

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第11期

Vol.37 No.11

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

承德市大气污染源排放清单及典型行业对 PM<sub>2.5</sub> 的影响 ..... 陈国磊,周颖,程水源,杨孝文,王晓琦(4069)

浙江省木制品行业挥发性有机物排放特征及排放系数 ..... 姚轶,王浙明,何志桥,徐志荣,顾震宇(4080)

山西省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献 ..... 闫雨龙,彭林(4086)

某化工区典型高污染过程 VOCs 污染特征及来源解析 ..... 高松,崔虎雄,伏晴艳,高爽,田新愿,方方,衣学文(4094)

加油 VOCs 排放因子测试方法研究与应用 ..... 黄玉虎,常耀卿,任碧琪,秦建平,胡玮,刘明宇(4103)

北京市生活垃圾填埋场氨排放特征研究 ..... 崔彤,李金香,杨妍研,程刚(4110)

西安市人为源大气氨排放清单及特征 ..... 苏航,闫东杰,黄学敏,宋文斌,王惠琴,宋雪娟(4117)

佛山市冬夏季非甲烷烃污染特征研究 ..... 周雪明,项萍,段菁春,贺克斌,马永亮,邓思欣,司徒淑婷,谭吉华(4124)

天津市道路环境大气颗粒物水溶性无机离子分析 ..... 赵梦雪,吴琳,方小珍,杨志文,李凤华,毛洪钧(4133)

戴云山国家级自然保护区大气氮沉降特点 ..... 袁磊,李文周,陈文伟,张金波,蔡祖聪(4142)

青岛近海冬季大气生物气溶胶中微生物活性研究 ..... 孟祥斌,李孟哲,李鸿涛,高冬梅,祁建华(4147)

玉米秸秆烟尘中正构脂肪酸的分子与碳同位素组成 ..... 刘刚,孙丽娜,徐慧,李久海,李中平,李立武(4156)

极低风速条件下水-气界面甲烷气体传输速率分析 ..... 张成,吕新彪,龙丽,张军伟,穆晓辉,李迎春,王圣瑞,张文丽,肖尚斌(4162)

典型水库型湖泊中 CDOM 吸收及荧光光谱变化特征:基于沿岸生态系统分析 ..... 陈雪霜,江韬,卢松,白薇扬,张成,王定勇,魏世强(4168)

西苕溪支流河口水体营养盐的特征及源贡献分析 ..... 陈诗文,袁旭音,金晶,李正阳,许海燕(4179)

周村水库主库区热分层初期氮素降低的驱动因子分析 ..... 张春华,黄廷林,方开凯,周石磊,夏超(4187)

太湖湖泛易发区沉积物中有机磷形态分布特征 ..... 董丹萍,章婷曦,张丁予,王巧云,李德芳,王国祥(4194)

多重扰动对湖泊内源磷迁移转化的影响 ..... 蔡顺智,李大鹏,王忍,刘焱见,徐垚,于胜楠,黄勇(4203)

丹江口库区覆膜耕作土壤氮素淋失随夏玉米生长期的变化 ..... 王伟,于兴修,汉强,刘航,徐苗苗,任瑞,张家鹏(4212)

营养盐恢复对氮磷饥饿铜绿微囊藻生长的影响 ..... 岳冬梅,李洁,肖琳(4220)

氯灭活地下水源中3种优势真菌的效能与机制 ..... 文刚,朱红,黄廷林,赵建超,任崑,徐向前(4228)

净水工艺对饮用水中微生物多重耐药性的影响与分析 ..... 马晓琳,陆洋,王钰,侯誉,白晓慧(4235)

单过硫酸氢钾复合粉在饮用水消毒过程中的副产物生成特性及遗传毒性变化 ..... 敖秀玮,李豪杰,刘文君,余京儒(4241)

三维有序介孔 Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 非均相活化单过硫酸氢钾降解罗丹明 B ..... 冯善方,邓思萍,杜嘉雯,马晓雁,卢遇安,高乃云,邓靖(4247)

调控絮体形态强化电絮凝减缓膜污染 ..... 赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4255)

初始 pH 值对序批式 CANON 工艺脱氮效果和 N<sub>2</sub>O 释放的影响 ..... 付昆明,王会芳,苏雪莹,周厚田(4261)

3DBER-S-Fe 同步脱氮除磷及去除邻苯二甲酸酯的工艺特性 ..... 张娅,郝瑞霞,徐鹏程,徐忠强(4268)

基于反硝化脱氮的硫铁复合填料除磷机制 ..... 范军辉,郝瑞霞,李萌,朱晚霞,万京京(4275)

基于 ABR-MBR 组合工艺优化反硝化除磷性能的研究 ..... 程朝阳,赵诗惠,吕亮,吴鹏,沈耀良(4282)

中常温变化对 PN-ANAMMOX 联合工艺脱氮效果的影响 ..... 袁砚,朱亮(4289)

生物活性炭对不同 C/N 比废水同步硝化反硝化脱氮效果的影响 ..... 崔延瑞,邱鑫,张庆荣,王琦,吴青,孙剑辉(4296)

ANAMMOX 菌利用零价铁还原硝酸盐脱氮研究 ..... 周健,完颜德卿,黄勇,刘忻,袁怡,李祥,姚鹏程,杨朋兵,薛鹏程(4302)

间歇曝气 SBR 与传统 SBR 处理养猪沼液的比较研究 ..... 董宝刚,宋小燕,刘锐,川岸朋树,张永明,陈吕军(4309)

应用解蛋白菌生物预水解剩余污泥 ..... 何晶晶,王颖,胡洁,吕凡,邵立明(4317)

应用环境多介质逸度模型研究废旧电器拆解区多溴联苯醚的迁移及归趋 ..... 薛南冬,陈宣宇,杨兵,秦普丰,龙雨(4326)

南宁市多环境介质中多环芳烃分布特征 ..... 苗迎,孔祥胜(4333)

杭州城区室内灰尘中多溴联苯醚的含量及人体暴露水平 ..... 金漫彤,滕丹丹,郑艳霞,胡张璇,沈学优,金赞芳(4341)

应用线性自由能关系估算药用活性化合物的生物碳质-水吸附系数 ..... 王佳怡,毕二平(4349)

表流湿地细菌群落结构特征 ..... 魏佳明,崔丽娟,李伟,雷茵茹,于菁菁,秦鹏,穆泳林,梁钊瑞(4357)

城市污水中硝化菌群落结构与性能分析 ..... 于莉芳,杜倩倩,傅学焘,张茹,李文江,彭党聪(4366)

DNA 和 cDNA 水平对比研究施肥对稻田土壤细菌多样性的影响 ..... 王聪,吴讷,侯海军,汤亚芳,沈健林,秦红灵(4372)

培养条件下双酚 A 对稻田土壤微生物群落特征的影响 ..... 刘畅,黄雅丹,张莹,靳振江,梁月明,宋昂,王腾,郭佳怡,李强(4380)

1 株兼具好、厌氧汞甲基化能力细菌的分离鉴定 ..... 陶兰兰,向玉萍,王定勇,黄曼琳,申鸿(4389)

北京地区菜田土壤抗生素抗性基因的分布特征 ..... 张兰河,王佳佳,哈雪姣,邱孟超,高敏,仇天雷,王旭明(4395)

梅花鹿养殖场抗生素抗性基因分布特征 ..... 黄福义,安新丽,陈青林,任红云,苏建强(4402)

几种高硅质矿物细颗粒的 A549 细胞毒性对比 ..... 霍婷婷,董发勤,邓建军,张青碧,贺小春,孙东平(4410)

添加复合吸附剂对土壤吸附非和 Cr(VI) 的影响 ..... 李文斌,孟昭福,吴琼,许绍娥,刘泽(4419)

生物炭对西北黄土吸附壬基酚的影响 ..... 张振国,蒋煜峰,慕仲锋,孙航,周琦,展惠英(4428)

集雨种植下不同沟垄比对土壤呼吸的影响及其对水热因子的响应 ..... 王昌江,施成晓,冯帆,陈婷,张磊,吕晓康,王伟,廖允成(4437)

秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响 ..... 黄容,高明,万毅林,田冬,陶睿,王芳丽(4446)

《环境科学》征稿简则(4161) 《环境科学》征订启事(4365) 信息(4123,4132,4409)

# 多重扰动对湖泊内源磷迁移转化的影响

蔡顺智, 李大鹏\*, 王忍, 刘焱见, 徐垚, 于胜楠, 黄勇

(苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215011)

