养效果。在实验开始后的第1、30、75和210 d分别采集已预处理的沉积物柱样(3个平行),送回实验室后进行静态释放实验及间隙水采集,然后将表层4 cm沉积物以1 cm间隔进行分层,其余以2 cm间隔分层。分层的样品待完全冷却后经冷冻干燥并利用玛瑙研钵研磨过100目尼龙筛后待测。

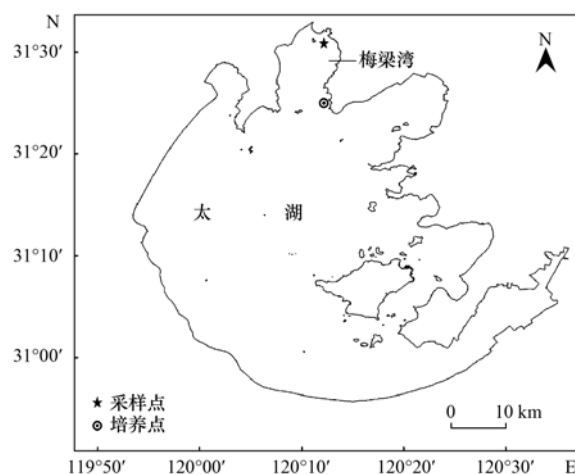


图1 太湖采样/培养点位示意

Fig. 1 Sampling sites and in-situ experimental locations in Taihu Lake

1.3 间隙水采集

将湖泊原位培养的各个处理柱样取出后迅速无

扰动地运回实验室, 原位采集间隙水采用根据渗透平衡原理建立的高分辨率 Peeper 技术^[21]. Peeper 装置由 30 个小室组成 (30 mm × 2.5 mm × 2 mm), 相邻小室中心间隔 4 mm^[22], 两侧覆盖 0.45 μm 硝酸纤维膜, 室内封装去离子水, 将 Peeper 装置浸没于封闭的去离子水桶中充 N₂ 约 1 h 后将其垂直插入不同处理的沉积物柱样中, 待膜两侧可溶性离子与分子交换达到平衡后 (约 48 h) 取出 Peeper 装置, 利用移液枪穿孔孔抽取适量间隙水进行元素分析^[23].

1.4 静态培养实验

将湖泊原位培养的各个处理柱样取出后迅速无扰动地运回实验室, 通过静态培养实验探究底泥内源磷的释放情况, 在实验室条件下, 利用虹吸法将有机玻璃柱中柱状泥样上覆水缓速抽去, 再利用虹吸法沿管壁小心滴注已过滤好的采样点原位底泥上覆水, 缓速滴加直至液面距泥水界面 20 cm 处停止, 标注刻度, 所有柱状样均竖直置于固定铁架内, 放入循环水浴恒温器中并设定与野外采样时湖泊水体温度一致, 蔽光敞口培养, 此外利用空调调节实验室温度使其也保持一致. 取样时间设定为 0、12、24、36、48、60 和 72 h, 每次取样在水柱中部抽取的体积为 50 mL, 取样结束后需加入过滤好的采样点原位底泥上覆水 50 mL 至标注刻度, 并用 0.45 μm 玻璃纤维滤膜 (Whatman GF/C) 抽滤后作相关分析. 底泥中 PO₄³⁻-P 的释放通量计算公式如下^[24]:

$$F = \frac{V(c_n - c_0) + \sum_{j=1}^n V_{j-1}(c_{j-1} - c_a)}{At}$$

式中, F 为释放通量, $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$; V 为上覆水体积, L; c_n 、 c_0 和 c_{j-1} 分别为第 n 次、初始和第 $j-1$ 次采样时某物质的质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; c_a 为水样中所添加物质的质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; V_{j-1} 为第 $j-1$ 次采样体积, L; A 为泥水界面面积, m^2 ; t 为释放时间, d.

1.5 样品分析方法

沉积物中总磷 (TP) 的测定采用过硫酸钾消解法^[25], 总氮 (TN) 的测定采用碱性过硫酸钾氧化法^[26]; 根据 Rydin 法^[27] 测定磷形态, 分级提取得到的磷形态包括弱结合态磷 (Lb-P)、铁结合态磷 (Fe-P)、铝结合态磷 (Al-P)、有机磷 (Org-P)、钙结合态磷 (Ca-P) 和残渣态磷 (Res-P), 可移动磷 (Mobile-P) 为 Lb-P、Fe-P 和 Org-P 的总和.

间隙水中 PO₄³⁻-P 浓度的测定在 96 孔板酶标仪 (Biotek Epoch, Winooski, VT, USA) 中进行. 静态释放实验水样采用流动注射分析仪 (SKALAR

SANPLUS, 荷兰) 分析测定.

1.6 数据分析与统计

应用 Origin 8.0 和 ArcGIS 10.2 软件进行本研究相关图形的绘制, 并应用 SPSS 22.0 软件对本研究中相关实验数据进行统计分析 & 处理.

2 结果与讨论

2.1 表层沉积物营养盐特征

从表层沉积物 TP、TN 含量的垂向分布来看 (图 2 和图 3), 原始沉积物柱样表层 TP 含量为 544.91 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 处于中度污染状态, 有研究表明, 当湖泊沉积物中 TP 含量超过 500 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 通常表明此污染程度应加以疏浚措施^[28], 疏浚 30 d 后效果较为显著, 疏浚组较未疏浚组表层 2 cm 沉积物 TP 含量均有大幅降低, 有外源组与无外源组分别由 555.94 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、568.68 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降至 364.17 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、353.45 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 降比分别达到了 35% 和 38%, TN 含量也由 1608.76 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、1989.09 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 分别降至 1378.52 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、1261.52 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 降比分别达到了 15% 和 37%, 无外源组较有外源组的 TP、TN 含量下降比大; 实验 75 d 后发现, 有外源组表层含量高于无外源组, 且其各自疏浚组较未疏浚组含量的降比也是同样的规律; 实验 210d 后, 疏浚对 TP 和 TN 保持着较好的控制效果, 有无外源组 TP 降比依然可分别达到 39% 和 32%, TN 降比为 45% 和 5%, 在无外源输入的条件下 TP 和 TN 含量均有一定的降低, 但经疏浚处理后其效果更加显著, 因而疏浚后阻止外源颗粒物输入对沉积物 TP 和 TN 的控制产生着积极的影响. 在有外源输入的条件下, 夏季表层沉积物 TP、TN 含量要高于冬春季, 夏季雨水充沛, 湖区周围耕地化肥的施用, 旅游活动频繁, 生活污水和农业面源污染等因素都会使得湖泊中氮磷含量的增加.

2.2 沉积物磷形态变化

从沉积物磷形态分布可看出 (图 4), 经疏浚后, 表层沉积物可移动磷 (Mobile-P) 含量显著降低, 自实验开始至 75 d, 表层 2 cm 沉积物中 Mobile-P 含量降比均可达 38% 以上, 有无外源组 Mobile-P 含量变化较为相似; 至 210 d, D + S 和 D 组较 U + S 和 U 组可移动磷含量降比分别高达 60% 和 60%, U + S 和 D + S 组较 U 和 D 组 Mobile-P 含量高, 其疏浚组与未疏浚组含量分别增加了 64% 和 64%, 原因是外源沉降的悬浮颗粒物中 Mobile-P 含量明显高于表层沉积物, 颗粒的沉降增加了其表层 Mobile-P 含量.

