

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第3期

Vol.36 No.3

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

重庆市 PM_{2.5} 浓度空间分异模拟及影响因子 吴健生, 廖星, 彭建, 黄秀兰 (759)

2012 ~ 2013 年间北京市 PM_{2.5} 中水溶性离子时空分布规律及相关性分析 杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 陈圆圆, 周健楠, 梁云平 (768)

南京地区大气 PM_{1.1} 中 OC、EC 特征及来源解析 姜文娟, 郭照冰, 刘凤玲, 芮茂凌, 石磊, 曾钢, 郭子研 (774)

太原市大气 PM_{2.5} 中碳质组成及变化特征 张桂香, 闫雨龙, 郭利利, 何秋生, 陈来国 (780)

朔州市市区 PM_{2.5} 中元素碳、有机碳的分布特征 刘凤娟, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 刘效峰, 李丽娟, 刘欣 (787)

中国 2013 年 1 月 PM_{2.5} 重污染过程卫星反演研究 薛文博, 武卫玲, 付飞, 王金南, 韩宝平, 雷宇 (794)

高空偏北风背景下北京地区高污染形成的环境气象机制研究 廖晓农, 孙兆彬, 唐宜西, 蒲维维, 李梓铭, 卢冰 (801)

重庆缙云山降水中不同形态汞的含量及其沉降量 覃蔡清, 王永敏, 彭玉龙, 王定勇 (809)

海南五指山大气气态总汞含量变化特征 雷育涛, 刘明, 陈来国, 谢东海, 林道征, 赵明江, 张毅强, 孙家仁 (817)

树叶烟尘中的有机碳和元素碳 陈惠雨, 刘刚, 徐慧, 李久海, 吴丹 (824)

介质阻挡放电对氯苯的降解特性及其产物分析 姜理英, 曹书岭, 朱润晔, 陈建孟, 苏飞 (831)

长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评价 母清林, 方杰, 邵君波, 张庆红, 王晓华, 黄备 (839)

河流沉积物对典型 PPCPs 的吸附特性及其影响因素 王凯, 李侃竹, 周亦圆, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (847)

岩溶地下河表层沉积物多环芳烃的污染及生态风险研究 蓝家程, 孙玉川, 师阳, 梁作兵 (855)

岩溶地下河系统多介质中多环芳烃污染特征及来源解析 卢丽, 王喆, 裴建国 (862)

两江交汇处水体溶解性有机质的吸收和荧光光谱特征: 以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江为例 闫金龙, 江韬, 高洁, 魏世强, 卢松, 刘江 (869)

三峡库区典型农业小流域土壤溶解性有机质的紫外-可见及荧光特征 王齐磊, 江韬, 赵铮, 木志坚, 魏世强, 闫金龙, 梁俭 (879)

夏、冬季降水中溶解性有机质 (DOM) 光谱特征及来源辨析 梁俭, 江韬, 魏世强, 卢松, 闫金龙, 王齐磊, 高洁 (888)

南水北调丹江口水库原水有机物分子组成规律及其强化混凝处理的效能对比 程拓, 徐斌, 朱贺振, 夏圣骥, 楚文海, 胡广新 (898)

夏季大辽河河口区水体反硝化及其影响因素 杨丽标, 雷坤, 孟伟 (905)

太湖入湖河流溶解性有机碳来源及碳水化合物生物可利用性 叶琳琳, 吴晓东, 孔繁翔, 刘波, 闫德智 (914)

汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析 王宇飞, 赵秀兰, 何丙辉, 黄琪 (922)

三峡蓄水期间汉丰湖消落区营养状态时间变化 黄祺, 何丙辉, 赵秀兰, 王宇飞 (928)

太湖水华期营养盐空间分异特征与赋存量估算 金颖薇, 朱广伟, 许海, 朱梦圆 (936)

贝江浮游藻类群落特征及富营养化风险分析 苟婷, 马千里, 许振成, 王丽, 李杰, 赵学敏 (946)

物理和摇蚊幼虫组合扰动对内源磷再生和形态转化的协同作用 史晓丹, 李大鹏, 王忍, 黄勇 (955)

磷限制下光照和温度对水华鱼腥藻生长动力学的影响 殷志坤, 李哲, 王胜, 郭劲松, 肖艳, 刘静, 张萍 (963)

矿物基多孔颗粒材料净化石英纯化废水研究 王恩文, 雷绍民, 张世春, 黄腾 (969)

PAA 改性纳米铁强化还原降解水中亚甲基蓝 和婧, 王向宇, 王培, 刘坤乾 (980)

微球负载双核锰配合物作为新型非均相 CWPO 催化剂对活性蓝 P-3R 的脱色应用 宋敏, 张琳萍, 钟毅, 徐红, 毛志平 (989)

生物合成施氏矿物作为类芬顿反应催化剂降解甲基橙的研究 汪快兵, 方迪, 徐峙晖, 施瑛, 郑冠宇, 周立祥 (995)

污泥厌氧产酸发酵液作碳源强化污水脱氮除磷中试研究 罗哲, 周光杰, 刘宏波, 聂新宇, 陈宇, 翟丽琴, 刘和 (1000)

高含固污泥水热预处理中碳、氮、磷、硫转化规律 卓杨, 韩芸, 程瑶, 彭党聪, 李玉友 (1006)

MBR 与 SMBR 脱氮除磷特性及膜污染控制 郭小马, 赵焱, 王开演, 赵阳国 (1013)

基质 COD 浓度对单室微生物电解池产甲烷的影响 滕文凯, 刘广立, 骆海萍, 张仁铎, 符诗雨 (1021)

天然沸石中离子交换平衡的离子特异性研究 何云华, 李航, 刘新敏, 熊海灵 (1027)

开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价 李一蒙, 马建华, 刘德新, 孙艳丽, 陈彦芳 (1037)

不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响 邱晓蕾, 宗良纲, 刘一凡, 杜霞飞, 罗敏, 汪润池 (1045)

种植花椒对喀斯特石漠化地区土壤有机碳矿化及活性有机碳的影响 张文娟, 廖洪凯, 龙健, 李娟, 刘云飞 (1053)

江西铜矿及冶炼厂周边土壤和农作物稀土元素含量与评价 金姝兰, 黄益宗, 王斐, 徐峰, 王小玲, 高柱, 胡莹, 乔敏, 李季, 向猛 (1060)

镉与 S-异丙甲草胺对斜生栅藻的联合毒性作用 章小强, 胡晓娜, 陈彩东, 刘惠君 (1069)

高寒灌丛退化演替过程对生态系统呼吸温度敏感性的影响 李东, 罗旭鹏, 曹广民, 吴琴, 胡启武, 卓玛措, 李惠梅 (1075)

黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究 李鑫, 曾全超, 安韶山, 董扬红, 李娅芸 (1084)

单斜相纳米氧化钴基低温 SCR 催化剂脱硝机制研究 叶飞, 刘荣, 管昊, 贡湘君, 季凌晨 (1092)

不同有机物料中的磷形态特征研究 邓佳, 胡梦坤, 赵秀兰, 倪九派, 谢德体 (1098)

北京电动出租车与燃油出租车生命周期环境影响比较研究 施晓清, 孙赵鑫, 李笑诺, 李金香, 杨建新 (1105)

燃煤电厂排放细颗粒物的水溶性无机离子特征综述 段雷, 马子轸, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥 (1117)

菌根真菌重金属耐性机制研究进展 陈保冬, 孙玉青, 张莘, 伍松林 (1123)

亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物特性研究进展 沈李东 (1133)

《环境科学》征订启事 (830) 《环境科学》征稿简则 (846) 信息 (838, 861, 913, 935)

物理和摇蚊幼虫组合扰动对内源磷再生和形态转化的协同作用

史晓丹, 李大鹏*, 王忍, 黄勇

(苏州科技学院环境科学与工程学院, 苏州 215011)