**摘要:** 为了阐明多重扰动因素对内源磷迁移转化的影响, 以太湖梅梁湾沉积物为研究对象, 借助 Rhizon 间隙水采样技术、Unisense 微电极系统等技术, 研究了扰动下泥水两相间溶解氧、不同形态磷、铁离子等变化规律。结果表明, 与对照实验相比, 河蚬的出现致使沉积物内部溶解氧含量降低。扰动致使间隙水中 DIP 的峰值区域由 3~4 cm 迁移至 4~5 cm, 暗示了摇蚊幼虫和河蚬的引入使得 DIP 再生的“活跃区域”更深入泥层。并且, 河蚬和藻类的出现进一步降低了间隙水中 DIP 的含量, 其主要来源于  $\text{NH}_4\text{Cl-P}$  的释放, 去向为上覆水和形成 Fe/Al-P。随着扰动因素的增加,  $\text{NH}_4\text{Cl-P}$  转化为 Fe/Al-P 的比重也逐渐增加(由 44% 增至 59%)。

**关键词:** 多重扰动; 内源磷; 迁移转化; 河蚬; 铜绿微囊藻

中图分类号: X131.2; X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)11-4203-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201605122

## Impacts of Multiple Disturbance on Migration and Transformation of Endogenous Phosphorus in Lake

CAI Shun-zhi, LI Da-peng\*, WANG Ren, LIU Yan-jian, XU Yao, YU Sheng-nan, HUANG Yong

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

**Abstract:** This work aimed to clarify the influence of multiple disturbance factors on the migration and transformation of endogenous phosphorus. In this experiment, the sediment of Meiliang Bay in Taihu Lake was studied as the major research object. With the help of Rhizon sampling technique, Unisense microelectrode system and so on, this experiment studied the change regularities of dissolved oxygen between sediment and water interface, different forms of phosphorus and iron ions under disturbance. The results indicated that the dissolved oxygen content in sediment decreased in the presence of *Corbicula fluminea* as compared with the control experiment. Disturbance made the peak area of DIP in interstitial water to migrate from 3-4 cm to 4-5 cm, which suggested that the “active region” of DIP regeneration went deeply into sediment with the appearance of *Chironomus plumosus* and *Corbicula fluminea*. Meanwhile, the existence of *Corbicula fluminea* and algae further reduced DIP in the interstitial water. That was because the released  $\text{NH}_4\text{Cl-P}$  was transferred to phosphorus in overlying water and Fe/Al-P. With the increase of disturbance factors, the transformation ratio from  $\text{NH}_4\text{Cl-P}$  to Fe/Al-P also increased gradually (from 44% to 59%).

**Key words:** multiple disturbance; endogenous phosphorus; migration and transformation; *Corbicula fluminea*; *Microcystis aeruginosa*

磷是导致水体富营养化的关键性限制因子<sup>[1-3]</sup>。对于外源磷已经被控制的水体而言, 内源磷的释放是水体引起富营养化的主要原因<sup>[4]</sup>, 而底泥扰动是促使内源磷迁移转换的关键因素<sup>[5]</sup>。

通常, 底泥扰动可分为两种, 一是物理扰动, 主要是风浪, 水流, 鱼类巡游, 船运等物理因素造成的。二是生物扰动, 主要是由底栖生物引起的<sup>[6]</sup>。然而, 在天然水体中, 底泥扰动通常由多种形式构成, 最常见的是物理扰动与底栖生物组成的组合扰动。以太湖为例, 风浪扰动频繁, 底泥中富含摇蚊幼虫、水丝蚓、河蚬等水生生物。因此, 导致太湖底泥扰动的并非是单一扰动形式, 更多的是多种形式上的组合扰动。

目前, 组合扰动越来越备受关注, 因为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<sup>[7]</sup>, 后者则改造底泥内部

的微环境, 由此对内源磷迁移转化产生影响。更重要的是两者之间存在相互促进作用, 从而对内源磷释放产生协同作用。已有研究发现物理扰动、摇蚊幼虫和河蚬、物理和摇蚊幼虫组合扰动、物理和摇蚊幼虫以及河蚬多重扰动等均会促进磷从底泥向上覆水迁移<sup>[6,8-11]</sup>。藻类的存在则会降低水体中磷含量, 即使在扰动条件下, 如 Cyr 等<sup>[12]</sup> 研究结果就证明了这一点。因此, 物理扰动、生物扰动、藻类均会导致磷在泥水两相间迁移。王忍等<sup>[11]</sup> 已经发现, 物理和摇蚊幼虫以及河蚬多重扰动下, 内源磷发生爆发性释放, 并且对内源磷赋存

收稿日期: 2016-05-18; 修订日期: 2016-06-30

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)

作者简介: 蔡顺智(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水体修复, E-mail: 42208383@qq.com

\* 通讯联系人, E-mail: ustslp@163.com

形态的数量分布产生显著影响. 那么,在多重扰动基础上,引入可以降低水体磷含量的藻类,是进一步诱发内源磷的释放还是对内源磷释放有所抑制,其对内源磷形态数量分布是否会产生影响,这些疑问将影响到多重扰动下内源磷迁移转化规律. 基于此,本文以物理扰动、摇蚊幼虫、河蚬和藻类为研究对象,真实地模拟了太湖底泥多重扰动的实际情形,分析了上覆水、间隙水、底泥中磷形态的变化规律,以期丰富浅水湖泊磷迁移转化理论体系提供数据支持.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究地点与采样准备

2015年7月利用大口径重力采样器(Rigo Co.

表1 采样点底泥和上覆水的理化性质

Table 1 Physico-chemical properties of sediments and overlying water from the sampling point

项目	DO /mg·L <sup>-1</sup>	pH	TP /mg·L <sup>-1</sup>	DTP /mg·L <sup>-1</sup>	DIP /mg·L <sup>-1</sup>	含水率/%	烧失量 LOI/%	Tot-P /mg·g <sup>-1</sup>
上覆水	4.28	7.72	0.217	0.183	0.054	—	—	—
底泥	—	—	—	—	—	52.37	7.02	0.440

### 1.2 实验方法

本实验用的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),底部用橡胶塞密封;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.

用400目金属筛将采集来的上覆水过滤,截除掉其中的浮游生物,过滤后的上覆水用作底泥柱样培养的上覆水. 采集的沉积物柱样进行以下处理:把每个柱样表层10 cm的底泥切分成5层,每层2 cm,相同层的沉积物收集在同一桶中,将各桶内底泥通过60目金属筛以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底泥上部,尽可能不使表层底泥发生扰动且保持泥-水界面的平整. 将制得的若干个(根据实验要求不同)底泥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,用曝气头对槽内水曝气预培养16 d,让底泥稳定.

在第14 d底泥已基本稳定,即泥-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,使得采样孔位于泥-水界面以下1.5、2.5、3.5、4.5、5.5 cm处(分别采集泥面下

直径90 mm高500 mm)在梅梁湾采样点(N31°31'30.10", E120°10'57.1")采集表层15 cm底泥柱样总计16根,并保留采样管上覆水水样,用橡皮塞密封采样管两端,再垂直地把采集到的柱样放入采样架中,同时采集上覆水50 L,采样运输过程中尽量保持柱样不发生扰动. 采样点底泥及上覆水的各项理化性质见表1.

本实验用的藻类购自中科院水生生物研究所(武汉),品种为铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*),该品种是太湖水华暴发时的优势种群. 实验用摇蚊幼虫、河蚬购自市场. 河蚬为太湖养殖河蚬. 用梅梁湾采集来的底泥和上覆水驯化培养买回来的摇蚊幼虫和河蚬,使其适应实验条件,一周后用于实验.

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胶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,棕色瓶用锡箔包裹,作为实验用上覆水的补充. 为了使实验结果更可靠,设置平行实验,将制得的15根柱样分别作如下实验:3根用于对照实验组(ES1)、3根用于物理和摇蚊幼虫组合扰动组(ES2)、3根用于物理、摇蚊幼虫和河蚬组合扰动组(ES3)、3根用于物理、摇蚊幼虫、藻和河蚬组合扰动组(ES4).

在第17 d,挑选活性较强的摇蚊幼虫,向组合扰动(ES2、ES3、ES4)组柱样中加入相应条数的摇蚊幼虫(密度与太湖自然密度一致),其中主要种为摇蚊(*Chironomus plumosus*)幼虫,绝大多数的摇蚊幼虫能迅速打孔钻入底泥中,半小时过后,将尚未打孔钻入的摇蚊幼虫用镊子轻轻挑出,用新的有活力的摇蚊幼虫代替,然后将所有培养管放回黑暗房间内开启实验. 以同样的方法加入相应数量的河蚬和藻类. 河蚬密度选择参照文献[13],铜绿微囊藻浓度

选择参照文献[14]. 加入河蚬时用筷子夹住河蚬缓慢靠近泥-水界面轻轻放置于底泥表面, 尽量避免产生较大扰动.