由图 5 发现, 变化的 Mobile-P 含量以 Fe-P 为

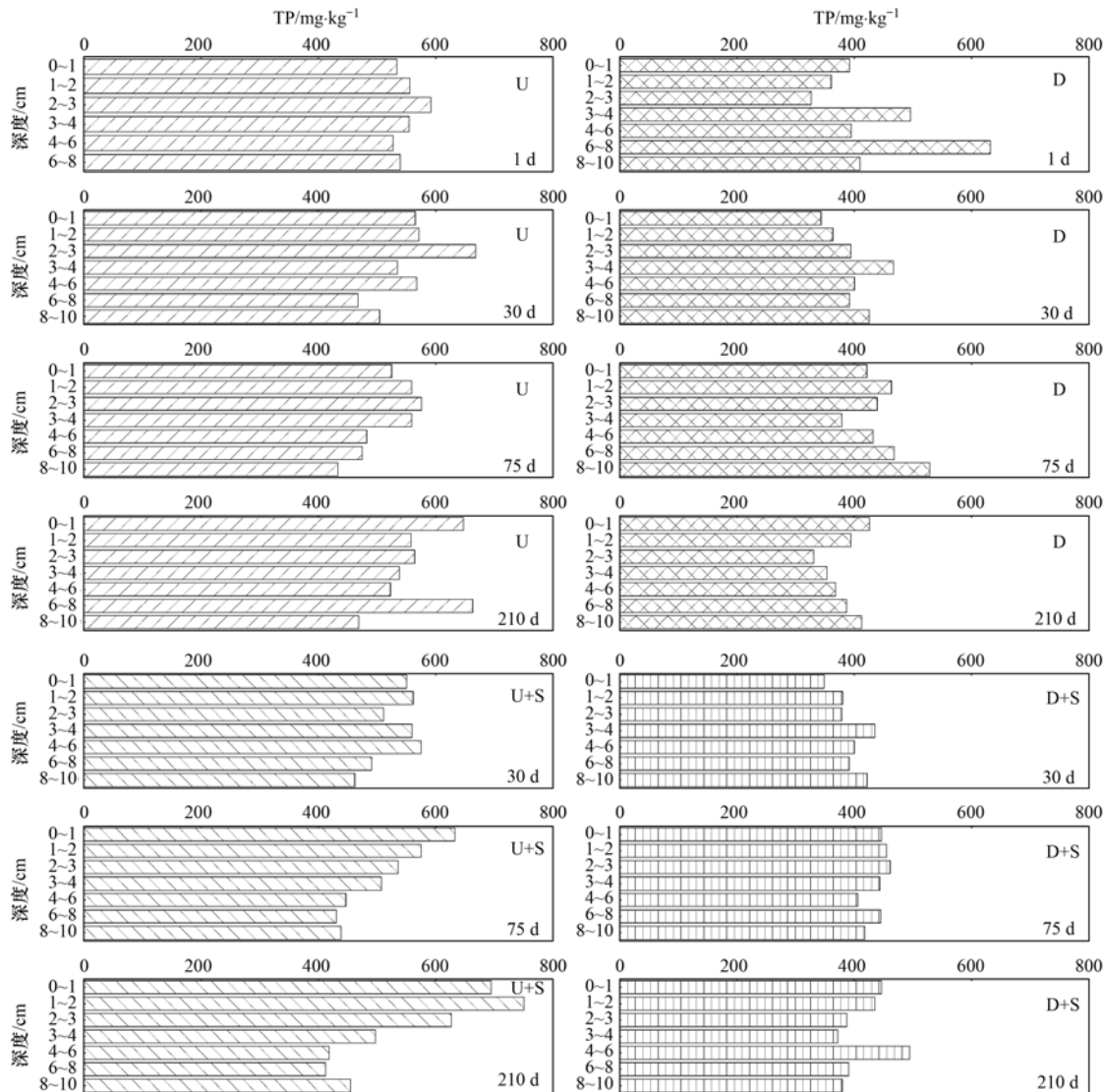


图2 沉积物中TP含量垂向分布特征

Fig. 2 Profile characteristics of the TP content of the sediments

主, Org-P 次之, Lb-P 含量较低不足总磷的 1‰. 这 3 种潜在可移动态磷易受到环境条件变化的影响, 易于在沉积物-水界面之间进行迁移转化^[29]. Lb-P 主要是沉积物矿物颗粒表面吸附的磷酸盐, 包括间隙水中的溶解性磷、CaCO₃ 结合的磷及沉积植物碎屑中菌体细胞降解所析出的磷^[30]. 在 3 种潜在可移动态磷中尽管 Lb-P 降低的含量是最少的, 但其含量的降比较其余两种形态磷要大得多. 统计发现, D 和 D+S 组 Lb-P 含量显著低于 U 和 U+S 组, 实验 75d 后, 有无外源组 Lb-P 含量的降比高达 85% 和 97%, 实验 210d 后降比也达到了 22% 和 36%. Lb-P 作为沉积物-水界面磷循环的直接贡献者, 在水土界面很活跃, 极易与沉积物间隙水中的溶解态磷发生交换作用并迁移进入上覆水体, 通常被认为沉积物-水界面磷释放通量的重要指示指标^[31].

表层沉积物 Fe-P 含量在 210 d 后有了明显的

降低, 浅水湖泊沉积物-水界面是一个相对不稳定区域, 底栖生物扰动和水动力扰动是造成该界面不稳定的主要因素, 底栖生物扰动改变了沉积物-水界面氧化还原环境, Parkins 等^[32]的研究发现, 当氧化还原点位降至 200 mV 以下, Fe-P 存在释放的可能性, 通过 Unisense 微电极系统对沉积物-水界面氧化还原电位进行微尺度剖面分析发现, 4 种处理柱样的表层沉积物的氧化还原电位均小于 200 mV. 实验 210 d 正值夏季, 水动力条件较强, 表层沉积物受水动力扰动发生再悬浮, 也可能加剧 Fe-P 的释放. 有研究发现, 夏季太湖上覆水 pH 明显高于冬春季, 在碱性条件下, 铁铝氧化物表面对磷酸根的亲和力降低, OH⁻ 离子更易占据矿物表面的吸附位, 致使磷酸根释放量的增加^[33]. Fe-P 作为一种潜在活性磷, 易受环境变化的影响, 在富氧环境下铁易以 Fe³⁺ 存在^[34], 微生物对有机质的降解以及微生物本身的呼吸作用大量消耗氧气, 导致界面

