ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第5期

Vol.36 No.5

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第36卷 第5期
2015年5月15日

目 次

深圳大气颗粒物中卤代多环芳烃污染研究 …… 孙建林,常文静,陈正侠,曾辉(1513)
北京市典型餐饮企业VOCs排放特征研究 …… 崔彤,程婧晨,何万清,任培芳,聂磊,徐东耀,潘涛(1523)
2006~2010年珠三角地区SO_2特征分析 …… 李菲,谭浩波,邓雪娇,邓涛,徐婉筠,冉靓,赵春生(1530)
环境空气$PM_{2.5}$连续监测系统手工采样比对测试 …… 王强,钟琪,迟颖,张杨,杨凯(1538)
燃煤电厂可凝结颗粒物的测试与排放 …… 裴冰(1544)
南海水域不同深度非光合微生物的固碳潜能及其对不同电子供体的响应 …… 方峰,王磊,席雪飞,胡佳俊,付小花,陆兵,徐殿胜(1550)
基于GOCI影像和水体光学分类的内陆湖泊叶绿素a浓度遥感估算 …… 冯驰,金琦,王艳楠,赵丽娜,吕恒,李云梅(1557)
贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析 …… 吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,罗进,蒋浩(1565)
东莞石马河流域水化学特征时空差异及来源辨析 …… 高磊,陈建耀,王江,柯志庭,朱爱萍,许凯(1573)
河南鸡冠洞洞穴水对极端气候的响应及其控制因素研究 …… 刘肖,杨琰,彭涛,赵景耀,任小凤,张银环,聂旭东,李建仓,凌新有,张志钦(1582)
石漠化治理对岩溶地下水水化学和溶解无机碳稳定同位素的影响 …… 肖时珍,熊康宁,蓝家程,张晖,杨龙(1590)
旱季不同土地利用类型下岩溶碳汇效应差异 …… 赵瑞一,梁作兵,王尊波,于正良,江泽利(1598)
有机氯农药在岩溶区上覆土壤中的垂直迁移特征及对地下水的影响 …… 孙玉川,王永啟,梁作兵,袁道先(1605)
山东南四湖沉积物中汞的污染现状及迁移研究 …… 曹霏霏,杨丽原,庞绪贵,王炳华,王云倩(1615)
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 …… 史晓丹,李勇,李大鹏,王忍,邓猛,黄勇(1622)
南方红壤区氮湿沉降特征及其对流域氮输出的影响 …… 郝卓,高扬,张进忠,徐亚娟,于贵瑞(1630)
不同紫色母岩对景观水体氮磷及有机物去除的影响 …… 黄雪娇,刘晓晨,李振轮,石纹豪,杨珊(1639)
荔枝落叶对铜绿微囊藻生长和光合作用的影响 …… 汪小雄,姜成春,李锦卫,汪晓军(1648)
黄连根茎浸提物对绿藻的毒理作用 …… 陈亚楠,袁玲(1655)
饮用水中消毒副产物1,1-二氯丙酮的形成机制 …… 丁春生,孟壮,徐洋洋,缪佳(1662)
水中利谷隆氯化降解动力学和消毒副产物生成特性 …… 凌晓,胡晨燕,程明,谷建(1668)
化学消毒的中和剂对水中内毒素活性检测的影响 …… 张灿,刘文君,史云,安代志,白淼,徐稳(1674)
牛粪生物炭对水中氨氮的吸附特性 …… 马锋锋,赵保卫,刁静茹,钟金魁,李安邦(1678)
丁二酸改性茶油树木屑吸附铀的研究 …… 张晓峰,陈迪云,彭燕,刘永胜,熊雪莹(1686)
SPG膜表面润湿性对膜污染和化学耐受性的影响 …… 张静,肖太民,张晶,曹丽亚,杜亚威,刘春,张磊(1694)
