

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第10期

Vol.33 No.10

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

淀山湖百年营养演化历史及营养物基准的建立	李小平, 陈小华, 董旭辉, 董志, 孙敦平 (3301)
矿化度作为蒙新高原湖泊营养物基准影响指标的可行性	席北斗, 张亚丽, 许秋瑾 (3308)
小波分析在湖泊常见浮游藻类荧光识别测定中的应用	张翠, 苏荣国, 宋志杰, 张珊珊, 王修林 (3314)
湖面亮温对巢湖水华影响的遥感监测分析	张红, 黄勇, 李堃 (3323)
基于地下水暴露途径的健康风险评价及修复案例研究	姜林, 钟茂生, 贾晓洋, 夏天翔, 姚珏君, 樊艳玲, 张丽娜, 唐振强 (3329)
基于多生物标志物污染指数法的北部湾潮间带污染程度评价	杜秀萍, 孟范平, 王志峰, 李祥蕾, 杨菲菲, 程凤莲, 杨跃志, 李正炎 (3336)
东海无机氮排海通量年际变化估算	吴家林, 方倩, 石晓勇, 李克强, 张传松, 王修林 (3344)
海洋酸化对大型海藻生长以及磷酸盐、硝酸盐吸收利用的影响	于娟, 张瑜, 杨桂朋, 田延旺 (3352)
北黄海表层沉积物中颗粒态磷的形态分布	孟佳, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (3361)
湖泊疏浚对沉积物再悬浮及磷迁移影响的模拟研究	余居华, 钟继承, 张银龙, 范成新, 何伟, 张雷, 唐阵武 (3368)
降雨条件下岩溶泉水中悬浮颗粒物的运移特征及来源分析	杨平恒, 刘子琦, 贺秋芳 (3376)
三峡水库试验性蓄水前后大宁河富营养化状态比较	张佳磊, 郑丙辉, 刘录三, 王丽婧, 吴光应 (3382)
三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应	曾立雄, 黄志霖, 肖文发, 田耀武 (3390)
山地城市地表径流源区水质特征监测研究	李立青, 单保庆, 赵建伟, 郭树刚, 高勇 (3397)
唐山开滦煤矿区土壤及地表水中 Se 元素赋存状态及其生态效应研究	张秀芝, 马忠社, 王荫楠, 王志军, 谢伟民 (3404)
西藏地表水中砷的分布	王明国, 李社红, 王慧, 肖唐付, 郑宝山 (3411)
锡林河流域地表水痕量元素的时空分布	薛丽洋, 吴锦奎, 张明泉, 丁永建, 叶柏生 (3417)
天津滨海地区表层沉积物中持久性有机污染物的含量特征与生态风险	卢晓霞, 张姝, 陈超琪, 侯珍, 杨君君 (3426)
松花江流域河流沉积物中多氯联苯的分布、来源及风险评价	聂海峰, 赵传冬, 刘应汉, 彭敏, 李括, 杨柯, 刘飞 (3434)
长江口近岸表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征	李涛, 侯立军, 刘敏, 赵迪, 尹国宇, 郑艳玲, 赵慧 (3443)
烟台四十里湾柱状沉积物氮形态地球化学特征	杨玉玮, 高学鲁, 李培苗 (3449)
黄河口湿地土壤中正构烷烃分子指标及物源指示意义	姚鹏, 尹红珍, 姚庆祯, 陈洪涛, 刘月良 (3457)
含藻水中壬基酚的光降解转化研究	彭章娥, 冯劲梅, 何淑英, 吴峰 (3466)
硝酸铁-过硫酸盐改性 GAC 催化 H ₂ O ₂ 氧化橙黄 IV	张瑛洁, 徐淑芬, 廖霞, 曹天静, 杨榕, 李大鹏 (3473)
Pd/CMK-3 的合成、表征及对甲酸的电催化氧化性能研究	还中科, 宗恩敏, 魏丹, 万海勤, 郑寿荣, 许昭怡 (3479)
曝气稳定塘处理农村生活污水曝气控制条件研究	李怀正, 姚淑君, 徐祖信, 陈卫兵 (3484)
以亲水改性聚氨酯为多孔载体的生物膜移动床反应器处理污水中试研究	王玉晓, 孔秀琴, 冯权, 卢海涛, 王德源, 唐黎明, 邢新会 (3489)
光催化降解渗滤液 DOM 不同组分的相对分子量变化特征	贾陈忠, 王焰新, 张彩香 (3495)
短程硝化-反硝化生物滤池脱氮机制研究	孙迎雪, 徐栋, 田媛, 李燕飞 (3501)
CANON 反应器运行稳定性及温度冲击的影响	付昆明, 张杰, 曹相生, 李冬, 孟雪征 (3507)
MUCT 工艺全程硝化和短程硝化模式下反硝化除磷研究	曾薇, 王向东, 张立东, 李博晓, 彭永臻 (3513)
活性污泥胞外聚合物 (EPS) 的分层组分及其理化性质的变化特征研究	袁冬琴, 王毅力 (3522)
有机负荷条件对间歇式气提内循环反应器中好氧颗粒污泥形成的影响	刘孟媛, 周丹丹, 高琳琳, 马德方, 张予萌, 李克宇 (3529)
厌氧污泥降解蔡动力学与生物多样性研究	曹新垲, 杨琦, 郝春博 (3535)
雌二醇在土壤/沉积物中的吸附特征及猪粪 DOM 对吸附的影响	张丰松, 李艳霞, 黄泽春, 杨明 (3542)
近海沉积物对粪固醇的等温吸附和热力学研究	张晓蕾, 薛文平, 徐恒振, 马新东 (3547)
甲苯在北京褐潮土中的运移分布及其 STOMP 模拟研究	韩春媚, 冉娟, 张慧, 李发生, 李雁, 谷庆宝 (3554)
聚丙烯酸钠为结合相的梯度扩散薄膜技术预测甘蔗田土壤中镉的生物有效性	王芳丽, 宋宁宁, 赵玉杰, 张长波, 沈跃, 刘仲齐 (3562)
土壤改良剂及其组合原位钝化果园土壤中的 Pb、Cd	汤民, 张进忠, 张丹, 陈舜, 张训, 刘万平, 余建 (3569)
基于不同通车时间的路旁土壤重金属健康风险:以连霍高速郑州—商丘段为例	谷蕾, 全致琦, 宋博, 马建华 (3577)
生活污水污泥制备的生物质炭对红壤酸度的改良效果及其环境风险	卢再亮, 李九玉, 姜军, 徐仁扣 (3585)
沉积物中多环芳烃对反硝化功能基因垂直分布的影响	吴艳阳, 黄珊, 叶嘉欣, 张恒军, 张仁铎 (3592)
阴离子黏土(层状双氢氧化物)对鲱鱼精 DNA 在重金属作用下的保护作用研究	唐旖旎, 吴平霄, 朱能武 (3598)
预处理后生物成因施氏矿物的矿物学特征及对 As(III) 吸附的影响	梁剑茹, 李浙英, 刘奋武, 周立祥 (3606)
铜绿假单胞菌 ZGKD2 的重金属耐性机制研究	张玉秀, 王姣, 柴团耀, 张倩, 刘金光, 李霞, 白志强, 苏增健 (3613)
1 株 1,2-二氯乙烷降解菌的分离及降解特性研究	王小春, 陈东之, 金小君, 陈建孟 (3620)
PCBs 降解菌的筛选及其降解特性研究	史舜燕, 冯流, 龚吉 (3627)
青草沙水库蓄水期间细菌群落结构变化的初步研究	彭青, 谢冰, 袁琦, 黄智婷, 崔璐璐, 王文婷 (3634)
华北平原玉米-小麦轮作农田 N ₂ O 交换通量的研究	裴淑玮, 张圆圆, 刘俊锋, 伦小秀, 牟玉静 (3641)
影响南京地区的两次典型空气污染过程分析	王飞, 朱彬, 康汉清, 高晋徽, 王瑛, 江琪 (3647)
济南市夏季环境空气 VOCs 污染特征研究	刘泽常, 张帆, 侯鲁健, 刘玉堂, 吕波 (3656)
活性炭分解臭氧机制研究	刘海龙, 张智辉, 张忠明, 焦媛媛, 王瑞军 (3662)
大气 O ₃ 浓度升高对 2 种基因型矮菜豆丛枝菌根 (AM) 结构及球囊霉素蛋白产生的影响	王鹏腾, 刁晓君, 王曙光 (3667)
铝胁迫下外源钙对外生菌根真菌抗氧化保护酶活性的影响	王明霞, 黄建国, 袁玲, 周志峰 (3675)
锌冶炼不同群落生境蟋蟀汞污染	郑冬梅, 李昕馨, 罗庆 (3680)
《环境科学》征订启事 (3313) 《环境科学》征稿简则 (3322) 信息 (3328, 3512, 3561, 3640)	