采用恒速搅拌机(IKA RW20 digital)对柱样进行扰动, 转速为  $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ , 在水面上方  $1 \text{ cm}$  处扰动  $10 \text{ min}$ , 使得表层  $0.5 \text{ cm}$  沉积物完全悬浮. 实验期间, 若发现摇蚊幼虫钻出泥面死亡时, 立即用镊子小心挑出, 并加入等量的活体.

采集上覆水水样测定 TP、DTP 和 DIP. 在泥-水界面以下  $0.5 \text{ cm}$  处用  $10 \text{ mL}$  针管抽取  $9 \text{ mL}$  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  $2 \text{ mL}$  注射器抽取  $1 \text{ mL}$  间隙水,  $\text{Fe}^{2+}$  取样时预先在针管中加入适量显色剂后抽取  $1 \text{ mL}$  间隙水.

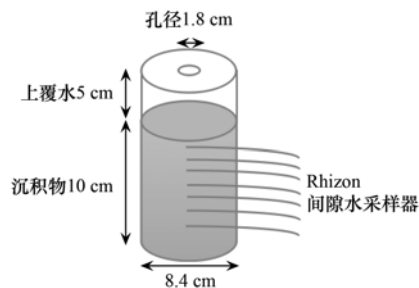


图 1 实验培养管

Fig. 1 Experimental incubation tube

实验共持续了  $11 \text{ d}$  (第  $17 \sim 27 \text{ d}$ ). 每天取  $9 \text{ mL}$  上覆水, 间隙水在  $15$ 、 $21$ 、 $26 \text{ d}$  采集, 每次抽取  $2 \text{ mL}$  间隙水. 实验在第  $27 \text{ d}$  结束, 当天用 Unisense 微电极系统测定各柱样氧剖面, 随后取出 Rhizon 间隙水采样器, 之后, 将底部橡胶塞上顶, 将表层  $6 \text{ cm}$  沉积物切分成  $3$  层, 每层底泥  $2 \text{ cm}$ , 将相同层位的底泥收集在同一烧杯中, 用玻璃棒充分混匀. 依次测定其含水率、孔隙度、沉积物这  $4$  种赋存形态磷含量.

### 1.3 样品分析方法

上覆水: TP 是将水样用过硫酸钾消解后用钼锑抗分光光度法测定<sup>[15]</sup>; DTP 是将水样先过  $0.45 \mu\text{m}$  滤膜然用过硫酸钾消解后测定<sup>[16]</sup>; DIP 含量是将水样过  $0.45 \mu\text{m}$  滤膜后测定<sup>[17]</sup>.

间隙水: DIP 含量是将水样过  $0.45 \mu\text{m}$  滤膜后直接测定.

间隙水中  $\text{Fe}^{2+}$  用邻菲罗啉分光光度法测定<sup>[18]</sup>.

沉积物溶解氧渗透深度(OPD)用微电极系统(Unisense, 丹麦)直接测定.

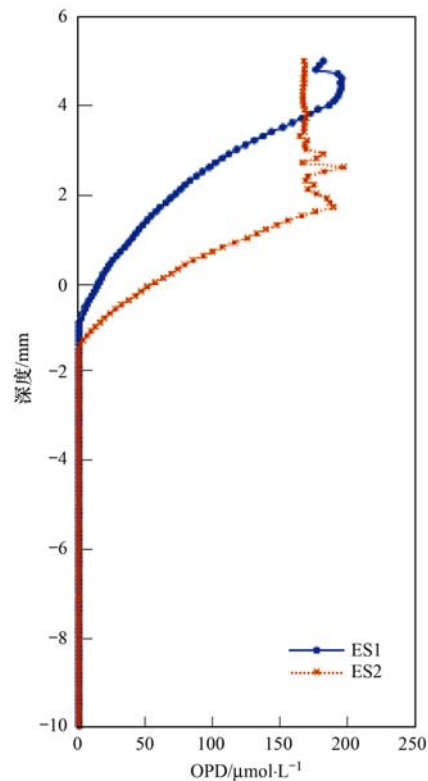
磷的形态分析方法: 参考四步连续提取法<sup>[6]</sup>, 各操作步骤提取液的 P 含量分析均采用钼锑抗分

光光度法<sup>[19]</sup>, 将底泥的磷形态分为  $4$  类: 弱吸附态磷( $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ )、铁/铝结合态磷、钙结合态磷( $\text{Ca-P}$ )、残渣磷( $\text{Res-P}$ ).

## 2 结果与讨论

### 2.1 沉积物微环境氧剖面规律

由于多重扰动因素的存在, 致使沉积物中溶解氧含量发生了明显变化(图 2 和图 3).



纵坐标  $0 \text{ mm}$  处表示沉积物-水界面(SWI), 泥上坐标为正, 泥下坐标为负, 下同

图 2 ES1 组和 ES2 组氧剖面曲线

Fig. 2  $\text{O}_2$  profiles of Group ES1 and Group ES2

图 2 显示, 组合扰动组 ES2 和空白组 ES1 氧浓度变化规律相似, 随着微电极系统从水相进入泥相, 氧浓度逐渐降低, 氧浓度分别从  $166.65 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $180.99 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  逐渐降低到  $0.76 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $0.75 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ . 同时, 在沉积物-水界面到沉积物-水界面以下  $1.5 \text{ mm}$  范围内, 同一位置 ES2 组的好氧程度明显要高于 ES1 组, 这主要是因为摇蚊幼虫在物理扰动的条件下构筑廊道, 增加了生物引灌作用, 从而增加了溶解氧的渗透, 泥相中氧气含量增加.

ES3 和 ES4 的氧浓度总体变化趋势并不明显, 随着微电极系统从水相进入泥相, OPD 浓度从  $0.53 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $0.51 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  分别变为  $0.54$

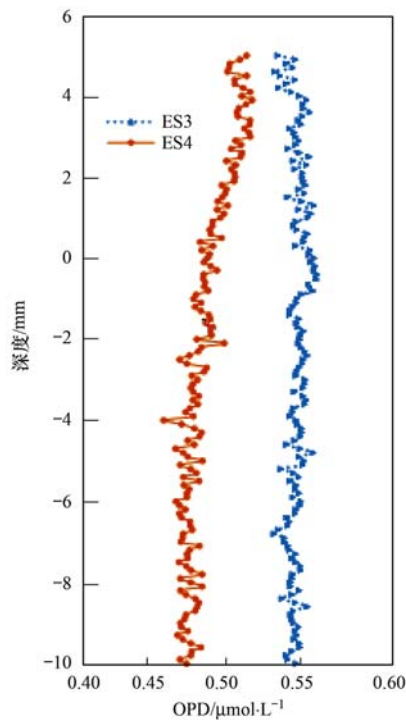


图3 ES3组和ES4组氧剖面曲线

Fig. 3 O<sub>2</sub> profiles of Group ES3 and Group ES4

$\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.47\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ . ES3、ES4与ES1、ES2相比氧浓度低了很多,并且ES3和ES4两者趋势较为相似,说明河蚬的引进使得底泥的微环境发生了变化,并且从图3中可以看出,ES4泥相中的含氧量要低于ES3.另外曲线存在着不规则的波动性,这是由于河蚬的加入增加了底泥的孔隙度造成的.

## 2.2 沉积物中不同形态磷变化规律

扰动因素导致不同形态内源磷含量发生明显变化,也发生了 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 和 $\text{Fe/Al-P}$ 间的相互转化(图4).