TiO_2诱导下左旋氧氟沙星的可见光降解及其机制 …… 郭宏生,刘亚楠,乔琪,魏红,董呈幸,薛洁,李克斌(1700)
新型高分子絮凝剂对废水中Cr(Ⅵ)的捕集性能 …… 王刚,杜凤龄,常青,徐敏(1707)
基于OUR-HPR测量在线估计活性污泥合成PHA量 …… 曾善文,王泽宇,高敬,刘东,张代钧,卢培利(1713)
分离高浓度污泥产酸发酵液的自生动态膜形成机制 …… 黄帅,刘宏波,殷波,马惠君,符波,刘和,白洁(1720)
通风强度对市政污泥生物干化中试效果的影响 …… 张喻,韩融,陆文静,王洪涛,明中远,王强,夏伟(1727)
生物可降解螯合剂谷氨酸*N*,*N*-二乙酸四钠对污泥中重金属萃取效率的研究 …… 吴青,崔延瑞,汤晓晓,杨慧娟,孙剑辉(1733)
百乐克(BIOLAK)活性污泥宏基因组的生物多样性及功能分析 …… 田美,刘汉湖,申欣,赵方庆,陈帅,姚永佳(1739)
异养硝化-好氧反硝化菌YL的脱氮特性 …… 梁贤,任勇翔,杨垒,赵思琪,夏志红(1749)
菌株*Arthrobacter* sp. CN2降解对硝基苯酚的特性与动力学 …… 任磊,史延华,贾阳,姚雪松,Ruth Nahurira,弥春霞,闫艳春(1757)
短短芽胞杆菌及其芽胞对茚的降解 …… 刘芷辰,叶锦韶,彭辉,刘则华,邓庭进,尹华,廖丽萍(1763)
垃圾填埋场抗生素抗性基因初探 …… 李蕾,徐晶,赵由才,宋立岩(1769)
不同构型人工湿地基质中土著菌的耐药性及整合子丰度调查 …… 麦晓蓓,陶然,杨扬,张敏,林剑华,满滢(1776)
硝酸盐和甲烷对覆土中苯系物厌氧氧化的影响 …… 柳蓉,龙焰,王立立,何婷,叶锦韶(1785)
山西高原落叶松人工林土壤呼吸的空间异质性 …… 严俊霞,李洪建,李君剑,武江星(1793)
施氮对黄土旱塬区春玉米土壤呼吸和温度敏感性的影响 …… 姜继韶,郭胜利,王蕊,刘庆芳,王志齐,张彦军,李娜娜,李如剑,吴得峰,孙棋棋(1802)
宣威街道尘中重金属的分布特征及其健康风险评估 …… 张文超,吕森林,刘丁彧,刘品威,米持真一,王效举,王青躍(1810)
宝鸡市街道尘埃磁学特征空间分布及环境意义 …… 张俊辉,王瑾,张健,房妮,夏敦胜(1818)
长期施肥下浙江稻田不同颗粒组分有机碳的稳定特征 …… 毛霞丽,陆扣萍,孙涛,张小凯,何丽芝,王海龙(1827)
矿区植被恢复方式对土壤微生物和酶活性的影响 …… 李君剑,刘峰,周小梅(1836)
三江平原典型湿地类型土壤微生物特征与土壤养分的研究 …… 肖烨,黄志刚,武海涛,吕宪国(1842)
钠盐类型对表面活性剂清洗煤油污染土壤的强化效应 …… 黄昭露,陈泉源,周娟,谢墨函(1849)
石油污染土壤的生物修复技术及微生物生态效应 …… 杨茜,吴蔓莉,聂麦茜,王婷婷,张明辉(1856)
可生物降解螯合剂GLDA诱导东南景天修复重金属污染土壤的研究 …… 卫泽斌,陈晓红,吴启堂,谭蒙(1864)
绿洲土Pb-Zn复合胁迫下重金属形态特征和生物有效性 …… 金诚,赵转军,南忠仁,王胜利,武文飞,王厚成(1870)
硫素对水稻根系铁锰胶膜形成及吸收镉的影响 …… 王丹,李鑫,王代长,饶伟,杜光辉,杨军,化党领(1877)
臭氧对几种楠木气体交换参数的影响 …… 李苗苗(1888)
某货车侧翻水污染事件的环境损害评估方法探索 …… 蔡锋,赵士波,陈刚才,鲜思淑,杨清玲,周贤杰,余海(1902)
《环境科学》征订启事(1543) 《环境科学》征稿简则(1756) 信息(1667,1726,1809,1848)