湖泊疏浚对沉积物再悬浮及磷迁移影响的模拟研究

余居华^{1,2}, 钟继承^{1*}, 张银龙², 范成新¹, 何伟¹, 张雷¹, 唐阵武³

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 2. 南京林业大学江苏省林业生态工程重点实验室, 南京 210037; 3. 华北电力大学资源与环境研究院, 北京 102206)

摘要: 选择太湖梅梁湾污染沉积物为研究对象, 选取夏季和冬季两个典型季节, 进行室内模拟试验研究了湖泊疏浚对沉积物再悬浮及磷迁移的影响。结果表明, 研究区模拟疏浚 20 cm 能够有效地抑制沉积物发生再悬浮, 冬季疏浚比夏季疏浚抑制效果更好, 在扰动过程中夏季未疏浚对照和疏浚水柱总悬浮物 (TSS) 最大含量分别为初始值的 7.0 和 2.2 倍; 而冬季未疏浚对照和疏浚水柱分别为 24.3 和 6.4 倍。统计分析发现, 夏、冬两季模拟试验未疏浚对照和疏浚水柱中总磷 (TP)、磷酸盐 ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) 含量都与 TSS 含量变化呈现显著正相关 ($P < 0.05$), 表明风浪扰动造成大量沉积物再悬浮, 并伴随内源磷的释放是水柱中 TP 和磷酸盐的主要来源。夏季模拟试验疏浚对水柱中 TP 和磷酸盐负荷控制效果略差, 冬季模拟试验疏浚水柱中 TP 和磷酸盐含量都显著 ($P < 0.01$) 低于未疏浚对照。利用薄膜扩散梯度 (DGT) 技术研究了夏季疏浚沉积物-水界面上间隙水中溶解态活性磷 (DRP) 垂向分布, 未疏浚水土界面中间隙水 DRP 扩散层厚度大于疏浚样, 但疏浚样间隙水 DRP 在水土界面的离子浓度势能大于未疏浚对照样, 表明底泥疏浚可以有效地降低疏浚区间隙水中 DRP 潜在的释放风险, 但水动力作用下短期内可能会导致疏浚间隙水中 DRP 释放。对于太湖这样的大型浅水湖泊, 确定最佳的疏浚时令、疏浚深度及疏浚范围至关重要。

关键词: 底泥疏浚; 再悬浮; 薄膜扩散梯度; 磷迁移; 太湖

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)10-3368-08

Influence of Dredging on Sediment Resuspension and Phosphorus Transfer in Lake: A Simulation Study

YU Ju-hua^{1,2}, ZHONG Ji-cheng¹, ZHANG Yin-long², FAN Cheng-xin¹, HE Wei¹, ZHANG Lei¹, TANG Zhen-wu³

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Key Laboratory of Forestry Ecological Engineering of Jiangsu Province, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 3. Resource and Environmental Research Institute, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: A simulated experiment was conducted to investigate the impacts of sediment dredging on sediment resuspension and phosphorus transfer in the summer and winter seasons under the common wind-wave disturbance, and the contaminated sediment used in this study was from Meiliang Bay, Taihu lake. The result showed that 20 cm dredging could effectively inhibit the sediment resuspension in study area, dredging in winter has a better effect than that in summer, and the higher values of the total suspended solid (TSS) in undredged and dredged water column during the process of wind wave disturbance were 7.0 and 2.2, 24.3 and 6.4 times higher than the initial value in summer and winter simulation respectively. The paired-samples *t*-test result demonstrated that total phosphorus (TP) and phosphate ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) loading positively correlated to TSS content in dredged ($P < 0.01$) and undredged water column ($P < 0.05$), which proved that internal phosphorus fulminating release induced by wind-wave disturbance would significantly increase the TP and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ loading in the water column. The effect of dredging conducted in summer on the TP and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ loading in the water column was negative, but not for winter dredging ($P < 0.01$). The pore water dissolved reactive phosphorus (DRP) profile at water-sediment interface in summer simulation was also investigated by diffusive gradients in thin films (DGT) technique. Diffusion layer of the DRP profile in undredged sediment was wider than that in dredged sediment. However, the DRP diffusion potential in dredged sediment was greater than that in undredged sediment, showing that dredging can effectively reduce the risk of the DRP potential release in dredged pore water, but also would induce the DRP fulminating release in the short time under hydrodynamic action. Generally, dredging was usually deployed during the summer and the autumn. Considering Taihu Lake is a large, shallow, eutrophic lake and the contaminant distribution is spatially heterogeneous, it is vital to determine the optimal time, depth and scope of dredging.

Key words: sediment dredging; resuspension; diffusive gradients in thin films (DGT); phosphorus transfer; Lake Taihu

收稿日期: 2011-12-08; 修订日期: 2012-04-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41171367, 40901253); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2009ZX07106-001-005)

作者简介: 余居华 (1984 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊污染修复与生源要素生物地球化学过程, E-mail: juhuayu1984@yahoo. cn

* 通讯联系人, E-mail: jczhong@niglas. ac. cn

湖泊磷素是水体富营养化程度重要的评价指标之一,同时也是蓝藻水华暴发主要的营养限制因子^[1]。当外源磷输入得到有效的控制后,对于易受风浪驱动的浅水湖泊而言,由于沉积物-水界面具有更大的接触面积,水土界面强烈和频繁的物质能量交换引起的内源磷释放问题受到了国内外研究者广泛关注。如 Roberts 等^[2]跟踪观测了日本琵琶湖在台风作用下水体磷含量增加了 2~4 倍; Qin 等^[3]通过水槽试验估算了太湖在常规风浪条件下全年的 TP 释放通量为 2.1 万 t,是外源磷输入量的 2~6 倍; Søndergaard 等^[4]通过室内模拟试验发现风浪作用下内源磷释放量最大可高达原来的 20~30 倍。因此,风浪扰动是浅水湖泊沉积物再悬浮和营养盐释放的主要驱动力之一,风浪扰动造成表层底泥发生再悬浮能够导致内源营养盐暴发性释放^[5]。

底泥疏浚因能从湖体中将污染底泥永久性去除而被广泛应用于富营养化湖泊内源污染控制,但在疏浚的效果及环境效应问题上国内外尚存在很多争议^[6-8]。近年来在底泥疏浚生态效应方面开展大量关于鱼类^[9]、贝类^[10]、浮游生物^[11]及底栖生物生境破坏与恢复^[12]方面的研究工作;关于疏浚对内源污染控制效果以及环境效应问题较多地关注了疏浚过程中底泥再悬浮^[13]与对污染物的释放^[14,15],以及疏浚后对污染物的长效控制^[16]与生源要素的界面过程及其回复效应^[8],近来国内外研究者也逐渐开始关注疏浚对湖泊生源要素的生物地球化学过程影响机制^[18,19];但所开展的研究通常是疏浚效果的野外监测评价^[20]和室内的静态模拟试验^[21]。由于湖泊野外条件复杂多变,加之底泥疏浚工程对湖泊生态系统的物理环境、化学参数及生物群落特征等均产生了很大影响^[7],野外监测评价很难客观、准确地量化疏浚在污染物控制中的效果^[22];而室内的静态模拟试验,仅有少数采用无扰动柱样模拟疏浚对磷释放的控制效果,并且忽略了浅水湖泊沉积物-水界面有风浪扰动的实际情况,试验精度受到一定的影响。迄今为止,湖泊底泥疏浚在风浪扰动下对水体磷负荷变化的环境效应研究还鲜见报道。