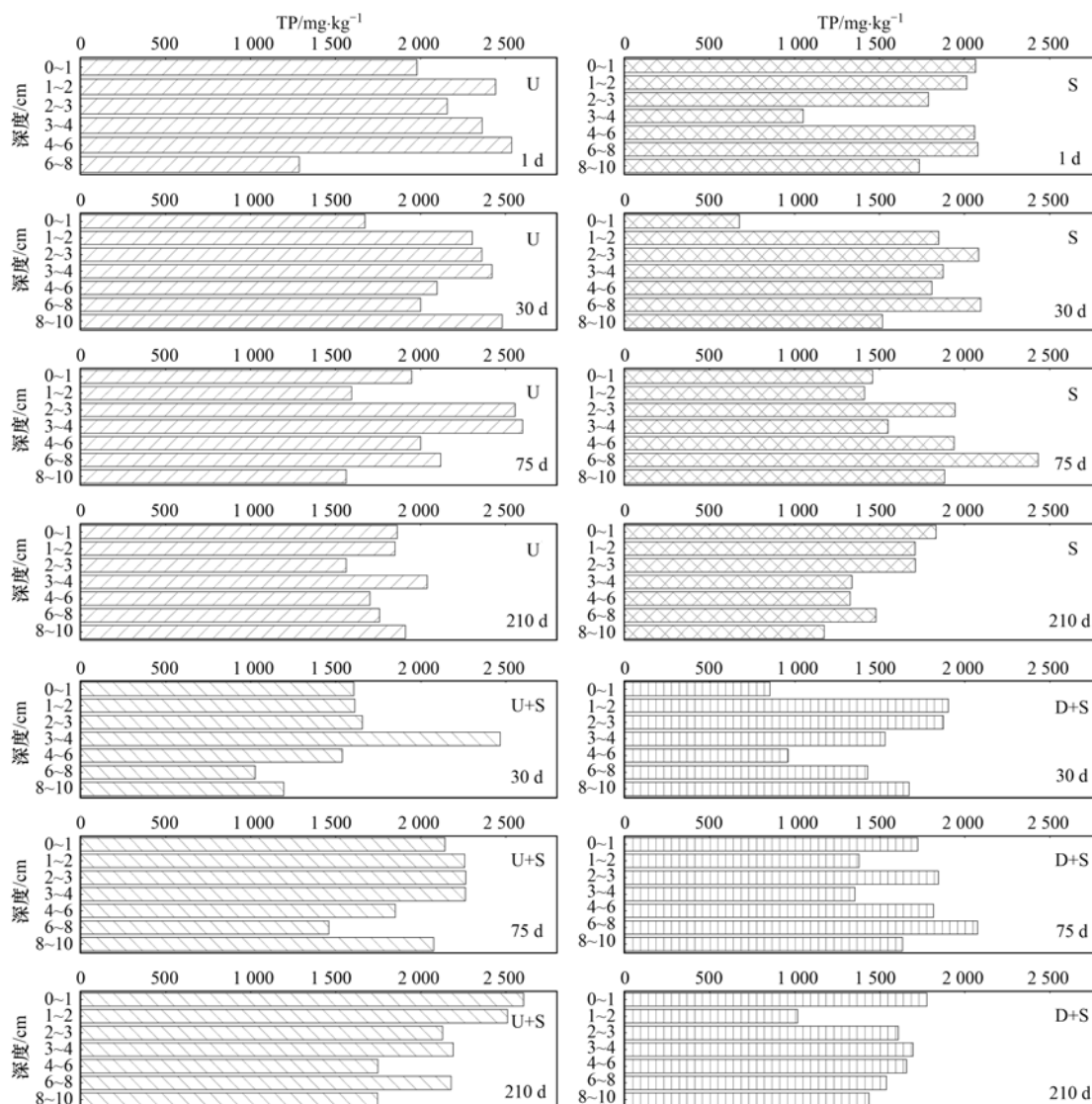


图3 沉积物中 TN 含量垂向分布特征

Fig. 3 Profile characteristics of the TN content of the sediments

处氧浓度降低^[12], 致使 Fe^{3+} 被还原为 Fe^{2+} , 促使 Fe-P 的释放^[35], 这也解释了受颗粒物沉降的表层有机质更高的外源组 Fe-P 含量较无外源组低。

Org-P 是沉积物中磷及有机质的重要组分, Org-P 经磷酸酶水解、细菌降解或光解等作用后很快地转化成生物活性磷, 通过间隙水向上覆水体迁移释放, 从而维持浮游生物的生长, 在水体中重新参加循环^[36~38]。有机质作为 Org-P 的重要载体, 其附着作用对沉积物磷的固定会产生很大的影响, 直接影响 Org-P 含量^[39]。实验 75 d 后发现, 有无外源组 Org-P 含量较 30 d 均有大幅减少且 U+S 和 D+S 组降比更大, 这可能是因为颗粒物的沉降导致界面有机质的累积, 磷酸酶的活性得以提升从而促进了酶可水解磷的水解^[40], Org-P 被释放, 进一步矿化后进入上覆水体^[41]。实验 210 d 后发现, U+S 和 D+S 组 Org-P 含量分别较 U 和 D 组高, 这可能是

因为时值夏季, 颗粒物的沉降以及水体中浮游生物死亡后其残体在沉积物表层大量累积, 有机质的累积速率超过了其矿化水平, 吸附的有机磷迅速埋藏^[42], 而 D 和 D+S 组因孔隙度较 U 和 U+S 组小, 吸附量减少, 使其含量变化差异不显著。

Al-P 是沉积物中铝与其氧化物或者氢氧化物相结合的磷, $\text{Al}(\text{OH})_3$ 是其主要存在形式, 不仅具有较高的吸附能力, 且可在好氧和厌氧条件下稳定存在, 但其对氧化还原电位不敏感, 在有氧和无氧环境下均较稳定, 释放潜力也小于 Fe-P 和 Lb-P^[43], 有研究发现, 疏浚后 Al-P 含量有一定的下降, 这可能是由于疏浚改变了泥水界面性质, 打破其原有动态平衡, 铝结合态磷化学键被打断而转化成磷酸根盐释放^[35]; Ca-P 作为一种典型的情性磷, 其主要来源于陆源输入的碎屑岩以及自生磷灰石, 一般水力条件下很难释放, 也难以被生物利用, 只

有在 pH 值较低的情况下才有被释放的可能^[44], 但有研究发现, 疏浚后 Ca-P 含量明显增加, 且其占 TP 比重更大, 这可能是由于有机磷矿化分解释放的磷酸盐被沉积物中活性 Ca^{2+} 等吸附并结合, 进而转化为 Ca-P^[35], 当氧化还原电位和盐度下降 Fe-P 被活化, 会与 Al^{3+} 和 Ca^{2+} 等相结合, 沉积物中 Fe、Al 和 Ca 等含量受人为污染或其他因素影响而发生

改变, 磷就会在不同形态间发生释放及重组, 从而实现磷形态间的转化^[2]; Res-P 是最稳定的难释放态磷, 即使环境条件变化也很难释放, 与其他形态磷的转化量也很小, 潜在活性磷若转化为 Res-P 则其将被永久固定于沉积物中, 因而 Res-P 也被称为永久结合态磷^[2], 随着时间的迁移, 底泥中的易释放态磷存在着向难释放态磷转化的趋势。