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

史晓丹,李勇,李大鹏*,王忍,邓猛,黄勇
(苏州科技学院环境科学与工程学院,苏州 215009)

摘要: 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 微电极技术,解析了物理扰动和摇蚊幼虫组合扰动下,沉积物微环境及微界面特征对物理扰动强度的响应规律. 结果表明,高强度物理扰动下(240 r·min^{-1}),溶解氧渗透深度(OPD)达到 12.1 mm,远高于低强度(60 r·min^{-1})的 3.8 mm. 沉积物总氧气交换速率(TOE)、TOE 与 DOE 差值、ORP、溶解氧渗透深度(OPD)、DO 空间分布的差异性等均显示了与物理扰动强度正相关趋势. 沉积物中 pH 增加的区域和幅度及 Fe^{2+} 减小的区域和幅度也显示了相同响应规律; 在沉积物表层 0~6 cm 范围内,相同深度沉积物的含水率、孔隙度、总微生物活性均随物理扰动强度增加呈递增趋势,并对物理扰动强度的响应程度随沉积物深度递增逐渐减弱. 这暗示了物理扰动胁迫摇蚊幼虫构造更深和更多的廊道,进而从垂向的角度改造了沉积物微界面和微环境.

关键词:组合扰动; 摇蚊幼虫; 微环境; 微界面; 太湖
中图分类号: X131.2 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2015)05-1622-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.2015.05.015

Response of Sediment Micro Environment and Micro Interface to Physical Disturbance Intensity Under the Disturbance of *Chironomus plumosus*

SHI Xiao-dan, LI Yong, LI Da-peng*, WANG Ren, DENG Meng, HUANG Yong
(School of Environmental Science and Engineering, University of Science and Technology of Suzhou, Suzhou 215009, China)

Abstract: The response of sediment micro environment and micro interface to physical disturbance intensity under the physical and *Chironomus plumosus* disturbance was investigated by means of sediment Rhizon samplers and Unisense micro sensor system. The sediment and overlying water were taken from Meiliang bay of Taihu Lake. The results showed that the OPD reached up to 12.1 mm under the high intensity (240 r·min^{-1}), while it was higher than 3.8 mm under low intensity (60 r·min^{-1}). The TOE, the difference of TOE and DOE, OPD, ORP and the difference of DO spatial distribution were all positively correlated with the physical disturbance intensity. The increasing magnitude and range of pH as well as the decreasing magnitude and range of ferrous followed the same response tendency. Within the 0-6 cm sediment, the water content and porosity as well as the microbial activity at the same depth increased with the increase of physical disturbance intensity. In addition, the degree of response of the above parameters to the physical disturbance intensity was weakened with the increase of sediment depth. It was suggested that *Chironomus plumosus* dug more and deeper galleries under high intensity physical disturbance. Therefore, the sediment micro environment and micro interface were transformed in the vertical direction of the sediment.

Key words: combined disturbance; *Chironomus plumosus*; micro environment; micro interface; Taihu Lake

对于外源磷被控制的水体而言,内源磷释放是水体暴发富营养化的主要原因[1],而底泥扰动是促使内源磷迁移转换的关键因素[2,3]. 然而,物理扰动和底栖生物扰动会从不同层面上对沉积物进行改造. 前者仅仅从水平向改造了沉积物表层泥水界面[4],而后者是通过挖穴、构筑廊道等活动从垂向上构造了泥水界面. 然而,对于底栖生物而言,其构造的洞穴或者廊道由于体积较小,其垂向泥水界面表面积也较小,与沉积物表层泥水界面相比较,因此,将底栖生物构造的垂向泥水界面称为微界面,以区别沉积物表层的水平向泥水界面. 这也使得沉积物-水界面从传统的水平面变成了水平与垂直共存的体系[5]. 据统计[6],因洞穴或廊道形成而增加的底泥微界面面积为底泥水平表面积的 1.3~5 倍. 显然,这扩大了泥水两相间磷的迁移转化通道. 由于底栖生物构造了垂向的洞穴和廊道,通过生物引灌作用改变了沉积物内部环境因子,如溶解氧渗透深度、pH 值等. 但这种改变更多的是出现在底栖生物构造的洞穴或者廊道及其泥水界面附近. 因此,可以将因沉积物活动而导致内部环境因子的变化称为微环

收稿日期: 2014-11-02; **修订日期**: 2014-12-24
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); 江苏省环境科学与工程重点专业项目; 江苏省特色优势学科二期项目; 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:ustsldp@163.com

境. 由于物理扰动和底栖生物扰动对沉积物泥水界面和内部环境改造的方式完全不同. 如果将两者组合起来,将会产生一种相互促进、相互协同的效应:物理扰动会通过破坏沉积物表面,迫使底栖生物向沉积物深处迁徙或放弃原有洞穴或廊道,构筑更深或者更多新的洞穴和廊道,通过生物引灌作用,从而加速间隙水与上覆水的交换,并增加溶解氧的渗透深度和区域;而生物扰动则会改变原有沉积物的含水率和孔隙度等物理特征,使得在同等的水动力作用下,被扰动的沉积物厚度显著增加,对表层沉积物产生更大程度的改造作用. 因此,物理扰动和底栖生物组合扰动对沉积物微环境和微界面产生叠加效应.