本研究针对地方政府正在或即将对太湖北部水体实施底泥疏浚工程,结合太湖的常规风情^[23],室内模拟研究了在风浪扰动下,夏、冬两个典型季节开展底泥疏浚对沉积物再悬浮过程和上覆水体磷负荷变化的影响;以期更好地认识湖泊底泥疏浚对沉积物再悬浮及磷在水土界面环境行为的影响,并为湖泊底泥疏浚工程方案的决策与实施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究点概况

本研究采样点(31°31′33.9″N,120°12′35.2″E)位于太湖梅梁湾鼋头渚国家重点风景游览区附近^[24]。研究点水体具有重要生态功能,除正常的航行和渔业功能外,研究点水体还具有景观用水的功能,另外研究湖区还是无锡市用水的水源地之一。考察太湖近 20 年来藻类水华发生位置可发现,随着太湖流域经济的快速发展,研究区是太湖藻华形成乃至发生暴发频率最高的区域之一,严重地影响了研究点水体重要的生态功能^[25]。在太湖相关的治理方案中,已有底泥疏浚工程正在或即将在研究区实施,本研究选择该区域进行分析具有重要的现实意义。

1.2 水样和柱状泥样采集时间与方法

样品采集时间分别在 2010 年 8 月和 2011 年 1 月,太湖地区一年中最冷的月份是 1 月,最低气温大致为零度^[26]。在 1 月 18~20 日太湖北部湖湾为雨雪天气,太湖沿岸带湖面出现了短期的结冰现象,利用多参数水质监测仪(YSI6600EDS 型)原位测定水面下 0.5 和 1.5 m 处温度均为 0.72℃;叶绿素 a 浓度和氧化还原电位(ORP)分别为 3.3、5.0 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 218.0、216.0 mV。8 月是太湖地区一年中最炎热的月份,野外原位监测到水面下 0.5 和 1.5 m 处水温分别为 31.55 和 31.29℃;叶绿素 a 浓度为 12.0 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 12.3 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$;ORP 分别为 -43.5 mV 和 -43.0 mV。采用大口径柱状采样器(Rigo Co., $\phi 110\text{ mm}\times 500\text{ mm}$)于预设的研究点位采集若干沉积物柱样,为了保证采集的沉积物柱样有较好的同质性,所有柱样均在较小的区域内一次性采集,用橡胶塞将柱样塞紧保存,同时采集取样点底层湖水,装入 25 L 塑料桶中,在 5 h 内运回实验室进行模拟试验,在运输过程中尽量避免沉积物柱样的扰动。

1.3 再悬浮试验装置与疏浚模拟试验

Y 型旋浆式沉积物再悬浮发生装置^[27],由 Y 型聚乙烯管、侧位扰动电机、上部扰动电机和调频电机等主件组成。根据太湖风速特征研究结果^[23],太湖小风过程极多,历时相对较长,是太湖最常见的水动力现象,前期的研究也对再悬浮发生装置与太湖风速进行了匹配校正。本研究选用 $1.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 作为太湖的背景风速,选择小风作为特征风情对研究区更具有现实意义。

样品运输到实验室后,用虹吸法无扰动抽出沉

积物柱样上覆水,采用上顶法把表层 20 cm 沉积物移入到具有相同口径的 Y 型再悬浮发生装置的玻璃柱中,作为未疏浚对照处理,共 3 个平行(柱样标记为 1 号、2 号、3 号);另取 3 根沉积物柱样,模拟疏浚 20 cm,为了更好地模拟疏浚效果,采用绞吸泵吸除表层 20 cm,余下的 20 cm 底层柱样移入到再悬浮装置中,作为疏浚处理,共 3 个平行(标记为 4 号、5 号、6 号)。未疏浚对照和疏浚柱样装入到再悬浮发生装置后,用虹吸法无扰动地灌注 160 cm 高度的水柱,试验模拟水深为 1.60 m。根据中国科学院太湖湖泊生态系统研究站的连续观测资料^[26],结合作者连续几年来对该研究点进行逐月的野外跟踪监测,设定夏季模拟试验水体温度为 30℃,冬季模拟试验水体温度为 4℃。风浪扰动试验开始前,先将装入到再悬浮发生装置的 6 根柱静态平衡 48 h,以避免添加上覆水而造成的微弱扰动。为了真实地模拟太湖野外实际的风浪过程,模拟典型风速下扰动 3 h,在典型风速扰动前后各开启 1 h 的背景风速扰动,完整地模拟再悬浮与沉降过程,历时 13 h。选择距离水-土界面处分别为 25、75 和 150 cm 的水柱高度预留的采样口采集水样,将采集的 3 个层次水样于 4℃ 下保持待分析。在风速过程的 0、0.5、1、2、5、6、8、10、13 h 采集水样到 100 mL 塑料瓶中,并用 0.45 μm 玻璃纤维滤膜(Whatman GF/C)抽滤后 4℃ 下保存待分析,采样后向水柱中补充相同体积的原位湖水,并根据体积修正稀释作用产生的误差。

疏浚和对照沉积物理化性质是在再悬浮试验结束后对沉积物柱样切割分层。分取沉积物湿样进行含水率、孔隙率和容重的分析,其他理化指标分析是将沉积物鲜样冷冻干燥后,磨碎过 100 目筛后分析。

1.4 间隙水采集与分析

DGT 装置由基座、扩散层、固定层和盖板组成^[17],扩散凝胶采购于 DGT 公司,固定凝胶是文献^[28]使用的 ZrO 固定膜,吸附容量(以 P 计)可以达到 223 μg·cm⁻²。于 2010 年 8 月夏季疏浚模拟试验开始前,将 DGT 装置小心插入用于微环境模拟培养的沉积物中,尽量避免膜窗口挤压和破损。试验结束后(72 h)取出,记录 DGT 装置的泥水界面以及放入和取出的准确时间和泥温度,立刻用超纯水将取出的 DGT 装置表面的颗粒物清洗干净,打开 DGT 装置并用塑料镊子将其中的吸附膜取出,沉积物中溶解性反应磷(DRP)的含量采用 Ding 等^[28]的方法进行测定。

当 DGT 装置插入沉积物中,介质中的活性磷能穿过一定厚度的滤膜和扩散凝胶层并被固定在固定凝胶相上。由于结合相的配合作用,DRP 从外界环境中扩散到结合相,很快在扩散层中会建立一个线性的浓度梯度。结合相上 DRP 浓度计算参照 Ding 等^[28]的计算方法。

1.5 样品分析方法

水样总磷(TP)的测定分别为碱性过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法^[29],磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)的测定为水样经过 0.45 μm 的醋酸纤维滤膜抽滤后采用流动注射分析仪(Skalar-SA1000)测定;总悬浮颗粒物(TSS)为水样过玻璃纤维滤膜(Whatman GF/C)抽滤后于 105℃ 烘干称重法;表层沉积物含水率在 105℃ 条件下烘 24 h 至恒重,孔隙率与容重采用金属环刀法测定^[19],总氮(TN)测定采用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7\text{-H}_2\text{SO}_4$ 消化-凯氏定氮法,总磷(TP)分析采用 SMT 法^[30],称取 0.2 g 干沉积物用 3.5 mol·L⁻¹ 的 HCl 溶液振荡提取,提取液经离心后用钼蓝比色测定上清液中的磷含量^[29],有机碳含量的测定采用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7\text{-H}_2\text{SO}_4$ 油浴氧化 FeSO_4 滴定法,沉积物粒度用激光光透式粒度仪(Mastersize2000, Malvern Instruments Ltd, UK)测定。

1.6 数据分析与统计

上覆水体总悬浮物(TSS)及各营养盐含量变化图用软件 Origin 8.0 来进行绘制。数据处理采用 Excel 2003,利用 SPSS 13.0 对未疏浚对照与疏浚水柱中各营养盐含量配对样品 *t*-检验,以检验试验处理组与对照组水柱中营养盐含量是否存在显著差异。

2 结果与分析

2.1 沉积物基本理化特征

模拟疏浚 20 cm 会对表层沉积物基本理化性质产生较大的影响(表 1)。与对照沉积物相比,疏浚表层沉积物含水率、孔隙率有所降低;容重、有机质与总氮略微增加。疏浚对表层沉积物的总磷与粒度影响较大,能明显提高砂粒在沉积物粒度组成中的百分比;而沉积物总磷含量减少则较为明显。