摘要: 为探讨物理和摇蚊幼虫组合扰动对内源磷再生和形态转化的协同作用, 选取了苏州某富营养化河道为研究对象. 利用室内静态培养试验和 Rhizon 间隙水采样技术, 着重对比了单纯的摇蚊幼虫扰动和组合扰动下, 上覆水、间隙水、沉积物中磷形态数量分布的变化规律. 结果表明, 组合扰动下, 上覆水中不同形态磷含量(TP、PP、DTP、DIP)均处于较高水平, 明显高于摇蚊幼虫扰动. 这可归因于微生物活性的显著增加. 与摇蚊幼虫扰动相比, 组合扰动下, 间隙水中 DIP 和 Fe^{2+} 浓度的降低幅度和降低范围明显更大. 这主要是由于物理扰动和底栖生物扰动产生的叠加效应, 导致溶解氧渗透深度增加. 另外, 0~2 cm 沉积物中, NH_4Cl-P 含量明显降低, $Fe/Al-P$ 明显增加, 并且, NH_4Cl-P 和 $Fe/Al-P$ 的变化幅度均在组合扰动下最大. 这暗示了物理扰动和底栖生物扰动对磷再生和迁移产生的叠加效应.

关键词: 组合扰动; 摇蚊幼虫; 内源磷; 间隙水; 上覆水; 沉积物

中图分类号: X131.2; X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)03-0955-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.03.026

Synergistic Effect of Physical and *Chironomus plumosus* Combined Disturbance on Regeneration and Transformation of Internal Phosphorus

SHI Xiao-dan, LI Da-peng*, WANG Ren, HUANG Yong

(School of Environmental Science and Engineering, University of Science and Technology of Suzhou, Suzhou 215011, China)

Abstract: To explain the synergistic effect of physical and *Chironomus plumosus* combined disturbance on the regeneration and transformation of internal phosphorus, laboratory static incubation experiments were carried out with the sediments and overlying water from a eutrophic river in Suzhou. Rhizon samplers were used to acquire the pore water. In the experiment, we compared the variation of different phosphorus forms in the overlying water, the pore water and sediments under the *Chironomus plumosus* disturbance and the combined disturbance. The results indicated that the amount of different forms of phosphorus (TP, PP, DTP, DIP) in the overlying water under combined disturbance was higher than that under *Chironomus plumosus* combination disturbance. It was attributed to the significant increase of the microbial activity in the sediments. Compared with *Chironomus plumosus* disturbance, the amount of DIP and ferrous decreased with the greater magnitude and range. It was attributed to the superposition effect of the physical and benthos disturbance on the penetration depth of the dissolved oxygen. In addition, the amount of NH_4Cl-P decreased remarkably in the 0-2 cm sediment while $Fe/Al-P$ increased obviously. Furthermore, the variation magnitude of NH_4Cl-P and $Fe/Al-P$ was higher under combined disturbance than that under *Chironomus plumosus* disturbance, which suggested the superposition effect of the physical and benthos disturbance on the regeneration and migration of phosphorus.

Key words: combined disturbance; *Chironomus plumosus*; internal phosphorus; pore water; overlying water; sediments

磷是湖泊富营养化产生的关键因子, 随着外源磷得到不断的控制, 内源磷的再生和形态转化对水体富营养化的进程起着越来越重要的作用^[1]. 沉积物扰动是促使内源磷再生和形态转化的关键因素^[2,3]. 通常, 沉积物扰动模式分为 2 类: 一是风浪、湖流、航运等所产生的物理扰动; 二是底栖生物产生的生物扰动. 近年来, 有关物理扰动对内源磷再生和形态转化的影响进行了诸多研究^[4,5]. 同时, 因生物扰动致使沉积物-水界面的特征变化^[6-8] 以及氮磷迁移转化^[9-11] 也引起了人们的关注.

然而, 由于底栖生物对沉积物产生的扰动强度明显低于物理扰动, 导致人们未对生物扰动产

生足够重视. 但是, 研究发现, 物理扰动和生物扰动对沉积物产生环境效应显著不同, 前者注重改造沉积物表层界面^[12], 后者则通过摄食、排泄、挖穴、构筑廊道等活动构造了垂向微界面, 改变了沉积物内部的微环境, 将沉积物-水界面从传统的水平面变成了水平与垂直共存的体系^[13]. 这对内

收稿日期: 2014-07-14; 修订日期: 2014-09-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178284, 51278523); 江苏省第四期“333”工程项目; 江苏省“六大人才高峰”项目(2013-JNHB-022); 苏州科技学院研究生科研创新计划项目(SKCX13S_018)

作者简介: 史晓丹(1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水体修复, E-mail: shixiaodany@foxmail.com

* 通讯联系人, E-mail: ustslp@163.com

源磷的释放途径和释放通量的影响方式明显不同于物理扰动。

如果将物理扰动和底栖生物扰动组合,则两者对沉积物微界面的改造以及对磷迁移转化将产生叠加效应。简而言之,两者会产生相互促进、相互协同的效应。物理扰动能强化生物扰动。在扰动初期,表层沉积物的洞穴和廊道被破坏,底栖生物被迫向沉积物深处迁徙,构筑更多新的廊道和洞穴。在生物引灌作用下,加速间隙水与上覆水的交换,并增加溶解氧的渗透深度;反之,生物扰动能增加表层沉积物的含水率,孔隙度,使得在同等的水动力剪切力作用下,被扰动的沉积物厚度将显著增加,增加因扰动而进入水体的颗粒物含量,并对沉积物、水体中磷的数量分布和形态分布产生影响。

为了验证和阐明物理和底栖生物组合扰动对磷迁移转化产生的叠加效应,本文以摇蚊幼虫和机械扰动作为研究对象,模拟物理和底栖生物组合扰动,探讨了组合扰动下上覆水中不同形态磷的变化规

律,并采用 Rhizon 间隙水采样技术分析了间隙水中溶解性磷酸盐和 Fe^{2+} 的变化规律,同时分析了沉积物不同分层条件下内源磷赋存形态数量分布规律,拟阐明组合扰动下内源磷再生和转化规律,以期丰富和完善浅水湖泊磷迁移转化理论体系提供基础理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究地点与野外采样

试验用沉积物和上覆水采自苏州科技学院校园河道,该河道常年处于重度富营养化状态,蓝藻频发 ($TP \geq 0.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。

2014年3月15日利用大口径重力采样器(Rigo Co. 直径 90 mm 高 500 mm)在河道入口处采集表层 15 cm 沉积物柱样,并保留采样管上端上覆水样,两端用橡胶塞密封后垂直放入特制采样架中,尽量无扰动运回实验室。同时采集上覆水 50 L。采样点沉积物及上覆水的理化性质见表 1。

表 1 采样点沉积物和上覆水的理化性质

Table 1 Physicochemical properties of sediments and overlying water collected from the sampling point

项目	DO / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	pH	TP / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	DTP / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	DIP / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	含水率/%	烧失量 LOI /%	Tot-P / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
上覆水	1.92	7.38	0.444	0.271	0.207			
沉积物						75.07	10.54	1 273

试验用摇蚊幼虫购自花鸟鱼虫市场,其中主要种为羽摇蚊幼虫 (*Chironomus plumosus*)。将买回的摇蚊幼虫用采集沉积物和上覆水驯化培养 1 周后用于试验。

1.2 室内培养试验方法

试验用培养单元培养管构造见图 1,培养管材料为有机玻璃(长 20.5 cm,内径 ID 8.4 cm),底端用橡胶塞密封;管壁留有安装 Rhizon 间隙水采样器(Rhizon core solution sampler)的小孔,使用前用疏水胶带密封。