图4(a)和图4(c)显示,各扰动组内源磷形态( $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、 $\text{Fe/Al-P}$ 、 $\text{Ca-P}$ 和 $\text{Res-P}$ )数量分布有所不同.从图4(a)中可以发现ES1、ES2、ES3、ES4组底泥0~2 cm中 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ <sup>[20]</sup>依次降低,与对照相比较,依次减少了24.3、57.1和91.2  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ .减少的 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 的去向主要是上覆水和内源磷中的 $\text{Fe/Al-P}$ .因此图4(a)显示, $\text{Fe/Al-P}$ 分别增加了10.8、27.9和53.9  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ .扣除 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 以DIP形式进入上覆水之外,则分别有44.44%(ES2)、48.87%(ES3)和59.10%(ES4) $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 转化成

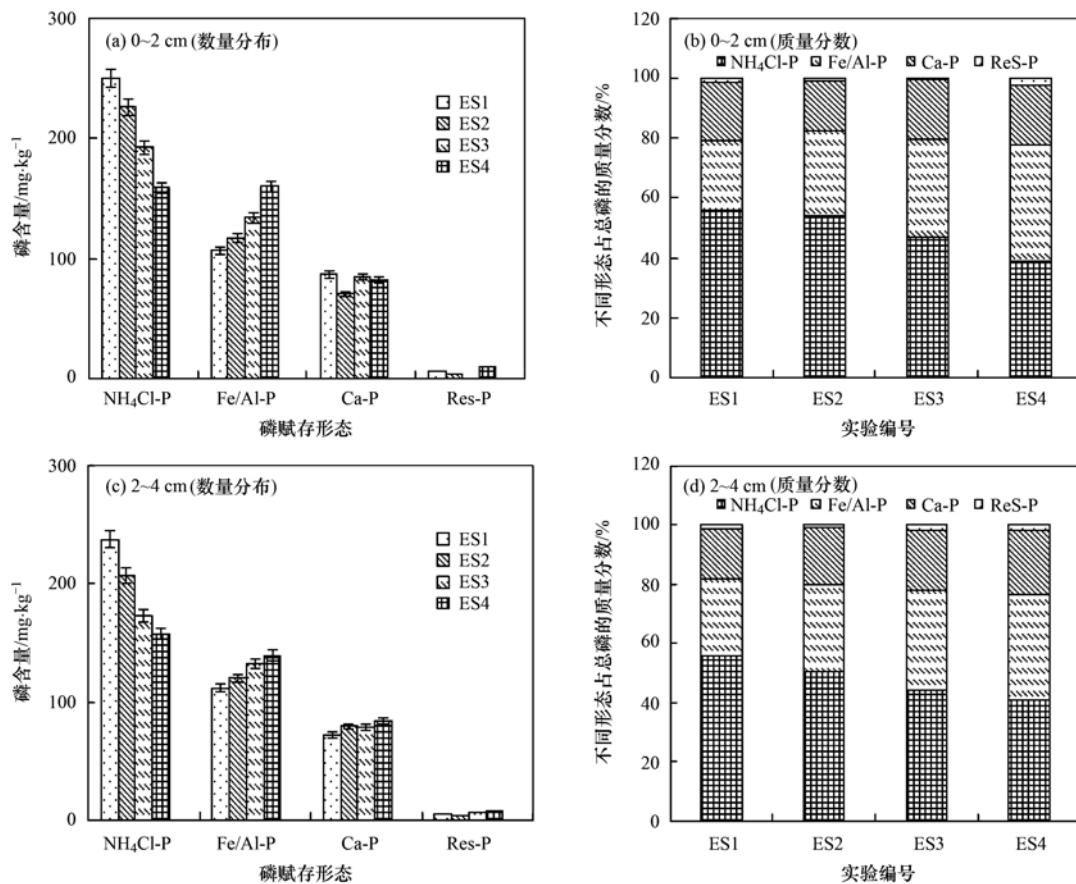


图4 0~4 cm底泥磷赋存形态数量分布和不同形态磷占总磷的质量分数

Fig. 4 Distributions of phosphorus forms and mass fraction of different phosphorus forms of TP in the 0-4 cm sediment

Fe/Al-P,由此可见,随着扰动因素的增加(依次增加了摇蚊幼虫、摇蚊幼虫+河蚬、摇蚊幼虫+河蚬+藻类),对内源磷形态转化的促进作用也在增加,而这可能主要发生在底栖生物诱导的“活性区域”(0~2 cm),而与2~4 cm相对比,这种转化趋势有所降低[图4(c)].毫无疑问,扰动加快了内源磷形态转化,其原因主要有二:一是 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 是弱吸附态磷,它属于非闭合的形态磷,分子间作用力较小,在扰动作用下,从而很容易释放转化为其他磷;二是间隙水中 $\text{Fe}^{2+}$ 含量增加(尤其是ES3和ES4,图7),其可能主要来源于 $\text{Fe}^{3+}$ 转化成 $\text{Fe}^{2+}$ ,尽管后者对DIP的吸附作用低于前者,但其仍可以捕捉DIP形成Fe/Al-P.ES3组河蚬的挖穴活动相当于附加的界面物理扰动,因此进一步增大了弱吸附态磷的释放程度,使得 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 转化为间隙水中的DIP或者比之更为稳定的Fe/Al-P.ES4组的弱吸附态磷相比于ES3组含量是更低的,这主要是由于藻类本身需要养分,它能够泵吸底泥中的磷来满足自身的需要,显然,弱吸附态磷是最容易被利用的,所以ES4组弱吸附态磷的含量进一步降低了.

通过计算发现,ES2、ES3、ES4底泥0~2 cm中总磷(Tot-P)都低于ES1,说明组合扰动、河蚬扰动和河蚬、藻扰动都会促进底泥磷向上覆水的释放.这可能是河蚬通过挖掘、生物引灌造成的弱吸附态磷的释放.而ES3组底泥0~2 cm中总磷(Tot-P)低于ES2的,ES4组底泥0~2 cm中总磷(Tot-P)低于ES3的.说明河蚬扰动进一步促进底泥磷向上覆水的释放,加入藻释放程度更大,通过这个结果再结合图2和图3的氧剖面曲线,可以发现河蚬扰动导致了内源磷的再生与释放,这可能是在河蚬存在的情况下,虽然河蚬扰动促进沉积物溶解氧渗透深度,但是河蚬扰动而产生的底泥含水率的增加、底泥-水界面面积的增大均可以加快间隙水中DIP向上覆水的扩散,同时它会吸收附近底泥微界面上的氧气,使得微界面表面溶解氧含量下降,导致Fe/Al-P形态磷的释放<sup>[21]</sup>,图3中ES3、ES4相同位置泥相氧浓度低于图2中ES1、ES2同一位置泥相氧浓度也说明了河蚬的存在的确会降低底泥微界面的溶解氧.

ES4底泥0~2 cm中总磷(Tot-P)低于ES3,从图4可以计算出,表层0~4 cm沉积物,ES3和ES4磷释放总量分别为 $74.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $77.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,占总磷Tot-P的8.48%和8.78%.

图4(c)和图4(d)显示,在2~4 cm,  $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、

Fe/Al-P变化规律与0~2 cm相似,Ca-P和Res-P未见明显变化,这与之前研究类似<sup>[22]</sup>,但形态磷含量及其占总磷百分比的变化幅度均低于0~2 cm[图4(a)和图4(b)].

### 2.3 上覆水中不同形态磷的变化规律

多重扰动下,上覆水不同形态磷(TP、DTP、DIP、PP)发生了显著变化,并且藻类引入与否对多重扰动体系上覆水不同形态磷的影响是不同的(图5).

从图5(a)、5(c)、5(e)、5(g)可以看出,ES1和ES2上覆水不同形态磷的分布规律,图5(a)显示,TP先逐渐增大,在第8 d左右达到最大值,ES1和ES2最大值分别是 $0.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.45 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,随即减小至11 d时呈缓慢上升趋势.其他3种形态磷除PP外均表现相同规律,这体现了物理和摇蚊幼虫组合扰动对内源磷迁移转化的协同作用<sup>[23]</sup>.

从图5(b)、5(d)、5(f)、5(h)可以看出,ES3和ES4上覆水不同形态磷的分布规律,图5(b)显示,不同扰动条件下,TP的变化规律明显不同.河蚬和藻类的引入显著增加了上覆水中TP含量,明显高于对照实验和组合扰动.ES3和ES4中TP含量逐渐上升,并在第11 d ES3和ES4同时达到最大值,分别为 $6.35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $8.49 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,是当天ES1的30.8倍和41.2倍,ES2的35.9倍和48倍.这说明河蚬和藻类更易于促进内源磷释放.然而,在第0~8 d ES3(无藻)大于ES4(有藻),第8 d之后ES3(无藻)小于ES4(有藻).这可能暗示了河蚬和藻类促使内源磷释放的作用更持久.PP的变化规律与TP类似图5(b).

DTP[图5(f)]和DIP[图5(h)]的变化规律一致.图5(f)显示上覆水DTP的变化趋势,河蚬和藻类的引入导致上覆水中DTP含量明显增加,并一直处于高于对照实验和组合扰动的水平.ES3和ES4中DTP含量逐渐上升,并在第11 d分别达到最大值 $4.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $4.61 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,是对照实验和组合扰动DTP的16~30倍.对照实验(ES1)和组合扰动(ES2)中DTP则一直处于较低水平.图5(h)显示,ES3和ES4上覆水中DIP含量明显高于ES1和ES2,并一直呈增加状态.其原因可能与河蚬的活动有关,且本研究中物理扰动并未促使足够量的底泥悬浮,致使DIP被悬浮物吸附沉淀的可能性降低,即使ES4中增加了藻类,但因其吸收能力有限,依然致使水体中DIP含量持续升高.