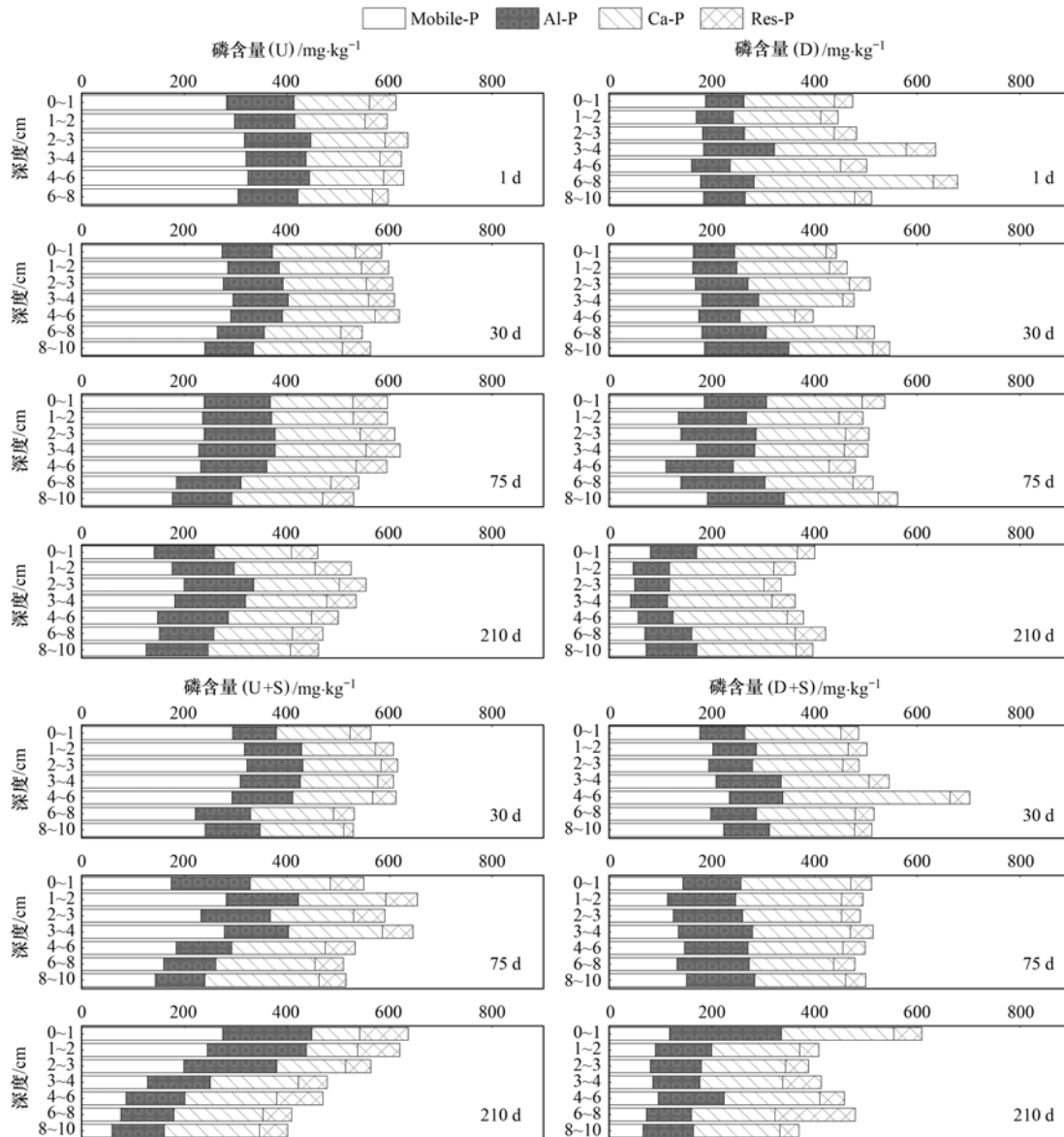


图 4 沉积物磷形态分布特征

Fig. 4 Profile characteristics of the phosphorus fraction in the sediments

2.3 间隙水 PO_4^{3-} -P 浓度及沉积物-水界面磷释放通量

沉积物-水界面磷酸盐的迁移扩散主要以间隙水为媒介, 上覆水体与沉积物间隙水中的 PO_4^{3-} -P 存在一定的浓度梯度, 在其作用下沉积物中的磷可能会由间隙水向上覆水扩散而进一步影响水体水质^[45]. 间隙水 PO_4^{3-} -P 浓度变化见图 6, 研究发现, 原始柱样下层间隙水中 PO_4^{3-} -P 浓度要高于上层, 因

而疏浚后表现为疏浚组间隙水 PO_4^{3-} -P 浓度高于未疏浚组; 30 d 后 (即 2 月), U + S 和 U 组与 D + S 和 D 组间隙水 PO_4^{3-} -P 浓度分别相似, 且疏浚组间隙水 PO_4^{3-} -P 浓度依然高于未疏浚组; 至 75 d (即 4 月), 疏浚组与未疏浚组间隙水 PO_4^{3-} -P 浓度差继续缩小, 疏浚组间隙水 PO_4^{3-} -P 浓度仅略高于未疏浚组, 且其浓度保持在相对较低的水平; 实验 210 d 后 (即 8 月), D 组间隙水 PO_4^{3-} -P 浓度依然保持着较低的水