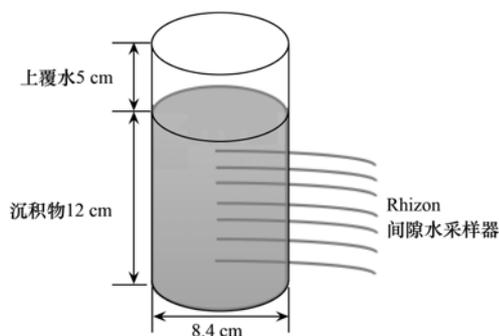


图 1 试验培养管示意

Fig. 1 Experimental incubation tube

将采集的上覆水过 400 目金属筛,截除浮游生物,过滤后的上覆水用作沉积物柱样培养的上覆水。采集的沉积物柱样进行以下处理:将每个柱样表层 12 cm 沉积物切分成 6 层,每层 2 cm,相同层的沉积物收集在同一桶中,将各桶内沉积物过 60 目金属筛除去其中的底栖生物和大颗粒物,将过筛后的沉积物混匀,按原来顺序装入培养管中,并用切片将沉积物-水界面切成完全平整。然后将滤后上覆水引到沉积物上,尽可能不产生表层沉积物的扰动且保持沉积物-水界面的平整。将制得的 9 个沉积物柱样放在培养水槽内,并向水槽内加入滤后上覆水淹没培养管,用曝气沙头对槽内水曝气预培养 16 d,让沉积物稳定。

在第 14 d 沉积物已基本稳定,即沉积物-水界面沉降完全,泥面高度保持稳定;上覆水中的各营养盐浓度保持稳定。从培养水槽中取出沉积物柱样,将泥样柱上顶至适当位置,使得采样孔位于沉积物-水界面以下 1.5、2.5、3.5、4.5、5.5 cm 处(分别采集泥面下 1~2、2~3、3~4、4~5、5~6 cm 段的间隙水,采样分辨率是 1 cm,由于在 0.5 cm 处插入的

Rhizon 采样管易在重力作用下将表层泥面开裂,因此原定于 0.5 cm 处抽取 1~2 cm 间隙水的小孔暂时取消),将 Rhizon 间隙水采样管包扎生料带后插入培养管壁预留的小孔中以保证完全密封,插入时注意采样管的水平.将制得的培养柱样放入黑暗房间内,防止藻类光合作用对磷的影响.同时取足量预培养水放入棕色瓶中 4℃ 保存,作为试验用上覆水的补充.将制得的 9 根柱样分别作如下试验:3 根用于对照试验(ES0),3 根用于摇蚊幼虫试验(ES1),3 根用于物理和摇蚊幼虫组合扰动(ES2).

在第 16 d,测定各处理柱样的上覆水中的总磷(TP),溶解性总磷(DTP),溶解性正磷酸盐(DIP),及不同深度间隙水中的 Fe^{2+} 和 DIP 作为试验初值(0 d).初值测定完毕后,挑选活性较强的摇蚊幼虫,按摇蚊幼虫密度 $3\ 500\ \text{ind}\cdot\text{m}^{-2}$ 计算(该密度处于自然界摇蚊幼虫最高密度范围之内^[14]),每根柱样中加入 20 条第四期摇蚊幼虫,其中主要种为羽摇蚊(*Chironomus plumosus*)幼虫,绝大多数的摇蚊幼虫能迅速打孔钻入沉积物中,0.5 h 过后,将尚未打孔钻入的摇蚊幼虫用镊子轻轻挑出,用新摇蚊幼虫替换,然后将所有培养管放回黑暗房间内开启试验.当晚 20:00,开启恒速搅拌机(IKA RW20 digital),对 ES2 柱样进行扰动,调节转速为 $100\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$,在水面上方 1 cm 处扰动 10 min,使得表层 0.5 cm 沉积物完全悬浮.在试验期间,发现摇蚊幼虫钻出泥面死亡或羽化留下躯壳时,立即用镊子小心挑出,并加入等量的活体,尽可能保证各柱样中生物密度的一致性.

每天采集上覆水水样测定 TP、DTP 和 DIP.在沉积物-水界面以下 0.5 cm 处用 10 mL 针管抽取 9 mL 上覆水.采样后,立即用存于棕色瓶中的等量预培养水补充.间隙水 DIP 取样时用 2 mL 注射器抽取 1 mL 间隙水, Fe^{2+} 取样时预先在针管中加入适量显色剂后抽取 1 mL 间隙水.

上述试验均在黑暗环境中进行,试验期间,室温保持在 15~18℃,共保持了 11 d(第 16~26 d).每天取 9 mL 上覆水,间隙水在 16、21、26 d 采集,每次抽取 2 mL 间隙水.试验在第 26 d 结束,从各组(ES0、ES1、ES2)分别取 1 根柱样,取出 Rhizon 间隙水采样器,并用疏水胶带密封管壁小孔,将底部橡胶塞上顶,切取表层 2 cm 沉积物测定含水率、有机质和沉积物磷形态.再从各组分别取 1 根柱样,经过相同处理后,每 1 cm 分一层,分析沉积物总微生物活性.最后将剩下的各组沉积物柱样按每 3 cm 分切

成 1 层,统计摇蚊幼虫在沉积物中的分布情况.

1.3 样品分析方法

TP 是将水样用过硫酸钾消解后用钼锑抗分光光度法测定;DTP 是将水样先过 0.45 μm 滤膜然用过硫酸钾消解后测定;DIP 含量是将水样过 0.45 μm 滤膜后直接测定.

间隙水中 DIP 用钼锑抗分光光度法测定^[15], Fe^{2+} 用邻菲罗啉分光光度法测定^[16].

将湿泥在 105℃ 条件下烘 12 h 至恒重,通过前后质量差计算得沉积物含水率(%).将烘干的沉积物碾磨、过 100 目筛后放入马弗炉内烧 5.5 h,通过前后质量差计算得沉积物烧失量.

沉积物总微生物活性用荧光素双醋酸酯(FDA)法测定,以单位干重沉积物在单位时间内水解的 FDA 物质的量来表征^[17].

沉积物磷形态分析方法参考四步连续提取的 H-L 法.

2 结果与分析

2.1 试验过程观察

摇蚊幼虫在投加过后能迅速钻入沉积物中,构筑直径约 2 mm 的 U 形或 J 行廊道.观察发现,廊道壁周围颜色由黑色逐渐转变为棕黄色,说明在摇蚊幼虫构造的廊道表层形成了氧化层.主要是由于摇蚊幼虫的“生物引灌”作用所致,致使溶解氧渗透深度增加.

2.2 上覆水中不同形态磷变化规律

试验期间,由于底栖生物作用以及底栖生物和物理扰动的协同作用,导致上覆水中不同形态磷数量分布发生明显变化(图 2).

由图 2(a)可见,对照试验中 TP 在 0~4 d 逐步减小,从第 4 d 开始逐步趋于稳定.同时,摇蚊幼虫扰动和组合扰动的变化趋势基本一致,在第 2 d,TP 都出现了陡然增加(分别从 $0.266\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.574\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 $0.353\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.646\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),前者随即达到了 10 d 以内的峰值.从第 3 到第 10 d,两者 TP 均呈现出减小的趋势.试验期间,组合扰动上覆水中 TP 含量一直处于较高水平,并依次高于摇蚊幼虫扰动试验和对照试验.由图 2(b)可见,PP 的变化规律与 TP 相类似.第 1 d,ES0、ES1 和 ES2 上覆水中 PP 均增加,但从第 2 d 开始,对照试验的 PP 大幅度降低并稳定在 $0.05\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,而摇蚊幼虫和组合扰动均呈先增加后逐渐降低的趋势.TP 和 PP 的变化规律表明:摇蚊幼虫扰动能促进磷从