2.2 模拟风浪扰动和沉降过程中水柱总悬浮物含量变化

模拟扰动和沉降过程中水柱中 TSS 含量变化如图 1 所示。夏季模拟试验未疏浚对照样与疏浚水柱中 TSS 最大的变化量分别为初始值的 7.0 和 2.7 倍[图 1(a)]。在扰动开始的 0.5 h 内,水柱中 TSS 含

表 1 疏浚与未疏浚对照表层沉积物(0~1 cm)基本理化性质¹⁾

Table 1 Physico-chemical characteristics of surface layer (0-1 cm) of control and dredged sediments

样品	含水率/%	孔隙率/%	容重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	有机碳/%	总氮/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	总磷/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	黏、粉粒/%	砂粒/%
对照	61.5 ± 1.4	86.4 ± 5.4	1.40 ± 0.06	1.12 ± 0.09	$1\,923 \pm 346$	714 ± 127	94.1 ± 1.3	5.9 ± 1.3
疏浚	53.7 ± 1.3	77.4 ± 3.3	1.44 ± 0.07	1.18 ± 0.05	$2\,269 \pm 425$	536 ± 114	92.8 ± 1.3	7.1 ± 1.3

1) 数据为 3 个平行样的平均值和标准偏差

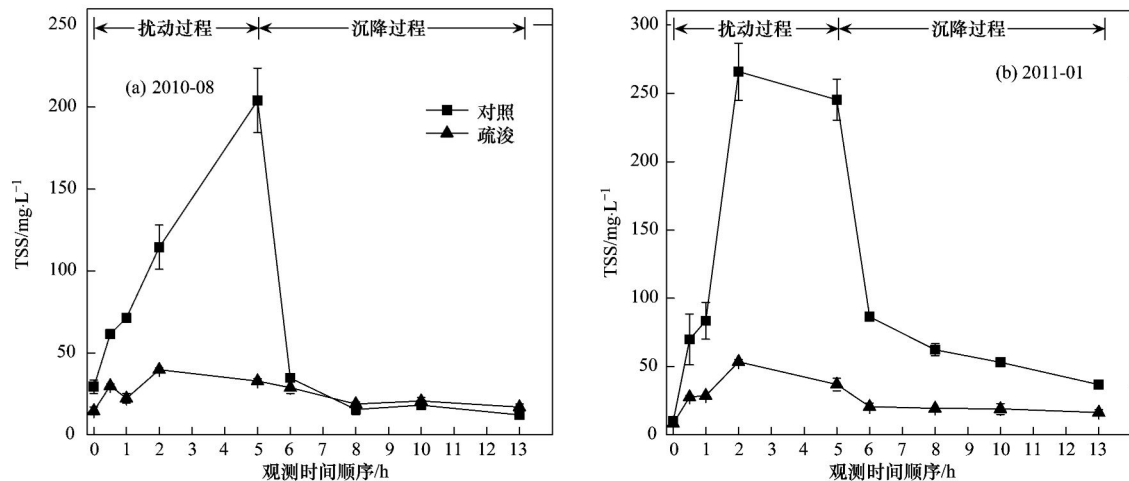


图 1 水柱中悬浮物含量变化情况

Fig. 1 Variances of the total suspended solid in overlying water column

量迅速增大,分别从初始值为 $29.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $14.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增大到 $61.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $29.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 随着扰动的持续,对照水柱中 TSS 含量在第 5 h 达到了最大值($204.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),而疏浚处理样则是在扰动开始后第 2 h 达到了最大值,为 $39.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 在扰动过程中,对照与疏浚水柱中 TSS 含量变化差异显著. 在沉降过程开始的第 1 h,对照样和疏浚水柱 TSS 含量迅速降低, TSS 含量分别为最大值的 17.0% 和 72.6%,在第 6~13 h,水柱 TSS 含量缓慢降低.

冬季模拟试验水柱 TSS 含量变化趋势与夏季的结果相似(图 1),在扰动开始第 0.5 h,对照与疏浚水柱 TSS 含量分别从初始值为 $10.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $8.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 $69.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $27.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [图 1(b)]; 在第 2 h 均达到最大值($265.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $53.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),分别为初始值的 26.3 和 4.4 倍. 在扰动过程中,对照水柱中 TSS 含量与疏浚水柱中 TSS 含量变化差异显著. 随着扰动持续,水柱中 TSS 含量并未继续增大,而是缓慢降低. 在停止扰动的第 1 h,对照与疏浚水柱 TSS 含量分别快速地从 $245.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $36.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低到 $86.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $20.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 直至试验结束,疏浚与对照水柱中 TSS 含量分别为初始值的 1.9 和 3.6 倍.

2.3 模拟风浪扰动和沉降过程中水柱磷负荷变化

水柱中 TP 和磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)含量变化规律与对应的 TSS 含量变化情况较为一致(图 1 和图 2),夏季模拟试验结果表明[图 2(a)和 2(b)],未疏浚对照与疏浚水柱 TP 和磷酸盐含量变化均不存在显著差异($P>0.05$). 在扰动初始的 0.5 h,对照与疏浚水柱 TP 含量分别从初始值为 $0.087 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.085 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 迅速增大到 $0.128 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 随着扰动的持续,在第 2 h,疏浚样降低到扰动阶段的极小值($0.114 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); 扰动过程结束时,对照和疏浚水柱中 TP 含量均达到了最大值,分别为 $0.155 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.134 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 沉降过程初始的 1 h,对照和疏浚水柱中 TP 含量分别降低了 $0.043 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.025 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而后稳步下降. 水柱磷酸盐含量的变化情况与 TP 趋势一致,在初始的 0.5 h,对照与疏浚水柱磷酸盐含量迅速从 $0.015 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.021 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 $0.028 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.025 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 在第 2 h,对照水柱磷酸盐含量达到最大值,为初始值的 2.9 倍;而处理样则是在第 1 h 达到最大值,为初始值的 1.8 倍. 随着扰动持续,水柱磷酸盐含量并非继续增加,对照样缓慢下降,在第 8 h 减少了 $0.022 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,在第 13 h 略高于初始值;然而,在扰动开始后第 2~6 h,疏浚水柱磷酸盐含量基

本保持稳定,并从第 8 h 降至初始值以下。

冬季模拟试验,对照与疏浚水柱中 TP 和磷酸盐含量变化均呈极显著差异 [$P < 0.01$, 图 2(c) 和 2(d)]。在扰动过程初始的 0.5 h, 对照和疏浚水柱 TP 含量快速增大, 疏浚水柱 TP 含量在第 2 h 达到最大值 ($0.119 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。对照水柱从第 1 ~ 5 h 稳步增大, 在第 5 h 达到最大值, 为初始值的 2.1 倍。在沉降过程初始 1 h, 对照和疏浚水柱均出现大幅度下降, 分别减少了 $0.077 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.026 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;

直至沉降过程结束, 疏浚水柱 TP 含量低于初始值。值得注意的是, 与夏季模拟试验最大的不同是从 0 ~ 10 h, 对照与疏浚水柱磷酸盐含量变化呈现稳步增加趋势, 在第 10 h 达到最大值, 分别从 $0.055 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.014 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增大到 $0.098 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.057 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。随着扰动持续, 在第 2 ~ 5 h 对照与疏浚水柱磷酸盐含量保持稳定; 而沉降过程中稳步增大, 第 13 h 分别为 $0.091 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.051 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