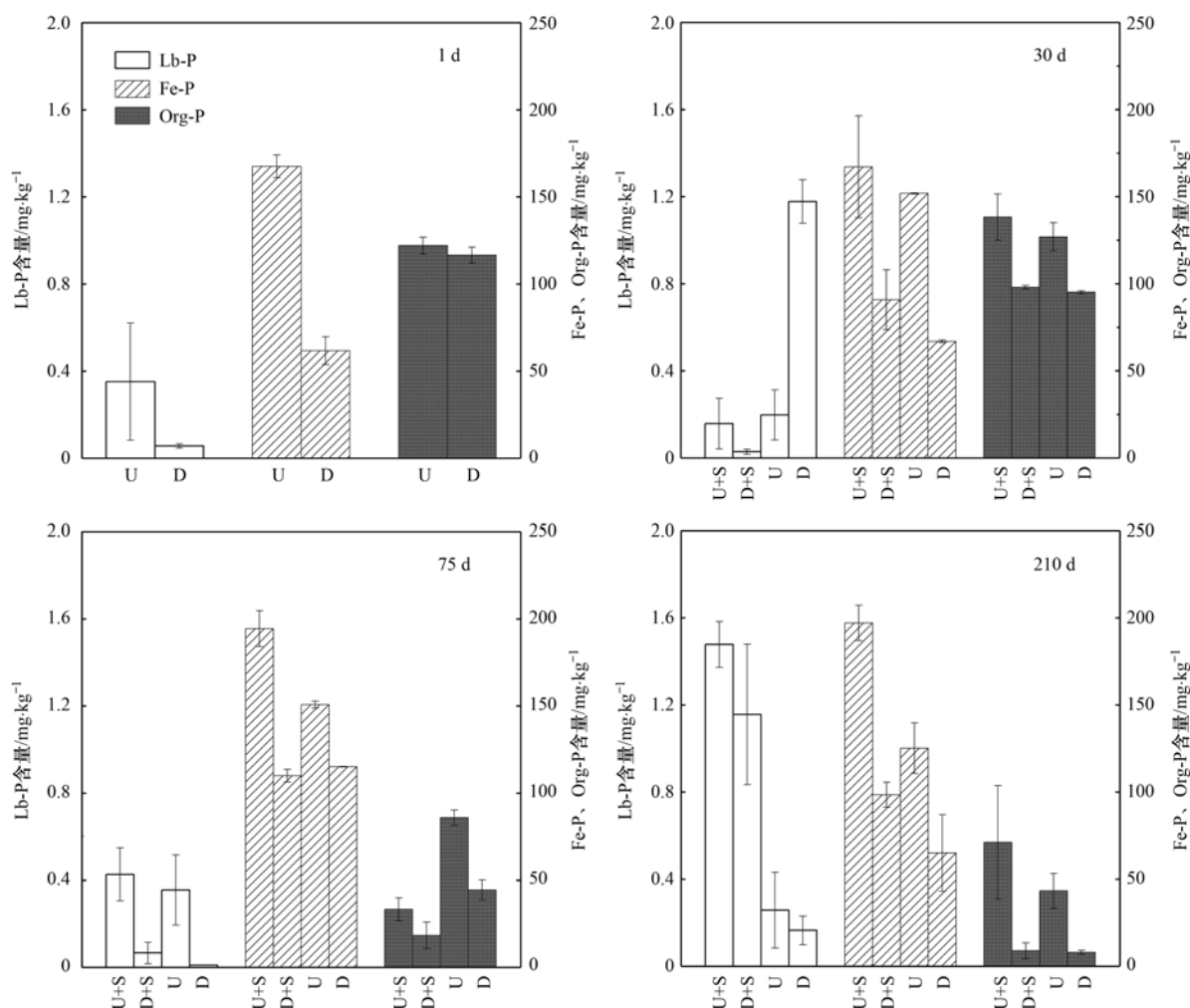


图5 表层沉积物 Mobile-P 中磷形态变化

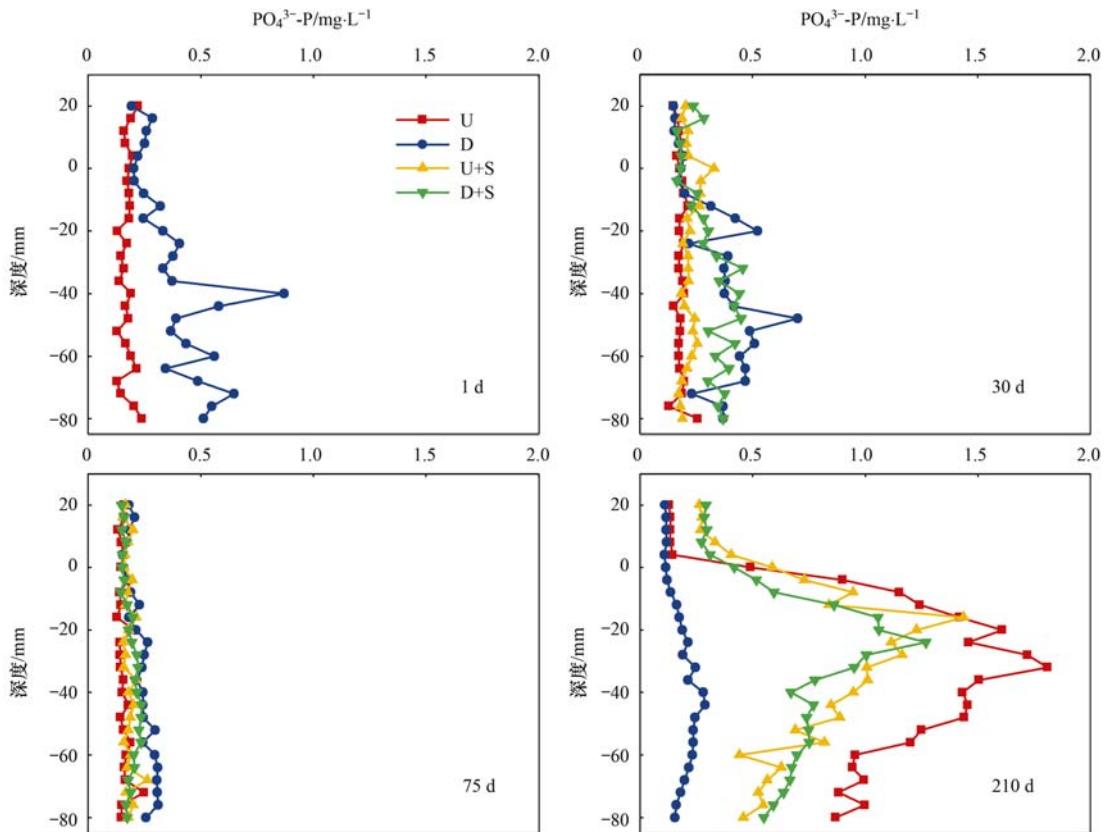
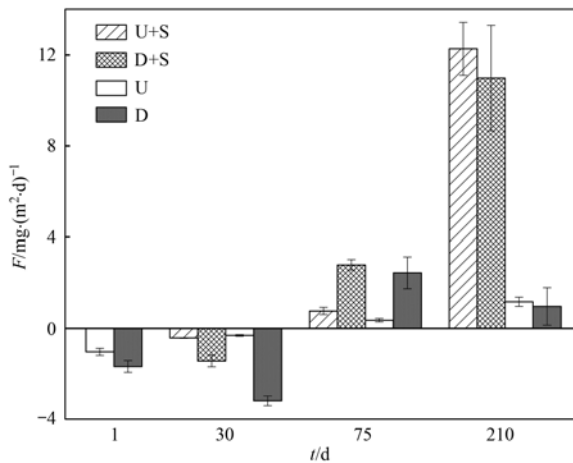
Fig. 5 Changes in the phosphorus fractions of Mobile-P in the surface sediments

平 $0.11 \sim 0.29 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其随季节差异并不显著, 而其余各组在夏季维持着较高的浓度, 且均在 $2 \sim 3 \text{ cm}$ 底泥层出现峰值; U + S、U 和 D 组间隙水 PO_4^{3-} -P 浓度随季节差异较大, 浓度范围分别为 $0.16 \sim 1.81$ 、 $0.13 \sim 1.44$ 和 $0.11 \sim 1.27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

随着实验的进行发现疏浚组与未疏浚组间隙水 PO_4^{3-} -P 浓度差异逐渐减小, 夏季呈现出疏浚组间隙水 PO_4^{3-} -P 浓度较未疏浚组低的现象, 疏浚效果得以显现。由于下层底泥孔隙度小密实程度高减弱了其向上覆水体的释放能力, 因而实验初期表现出疏浚组间隙水 PO_4^{3-} -P 浓度高于未疏浚组的现象, 疏浚后新生表层直接与氧气浓度较高的上覆水体接触, 使其泥水界面氧化还原电位上升, 表层会形成新的氧化层, 可对下层间隙水向上覆水体释磷起到一定程度的抑制作用^[17], 这在无外源组得到了很好地体现, 而有外源组因受悬浮颗粒物沉降, 颗粒物中有机物含量高且附着大量微生物, 有机质的分解、微生物的繁殖等致使新生氧化层遭到破坏^[46], 因而其效果不如无外源组明显; D 组间隙水 PO_4^{3-} -P 浓度