上覆水增加的磷的来源之一是内源磷的再生与

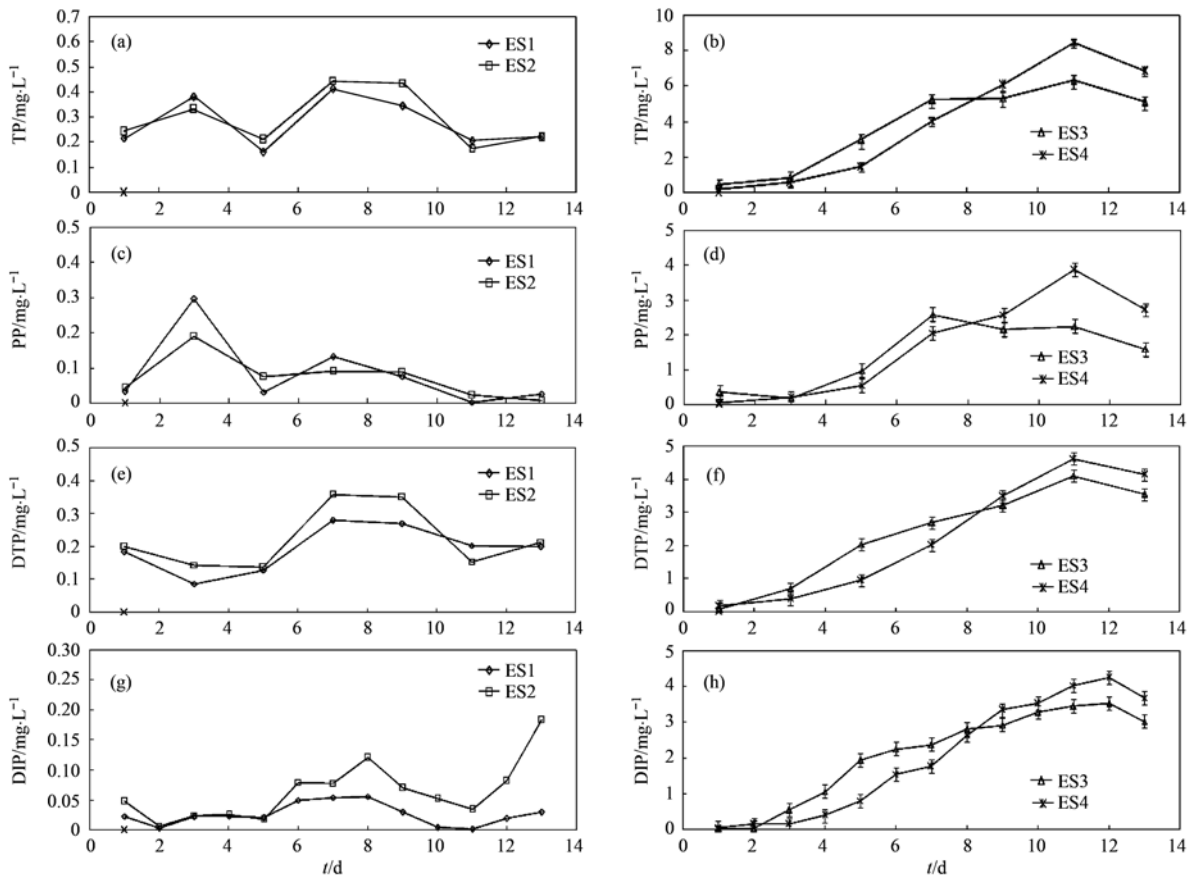


图5 不同处理组上覆水中各形态磷的变化规律

Fig. 5 Variation of different phosphorus forms in the overlying water in different treatments

释放,除此之外,还有另一种可能,那就是河蚬大量产生的含磷排泄物,根据文献[24],河蚬在 25℃ 时 TP 排泄率为  $0.012 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ ,本实验中 4 个河蚬干重(将河蚬在 65℃ 下烘干至恒重称重)约为 1 g,再根据上覆水体积,即可计算的在整个实验期间(13 d)内河蚬排泄出的磷可使上覆水 TP 上升  $13.51 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (此值大于实验中出现的最大 TP 值  $8.49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ),但这仅仅是河蚬最大的 TP 排泄理论值(因为河蚬不可能每天不停地排泄<sup>[25]</sup>).由此可见河蚬的磷排泄是有可能使上覆水 TP 大幅增大的.而在河蚬磷排泄中,DTP 占 TP 的质量分数一般在 83.01% ~ 100% 之间,DIP 在 36.60% ~ 96.59% 之间<sup>[24]</sup>,所以河蚬的出现也可以使其他形态磷大幅增加.同时,前面已经指出,ES3 和 ES4 两组的磷释放总量分别为  $74.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $77.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,占总磷 Tot-P 的 8.48% 和 8.78%.即使把这些磷全都释放到上覆水也只会让上覆水 TP 上升量不到  $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,因此,在河蚬或藻类的存在下,组合扰动上覆水大幅上升最大的原因很有可能是河蚬的排泄物,其次才是内源磷的再生和释放.

但不可忽视的是,尽管河蚬引入后加大了水体中不同形态磷(TP、PP、DTP、DIP)的释放量,但由于藻类的引入(ES4),在实验初期(第 0 ~ 8 d),藻类仍明显抑制了上覆水中不同形态磷含量的增加.然而,第 8 d 之后,藻类却加大了不同形态磷释放量,与单纯河蚬扰动(ES3)相比.其原因可能有二:一是藻类在扰动状态下,生长受到抑制<sup>[26]</sup>,其过量吸附的磷重新释放至水体;二是间隙水、上覆水间磷浓度已趋于动态平衡,并且由于溶解氧融入致使底泥表层(特别是河蚬扰动的底泥)被氧化,强化了对间隙水磷向上覆水迁移的抑制,也强化了对上覆水磷的捕捉和吸附,致使 ES3 不同形态磷含量逐渐降低,相反,在 ES4 中,本该如此变化趋势,但由于藻类存在,其生长需求仍会通过“泵吸”作用从底泥中诱发磷释放,从而维持上覆水中磷浓度.

#### 2.4 间隙水 DIP、 $\text{Fe}^{2+}$ 的变化规律

底泥通过间隙水与上覆水相接触,间隙水中的  $\text{DIP}^{[27]}$  可以通过间隙水扩散到上覆水中,同时上覆水中的磷也可以通过间隙水被固定到底泥中,因此间隙水 DIP 的变化趋势反映了底泥-上覆水中磷的



转化趋势. 本实验利用 Rhizon 间隙水采样技术分析  
了间隙水 DIP 的变化规律, 为上覆水磷和沉积物磷

之间的相互迁移转化提供依据. 各处理间隙水 DIP  
含量的变化规律如图 6.

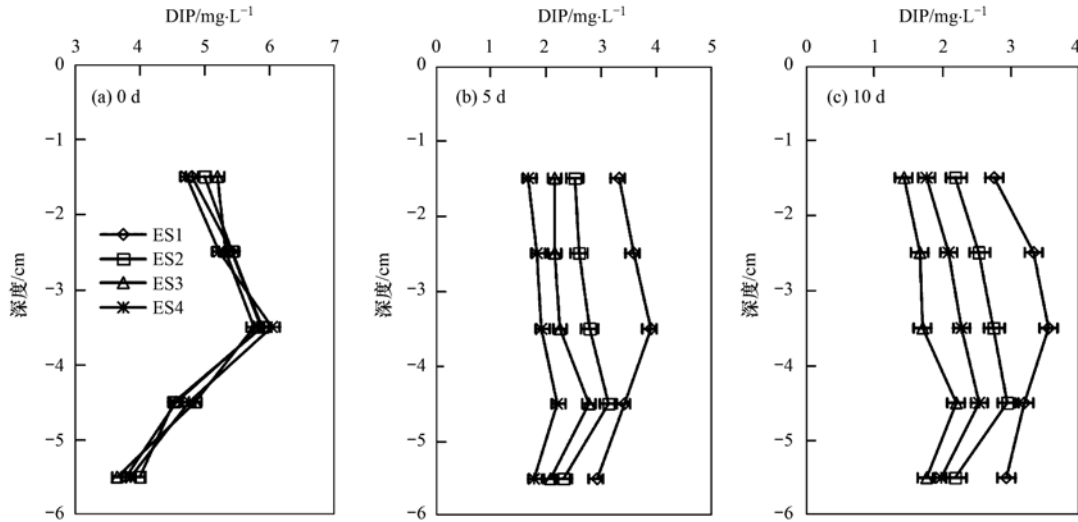


图 6 不同处理组间隙水 DIP 剖面

Fig. 6 DIP profiles in the pore water sampled on day 0, day 5 and day 10 in different treatments

图 6 显示,随着时间的迁移,底泥相同深度间隙  
水中 DIP 含量呈逐渐降低趋势;由于底栖生物的扰  
动作用,导致同一处理组不同底泥深度间隙水中  
DIP 含量趋于一致.