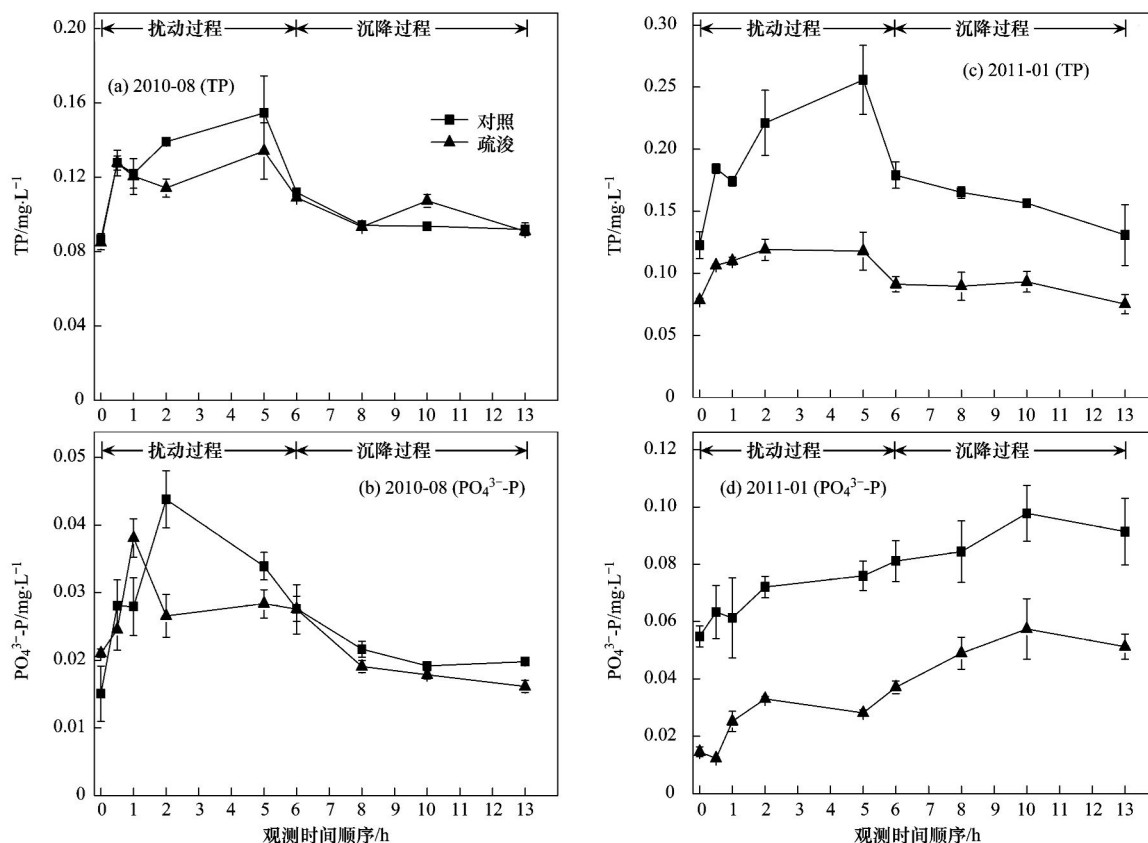


图 2 水柱中 TP 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量变化情况

Fig. 2 Variances of the TP and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ in overlying water column

2.4 间隙水中 DRP 含量垂向分布

利用 DGT 技术获得风浪作用下对照与疏浚沉积物间隙水 DRP 质量浓度的垂向分布 (图 3)。从水-土界面到界面以下 43 mm 处, 对照沉积物间隙水中 DRP 质量浓度呈波动地缓慢增加 (从 $0.029 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增大到 $0.327 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。从界面以下 44 ~ 55 mm 处, 间隙水中 DRP 浓度稳步降低, 在界面以下 55 ~ 60 mm 处间隙水 DRP 质量浓度基本保持稳定 ($0.230 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。疏浚沉积物间隙水 DRP 出现 2 个峰值, 分别在界面以下 15 mm 和 26 mm 处。从水-土界面到界面以下 16 mm 处, 间隙水 DRP 质量浓度突跃式增大, 尤其是从界面以下 8 ~ 16 mm 处, DRP

从 $0.100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增大为 $0.385 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。从界面以下 26 ~ 41 mm 波动降低, 从 $0.414 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低到 $0.189 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 随着深度增加, 间隙水 DRP 含量略微增加后趋于稳定。

3 讨论

沉积物-水界面是沉积物相与上覆水之间的边界层。由于沉积物-水界面的不连续性, 沉积物性质如颗粒密度、颗粒组成、化学物质活性、pH、氧化还原电位、生物活性等均在水土界面发生快速变化^[31]。湖泊底泥疏浚是一种大规模的人为扰动行为, 对湖泊生态系统的物理环境、化学参数及生物

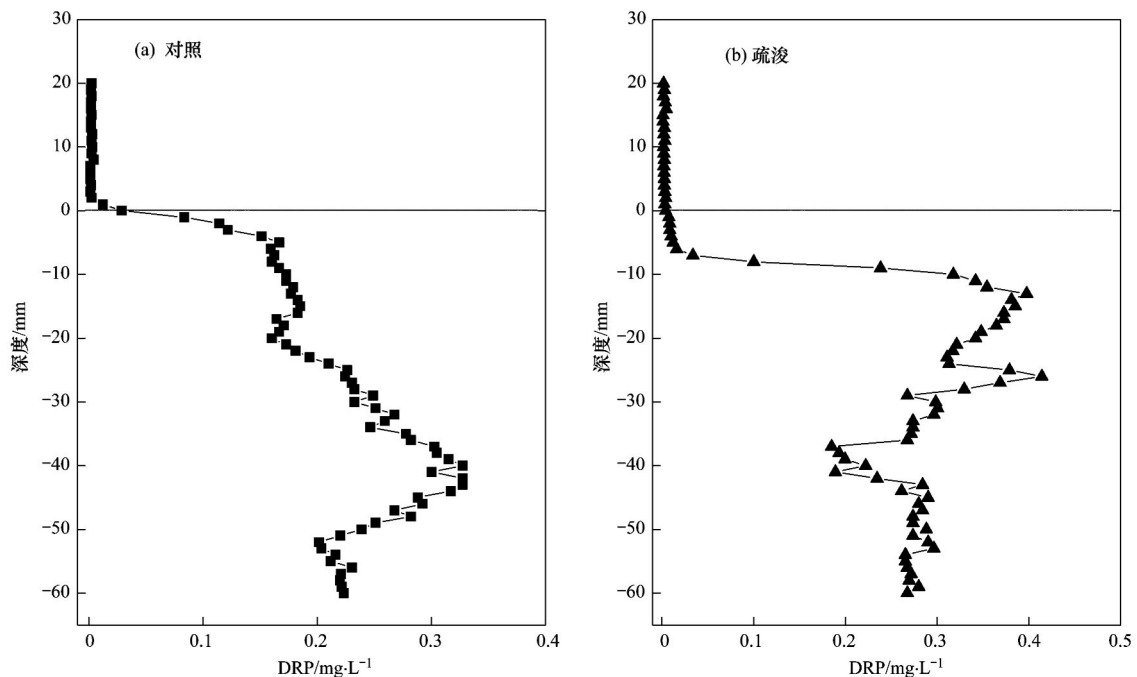


图3 夏季模拟试验沉积物间隙水 DRP 含量剖面分布情况

Fig. 3 Pore water DRP profiles in sediment in August 2010

群落等诸多环境因子产生巨大的影响^[7];同时,沉积物-水界面上也不断发生了一系列物理过程(如颗粒物沉降、再悬浮、紊流等)、化学过程(矿化、吸附和解吸等)及生物过程(生物扰动、生物引灌、生物代谢等)。因此,磷在水土界面上的迁移转化行为也势必受到该过程的影响^[8]。

湖泊疏浚扰动致使表层沉积物胶黏状云团大量发生再悬浮。尤其在大型浅水湖泊中,加上风浪和湖流作用,疏浚过程中水动力扰动将能量带入湖底,对底泥进行扰动,造成表层沉积物、有机碎屑和矿物质等细小颗粒发生大量再悬浮,从而造成水体中营养盐与有机质含量增大^[36]。本研究模拟太湖常规风情扰动下,夏季和冬季模拟试验,对照与疏浚沉积物都发生了不同程度的再悬浮,沉积物中溶解性及颗粒态的磷随着沉积物再悬浮而释放,并且水土界面存在着较大的 DRP 离子浓度势能,而且 DRP 扩散层厚度较大(图3)。在湖流和风浪作用下,导致沉积物间隙水中溶解性活性磷向上覆水中迁移,可能导致内源磷暴发性地释放^[3,5]。有研究表明,6 h 的强风浪扰动可导致水体营养盐浓度增高近1倍;室内模拟试验也发现,动力悬浮产生的营养盐浓度更可高达原来的20~30倍^[4,33]。但疏浚沉积物再悬浮作用明显受到了抑制(图1),相应的沉积物再悬浮过程中的磷释放也受到了抑制(图2),尤其是在冬季模拟试验中,疏浚水柱中 TP 与磷酸