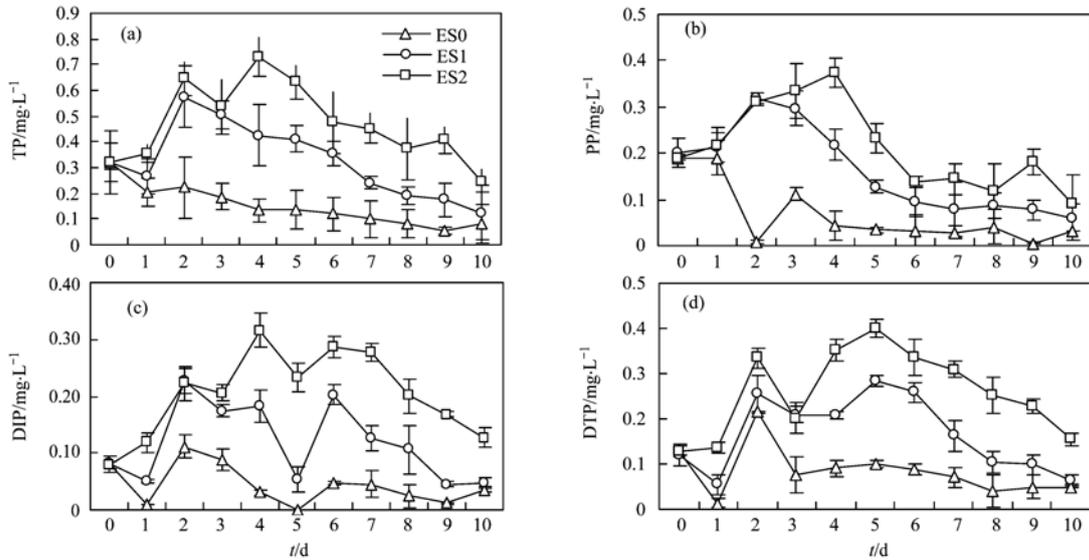


图2 不同处理组上覆水中各形态磷的变化规律

Fig. 2 Variation of different phosphorus forms in the overlying water under different treatments

沉积物向上覆水释放,这与前人研究结果一致^[6,13],同时叠加物理扰动能进一步加大释磷的力度.这可能与底栖生物扰动增加表层沉积物的含水率和孔隙度有关,使得同等物理扰动强度下,沉积物悬浮量增加,从而增加了上覆水中颗粒物含量,进而增加颗粒态磷含量.

DIP 与 DTP 的变化趋势基本一致[图 2(c)和图 2(d)].与 TP 变化规律相同的是,组合扰动上覆水中 DIP 和 DTP 均处于较高水平,并明显高于摇蚊幼虫扰动试验,且均高于对照试验.对照试验上覆水中 DIP 一直稳定在 $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,而摇蚊幼虫扰动,则在第 2 d 出现了最大值($0.23 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),随后呈降低趋势,并于第 10 d 接近 $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.组合扰动则在第 4 d 出现最高值($0.32 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),随后降低,但直至试验结束,上覆水中 DIP 浓度 ($0.13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 仍高于其他试验.图 2(d) 显示, DTP 的变化规律与 DIP 基本一致,并分别在第 2 d、第 5 d 和第 5 d 出现最高值,分别为 $0.21 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (对照试验)、 $0.28 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (摇蚊幼虫扰动) 和 $0.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (组合扰动),随后均呈降低趋势.

这暗示了底栖生物扰动加快了内源磷释放,导致上覆水中溶解态磷含量增加.这主要是在摇蚊幼虫作用下,上覆水从 U 形廊道的一端冲刷进入,将高 DIP 浓度的间隙水从廊道的另一端带出^[18].此外,摇蚊幼虫摄入有机质,并通过新陈代谢作用将有机磷转化成 DIP 的形式排放,这是导致上覆水中溶解态磷含量升高的另一种解释.而相比较而言,由于摇蚊幼虫构建廊道会增加溶解氧的渗透深度,从

而改变沉积物不同深度微生物的数量分布,而微生物数量分布的改变也是导致间隙水中溶解态磷含量变化的关键因素^[8,19].本研究中发现,由于底栖生物的存在,导致沉积物中微生物活性增强,而组合扰动对微生物活性的强化作用则更加明显(图 3).

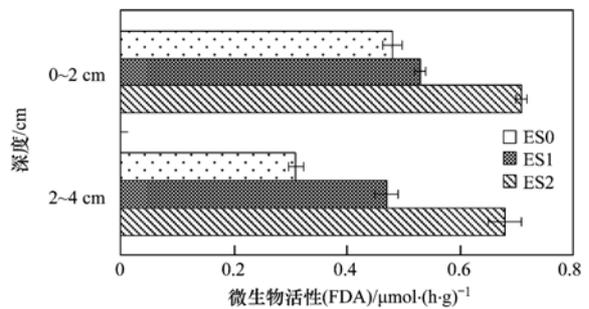


图3 沉积物总微生物活性分布规律

Fig. 3 Distribution of total microbial activity in sediments of different treatments at the end of experiments

图 3 显示,与对照试验相比,摇蚊幼虫和组合扰动显著增加了沉积物中微生物活性.摇蚊幼虫通过生物引灌作用在廊道内部形成了环形氧化层,促使沉积物中好氧微生物活性的恢复,同时也促使好氧微生物向沉积物深处迁移.因此,加快了有机磷的矿化速率^[11],增加了间隙水中 DIP 浓度.组合扰动中微生物活性明显高于摇蚊幼虫扰动,其原因主要是,物理扰动破坏了沉积物表层的廊道和洞穴,迫使摇蚊幼虫重新构筑新的廊道,或者促使摇蚊幼虫构建更深的廊道.因此,与单纯的摇蚊幼虫相比,组合扰动增加了沉积物中好氧区体积,为微生物的恢复提供了有利条件.此外,对照试验中,随着沉积物深度

增加,微生物活性明显降低,然而,在摇蚊幼虫扰动和组合扰动中,这种降低幅度并不明显,这证明了底栖生物扰动增加了溶解氧渗透深度,也证实了物理扰动对底栖生物扰动的促进作用。

如果将摇蚊幼虫所构造廊道的界面面积累加起来,将远远大于沉积物表层界面面积。而这些廊道内壁通常覆盖一层被氧化的颗粒物质,将会对扩散的磷酸根产生专属性吸附。由此推测,摇蚊幼虫扰动和组合扰动下,上覆水中的溶解态磷应显著低于对照试验(沉积物内部无氧化区)。然而,试验结果却并非如此。其主要原因可能有二:其一,在廊道内部,随上覆水引入的溶解氧浓度低于沉积物表层溶解氧浓度,致使廊道中沉积物-水界面氧化层厚度远低于沉积物表层,从而使得抑制间隙水中溶解态磷迁移的能力较弱;其二,摇蚊幼虫活动时,会通过“生物引灌”作用不断将廊道内的间隙水与上覆水更换,但其不活动时,廊道内溶解氧浓度降低,使得氧化区转变为缺氧区,甚至厌氧区,而这种交替的好氧/缺氧/厌氧,可能会诱发内源磷形态发生转变,并促使其再生,从而不断补充间隙水中溶解态磷含量。

2.3 间隙水中 DIP、 Fe^{2+} 变化情况

上覆水中不同形态磷的变化规律与间隙水中溶解性磷酸盐(DIP)的变化密切相关,间隙水既是上覆水中磷含量的重要来源,也是上覆水中磷迁移的主要去向。试验过程中采用 Rhizon 间隙水采样技术分析了 DIP 和 Fe^{2+} 的变化规律(图 4 和图 5),为阐明上覆水中不同形态磷变化规律提供依据。