保持着较低的水平, 这与其氧气渗透深度大存在一定关系, 研究发现, D 组表层底泥氧气渗透深度达到了 7 mm , 远大于其余各组, 其余组间隙水中 PO_4^{3-} -P 浓度呈现先增加后减小的趋势, 在深度 $2 \sim 3 \text{ cm}$ 处出现峰值, 间隙水中 PO_4^{3-} -P 浓度与其对应分层沉积物中 Fe-P 含量在 0.05 水平上显著正相关, 在缺氧或厌氧的沉积物中, Fe-P 和较易分解的含磷有机物, 可分别通过 Fe^{3+} 的还原以及有机质的分解实现游离态磷酸盐的释放^[47]。

界面 PO_4^{3-} -P 释放通量变化见图 7, 有外源组呈现出一定的季节性变化, 与间隙水 PO_4^{3-} -P 浓度变化较相一致。实验 30 d 内, 沉积物对上覆水表现为汇, 即向下的通量, 在冬春季间 ($30 \sim 75 \text{ d}$) 沉积物的源-汇功能发生了转变, 沉积物从汇转变成成为源, 这与余居华等^[48]的研究结果一致; 实验 75 d 时, D 和 D + S 组 PO_4^{3-} -P 释放通量分别大于 U 和 U + S 组, 磷由间隙水向上覆水扩散主要是由于上覆水体与沉积物间隙水中的 PO_4^{3-} -P 存在一定的浓度梯度, 间隙水 PO_4^{3-} -P 浓度剖面发现, 疏浚组浓度梯度高于未疏

图6 孔隙水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度剖面变化Fig. 6 Changes in the concentration of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ profiles in the pore water图7 沉积物-水界面 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 扩散通量变化Fig. 7 Changes in $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ diffusive flux across the sediment-water interface

浚组,这可能是导致该现象发生的主要原因;此外,D+S和U+S组的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 释放通量分别高于D和U组,夏季更为显著,D+S和U+S组的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 释放通量分别高达 $10.99 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $12.27 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$,阻止外源颗粒物输入后疏浚组与未疏浚组 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 释放通量降低了90%以上,这是由于颗粒物以及动植物残体沉降于沉积物表层,有机质的累积提升了微生物活性,界面处氧浓度的降低

以及磷酸酶活性的提升促进酶可水解磷的水解^[40],进而导致Fe-P和Org-P的溶解释放,夏季温度较高,内源负荷及释放通量的增加更为显著^[49].高有机质、移动磷含量的颗粒物的持续输入与累积,对新生界面会产生一系列负效应,这在Liu等^[12]研究中得以证实,外源颗粒物的输入是河口湖区底泥磷通量长期增长的主要外因^[50],在对五里湖疏浚底泥15 a内控磷效果的长期跟踪研究发现,疏浚初期疏浚表层因其较低的孔隙度、微生物活性和碱性磷酸酶活性等,有效抑制了可移动磷的扩散与释放,疏浚18个月后,因颗粒物的持续输入, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 释放通量恢复到疏浚前的水平^[51].

实验210 d后发现,D和D+S组 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 释放通量分别低于U和U+S组,疏浚降低了底泥内源磷释放速率.有研究表明,疏浚30 cm可有效控制内源磷负荷^[15, 52],减弱泥水界面磷的释放,疏浚底泥的释磷潜力更低,在疏浚初期磷的释放速率可降低50%以上,尤其在夏季,疏浚沉积物依然可保持对上覆水表现为汇的状态;陈超等^[18]对太湖西北部典型疏浚及对照湖区研究表明,竺山湾等疏浚区 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 释放速率是未疏浚区的50.2%,胥江口等疏浚区 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 释放速率是未疏浚区的6.4倍;Chen等^[53]对疏浚6 a后的太湖梅梁湾底泥内源磷的控

制效果进行了评估, 其研究表明, 4、7 和 1 月疏浚后磷的扩散通量分别降低了 77%、61% 和 87%, 10 月无较大差异, 夏秋季藻类的降解加速了沉积物中磷的释放从而抑制了疏浚效果. 本研究 D + S 和 D 组的 PO_4^{3-} -P 释放通量分别降低了 11% 和 30%, 阻止外源输入对疏浚控制内源磷负荷起到了较好的促进作用. 因疏浚效果初现, 将继续对有无外源颗粒物输入条件下的疏浚效果作长期跟踪研究.

3 结论

(1) 太湖梅梁湾研究区沉积物处于中度污染状态, 实验 210 d 后, 疏浚对 TP 和 TN 保持着较好的控制效果, 疏浚后阻止外源颗粒物输入对沉积物 TP 和 TN 的控制产生着积极的影响.

(2) 疏浚显著降低了表层沉积物潜在可移动磷的含量, 外源组 Mobile-P 含量显著高于无外源组, 变化的 Mobile-P 以 Fe-P 为主, Org-P 次之, Lb-P 含量较低不足总磷的 1%.

(3) 夏季在有外源条件下疏浚组间隙水 PO_4^{3-} -P 浓度低于未疏浚组, 无外源组更为显著; 无外源疏浚组间隙水 PO_4^{3-} -P 浓度保持着较低的水平, 其余组间隙水中 PO_4^{3-} -P 浓度呈现先增加后减小的趋势, 间隙水 PO_4^{3-} -P 浓度与其对应分层沉积物中 Fe-P 含量显著正相关.

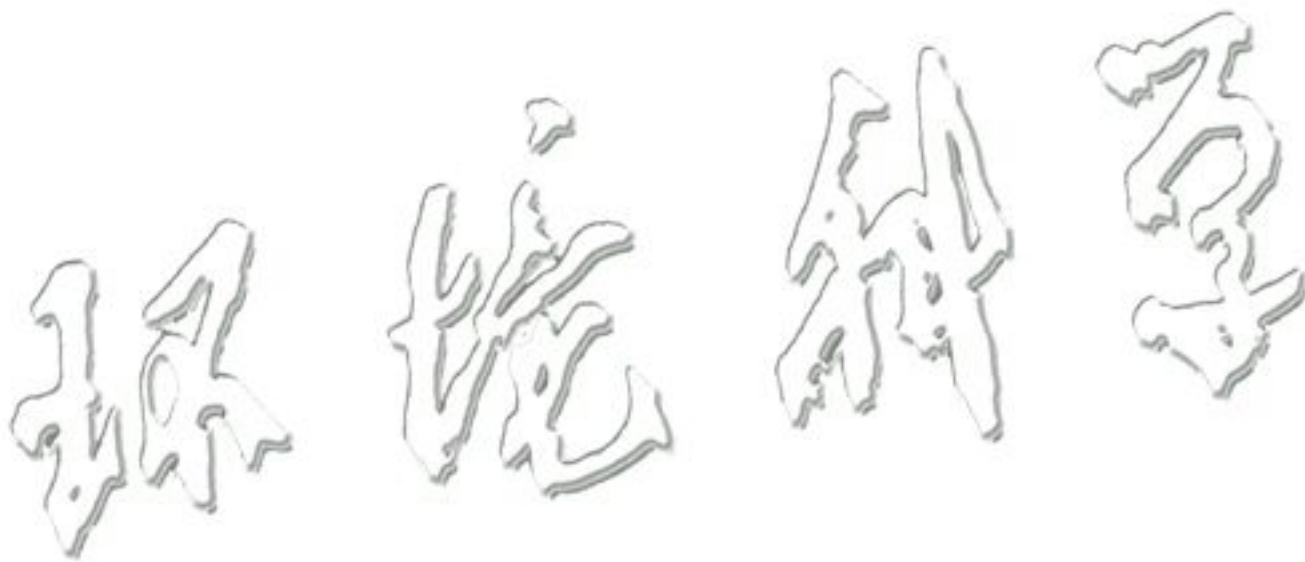
(4) 冬春季间沉积物的源-汇功能发生了转变, 沉积物对上覆水由汇转变成为源; 疏浚措施降低了底泥内源磷释放速率, 可有效控制其内源磷释放, 阻止外源颗粒物输入对疏浚控制内源磷负荷起到了较好地促进作用.