盐含量都显著低于对照。疏浚与对照泥柱表层沉积物物理性质方面存在差异,与对照沉积物相比,疏浚新生表层沉积物更为致密,不如对照沉积物疏松,疏浚沉积物含水率和孔隙率有明显的降低(表1)。水土界面在受到同等强度的切应力情况下,致使疏浚后致密的新生表层沉积物不易发生再悬浮及内源磷释放(图1和图2)。

底泥疏浚对水土界面化学特征产生了很大影响,随着深度增加,沉积物中的非晶矿物逐步有序化,铁氧化物与磷的结合能力逐渐降低^[34];并且疏浚较对照沉积物,易生物分解的有机质含量显著降低。底泥疏浚将表层富含营养盐和污染物层次移除,造成了新生表层铁、锰氧化物的含量和赋存形态发生改变。另外,疏浚过程中水动力作用也会将沉积物-水界面变大,致使疏浚后新生界面频繁与氧含量高的介质充分接触,致使氧化还原电位上升,从而使上覆水中的无机颗粒物质,以铁、锰离子等为基本构架的黏土矿物及氧化物胶体等含量显著增加,结果可能在沉积物界面上形成一较致密的氧化层^[35],随着氧化层的形成并能够阻止磷在水土界面的释放,因此有利于底泥对磷的专属性吸附^[4]。

夏季模拟试验中,疏浚水柱中 TP 负荷在扰动过程中低于对对照,由于其平衡时间较长,因此在沉降过程出现了高于未疏浚对照的现象[图2(a)];而冬季模拟试验过程中疏浚水柱 TP 浓度显著低于

对照 [$P < 0.01$, 图 2(c)]. 可能是由于疏浚后新生表层没有对照沉积物那么疏松, 对照水柱 TSS 含量显著高于疏浚样(图 1), 可能导致湖泊内源营养盐发生爆发性释放^[5]. 夏、冬季两次试验中疏浚水柱磷酸盐浓度显著低于对照样 [$P < 0.01$, 图 2(b) 和 2(d)], 可能是由于风浪作用下, 疏浚后新生界面层不断复氧, 在水土界面形成的致密氧化层对间隙水中活性磷具有强烈的吸附与阻滞作用. 其次, 可能是疏浚样发生再悬浮的颗粒物粒径较小, 相对于粗颗粒比表面积更大, 对水体中溶解性活性磷吸附作用更强, 疏浚样水柱中 TP 和磷酸盐含量平衡时间更长可能也与之有关(图 2).

在模拟风浪扰动过程中, 夏季模拟试验结果表明: 随着扰动的持续, 对照和疏浚水柱 TP 含量在不断增大, 第 5 h 水柱中 TP 负荷达到最大值 ($0.155 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.134 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$); 但水柱磷酸盐含量并非继续增加, 对照样缓慢下降, 而疏浚样从第 2 ~ 6 h 基本保持稳定[图 2(a) 和 2(b)], 冬季模拟试验结果也出现了类似的现象[图 2(b) 和 2(d)]. 其中的原因可能有二点: 其一, 风浪扰动促使表层沉积物发生再悬浮, 新生表层直接与氧含量较充分的上覆水接触, 致使氧化还原电位上升, 从而使上覆水中的无机颗粒物, 以铁、锰离子等为基本构架的黏土矿物及氧化物胶体等含量显著增加, 有利于底泥对磷的专属性吸附^[30]; 其二, 扰动增加了水体悬浮颗粒物的数量, 且加剧了水体颗粒物质的运动, 并增加了颗粒间、颗粒与离子间的碰撞, 增大了水体无机和有机胶体颗粒对溶解性磷的吸附作用^[32]. 较未疏浚对照而言, 疏浚处理水柱磷酸盐负荷下降缓慢, 表明底泥疏浚柱中颗粒物相对较少, 相应地对水柱溶解性活性磷吸附作用较弱, 平衡时间相对较长.

总体上说, 试验过程中水柱 TP 和溶解性磷酸盐含量变化大致与 TSS 含量变化趋势相一致[图(2)]. 尤其是冬季模拟, 疏浚与对照样水柱中 TP 和磷酸盐含量与 TSS 负荷变化具有显著的正相关 ($P < 0.05$, 图 1 和图 2). 这说明风浪扰动过程中, 水柱中 TP 和溶解性活性磷主要源于沉积物的再悬浮过程. 但是夏季和冬季 2 次试验过程中水柱溶解性活性磷浓度变化趋势有所不同, 夏季模拟疏浚与对照样水柱中磷酸盐含量在扰动结束后均出现不同程度的下降[图 2(b)], 但冬季模拟试验水柱中磷酸盐负荷在扰动结束后反而稳步增加[图 2(d)], 这表明 2 次试验在模拟风浪扰动和沉降过程中磷的迁移行为有所不同, 冬季试验中溶解性活性磷的释

放持续时间较长, 与夏季试验相比溶解性活性磷释放出现了滞后, 这个现象可能与两季沉积物间隙水中溶解性活性磷浓度、沉积物性质、试验系统温度和风浪扰动强度等都有关系^[32,37].

另外需要指出的是, 受试验方法的限制, 本研究只是模拟疏浚 20 cm, 在 2 次试验过程中对照水柱中的溶解性活性磷要高于疏浚处理(图 2), 而疏浚沉积物间隙水中的溶解性活性磷并没有降低(图 3), 因此疏浚水柱中溶解性活性磷负荷消减的原因主要在于疏浚沉积物再悬浮受到明显的抑制(图 1), 相应地沉积物再悬浮过程中颗粒物的溶解性活性磷释放也会受到抑制, 而沉积物间隙水溶解性活性磷的静态扩散通量对于水柱中磷浓度大小不起决定作用. 从这个角度来说, 污染沉积物疏浚一定深度能够抑制沉积物的再悬浮, 并能够消减沉积物再悬浮过程中颗粒物磷的释放, 对于湖泊疏浚工程来说是一个正效应. 在规划疏浚工程时, 建议对拟疏浚区做前期的调查研究, 以确定磷及其他污染物在沉积物与间隙水中垂向赋存特征, 模拟不同的疏浚深度并评价其潜在风险, 以确定合理疏浚深度, 提高疏浚工程的成功率.

4 结论

通过冬夏两季疏浚模拟试验表明, 研究区模拟疏浚 20 cm 能够有效地抑制沉积物在风浪作用下发生再悬浮, 其中冬季比夏季疏浚抑制效果更好. 就短时效应而言, 夏季模拟疏浚对水体 TP 和磷酸盐含量都有一定的控制作用, 冬季疏浚对水体 TP 和磷酸盐含量控制效果均达到极显著差异; 但因疏浚新生界面较对照更加密实, 夏、冬季节疏浚对水柱 TP 含量控制效果上均存在滞后效应. 另外需要指出, 疏浚后新生界面 DRP 扩散层厚度大于对照, 虽可有效降低间隙水中 DRP 的潜在释放风险; 但水土界面 DRP 离子浓度势能较对照增大, 在风浪作用下可能会引发内源磷的释放. 对于易受风浪扰动的大型浅水湖泊, 确定最佳的疏浚时令、疏浚深度和疏浚范围尤为重要.