由图 4(a)可知,在摇蚊幼虫加入前(-1 d),对

照试验(ES0),摇蚊幼虫扰动(ES1),组合扰动(ES2)中 DIP 剖面相似,无显著性差异。在 0~4 cm, DIP 浓度随深度的增加而增加,从 $2.39 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (ES0)、 $2.79 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (ES1) 和 $2.83 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (ES2) 增加到 $5.59 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (ES0)、 $5.03 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (ES1) 和 $5.28 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (ES2); 大于 4 cm 后, DIP 浓度随深度的增加而减小,分别降低至 $3.78 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (ES0)、 $3.91 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (ES1) 和 $3.93 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (ES2)。将图 4(b)与图 4(a)相对比,发现,ES1 和 ES2 沉积物间隙水中 DIP 的峰值区域由 3~4 cm 迁移至 4~5 cm,而对照试验并无此现象,说明摇蚊幼虫的引入改变了原有 DIP 再生的优势区域。此外,对照试验,沉积物纵向剖面 DIP 浓度未见明显减小,这与上覆水中 DIP 浓度保持稳定有关,即在该浓度梯度下,间隙水与上覆水之间 DIP 已达到动态平衡。图 4(c)也显示了相类似规律。而对于摇蚊幼虫扰动而言,间隙水中 DIP 呈明显降低趋势[图 2(c)],暗示了间隙水中 DIP 在生物引灌作用下对上覆水的补充[图 2(c), DIP 在第 2 d 达到峰值]。图 4(c)中,间隙水中 DIP 浓度已达到平衡状态。然而,图 2(c)则显示,5 d 后,摇蚊幼虫扰动致使上覆水中 DIP 有降低趋势。消失的 DIP 主要以迁移进入沉积物为主,抑或被沉积物表层的颗粒物质捕捉,抑或进入间隙水,被氧化的 Fe^{3+} 或者相关 Fe 等金属氧化物吸附。图 5(c)中消失的 Fe^{2+} 可以解释这一点。与摇蚊幼虫扰动相似的是,组合扰动也呈现了相类似的规律。但不同的是, DIP 降低的幅度更大。这与图 2(c)中组合扰动下 DIP 的变化规律也一致。与单纯摇蚊幼虫相比,组合

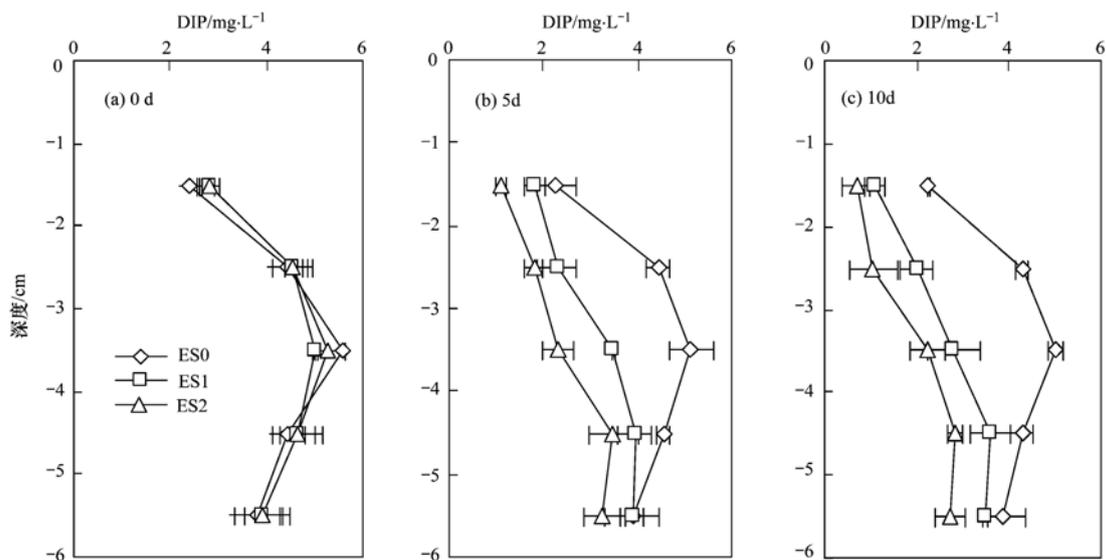
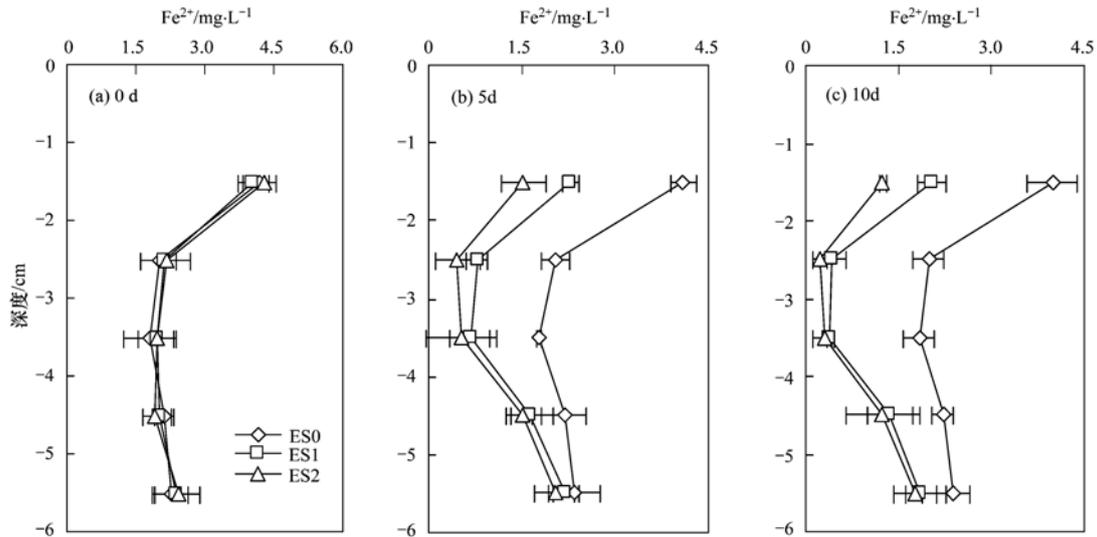


图 4 不同处理组间隙水 DIP 剖面

Fig. 4 DIP profiles in the pore water sampled on day 0, day 5 and day 10 under different treatments

图5 不同处理组间隙水 Fe^{2+} 剖面Fig. 5 Fe^{2+} profiles in the pore water sampled on day 0, day 5 and day 10 under different treatments

扰动下上覆水和间隙水中 DIP 变化幅度更大,也恰恰说明了物理扰动与生物扰动产生的相互促进的叠加效应。

由图 5(a)可知,在摇蚊幼虫加入前(-1 d),对照试验(ES0),摇蚊幼虫扰动(ES1),组合扰动(ES2)中 DIP 剖面相似,无显著性差异。在 0~4 cm, Fe^{2+} 浓度随深度的增加而减小,从 $4.17 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (ES0)、 $4.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (ES1) 和 $4.29 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (ES2) 减小到 $1.83 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (ES0)、 $1.95 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (ES1) 和 $1.94 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (ES2)。大于 4 cm 后 Fe^{2+} 浓度随深度的增加而增大,分别增加到 $2.27 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (ES0)、 $2.39 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (ES1) 和 $2.45 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (ES2),并保持稳定。 Fe^{2+} 在沉积物中分布规律与溶解氧的渗透深度密切相关。图 5(b)显示,与对照试验相比,在沉积物 0~5 cm,摇蚊幼虫显著降低了间隙水中 Fe^{2+} 浓度,并且叠加物理扰动能进一步加大 Fe^{2+} 的降低幅度,这与 DIP[图 4(b)]的变化基本保持一致。对比图 5(b)与对照试验、摇蚊幼虫和组合扰动分别从第 0 d 的 1.82 、 1.94 、 $1.94 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至第 5 d 的 1.78 、 0.67 、 $0.54 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和第 10 d 的 1.81 、 0.37 、 $0.29 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

图 4 和图 5 中 DIP 和 Fe^{2+} 浓度的变化规律表明,摇蚊幼虫能显著减小间隙水中的 DIP 和 Fe^{2+} 浓度,这与前人研究结论相一致^[7,10]。其原因主要有二:一是,底栖生物扰动能将表层的氧化态颗粒带入到沉积物深处;二是,廊道周边沉积物和间隙水中的 Fe^{2+} 不断向其扩散并被氧化成水合铁氧化物^[20]。因此,氧化区及其周边的间隙水中的 DIP 被