参考文献:

- [1] Kelepertzis E, Argyraki A, Daftsis E. Geochemical signature of surface water and stream sediments of a mineralized drainage basin at NE Chalkidiki, Greece: a pre-mining survey [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2012, **114**: 70-81.
- [2] 何佳, 陈春瑜, 邓伟明, 等. 滇池水-沉积物界面磷形态分布及潜在释放特征[J]. *湖泊科学*, 2015, **27**(5): 799-810.
He J, Chen C Y, Deng W M, *et al.* Distribution and release characteristics of phosphorus in water-sediment interface of Lake Dianchi[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(5): 799-810.
- [3] Rulley J E, Rusch K A. An assessment of long-term post-restoration water quality trends in a shallow, subtropical, urban hypereutrophic lake[J]. *Ecological Engineering*, 2002, **19**(4): 265-280.
- [4] Seiderer L J, Newell R C. Analysis of the relationship between sediment composition and benthic community structure in coastal deposits: implications for marine aggregate dredging[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 1999, **56**(5): 757-765.
- [5] Dolmer P, Kristensen T, Christiansen M L, *et al.* Short-term impact of blue mussel dredging (*Mytilus edulis* L.) on a benthic community[J]. *Hydrobiologia*, 2001, **465**(1-3): 115-127.
- [6] Graca B, Burska D, Matuszewska K. The impact of dredging deep pits on organic matter decomposition in sediments [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2004, **158**(1): 237-259.
- [7] Voie Ø A, Johnsen A, Rossland H K. Why biota still accumulate high levels of PCB after removal of PCB contaminated sediments in a Norwegian fjord [J]. *Chemosphere*, 2002, **46**(9-10): 1367-1372.
- [8] Weston D P, Jarman W M, Cabana G, *et al.* An evaluation of the success of dredging as remediation at a DDT-contaminated site in San Francisco Bay, California, USA [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2002, **21**(10): 2216-2224.
- [9] Ryding S O. Lake trerörningen restoration project. Changes in water quality after sediment dredging[J]. *Hydrobiologia*, 1982, **91**(1): 549-558.
- [10] Annadotter H, Cronberg G, Aagren R, *et al.* Multiple techniques for lake restoration[J]. *Hydrobiologia*, 1999, **395-396**: 77-85.
- [11] Palermo M, Hays D F. Sediment dredging, treatment and disposal[A]. Reible D D (Ed.). *Processes, Assessment and Remediation of Contaminated Sediments* [M]. New York: Springer, 2014. 365-391.
- [12] Liu C, Shao S G, Shen Q S, *et al.* Effects of riverine suspended particulate matter on the post-dredging increase in internal phosphorus loading across the sediment-water interface [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **211**: 165-172.
- [13] Stecko J P P, Bendell-Young L I. Contrasting the geochemistry of suspended particulate matter and deposited sediments within an estuary[J]. *Applied Geochemistry*, 2000, **15**(6): 753-775.
- [14] Sutula M, Bianchi T S, McKee B A. Effect of seasonal sediment storage in the lower Mississippi River on the flux of reactive particulate phosphorus to the Gulf of Mexico[J]. *Limnology and Oceanography*, 2004, **49**(6): 2223-2235.
- [15] 钟继承, 刘国锋, 范成新, 等. 湖泊底泥疏浚环境效应: I. 内源磷释放控制作用[J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(1): 84-93.
Zhong J C, Liu G F, Fan C X, *et al.* Environmental effect of sediment dredging in lake (I): the role of sediment dredging in reducing internal phosphorous release [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, **21**(1): 84-93.
- [16] 钟继承, 范成新. 底泥疏浚效果及环境效应研究进展[J]. *湖泊科学*, 2007, **19**(1): 1-10.
Zhong J C, Fan C X. Advance in the study on the effectiveness and environmental impact of sediment dredging [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2007, **19**(1): 1-10.
- [17] 范成新, 张路, 王建军, 等. 湖泊底泥疏浚对内源释放影响的过程与机理[J]. *科学通报*, 2004, **49**(15): 1523-1528.
- [18] 陈超, 钟继承, 邵世光, 等. 太湖西北部典型疏浚/对照湖区内源性营养盐释放潜力对比[J]. *湖泊科学*, 2014, **26**(6): 829-836.
Chen C, Zhong J C, Shao S H, *et al.* On the potential release rates of nutrient from internal sources: a comparative study of typical dredged and un-dredged areas, northwestern Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(6): 829-836.
- [19] 毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 等. 太湖东部不同类型湖区底泥疏浚的生态效应[J]. *湖泊科学*, 2014, **26**(3): 385-392.
Mao Z G, Gu X H, Lu X M, *et al.* Ecological effects of dredging on aquatic ecosystem in the different regions of eastern Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(3): 385-392.
- [20] 黄卫, 陈鸣, 徐亮. 太湖梅梁湾水环境监控预警体系研究[J]. *环境监控与预警*, 2009, **1**(1): 6-9.
Huang W, Chen M, Xu L. A study on water environment surveillance and Early warning system of Taihu Lake [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2009, **1**(1): 6-9.