自然水体中,物理扰动(风浪、湖流、人类活动)和底栖生物扰动是共存的. 迄今为止,已经有诸多关于沉积物扰动强度下的相关研究[7,8],但是,从物理扰动和底栖生物组合扰动的角度探讨不同物理扰动强度对沉积物微环境和微界面的改造效应的研究却极为少见. 基于此,本研究以摇蚊幼虫和物理扰动为对象,通过改变物理扰动强度,探讨了组合扰动下沉积物微环境以及微界面物理化学和微生物特征的变化规律,分析了组合扰动下沉积物微环境和微界面对物理扰动强度的响应规律,以期为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

2014 年 6 月利用大口径重力采样器(Rigo Co. 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 沉积物柱样共 16 根,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(0 ~2 cm)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(n = 3)

Table 1　Physico-chemical properties of sediments and overlying water from the sampling point (n = 3)

项目	DO /mg·L^{-1}	pH	TP /mg·L^{-1}	DTP /mg·L^{-1}	DIP /mg·L^{-1}	含水率 /%	烧失量(LOI) /%	Tot-P /mg·g^{-1}
上覆水	4. 12 ± 0. 23	8. 20 ± 0. 10	0. 105 ± 0. 002	0. 075 ± 0. 001	0. 036 ± 0. 001			
沉积物						56. 12 ± 3. 06	5. 42 ± 2. 11	0. 201 ± 0. 035

实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 周后用于实验.

1.2　室内培养实验方法

实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.

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 10 cm 沉积物切分成 5 层,每层 2 cm,相同层的沉积物分别收集在同一桶中,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. 然后将滤后上覆水虹吸到沉积物上,尽可能不扰动表层沉积物且保持沉积物-水界面平整. 将制得的 4 根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 cm、2 ~3 cm、3 ~4 cm、4 ~5 cm、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,作为实验用上覆水的补充. 将制得的 4 根柱样记为 ES1、ES2、ES3、ES4,均采用组合扰动模式,其中 4 个柱样中投加的生物数量均为 20 ind,叠加的物理扰动强度分别为 60、120、180、240 r·min^{-1},实验过程温度为室温.

在第 17 d,挑选活性较强的摇蚊幼虫,向每根柱样中加入 20 ind 的摇蚊幼虫(密度为 3 611 ind·m^2),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实验. 当晚 20:00,开启恒速搅拌机(IKA RW20 digital),在沉积物-水界面上方 1 cm 处对各沉积物柱样扰动 10 min. 在实验期间,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.

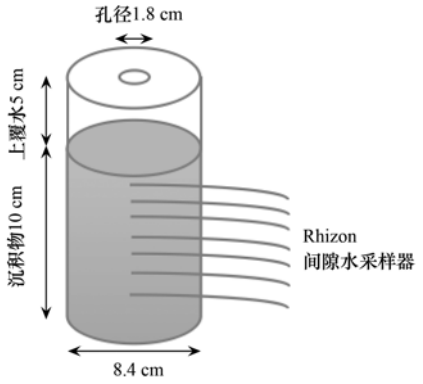


图 1 实验培养管

Fig. 1 Experimental incubation tube

实验期间,所有实验均在黑暗环境中进行,室温保持在 25 ~ 30℃,共持了 11 d(第 17 ~ 27 d),每天均对各处理组进行 10 min 的物理扰动. 间隙水在 15、21、26 d 采集,每次抽取 2 mL 间隙水,测定 Fe^{2+} 浓度. 总氧气交换速率(TOE)在 16、22、27 d 测定. 实验在第 27 d 结束,当天用 Unisense 微电极系统测定各柱样氧剖面,及 pH 剖面. 第 28 d 测定各柱样氧化还原电位(ORP)剖面,之后取出 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,将表层 6 cm 沉积物切分成 3 层,每层沉积物 2 cm,分别测定其含水率、孔隙度、沉积物总微生物活性.