大量吸附形成了铁结合态磷(图 6)。这也是 Fe^{2+} 和 DIP 变化同步的解释。此外,组合扰动对 DIP 和 Fe^{2+} 浓度的降低效应显著高于单纯的底栖生物扰动,由于组合扰动对沉积物影响范围增加,从而扩大了 DIP 和 Fe^{2+} 浓度变化范围。这主要与底栖生物扰动和物理扰动对沉积物界面改造的协同效应有关。因此,在两者协同作用下,沉积物中氧化区所占体积增加,即更多的空间和颗粒物质存在氧化的趋势,使得 DIP 和 Fe^{2+} 进一步减小。

2.4 沉积物中磷赋存形态数量分布的变化规律

底栖生物扰动和组合扰动显著改变了沉积物间隙水中 DIP 和 Fe^{2+} 浓度(图 4 和图 5),而 DIP 和 Fe^{2+} 的改变均会对沉积物中不同形态磷的数量分布产生影响(图 6 和图 7)。

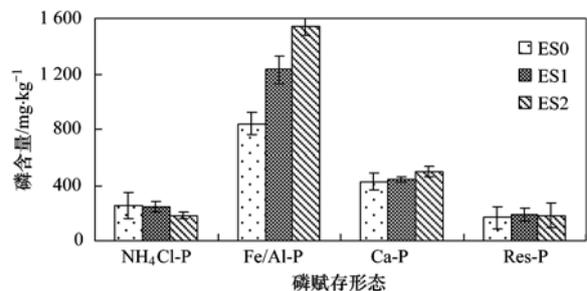


图6 0~2 cm 沉积物磷赋存形态数量分布

Fig. 6 Distribution of phosphorus forms in 0-2 cm sediment from different treatments

图 6 和图 7 显示,不同扰动状态以及对照试验沉积物中不同形态磷数量分布规律明显不同。计算可知,在 0~2 cm 和 2~4 cm,沉积物中 ES0、ES1、ES2 中总磷(Tot-P)含量均呈增加趋势。而对于不同

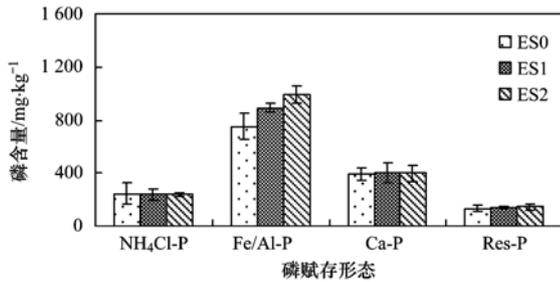


图7 2~4 cm 沉积物磷赋存形态数量分布

Fig. 7 Distribution of phosphorus forms in 2-4 cm sediment from different treatments

形态磷(NH₄Cl-P、Fe/Al-P、Ca-P 和 Res-P)而言,其变化规律有所不同. 表层 0~2 cm, ES0、ES1、ES2 沉积物中的 NH₄Cl-P 含量逐渐减小(图 6), 占总磷的百分比也逐渐较小(图 8), 呈释放趋势. 其可能在好氧/缺氧/厌氧的交替作用下以及微生物作用下, 转化成 DIP 释放到间隙水中, 也可能直接转化成其它形态磷, 如 Fe/Al-P. Fe/Al-P 含量(图 6)及其占 Tot-P 百分比(图 8)显著增加. 与对照试验相比, 摇蚊幼虫扰动和组合扰动下 Fe/Al-P 的净增加量分别达到 390.5 mg·kg⁻¹ 和 704.8 mg·kg⁻¹. 而 Ca-P 和 Res-P 含量略有增加, 但不显著(图 6). 说明 0~2 cm 内的摇蚊幼虫扰动促进了 NH₄Cl-P 向 Fe/Al-P 的转化. 这归因于生物引灌所产生的廊道内溶解氧含量的增加, 间隙水中的 Fe²⁺ 和廊道附近沉积物中的 Fe²⁺ 被氧化成 Fe³⁺ 及其他铁氧化物. 相类似的, 铝锰等金属离子也会因为溶解氧的融入而以氧化态存在. 这些氧化物对磷酸根离子具有较强的吸附能力, 因此, 显著降低了间隙水中的溶解性磷酸盐含量, 藉此增加了 Fe/Al-P 含量^[7,10,21]. 同时, 叠加物理扰动后, NH₄Cl-P 降低幅度以及 Fe/Al-P 增加幅度明显大于单纯的底栖生物扰动. 这可能是由于物理扰动产生的水动力和颗粒间摩擦力较大, 致使以范德华力为主的物理吸附形态磷——NH₄Cl-P 解析释放. 在物理扰动和底栖生物扰动协同作用下, Fe/Al-P 增加显著^[22,23].

尽管 Ca-P 的净增加量低于 Fe/Al-P, 但其增加趋势还是暗示了颗粒悬浮的重要性. 李大鹏等的研究表明^[24], 沉积物扰动致使不同形态磷发生了以“水为媒介”的形态转化. 而将图 6 和图 7 对比, Ca-P 的增加趋势随着沉积物深度增加而降低, 则更证明了颗粒物悬浮的重要性.

图 7 和图 9 显示, 在 2~4 cm, 仅仅 Fe/Al-P 含量及其占总磷的百分比变化明显, 而 NH₄Cl-P、Ca-P 和 Res-P 含量及其占总磷的百分比未见明显变化.

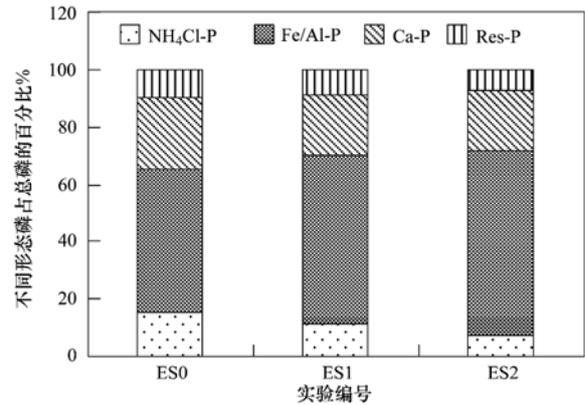


图8 0~2cm 沉积物不同形态磷占总磷的百分比

Fig. 8 Percentage of different phosphorus forms of TP in the 0-2 cm sediment

在其他的研究中也发现了类似的现象^[7,25], 与图 6 对比, Fe/Al-P 的净增加量也明显更低. Fe/Al-P 的增加主要是源于溶解氧渗透深度的增加, 因为组合扰动中 Fe/Al-P 的净增加量要明显高于单纯的底栖生物扰动. 这主要归功于组合扰动的叠加效应. 物理扰动破坏了沉积物表层界面, 致使摇蚊幼虫向更深处构筑廊道, 表层 0~2 cm 的摇蚊幼虫大量向深处迁徙, 促进溶解氧向更深处渗透. 这就使得 2~4 cm 处的氧化还原电位增加, 使得 Fe²⁺ 向 Fe³⁺ 转化(图 5), 并通过形成 Fe/Al-P 的形式降低间隙水中磷酸根离子含量.