将图 6(b)与图 6(a)相对比,发现 ES2、ES3 和  
ES4 沉积物间隙水中 DIP 的峰值区域由 3~4 cm 迁  
移至 4~5 cm,而空白组(ES1)并无此现象,说明摇  
蚊幼虫和河蚬的引入使得 DIP 再生的“活跃区域”  
更深入泥层.此外,空白组(ES1)沉积物纵向剖面  
DIP 浓度未见明显减小,这是因为在该浓度梯度下,  
间隙水与上覆水之间 DIP 已达到动态平衡,图 6(c)  
也显示了类似规律.

图 6(b)和 6(c)中物理和摇蚊幼虫组合扰动  
(ES2)间隙水中 DIP 浓度明显低于空白组(ES1),  
ES3、ES4 间隙水中 DIP 浓度也低于 ES1,同时 ES3、  
ES4 间隙水 DIP 低于 ES2,说明在组合扰动的基础  
上,河蚬和藻类的加入进一步降低了间隙水中的  
DIP 浓度.再结合图 5(b)ES3 和 ES4 TP 浓度远高  
于其他实验组,第 5 d 时 ES3 TP 浓度大于 ES4,与  
间隙水中的 DIP 变化趋势一致,说明内源磷有向  
上覆水扩散的趋势.研究表明河蚬不仅没有减缓  
DIP 向上覆水的释放,反而促进了 DIP 向上覆水  
释放<sup>[28]</sup>.河蚬通过挖掘、生物引灌也会造成弱  
吸附态磷的释放.因此加入河蚬是促进了内源磷  
再生与释放,这与图 4 的分析结果一致.图 6(b)  
中 ES4 间隙水 DIP 低于 ES3.其原因是藻类在白  
天产

生氧气,使得底泥间隙内溶解氧高于 ES3,而溶  
解氧的渗入又会导致间隙水中  $\text{Fe}^{2+}$  生成  $\text{Fe}^{3+}$ <sup>[29]</sup>,  
而水合铁氧化物对 DIP 有很强的吸附能力<sup>[30]</sup>,这  
有利于溶解态磷向结合态磷转移<sup>[31]</sup>,这与图(7)  
中  $\text{Fe}^{2+}$  的变化相类似.

图 6(c)中,ES4 间隙水 DIP 高于 ES3,结合图 2  
中第 10 d 的 TP 浓度比较,可以发现,上覆水中的  
TP 与间隙水中的 DIP 变化趋势依然一致,这暗示  
了 ES3 和 ES4 的 TP 的交替变化是由底泥磷释放  
引起的.其原因可能与间隙水氧浓度有关.

由图 7(a)可知,在底栖生物和藻类加入前(15  
d),空白组(ES1)、物理和摇蚊幼虫组合扰动组  
(ES2)、物理、摇蚊幼虫和河蚬组合扰动组(ES3)  
和物理、摇蚊幼虫、藻和河蚬组合扰动组(ES4)中  
 $\text{Fe}^{2+}$  剖面相似,无显著性差别.在 0~3.5 cm,  
 $\text{Fe}^{2+}$  浓度随深度的增加而减小,各处理组(ES1、  
ES2、ES3、ES4)  $\text{Fe}^{2+}$  浓度从 3.50、3.57、3.75 和  
3.89  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  分别降低到 2.26、2.15、2.15 和 2.03  
 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .大于 3.5 cm 后  $\text{Fe}^{2+}$  浓度随深度的增加  
而增大,分别增大到 2.55、2.47、2.50 和 2.61  
 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  并保持稳定.图 7(b)显示,与空白组相比,  
在沉积物 0~5 cm,组合扰动进一步加大  $\text{Fe}^{2+}$  的  
降低幅度,这与图 6(b)的 DIP 变化基本保持一致.  
组合扰动的协同作用是主要原因.

图 6 和图 7 中 DIP 和  $\text{Fe}^{2+}$  浓度的变化规律  
表明,组合扰动相比于对照组能减小间隙水中的  
DIP

和  $\text{Fe}^{2+}$  浓度. 含有河蚬的 ES3、ES4 的  $\text{Fe}^{2+}$  浓度明显高于其他组, 这是因为河蚬在底泥表层或里面活动时需要吸收水中的溶解氧, 致使间隙水中的缺氧状况加剧,  $\text{Fe}^{2+}$  浓度因此增加. 图 7(b) 和图 7(c) 显示, ES3 的  $\text{Fe}^{2+}$  浓度高于 ES4. 这也解释了为何  $\text{Fe}^{2+}$  和 DIP 变化同步, 并与图 3 的分析结果相吻合, 这主要是因为藻类光合作用下, 底

泥表层溶解氧含量升高, 河蚬的活动能力增强, 代谢能力也增强, 这不仅加快释放磷也会导致原本构筑的廊道空隙被堵住, 即加剧了 ES4 的缺氧状况, 结合图 6(c) 可以发现 ES4 的间隙水 DIP 高于 ES3, 这恰好说明了图 6 的这种现象是 ES4 的缺氧状况造成的, 同时也说明了图 6(c) 与图 7(c) 规律的一致性.

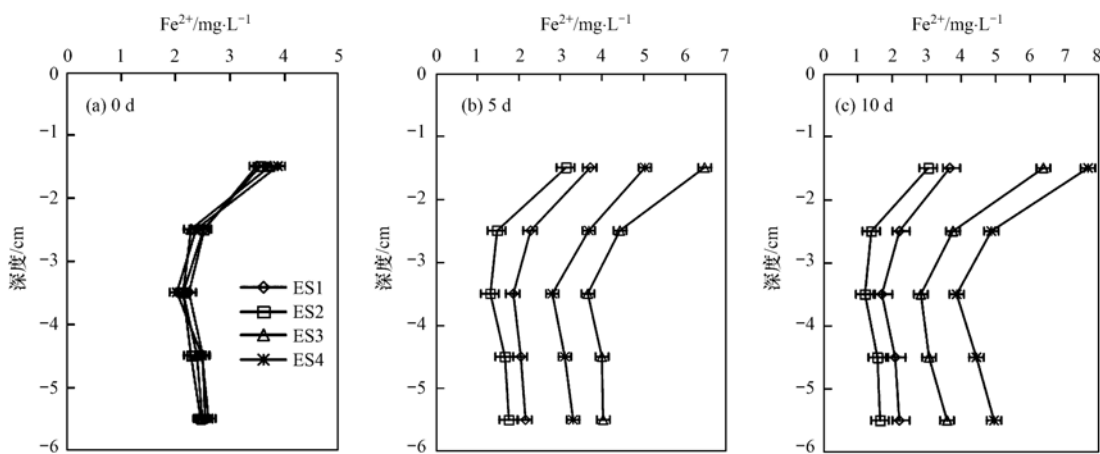


图 7 不同处理组间隙水  $\text{Fe}^{2+}$  剖面

Fig. 7  $\text{Fe}^{2+}$  profiles in the pore water sampled on day 0, day 5 and day 10 in different treatments

### 3 结论

(1) 随着扰动因素的增加, 上覆水及沉积物内部溶解氧含量明显降低.

(2) 河蚬的引入, 增加了内源磷释放趋势, 导致上覆水中不同形态磷含量明显增加(但部分磷可能来源于河蚬的排泄物), 而藻类的加入对内源磷释放的诱导作用更持久, 间隙水中 DIP 含量的降低则充分证明了这一点.

(3) 扰动因素的增加, 内源磷释放幅度加大, 并且由  $\text{NH}_4\text{Cl-P}$  转化为  $\text{Fe/Al-P}$  的比重也逐渐增加(由 44% 增至 59%).