参考文献:

- [1] 范成新, 王春霞. 长江中下游湖泊环境地球化学与富营养化[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 61-74.
- [2] Roberts R D, Waiser M J, Hadas O, *et al.* Relaxation of phosphorus limitation due to typhoon-induced mixing in two morphologically distinct basins of Lake Biwa, Japan[J]. *Limnology and Oceanography*, 1998, **43**(6): 1023-1036.
- [3] Qin B Q, Hu W P, Gao G, *et al.* Dynamics of sediment

- resuspension and the conceptual schema of nutrient release in the large shallow Lake Taihu, China[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, **49**(1): 54-64.
- [4] Søndergaard M, Kristensen P, Jeppesen E. Phosphorus release from resuspended sediment in the shallow and wind-exposed Lake Arresø, Denmark[J]. Hydrobiologia, 1992, **228**(1): 91-99.
- [5] 朱广伟, 秦伯强, 高光. 风浪扰动引起大型浅水型湖泊内源磷暴发性释放的直接证据[J]. 科学通报, 2005, **50**(1): 66-71.
- [6] Qin B Q, Yang L Y, Chen F Z, *et al.* Mechanism and control of lake eutrophication [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, **51**(19): 2401-2412.
- [7] 濮培民, 王国祥, 胡春华, 等. 底泥疏浚能控制湖泊富营养化吗? [J]. 湖泊科学, 2000, **12**(3): 269-278.
- [8] Fan C X, Zhang L, Wang J J, *et al.* Processes and mechanism of effects of sludge dredging on internal source release in lakes[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, **49**(17): 1853-1859.
- [9] Tuck I D, Bailey N, Harding M, *et al.* The impact of water jet dredging for razor clams, *Ensis* spp., in a shallow sandy subtidal environment[J]. Journal of Sea Research, 2000, **43**(1): 65-81.
- [10] Maguire J A, Coleman A, Jenkins S, *et al.* Effects of dredging on undersized scallops[J]. Fisheries Research, 2002, **56**(2): 155-165.
- [11] Edlund A, Jansson J K. Changes in active bacterial communities before and after dredging of highly polluted Baltic Sea sediments [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2006, **72**(10): 6800-6807.
- [12] Szymelfening M, Kotwicki L, Graca B. Benthic re-colonization in post-dredging pits in the Puck Bay (Southern Baltic Sea) [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2006, **68**(3-4): 489-498.
- [13] Hossain S, Eyre B D, McKee L J. Impacts of dredging on dry season suspended sediment concentration in the Brisbane River estuary, Queensland, Australia [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2004, **61**(3): 539-545.
- [14] Bremle G, Larsson P. PCB concentration in fish in a river system after remediation of contaminated sediment [J]. Environmental Science and Technology, 1998, **32**(22): 3491-3495.
- [15] Lohrer A M, Wetz J J. Dredging-induced nutrient release from sediments to the water column in a southeastern saltmarsh tidal creek [J]. Marine Pollution Bulletin, 2003, **46**(9): 1156-1163.
- [16] Reddy K R, Fisher M M, Wang Y, *et al.* Potential effects of sediment dredging on internal phosphorus loading in a shallow, subtropical lake[J]. Lake and Reservoir Management, 2007, **23**(1): 27-38.
- [17] Zhang H. Practical guide to using DGT sediment probes [R]. Lancaster, UK: DGT Research Ltd, 1999.
- [18] Zhong J C, Fan C X, Zhang L, *et al.* Significance of dredging on sediment denitrification in Meiliang Bay, China: a year long simulation study[J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, **22**(1): 68-75.
- [19] 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.
- [20] Wang X Y, Feng J. Assessment of the effectiveness of environmental dredging in South Lake, China[J]. Environmental Management, 2007, **40**(2): 314-322.
- [21] 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.
- [22] Gustavson K E, Allen Burton G, Francingues N J R, *et al.* Evaluating the effectiveness of contaminated-sediment dredging: as the science of environmental dredging and sediment management changes, adaptive management strategies can help long-term remediation projects keep pace [J]. Environmental Science and Technology, 2008, **42**(14): 5042-5047.
- [23] 尤本胜, 王同成, 范成新, 等. 太湖沉积物再悬浮模拟方法 [J]. 湖泊科学, 2007, **19**(5): 611-617.
- [24] 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.
- [25] 秦伯强. 太湖水环境面临的主要问题、研究动态与初步进展 [J]. 湖泊科学, 1998, **10**(4): 1-9.
- [26] Kelderman P, Zhu W, Maessen M. Water and mass budgets for estimating phosphorus sediment-water exchange in Lake Taihu (China P. R.) [J]. Hydrobiologia, 2005, **544**(1): 167-175.
- [27] 尤本胜, 王同成, 范成新, 等. 太湖草型湖区沉积物再悬浮对水体营养盐的影响[J]. 环境科学, 2008, **29**(1): 26-31.
- [28] Ding S M, Xu D, Sun Q, *et al.* Measurement of dissolved reactive phosphorus using the diffusive gradients in thin films technique with a high-capacity binding phase [J]. Environmental Science and Technology, 2010, **44**(21): 8169-8174.
- [29] 金灿灿, 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.
- [30] Ruban V, López-Sánchez J F, Pardo P, *et al.* Selection and evaluation of sequential extraction procedures for the determination of phosphorus forms in lake sediment [J]. Journal of Environmental Monitoring, 1999, **1**(1): 51-56.
- [31] Sandschi P, Höhener P, Benoit G, *et al.* Chemical processes at the sediment-water interface [J]. Marine Chemistry, 1990, **30**: 269-315.
- [32] 孙小静, 秦伯强, 朱广伟, 等. 风浪对太湖水体中胶体态营养盐和浮游植物的影响 [J]. 环境科学, 2007, **28**(3): 506-511.
- [33] Kristensen P M, Søndergaard M, Jeppesen E. Resuspension in a shallow eutrophic lake [J]. Hydrobiologia, 1992, **228**(1): 101-109.
- [34] 张路, 范成新, 池俏俏, 等. 太湖及其主要入湖河流沉积磷形态分布研究 [J]. 地球化学, 2004, **33**(4): 423-432.
- [35] 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.
- [36] Nayar S, Miller D J, Hunt A, *et al.* Environmental effects of dredging on sediment nutrients, carbon and granulometry in a tropical estuary [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2007, **127**(1-3): 1-13.
- [37] 钟继承, 刘国锋, 范成新, 等. 湖泊底泥疏浚环境效应: IV. 对沉积物微生物活性与群落功能多样性的影响及其意义 [J]. 湖泊科学, 2010, **22**(1): 21-28.