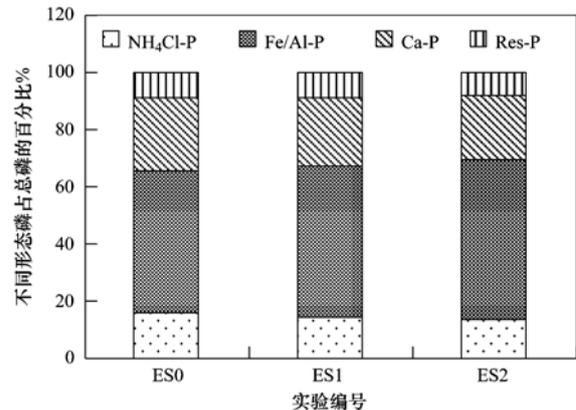


图9 2~4 cm 沉积物不同形态磷占总磷的百分比

Fig. 9 Percentage of different phosphorus forms of TP in the 2-4 cm sediment

值得指出的是, 本文仅是通过上覆水、间隙水中磷含量变化以及不同分层沉积物中形态磷数量分布规律来解释和推测磷的归趋. 如间隙水中的磷酸根离子消失是以进入上覆水增加 DIP 含量为主还是与 Fe³⁺ 及其氧化物形成 Fe/Al-P 为主, 以及两者之间是否存在相互转化的趋势, 还需进一步研究. 在组合扰动作用下, 溶解氧渗透深度增加, 沉积物中好氧

区体积增加,有氧/缺氧/厌氧的交替作用,上述因素的改变对于沉积物中内源磷再生、转化将产生怎样的作用可能是阐明间隙水中 DIP 和 Fe^{2+} 变化规律的关键因素。但毫无疑问,组合扰动对于磷迁移转化的叠加效应显著大于单纯的底栖生物扰动。与单纯的底栖生物扰动或者物理扰动相比,组合扰动更加复杂,但其更接近太湖实际情况,有望揭示太湖水体富营养化发展进程^[26]。

3 结论

(1) 试验期间,组合扰动上覆水中磷含量(TP、PP、DTP、DIP)高于摇蚊幼虫扰动,并且,两者均高于对照试验。这主要源于物理扰动和底栖生物扰动对磷再生和迁移产生的叠加效应。

(2) 组合扰动下,间隙水中 DIP 和 Fe^{2+} 浓度的降低幅度和降低范围明显大于单纯的底栖生物扰动和对照试验。因扰动致使溶解氧渗透深度增加是导致 DIP 和 Fe^{2+} 浓度降低的主要原因。0~2 cm 沉积物中 Fe/Al-P 含量的显著增加则证明了 DIP 和 Fe^{2+} 同步降低的可行性。

(3) 0~2 cm 沉积物中, $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 含量明显降低, Fe/Al-P 明显增加,并且, $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 和 Fe/Al-P 的变化幅度均在组合扰动下最大。

参考文献:

- [1] 秦伯强, 杨柳燕, 陈非洲, 等. 湖泊富营养化发生机制与控制技术及其应用[J]. 科学通报, 2006, **51**(16): 1857-1866.
- [2] Neal C, Neal M, Leeks G J L, *et al.* Suspended sediment and particulate phosphorus in surface waters of the upper Thames Basin, UK[J]. Journal of Hydrology, 2006, **330**(1-2): 142-154.
- [3] 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.
- [4] Li D P, Huang Y. Sedimentary phosphorus fractions and bioavailability as influenced by repeated sediment resuspension [J]. Ecological Engineering, 2010, **36**(7): 958-962.
- [5] 李大鹏, 黄勇, 袁砚, 等. 城市重污染河道底泥对外源磷的吸附和固定机制[J]. 环境科学, 2011, **32**(1): 96-101.
- [6] Gallepp G W. Chironomid influence on phosphorus release in sediment-water microcosms[J]. Ecology, 1979, **60**(3): 547-556.
- [7] Lewandowski J, Hupfer M. Effect of macrozoobenthos on two-dimensional small-scale heterogeneity of pore water phosphorus concentrations in lake sediments: A laboratory study [J]. Limnology and Oceanography, 2005, **50**(4): 1106-1118.
- [8] Hansen K, Mouridsen S, Kristensen E. The impact of *Chironomus plumosus* larvae on organic matter decay and nutrient (N, P) exchange in a shallow eutrophic lake sediment following a phytoplankton sedimentation [J]. Hydrobiologia, 1998, **364**(1): 65-74.
- [9] Andersson G, Granéli W, Stenson J. The influence of animals on phosphorus cycling in lake ecosystems [J]. Hydrobiologia, 1988, **170**(1): 267-284.
- [10] Matisoff G, Fisher J, Matis S. Effects of benthic macroinvertebrates on the exchange of solutes between sediments and freshwater [J]. Hydrobiologia, 1985, **122**(1): 19-33.
- [11] Mermillod-Blondin F, Nogaro G, Detry T, *et al.* Do tubificid worms influence the fate of organic matter and pollutants in stormwater sediments? [J]. Environmental Pollution, 2005, **134**(1): 57-69.
- [12] Hu C H, Hu W P, Zhang F B, *et al.* Sediment resuspension in the Lake Taihu, China [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, **51**(6): 731-737.
- [13] Zhang L, Gu X Z, Fan C X, *et al.* Impact of different benthic animals on phosphorus dynamics across the sediment-water interface [J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, **22**(11): 1674-1682.
- [14] McLachlan A J. Some effects of tube shape on the feeding of *Chironomus plumosus* L. (Diptera: Chironomidae) [J]. Journal of Animal Ecology, 1977, **46**(1): 139-146.
- [15] Murphy J, Riley J P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters [J]. Analytica Chimica Acta, 1962, **27**: 31-36.
- [16] Stookey L L. Ferrozine-a new spectrophotometric reagent for iron [J]. Analytical Chemistry, 1970, **42**(7): 779-781.
- [17] Adam G, Duncan H. Development of a sensitive and rapid method for the measurement of total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) in a range of soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, **33**(7-8): 943-951.
- [18] Pinder L C V. The chironomidae [M]. London: Chapman & Hall, 1995. 107-135.
- [19] Andersen F Ø, Jensen H S. The influence of chironomids on decomposition of organic matter and nutrient exchange in a lake sediment [J]. Verhandlungen des internationalen Verein Limnologie, 1991, **24**: 3051-3055.
- [20] Boström B, Andersen J, Fleischer S, *et al.* Exchange of phosphorus across the sediment-water interface [J]. Hydrobiologia, 1988, **170**(1): 229-244.
- [21] 尤本胜. 太湖沉积物再悬浮和沉降过程中物质的动态迁移及其量化[D]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2007. 75-96.
- [22] House W A, Denison F H. Factors influencing the measurement of equilibrium phosphate concentration in river sediments [J]. Water Research, 2000, **34**(4): 1187-1200.
- [23] 范成新, 张路, 包先明, 等. 太湖沉积物水界面生源要素迁移机制及量化-2 磷释放的热力学机制及源汇转换 [J]. 湖泊科学, 2006, **18**(3): 207-217.
- [24] 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.
- [25] 张雷, 古小治, 邵世光, 等. 河蚬 (*Corbicula fluminea*) 扰动对湖泊沉积物性质及磷迁移的影响 [J]. 环境科学, 2011, **32**(1): 88-95.
- [26] 李大鹏, 黄勇. 风浪与底栖生物扰动对底泥内源磷释放的协同作用 [J]. 中国给水排水, 2013, **29**(4): 17-20.