#### 参考文献:

- [1] Palomo L, Clavero V, Izquierdo J J, *et al.* Influence of macrophytes on sediment phosphorus accumulation in a eutrophic estuary (Palmones River, Southern Spain)[J]. *Aquatic Botany*, 2004, **80**(2): 103-113.
- [2] Edlund G, Carman R. Distribution and diagenesis of organic and inorganic phosphorus in sediments of the Baltic proper [J]. *Chemosphere*, 2001, **45**(6-7): 1053-1061.
- [3] Wen L, Recknagel F. In situ removal of dissolved phosphorus in irrigation drainage water by planted floats: preliminary results from growth chamber experiment[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2002, **90**(1): 9-15.
- [4] 汪明, 武晓飞, 李大鹏, 等. 太湖梅梁湾不同形态磷周年变化规律及藻类响应研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 80-

86.

- Wang M, Wu X F, Li D P, *et al.* Annual variation of different phosphorus forms and response of algae growth in Meiliang Bay of Taihu Lake[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 80-86.
- [5] 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.
- You B S, Wang T C, Fan C X, *et al.* Effects of sediment resuspension on aqueous nutrient loading in grass type zone of Lake Taihu[J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(1): 26-31.
- [6] 史晓丹, 李大鹏, 王忍, 等. 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[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 955-962.
- Shi X D, Li D P, Wang R, *et al.* Synergistic effect of physical and *Chironomus plumosus* combined disturbance on regeneration and transformation of internal phosphorus [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 955-962.
- [7] 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.
- [8] 李大鹏, 黄勇. 扰动强度对太湖沉积物中磷释放及其形态转化的影响[J]. *环境科学*, 2012, **33**(8): 2614-2620.
- Li D P, Huang Y. Effect of disturbance intensity on phosphorus release and its transformation in the sediment from Taihu Lake [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(8): 2614-2620.
- [9] 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.
- Li D P, Huang Y. Synergistic effect of disturbance from wind - waves and benthic organisms on release of internal phosphorus from sediments[J]. *China Water & Wastewater*, 2013, **29**(4): 17-20.

- [10] 史晓丹, 李勇, 李大鹏, 等. 摇蚊幼虫扰动下沉积物微环境和微界面对物理扰动强度的响应[J]. 环境科学, 2015, **36**(5): 1622-1629.  
Shi X D, Li Y, Li D P, *et al.* Response of sediment micro environment and micro interface to physical disturbance intensity under the disturbance of *Chironomus plumosus* [J]. Environmental Science, 2015, **36**(5): 1622-1629.
- [11] 王忍, 李勇, 李大鹏, 等. 河蚬或藻存在下组合扰动对内源磷迁移的影响[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(4): 1226-1234.  
Wang R, Li Y, Li D P, *et al.* Impacts of *Corbicula fluminea* or algae under combined disturbance on internal phosphorus migration [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(4): 1226-1234.
- [12] Cyr H, McCabe S K, Nürnberg G K. Phosphorus sorption experiments and the potential for internal phosphorus loading in littoral areas of a stratified lake[J]. Water Research, 2009, **43**(6): 1654-1666.
- [13] 蔡炜, 蔡永久, 龚志军, 等. 太湖河蚬时空格局[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(5): 714-722.  
Cai W, Cai Y J, Gong Z J, *et al.* Temporal and spatial patterns of *Corbicula fluminea* in Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, **22**(5): 714-722.
- [14] 耿磊, 郁凡, 李亚春. 基于 MODIS 资料的太湖蓝藻浓度监测[J]. 气象科学, 2010, **30**(6): 827-831.  
Geng L, Yu F, Li Y C. Monitoring the concentration of cyanobacteria in Taihu Lake based on MODIS data [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2010, **30**(6): 827-831.
- [15] 李大鹏, 黄勇, 范成新. 底泥间歇扰动-沉降过程对静止水体中生物有效磷的影响[J]. 环境科学, 2010, **31**(8): 1795-1800.  
Li D P, Huang Y, Fan C X. Influence of intermittent sediment disturbance-sedimentation process on the bioavailable phosphorus in standing water [J]. Environmental Science, 2010, **31**(8): 1795-1800.
- [16] 李大鹏, 黄勇. 底泥间歇扰动对静止水体磷迁移的累加效应[J]. 环境化学, 2010, **29**(6): 1075-1078.  
Li D P, Huang Y. Accumulation effect of intermittent sediment disturbance on phosphorus migration in static water [J]. Environmental Chemistry, 2010, **29**(6): 1075-1078.
- [17] 费忠民, 李大鹏, 黄勇. 不同水温时底泥扰动对不同形态磷分布的影响[J]. 环境污染与防治, 2009, **31**(11): 13-16.  
Fei Z M, Li D P, Huang Y. Effect of sediment disturbance on the phosphorus forms migration under different water temperature [J]. Environmental Pollution & Control, 2009, **31**(11): 13-16.
- [18] Stookey L L. Ferrozine-a new spectrophotometric reagent for iron [J]. Analytical Chemistry, 1970, **42**(7): 779-781.
- [19] 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.
- [20] 李勇, 李大鹏, 黄勇, 等. 曝气对重污染河道底泥吸收和滞留磷的影响[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2011, **28**(3): 388-392.  
Li Y, Li D P, Huang Y, *et al.* Effect of aeration on phosphorus adsorption and immobilization by sediment in heavily polluted canal [J]. Journal of Natural Science of Heilongjiang University, 2011, **28**(3): 388-392.
- [21] Saavedra C, Delgado A. Iron-related phosphorus in eroded sediments from agricultural soils of Mediterranean areas [J]. Geoderma, 2005, **125**(1-2): 1-9.
- [22] 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.
- [23] 王忍, 李大鹏, 黄勇, 等. 物理和生物组合扰动对底泥微界面过程的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(11): 4112-4120.  
Wang R, Li D P, Huang Y, *et al.* Development of sediment micro-interface under physical and *Chironomus plumosus* combination disturbance [J]. Environmental Science, 2015, **36**(11): 4112-4120.
- [24] 薛庆举, 蔡永久, 许浩, 等. 温度对河蚬(*Corbicula fluminea*) 氮、磷排泄影响的初步研究[J]. 湖泊科学, 2014, **26**(6): 864-870.  
Xue Q J, Cai Y J, Xu H, *et al.* Effects of temperature on the nitrogen and phosphorus excretion of *Corbicula fluminea* [J]. Journal of Lake Sciences, 2014, **26**(6): 864-870.
- [25] 张雷, 商景阁, 王兆德, 等. 河蚬扰动沉积物界面效应及其在水中代谢速率[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(6): 1001-1006.  
Zhang L, Shang J G, Wang Z D, *et al.* Bioturbation effects of *Corbicula fluminea* on sediment-water interface progresses and its metabolic rate in water [J]. China Environmental Science, 2011, **31**(6): 1001-1006.
- [26] 武晓飞, 李大鹏, 汪明, 等. 反复扰动下加藻对不同形态磷相互转化的影响[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(4): 1187-1196.  
Wu X F, Li D P, Wang M, *et al.* Migration and transformation of phosphorus forms under dual effect of sediment resuspension and the addition of algae [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(4): 1187-1196.
- [27] 张雷, 古小治, 王兆德, 等. 水丝蚓(Tubificid worms) 扰动对磷在湖泊沉积物-水界面迁移的影响[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(5): 666-674.  
Zhang L, Gu X Z, Wang Z D, *et al.* The influence of Tubificid worms bioturbation on the exchange of phosphorus across sediment-water interface in lakes [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, **22**(5): 666-674.
- [28] 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.  
Zhang L, Gu X Z, Shao S G, *et al.* Impacts of Asian clams (*Corbicula fluminea*) on lake sediment properties and phosphorus movement [J]. Environmental Science, 2011, **32**(1): 88-95.
- [29] Nguyen L M. Phosphate incorporation and transformation in surface sediments of a sewage-impacted wetland as influenced by sediment sites, sediment pH and added phosphate concentration [J]. Ecological Engineering, 1999, **14**(1-2): 139-155.
- [30] Boström B, Andersen J M, Fleischer S, *et al.* Exchange of phosphorus across the sediment-water interface [J]. Hydrobiologia, 1988, **170**(1): 229-244.
- [31] Schönbrunner I M, Preiner S, Hein T. Impact of drying and reflooding of sediment on phosphorus dynamics of river-floodplain systems [J]. Science of the Total Environment, 2012, **432**: 329-337.

## CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory and Impact of Typical Industries on PM <sub>2.5</sub> in Chengde .....	CHEN Guo-lei, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4069)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Woodwork-making Industry in Zhejiang Province .....	YAO Yi, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> (4080)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Shanxi Province .....	YAN Yu-long, PENG Lin (4086)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of High Pollution Process at Chemical Industrial Area in Winter of China .....	GAO Song, CUI Hu-xiong, FU Qing-yan, <i>et al.</i> (4094)
Study and Application of Test Method for VOCs Emission Factor of Refueling in Service Station .....	HUANG Yu-hu, CHANG Yao-qing, REN Bi-qi, <i>et al.</i> (4103)
NH <sub>3</sub> Emission Characteristics in Landfill Sites in Beijing .....	CUI Tong, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan, <i>et al.</i> (4110)
Inventory and Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emission in Xi'an .....	SU Hang, YAN Dong-jie, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (4117)
Pollution Characteristics of Non-methane Hydrocarbons During Winter and Summer in Foshan City .....	ZHOU Xue-ming, XIANG Ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (4124)
Water-soluble Inorganic Ions in the Road Ambient Atmospheric Particles of Tianjin .....	ZHAO Meng-xue, WU Lin, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4133)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Daiyun Mountain National Nature Reserve .....	YUAN Lei, LI Wen-zhou, CHEN Wen-wei, <i>et al.</i> (4142)
Microbial Activity in Bioaerosols in Winter at the Coastal Region of Qingdao .....	MENG Xiang-bin, LI Meng-zhe, LI Hong-tao, <i>et al.</i> (4147)
Molecular and Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Smoke from Maize Straw Combustion .....	LU Gang, SUN Li-na, XU Hui, <i>et al.</i> (4156)
Gas Transfer Velocity of CH <sub>4</sub> at Extremely Low Wind Speeds .....	ZHANG Cheng, LÜ Xin-biao, LONG Li, <i>et al.</i> (4162)
Spectral Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake from Inland of Three Gorges Reservoir Areas: In the View of Riparian Ecosystem Analysis .....	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (4168)
Characteristics and Pollution Source Analysis of Nutrients in Tributary Outlets of Xitaoxi Watershed .....	CHEN Shi-wen, YUAN Xu-yin, JIN Jing, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Driving Factors on the Nitrogen Decrease in the Early Stage of the Thermal Stratification in Main Area of Zhoucun Reservoir .....	ZHANG Chun-hua, HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, <i>et al.</i> (4187)
Characteristics of Organic Phosphorus Fractions in the Sediments of the Black Water Aggregation in Lake Taihu .....	DONG Dan-ping, ZHANG Ting-xi, ZHANG Ding-yu, <i>et al.</i> (4194)
Impacts of Multiple Disturbance on Migration and Transformation of Endogenous Phosphorus in Lake .....	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (4203)
Change of Soil Nitrogen Leaching with Summer Maize Growing Periods Under Plastic Film Mulched Cultivation in Danjiangkou Reservoir Area, China .....	WANG Wei, YU Xing-xiu, HAN Qiang, <i>et al.</i> (4212)
Nutrients Recovery on the Growth of Nitrogen and Phosphorus Starved <i>Microcystis aeruginosa</i> .....	YUE Dong-mei, LI Jie, XIAO Lin (4220)
Inactivation Efficiency and Mechanism of Three Dominant Fungal Spores in Drinking Groundwater by Chlorine .....	WEN Gang, ZHU Hong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (4228)
Effect of Water Treatment Process on the Bacterial Multidrug Resistance in Drinking Water .....	MA Xiao-lin, LU Yang, WANG Yu, <i>et al.</i> (4235)
Characteristics of Disinfection By-products and Genotoxicity During Drinking Water Disinfection with Potassium Monopersulfate Compound Powder .....	AO Xiu-wei, LI Hao-jie, LIU Wen-jun, <i>et al.</i> (4241)
Heterogeneous Activation of Peroxymonosulfate with Three-dimensional Ordered Mesoporous Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> for the Degradation of Rhodamine B .....	FENG Shan-fang, DENG Si-ping, DU Jia-wen, <i>et al.</i> (4247)
Enhanced Mitigation of Membrane Fouling by Regulations on Floc Morphology in Electrocoagulation .....	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4255)
Effect of Initial pH on Nitrogen Removal Performance and N <sub>2</sub> O Emission of a Sequencing Batch CANON Reactor .....	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (4261)
Operational Characteristics of the Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Removal of Phthalate Esters by Three-dimensional Biofilm-electrode Coupled with Iron/Sulfur Reactor .....	ZHANG Ya, HAO Rui-xia, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (4268)
Phosphorus Removal Mechanism of Sulfur/Sponge Iron Composite Fillers Based on Denitrification .....	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, LI Meng, <i>et al.</i> (4275)
Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process .....	CHENG Chao-yang, ZHAO Shi-hui, LÜ Liang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Moderate and Room Temperature on Nitrogen Removal in PN-ANAMMOX Process .....	YUAN Yan, ZHU Liang (4289)
Influence of Biological Activated Carbon on Simultaneous Nitrification and Denitrification in Inflow with Different C/N Ratios .....	CUI Yan-rui, QIU Xin, ZHANG Qing-rong, <i>et al.</i> (4296)
Biotransformation of Nitrate to Nitrogen Gas Driven by ANAMMOX Microbes via Zero-valent Iron Under Anaerobic Conditions .....	ZHOU Jian, WANYAN De-qing, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4302)
A Comparative Study on Performance of an Intermittent Aeration SBR and a Traditional SBR for Treatment of Digested Piggyery Wastewater .....	DONG Bao-gang, SONG Xiao-yan, LIU Rui, <i>et al.</i> (4309)
Biological Pre-treatment of Surplus Sludge Using the Protease-secreting Bacteria .....	HE Pin-jing, WANG Ying, HU Jie, <i>et al.</i> (4317)
Transfer and Fate of Polybrominated Diphenyl Ethers in an Electrical Equipment Dismantling Area Using a Multimedia Fugacity Model .....	XUE Nan-dong, CHEN Xuan-yu, YANG Bing, <i>et al.</i> (4326)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Environmental Media in Nanning City .....	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng (4333)
PBDEs Levels in House Dust and Human Exposure to PBDEs via Dust Ingestion in Hangzhou .....	JIN Man-tong, TENG Dan-dan, ZHENG Yan-xia, <i>et al.</i> (4341)
Evaluating Biochar-Water Sorption Coefficients of Pharmaceutically Active Compounds by Using a Linear Free Energy Relationship .....	WANG Jia-yi, BI Er-ping (4349)
Characteristics of Bacterial Communities in Surface-flow Constructed Wetlands .....	WEI Jia-ming, CUI Li-juan, LI Wei, <i>et al.</i> (4357)
Community Structure and Activity Analysis of the Nitrifiers in Raw Sewage of Wastewater Treatment Plants .....	YU Li-fang, DU Qian-qian, FU Xue-tao, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Fertilization on Soil Microbial Abundance and Community Structure at DNA and cDNA Levels in Paddy Soils .....	WANG Cong, WU Ne, HOU Hai-jun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Bisphenol A on Characteristics of Paddy Soil Microbial Community Under Different Cultural Conditions .....	LIU Chang, HUANG Ya-dan, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (4380)
Identification of a Facultative Bacterium Strain with the Ability to Methylate Mercury Under Both Aerobic and Anaerobic Conditions .....	TAO Lan-lan, XIANG Yu-ping, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4389)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Vegetable Soils in Beijing .....	ZHANG Lan-he, WANG Jia-jia, HA Xue-jiao, <i>et al.</i> (4395)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Sika Deer Farm .....	HUANG Fu-yi, AN Xin-li, CHEN Qing-lin, <i>et al.</i> (4402)
Comparison of Toxic Effect of Siliceous Mineral Dusts on Lung Epithelial A549 Cells .....	HUO Ting-ting, DONG Fa-qin, DENG Jian-jun, <i>et al.</i> (4410)
Effect of Adding Compound Adsorbent on Phenanthrene and Cr(VI) Absorption by Lou Soil .....	LI Wen-bin, MENG Zhao-fu, WU Qiong, <i>et al.</i> (4419)
Effect of Biochar on Adsorption Behavior of Nonylphenol onto Loess Soil in Northwest China .....	ZHANG Zhen-guo, JIANG Yu-feng, MU Zhong-feng, <i>et al.</i> (4428)
Soil Respiration in Response to Different Ridge/Furrow Ratios and Its Relationship with Soil Moisture and Temperature Under Ridge-Furrow Planting Patterns .....	WANG Chang-jiang, SHI Cheng-xiao, FENG Fan, <i>et al.</i> (4437)
Effects of Straw in Combination with Reducing Fertilization Rate on Soil Nutrients and Enzyme Activity in the Paddy-Vegetable Rotation Soils .....	HUANG Rong, GAO Ming, WAN Yi-lin, <i>et al.</i> (4446)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
赵进才 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)

2016年11月15日 第37卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 11 Nov. 15, 2016

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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