1.3 样品分析方法

沉积物氧剖面,pH 剖面,ORP 剖面,溶解氧渗透深度(OPD),总氧气交换速率(TOE),扩散氧气交换速率(DOE)均可用微电极系统(Unisense,丹麦)直接或间接测定.

其中,自沉积物-水界面至溶解氧浓度为零的深度记为溶解氧渗透深度(oxygen penetration depth, OPD)[9],表层沉积物中富含大量有机质,且微生物活性高,因此氧气进入沉积物能迅速被消耗. 因此,湖泊沉积物 OPD 一般为几个毫米. 利用氧剖面直接读出 OPD 数值[6].

采用封闭上覆水法测定沉积物总氧气交换速率 TOE[10,11]. TOE 的测定参见王建军等的研究[12]. 在沉积物-水界面存在一个扩散边界层(DBL)[13],控制着溶解物质在沉积物-水界面交换过程. 扩散边界层内主要以分子扩散为主,因此该层内物质浓度一般线性变化,可以利用 Fick 第一定律及氧剖面计算出氧在沉积物-水界面的扩散通量 DOE(扩散氧气交换速率)[14]. DOE 的测定参见王建军等的研究[12].

间隙水中 Fe^{2+} 用邻菲啰啉分光光度法测定[15]. 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(%).

孔隙度是根据沉积物湿重与干重计算所得,计算公式如下:

$$\mathrm{POR}(\%) = \frac{(m_2 - m_1) \times 100}{(m_2 - m_1) + m_1/2.5} \quad (1)$$

式中,$-m_1$ 为底泥干重,m_2 为底泥湿重,2.5 为沉积物干密度($g \cdot cm^{-3}$).

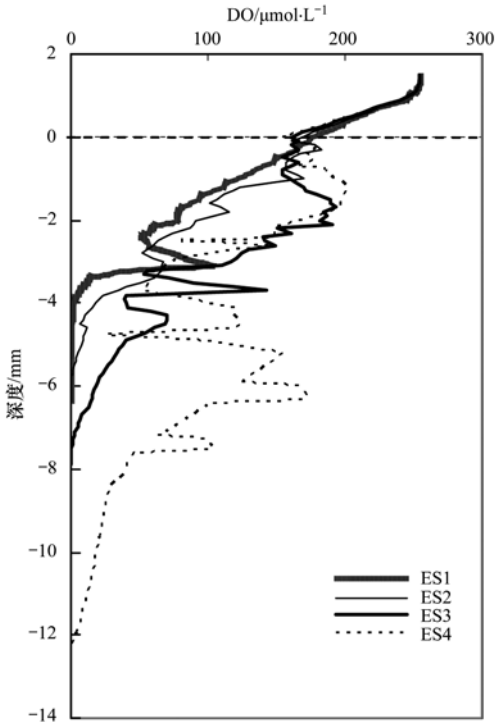
沉积物总微生物活性用荧光素双醋酸酯(FDA)法测定,以单位干重沉积物在单位时间内水解的 FDA 物质的量来表征[16].

2 结果与讨论

2.1 沉积物中微环境氧的响应规律

组合扰动中的物理扰动强度因子的改变深刻地影响着沉积物-水界面氧行为过程(图 2). 其中,溶解氧渗透深度(OPD)随着扰动强度的增大呈现递增趋势:转速为 60、120、180、240 $r \cdot min^{-1}$,对应的 OPD 分别为 3.8、5.5、8.0、12.1 mm. 各扰动强度下的氧剖面是对该沉积物柱样表层随机选取一点做穿刺测定的,在选点时避开了摇蚊幼虫所打的虫洞,因此剖面具有相对一般性. 同时,DO 在垂向上呈现不规则的波动,在部分区域内 DO 随着深度的增加呈现递增趋势,这可能是电极尖端深入到廊道内所致. 并且,扰动强度越大,产生的不规则波动越剧烈,这与物理扰动的强化能胁迫摇蚊幼虫重塑更多的廊道相关. 研究表明:摇蚊幼虫扰动既能增加 OPD,又能改变 DO 在空间分布的差异性[17]. 而在本实验的组合扰动下,物理扰动的强度越大,OPD 则会越大,且 DO 空间分布的差异性越显著.