CONTENTS

Simulation and Influencing Factors of Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentrations in Chongqing	WU Jian-sheng, LIAO Xing, PENG Jian, <i>et al.</i>	(759)
Correlation, Seasonal and Temporal Variation of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Beijing During 2012-2013	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i>	(768)
Characteristics and Sources Apportionment of OC and EC in PM _{1.1} from Nanjing	JIANG Wen-juan, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i>	(774)
Composition and Variation Characteristics of Atmospheric Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Taiyuan, China	ZHANG Gui-xiang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i>	(780)
Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shouzhou City	LIU Feng-xian, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i>	(787)
Satellite Retrieval of a Heavy Pollution Process in January 2013 in China	XUE Wen-bo, WU Wei-ling, FU Fei, <i>et al.</i>	(794)
Meteorological Mechanism for the Formation of a Serious Pollution Case in Beijing in the Background of Northerly Flow at Upper Levels	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, TANG Yi-xi, <i>et al.</i>	(801)
Concentrations and Deposition Fluxes of Different Mercury Species in Precipitation in Jinyun Mountain, Chongqing	QIN Cai-qing, WANG Yong-min, PENG Yu-long, <i>et al.</i>	(809)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Wuzhi Mountain (Wuzhishan) Background Station in Hainan	LEI Yu-tao, LIU Ming, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i>	(817)
Organic and Element Carbon in Foliar Smoke	CHEN Hui-yu, LIU Gang, XU Hui, <i>et al.</i>	(824)
Analysis of Characteristics and Products of Chlorobenzene Degradation with Dielectric Barrier Discharge	JIANG Li-ying, CAO Shu-ling, ZHU Run-ye, <i>et al.</i>	(831)
Distribution, Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Sediments of Yangtze Estuary and Zhejiang Coastal Areas	MU Qing-lin, FANG Jie, SHAO Jun-bo, <i>et al.</i>	(839)
Adsorption Characteristics of Typical PPCPs onto River Sediments and Its Influencing Factors	WANG Kai, LI Kan-zhu, ZHOU Yi-yuan, <i>et al.</i>	(847)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediment in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, <i>et al.</i>	(855)
Contamination Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Multimedium in Karst Underground River	LU Li, WANG Zhe, PEI Jian-guo, <i>et al.</i>	(862)
Characteristics of Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter from Confluence of Rivers; Case Study of Qujiang River-Jialing River and Fujiang River-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, GAO Jie, <i>et al.</i>	(869)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter (DOM) in Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Region	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i>	(879)
Absorption and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Rainwater and Sources Analysis in Summer and Winter Season	LIANG Jian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i>	(888)
Composition of NOM in Raw Water of Danjiangkou Reservoir of South-to-North Water Diversion Project and Comparison of Efficacy of Enhanced Coagulation	CHENG Tuo, XU Bin, ZHU He-zhen, <i>et al.</i>	(898)
Denitrification in Water of Daliao River Estuary in Summer and the Effect of Environmental Factors	YANG Li-biao, LEI Kun, MENG Wei, <i>et al.</i>	(905)
Sources of Dissolved Organic Carbon and the Bioavailability of Dissolved Carbohydrates in the Tributaries of Lake Taihu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, KONG Fan-xiang, <i>et al.</i>	(914)
Canonical Correspondence Analysis of Summer Phytoplankton Community and Its Environmental Factors in Hanfeng Lake	WANG Yu-fei, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i>	(922)
Temporal Variation of Trophic Status in Drawdown Area of Hanfeng Lake in the Storage Period of Three Gorges Reservoir in China	HUANG Qi, HE Bing-hui, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i>	(928)
Spatial Distribution Pattern and Stock Estimation of Nutrients During Bloom Season in Lake Taihu	JIN Ying-wei, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i>	(936)
Phytoplankton Community Structure and Eutrophication Risk Assessment of Beijing River	GOU Ting, MA Qian-li, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i>	(946)
Synergistic Effect of Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combined Disturbance on Regeneration and Transformation of Internal Phosphorus	SHI Xiao-dan, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i>	(955)
Effect of Light and Temperature on Growth Kinetics of <i>Anabaena flosaquae</i> Under Phosphorus Limitation	YIN Zhi-kun, LI Zhe, WANG Sheng, <i>et al.</i>	(963)
Purification of the Wastewater of Quartz Processing by Mineral-based Porous Granulation Material	WANG En-wen, LEI Shao-min, ZHANG Shi-chun, <i>et al.</i>	(969)
Enhanced Reductive Decoloration of Methylene Blue by Polyacrylic Acid Modified Zero-valent Iron Nanoparticles	HE Jing, WANG Xiang-yu, WANG Pei, <i>et al.</i>	(980)
Decolorization of Reactive Blue P-3R with Microsphere-supported Binuclear Manganese Complex as a Novel Heterogeneous CWPO Catalyst	SONG Min, ZHANG Lin-ping, ZHONG Yi, <i>et al.</i>	(989)
Biosynthetic Schwertmannite as Catalyst in Fenton-like Reactions for Degradation of Methyl Orange	WANG Kuai-bing, FANG Di, XU Zhi-hui, <i>et al.</i>	(995)
Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal of Wastewater by Using Sludge Anaerobic Fermentation Liquid as Carbon Source in a Pilot-scale System	LUO Zhe, ZHOU Guang-jie, LIU Hong-bo, <i>et al.</i>	(1000)
Transformation Characteristics of Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Sulfur During Thermal Hydrolysis Pretreatment of Sludge with High Solid Content	ZHUO Yang, HAN Yun, CHENG Yao, <i>et al.</i>	(1006)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Control of Membrane Fouling in MBR and SMBR	GUO Xiao-ma, ZHAO Yan, WANG Kai-yan, <i>et al.</i>	(1013)
Influence of Substrate COD on Methane Production in Single-chambered Microbial Electrolysis Cell	TENG Wen-kai, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i>	(1021)
Ion Specificity During Ion Exchange Equilibrium in Natural Clinoptilolite	HE Yun-hua, LI Hang, LIU Xin-min, <i>et al.</i>	(1027)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risks of Urban Soils in Kaifeng City, China	LI Yi-meng, MA Jian-hua, LIU De-xin, <i>et al.</i>	(1037)
Effects of Different Cultivation Patterns on Soil Aggregates and Organic Carbon Fractions	QIU Xiao-lei, ZONG Liang-gang, LIU Yi-fan, <i>et al.</i>	(1045)
Effects of Chinese Prickly Ash Orchard on Soil Organic Carbon Mineralization and Labile Organic Carbon in Karst Rocky Desertification Region of Guizhou Province	ZHANG Wen-juan, LIAO Hong-kai, LONG Jian, <i>et al.</i>	(1053)
Rare Earth Elements Content in Farmland Soils and Crops of the Surrounding Copper Mining and Smelting Plant in Jiangxi Province and Evaluation of Its Ecological Risk	JIN Shu-lan, HUANG Yi-zong, WANG Fei, <i>et al.</i>	(1060)
Combined Toxicity of Cadmium and S-metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>	ZHANG Xiao-qiang, HU Xiao-na, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i>	(1069)
Effect of Degradation Succession Process on the Temperature Sensitivity of Ecosystem Respiration in Alpine <i>Potentilla fruticosa</i> Scrub Meadow	LI Dong, LUO Xu-peng, CAO Guang-min, <i>et al.</i>	(1075)
Ecological Stoichiometric Characteristics in Leaf and Litter Under Different Vegetation Types of Zhifanggou Watershed on the Loess Plateau, China	LI Xin, ZENG Quan-chao, AN Shao-shan, <i>et al.</i>	(1084)
Denitration Mechanism of Monoclinic-phase Nano Zirconium Oxide-based Catalysts	YE Fei, LIU Rong, GUAN Hao, <i>et al.</i>	(1092)
Characterization of Phosphorus Forms in Different Organic Materials	DENG Jia, HU Meng-kun, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i>	(1098)
Comparative Life Cycle Environmental Assessment Between Electric Taxi and Gasoline Taxi in Beijing	SHI Xiao-qing, SUN Zhao-xin, LI Xiao-nuo, <i>et al.</i>	(1105)
Characteristics of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particles Emitted from Coal-Fired Power Plants	DUAN Lei, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i>	(1117)
Underlying Mechanisms of the Heavy Metal Tolerance of Mycorrhizal Fungi	CHEN Bao-dong, SUN Yu-qing, ZHANG Xin, <i>et al.</i>	(1123)
Research Progress on Microbial Properties of Nitrite-Dependent Anaerobic Methane-Oxidising Bacteria	SHEN Li-dong	(1133)

《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)

2015年3月15日 第36卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 3 Mar. 15, 2015

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. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. 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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行