- [21] Hesslein R H. An in situ sampler for close interval pore water studies[J]. *Limnology and Oceanography*, 1976, **21**(6): 912-914.
- [22] Ding S M, Sun Q, Xu D. Development of the DET technique for high-resolution determination of soluble reactive phosphate profiles in sediment pore waters [J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2010, **90**(14-15): 1130-1138.
- [23] 张路, 范成新, 王建军, 等. 太湖草藻型湖区间隙水理化特性比较[J]. *中国环境科学*, 2004, **24**(5): 556-560.
Zhang L, Fan C X, Wang J J, *et al.* Comparison of physicochemical characters of pore water in grass/algae type zone in Lake Taihu [J]. *China Environmental Science*, 2004, **24**(5): 556-560.
- [24] 范成新, 张路, 杨龙元, 等. 湖泊沉积物氮磷内源负荷模拟[J]. *海洋与湖沼*, 2002, **33**(4): 370-378.
- [25] 董平, 矫健, 张鑫. 过硫酸钾消解-钼锑抗光度法测定脱水污泥中的总磷[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2010, **29**(1): 67-71.
Dong P, Jiao J, Zhang X. The measurement of total phosphorus in dewatered sludge with the method of molybdenum-antimony resolved by potassium persulfate and anti-spectrophotometry [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2010, **29**(1): 67-71.
- [26] 王圣瑞. 湖泊沉积物-水界面过程——基本理论与常用测定方法[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [27] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment [J]. *Water Research*, 2000, **34**(7): 2037-2042.
- [28] 刘鸿亮, 金相灿, 荆一风. 湖泊底泥环境疏浚工程技术[J]. *中国工程科学*, 1999, **1**(1): 81-84.
- [29] 吕昌伟, 何江, 孙惠民. 乌梁素海沉积物中磷的形态分布特征[J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(3): 878-885.
Lu C W, He J, Sun H M, *et al.* Phosphorus speciation and distribution character in sediment of Wuliangsu Lake [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, **26**(3): 878-885.
- [30] Kaiserli A, Voutsas D, Samara C. Phosphorus fractionation in lake sediments-Lakes Volvi and Koronia, N. Greece [J]. *Chemosphere*, 2002, **46**(8): 1147-1155.
- [31] 赵忠红, 张乃明, 扈学文, 等. 云南阳宗海表层沉积物有机质组成结构对磷赋存形态特征的影响[J]. *湖泊科学*, 2017, **29**(2): 308-316.
Zhao Z H, Zhang N M, Hu X W, *et al.* Effects of composition and structure of natural organic matter on phosphorus fractions in sediment from Lake Yangzonghai, Yunnan Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, **29**(2): 308-316.
- [32] Perkins R G, Underwood G J C. The potential for phosphorus release across the sediment-water interface in an eutrophic reservoir dosed with ferric sulphate [J]. *Water Research*, 2001, **35**(6): 1399-1406.
- [33] 王颖, 沈珍瑶, 呼丽娟, 等. 三峡水库主要支流沉积物的磷吸附/释放特性[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(8): 1654-1661.
Wang Y, Shen Z Y, Hu L J, *et al.* Adsorption and release of phosphorus from sediments from the main branches of the Three-Gorges Reservoir [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(8): 1654-1661.
- [34] 陈豁然, 杨梦兵, 王中伟, 等. 底泥磷形态及分布特征对水体富营养化的影响[J]. *污染防治技术*, 2009, **22**(5): 81-83, 123.
Chen H R, Yang M B, Wang Z W, *et al.* The effects of species and distribution characteristics of phosphorus in sediment to eutrophication [J]. *Pollution Control Technology*, 2009, **22**(5): 81-83, 123.
- [35] 李大鹏, 黄勇, 李伟光. 再悬浮条件下底泥中磷赋存形态的转化研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(5): 1289-1294.
Li D P, Huang Y, Li W G. Transformation of phosphorus forms in the sediments under the conditions of Sediments re-suspension [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(5): 1289-1294.
- [36] Jensen H S, Kristensen P, Jeppesen E, *et al.* Iron; phosphorus ratio in surface sediment as an indicator of phosphate release from aerobic sediments in shallow lakes [J]. *Hydrobiologia*, 1992, **235**(1): 731-743.
- [37] Baldwin D S. The phosphorus composition of a diverse series of Australian sediments [J]. *Hydrobiologia*, 1996, **335**(1): 63-73.
- [38] Zhang T X, Wang X R, Jin X C. Variations of alkaline phosphatase activity and P fractions in sediments of a shallow Chinese eutrophic lake (Lake Taihu) [J]. *Environmental Pollution*, 2007, **150**(2): 288-294.
- [39] 史静, 俎晓静, 张乃明, 等. 滇池草海沉积物磷形态、空间分布特征及影响因素[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(10): 1808-1813.
Shi J, Zu X J, Zhang N M, *et al.* Sediment phosphorus form, space distribution characteristic and influencing factor of Cao Hai in Dian Lake, Yunnan, China [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(10): 1808-1813.
- [40] Zhang R Y, Wu F C, Liu C Q, *et al.* Characteristics of organic phosphorus fractions in different trophic sediments of lakes from the middle and lower reaches of Yangtze River region and Southwestern Plateau, China [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **152**(2): 366-372.
- [41] Anschutz P, Chaillou G, Lecroart P. Phosphorus diagenesis in sediment of the Thau Lagoon [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, **72**(3): 447-456.
- [42] Ahlgren J, Reitzel K, Tranvik L, *et al.* Degradation of organic phosphorus compounds in anoxic Baltic Sea sediments: a ³¹P nuclear magnetic resonance study [J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, **51**(5): 2341-2348.
- [43] 莫家勇, 钟萍, 刘正文. 生态修复对浅水湖泊沉积物磷形态特征及湖水磷浓度的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2016, **22**(2): 320-325.
Mo J Y, Zhong P, Liu Z W. Effects of ecological restoration on the sediment phosphorus form and the water phosphorus concentration in a shallow lake [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2016, **22**(2): 320-325.
- [44] 金晓丹, 吴昊, 陈志明, 等. 长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 448-456.
Jin X D, Wu H, Chen Z P, *et al.* Phosphorus fractions, sorption characteristics and its release in the sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 448-456.
- [45] 望雪, 程豹, 杨正健, 等. 澜沧江流域沉积物间隙水-上覆水营养盐特征与交换通量分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 2126-2134.
Wang X, Cheng B, Yang Z J, *et al.* Differences in diffusive fluxes of nutrients from sediment between the natural river areas and reservoirs in the Lancang River Basin [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 2126-2134.
- [46] Desprez M. Physical and biological impact of marine aggregate extraction along the French coast of the Eastern English Channel: short- and long-term post-dredging restoration [J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2000, **57**(5): 1428-1438.

- [47] Gunnars A, Blomqvist S. Phosphate exchange across the sediment-water interface when shifting from anoxic to oxic conditions - an experimental comparison of freshwater and brackish-marine systems[J]. *Biogeochemistry*, 1997, **37**(3): 203-226.
- [48] 余居华. 湖泊疏浚对水土界面氮磷迁移转化关键过程的影响[D]. 南京: 南京林业大学, 2012. 13-14.
Yu J H. Influences of the sediment dredging on the key transfer and transformation processes of the nitrogen and phosphorus at the sediment-water interface in lake[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2012. 13-14.
- [49] Loh P S, Molot L A, Nowak E, *et al.* Evaluating relationships between sediment chemistry and anoxic phosphorus and iron release across three different water bodies[J]. *Inland Waters*, 2013, **3**(1): 105-118.
- [50] Liu C, Du Y H, Yin H B, *et al.* Exchanges of nitrogen and phosphorus across the sediment-water interface influenced by the external suspended particulate matter and the residual matter after dredging[J]. *Environmental Pollution*, 2019, **246**: 207-216.
- [51] Liu C, Zhong J C, Wang J J, *et al.* Fifteen-year study of environmental dredging effect on variation of nitrogen and phosphorus exchange across the sediment-water interface of an urban lake[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **219**: 639-648.
- [52] Zhong J C, You B S, Fan C X, *et al.* Influence of sediment dredging on chemical forms and release of phosphorus [J]. *Pedosphere*, 2008, **18**(1): 34-44.
- [53] Chen M S, Cui J Z, Lin J, *et al.* Successful control of internal phosphorus loading after sediment dredging for 6 years: a field assessment using high-resolution sampling techniques [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **616-617**: 927-936.



CONTENTS

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