CONTENTS

Nutrient Dynamics over the Past 100 Years and Its Restoration Baseline in Dianshan Lake	LI Xiao-ping, CHEN Xiao-hua, DONG Xu-hui, <i>et al.</i> (3301)
Possibility of Total Dissolved Solid as one of Nutrient Baselines in Inner Mongolia-Xinjiang Plateau	XI Bei-dou, ZHANG Ya-li, XU Qiu-jin (3308)
Fluorescence Discrimination Technique for Phytoplankton Based on the Wavelet Analysis	ZHANG Cui, SU Rong-guo, SONG Zhi-jie, <i>et al.</i> (3314)
Analysis of Algae Bloom and Lake Surface Bright Temperature in Chaohu Lake Based on Remote Sensing Data	ZHANG Hong, HUANG Yong, LI Kun (3323)
Case Study on Groundwater Health Risk Assessment and Remediation Strategy Based on Exposure Pathway	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, JIA Xiao-yang, <i>et al.</i> (3329)
Pollution Assessment in the Intertidal Zone of Beibu Gulf Using Multi-biomarker Pollution Index	DU Xiu-ping, MENG Fan-ping, WANG Zhi-feng, <i>et al.</i> (3336)
Estimation of the Flux of Inorganic Nitrogen Flowing into the East China Sea	WU Jia-lin, FANG Qian, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (3344)
Effects of Ocean Acidification on Growth, Phosphate and Nitrate Uptake of Macroalgae	YU Juan, ZHANG Yu, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (3352)
Forms and Distributions of Particulate Phosphorus in the Surface Sediments of North Yellow Sea	MENG Jia, YAO Qing-zhen, CHEN Hong-tao, <i>et al.</i> (3361)
Influence of Dredging on Sediment Resuspension and Phosphorus Transfer in Lake; A Simulation Study	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, ZHANG Yin-long, <i>et al.</i> (3368)
Transportation and Sources of the Suspended Particle in a Karst Spring During a Storm Event	YANG Ping-heng, LIU Zi-qi, HE Qiu-fang (3376)
Comparison of Trophic Status Analysis of the Daning River Within the Three Gorges Reservoir Before and After Experimental Impoundment	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (3382)
Nitrogen and Phosphorus Loss in Different Land Use Types and Its Response to Environmental Factors in the Three Gorges Reservoir Area	ZENG Li-xiong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3390)
Research on Stormwater Runoff Quality of Mountain City by Source Area Monitoring	LI Li-qing, SHAN Bao-qing, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (3397)
Occurrence Form and Ecological Effect of Selenium in Soil and Surface Water of Kailuan Coalfield of Tangshan	ZHANG Xiu-zhi, MA Zhong-she, WANG Yin-nan, <i>et al.</i> (3404)
Distribution of Arsenic in Surface Water in Tibet	WANG Ming-guo, LI She-hong, WANG Hui, <i>et al.</i> (3411)
Spatial and Temporal Distribution of Trace Elements in Surface Water in the Xilin River Basin	XUE Li-yang, WU Jin-kui, ZHANG Ming-quan, <i>et al.</i> (3417)
Concentration Characteristics and Ecological Risk of Persistent Organic Pollutants in the Surface Sediments of Tianjin Coastal Area	LU Xiao-xia, ZHANG Shu, CHEN Chao-qi, <i>et al.</i> (3426)
Distribution, Sources and Ecological Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyl in Sediments from Songhua River Basin	NIE Hai-feng, ZHAO Chuan-dong, LIU Ying-han, <i>et al.</i> (3434)
Distributions of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of the Yangtze Estuary	LI Tao, HOU Li-jun, LIU Min, <i>et al.</i> (3443)
Geochemical Characteristics of Nitrogen in Core Sediments from Sishili Bay, China	YANG Yu-wei, GAO Xue-lu, LI Pei-miao (3449)
Composition of <i>n</i> -Alkanes in Soils of the Yellow River Estuary Wetlands and Their Potential as Organic Matter Source Indicators	YAO Peng, YIN Hong-zhen, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (3457)
Study on the Degradation and Transformation of Nonylphenol in Water Containing Algae	PENG Zhang-e, FENG Jin-mei, HE Shu-ying, <i>et al.</i> (3466)
Degradation of Orange IV Dye Solution Catalyzed by Fe(NO ₃) ₃ ·(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈ Modified GAC in the Presence of H ₂ O ₂	ZHANG Ying-jie, XU Shu-fen, LIAO Xia, <i>et al.</i> (3473)
Synthesis, Characterization and Electrocatalytic Performance of Pd/CMK-3 for Formic Acid Oxidation	HUAN Zhong-ke, ZONG En-min, WEI Dan, <i>et al.</i> (3479)
Research of Controlling Condition for Aeration Stabilization Pond Dealing with Sanitary Waste of Countryside	LI Huai-zheng, YAO Shu-jun, XU Zu-xin, <i>et al.</i> (3484)
Pilot-Scale Study on Treatment of Municipal Sewage by Moving-Bed Biofilm Reactor with the Hydrophobically Modified Polyurethane Cubes as Biofilm Carriers	WANG Yu-xiao, KONG Xiu-qin, FENG Quan, <i>et al.</i> (3489)
Variation Characteristics of Relative Molecular Mass of Different Fractions of Dissolved Organic Matter from Landfill Leachate During Photocatalytic Degradation	JIA Chen-zhong, WANG Yan-xin, ZHANG Cai-xiang (3495)
Mechanism of Nitrogen Removal by Partial Nitrification-Denitrification Biological Filter	SUN Ying-xue, XU Dong, TIAN Yuan, <i>et al.</i> (3501)
Performance Stability of CANON Reactor and Temperature Impact	FU Kun-ming, ZHANG Jie, CAO Xiang-sheng, <i>et al.</i> (3507)
Denitrifying Phosphorus Removal in a Modified University of Cape Town (MUCT) Process Treating Domestic Wastewater Under Nitrification and Nitritation	ZENG Wei, WANG Xiang-dong, ZHANG Li-dong, <i>et al.</i> (3513)
Study on the Stratification Components of Extracellular Polymeric Substances (EPS) in Activated Sludge and Their Variation Characteristics in Physicochemical Properties	YUAN Dong-qin, WANG Yi-li (3522)
Influence of Organic Loading Rate on the Start-up of a Sequencing Airlift Aerobic Granular Reactor	LIU Meng-yuan, ZHOU Dan-dan, GAO Lin-lin, <i>et al.</i> (3529)
Degradation Kinetics of Naphthalene by Anaerobic Sludge and Analysis of the Bacterial Biodiversity	CAO Xin-kai, YANG Qi, HAO Chun-bo (3535)
Sorption of 17 β -estradiol to Soils and Sediment and Influence of Pig Manure DOM	ZHANG Feng-song, LI Yan-xia, HUANG Ze-chun, <i>et al.</i> (3542)
Sorption Isotherms and Sorption Thermodynamics of Faecal Sterols on Offshore Sediment	ZHANG Xiao-lei, XUE Wen-ping, XU Heng-zhen, <i>et al.</i> (3547)
Research on the Characteristic of Toluene Migration and Distribution in Fluvio-Aquic Soil and Its Simulation Using STOMP Model	HAN Chun-mei, RAN Juan, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (3554)
Predicting the Cadmium Bioavailability in the Soil of Sugarcane Field Based on the Diffusive Gradients in Thin Films with Binding Phase of Sodium Polycrylate	WANG Fang-li, SONG Ning-ning, ZHAO Yu-jie, <i>et al.</i> (3562)
<i>In Situ</i> Immobilization of Pb and Cd in Orchard Soil Using Soil Ameliorants	TANG Min, ZHANG Jin-zhong, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3569)
Health Assessment of Heavy Metals in Roadside Soils at Different Operation Time; A Case Study of Zhengzhou-Shangqiu Section Along the Lianyungang-Horgas Highway	GU Lei, TONG Zhi-qi, SONG Bo, <i>et al.</i> (3577)
Amelioration Effects of Wastewater Sludge Biochars on Red Soil Acidity and Their Environmental Risk	LU Zai-liang, LI Jiu-yu, JIANG Jun, <i>et al.</i> (3585)
Effect of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on the Vertical Distribution of Denitrifying Genes in River Sediments	WU Yan-yang, WU Qun-he, HUANG Shan, <i>et al.</i> (3592)
Role of Layered Double Hydroxide (LDH) in the Protection of Herring Testis DNA from Heavy Metals	TANG Yi-ni, WU Ping-xiao, ZHU Neng-wu (3598)
Mineralogical Characteristics of Biogenic Schwertmannite Amended with Different Pretreatment Methods and the Effects on As(Ⅲ) Absorption	LIANG Jian-ru, LI Zhe-ying, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (3606)
Mechanism of Heavy-Metal Tolerance in <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ZGKD2	ZHANG Yu-xin, WANG Jiao, CHAI Tuan-yao, <i>et al.</i> (3613)
Isolation, Degradation Characteristics of a 1,2-Dichloroethane-Degrading Strain	WANG Xiao-chun, CHEN Dong-zhi, JIN Xiao-jun, <i>et al.</i> (3620)
Isolation and Degradation Characteristics of PCB-degrading Strain	SHI Shun-yan, FENG Liu, GONG Ji (3627)
Preliminary Study on the Changes of Bacterial Community Structure in Qingcaosha Reservoir During Water Storage Period	PENG Qing, XIE Bing, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3634)
N ₂ O Exchange Fluxes from Wheat-Maize Crop Rotation System in the North China Plain	PEI Shu-wei, ZHANG Yuan-yuan, LIU Jun-feng, <i>et al.</i> (3641)
Analysis of the Impact of Two Typical Air Pollution Events on the Air Quality of Nanjing	WANG Fei, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (3647)
Pollution Characteristics of VOCs in Ambient Air of Ji'nan City in Summer	LIU Ze-chang, ZHANG Fan, HOU Lu-jian, <i>et al.</i> (3656)
Effects and Mechanism of Catalytic Decomposition of Ozone by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhi-ye, ZHANG Zhong-ming, <i>et al.</i> (3662)
Effect of Elevated O ₃ on the Arbuscular Mycorrhizal (AM) Structure and Glomalin Production in Two Genotypes of Snap Bean	WANG Peng-teng, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang (3667)
Effect of Exogenous Calcium on the Activities of Antioxidative Protective Enzymes in Ectomycorrhizal Fungi Under Aluminum Stress	WANG Ming-xia, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3675)
Mercury Pollution in Cricket in Different Biotopes Suffering from Pollution by Zinc Smelting	ZHENG Dong-mei, LI Xin-xin, LUO Qing (3680)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年10月15日 33卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 10 Oct. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科学出版社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷装订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科学出版社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发刊