组合扰动下氧剖面的变化规律也可以通过



0 mm 处虚线表示沉积物-水界面(SWI)

图 2　组合扰动下不同物理扰动强度对沉积物 O_2 剖面的影响

Fig. 2　Effect of different physical intensity on the sediment O_2 profiles under combined disturbance

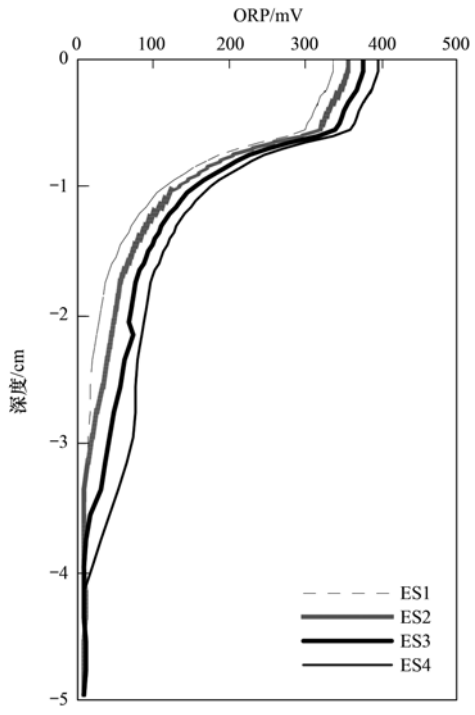


图 3　组合扰动下不同物理扰动强度对沉积物 ORP 剖面的影响

Fig. 3　Effect of different physical intensity on the sediment ORP profiles under combined disturbance

ORP 的变化来描述(图 3). 图 3 显示,不同物理扰动强度下沉积物的 ORP 在表层 0 ~ 1 cm 呈现迅速递减趋势,从(363 ± 32) mV 减小至(132 ± 31) mV; 在 1 ~ 4 cm 内呈现缓慢递减趋势,从(132 ± 31) mV 减小至 0 mV 左右; 4 ~ 5 cm 的沉积物中, ORP 几乎稳定在 0 mV. 同时,随着物理扰动强度的增加,各处理组的剖面从左向右平移, ORP 增加的区域沿垂向上呈现逐渐扩张的趋势,即 ORP 增加的区域和幅度随着扰动强度的增加而增大. 这主要是由于物理扰动胁迫摇蚊幼虫向沉积物更深处构筑廊道,或者放弃原有廊道而在相同深度处重新构筑廊道,从而增加了生物引灌作用,促使溶解氧渗透深度增加(图 2). 此外,摇蚊幼虫通过摄食等活动将表层含氧沉积物拖拽到沉积物深处,由于生物扰动、生物平流等效应使得深层沉积物获得了更多的电子供体,ORP 随之也呈现递增态势.

总氧气交换速率(TOE)不仅与底栖生物扰动有关,而且与沉积物表层扰动也密切相关(图 4). 在投加底栖生物前(16 d),各扰动强度下 TOE 在(1 333 ± 23) ~ (1 365 ± 19) μmol·(m^2·h)$^{-1}$之间波动,无显著性差异. 但组合扰动下,显著增加了各实验装置中的 TOE. 其中,实验结束时(27 d), ES1、ES2、ES3、ES4 的 TOE 分别增加了 44.28%、64.67%、89.38%、108.28%,与初始状态相比较(16 d). 由于各实验装置中摇蚊幼虫数量相同,因此, TOE 随物理扰动强度的增加而增加.

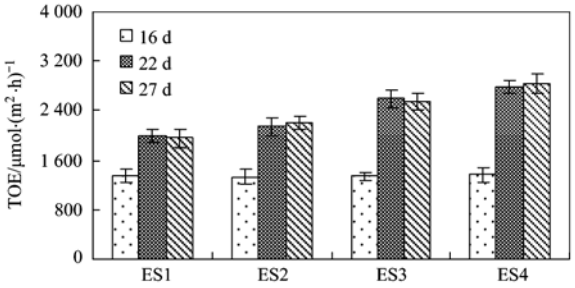


图 4　组合扰动下不同物理扰动强度对 TOE 的影响

Fig. 4　Effect of different physical intensity on TOE under combined disturbance

摇蚊幼虫扰动能显著增加沉积物的 TOE[6]. 在前期实验中,也发现组合扰动比单一的生物扰动增加更多的 TOE. 本实验的数据显示,同为组合扰动下,各沉积物柱样的 TOE 随着物理扰动强度的增加而增加. 这可归因于如下因素. 首先,引入沉积物中的摇蚊幼虫自身的呼吸作用. 研究表明,沉积物 TOE 是羽摇蚊幼虫的呼吸速率的 2.4 倍[18],即加入生物的呼吸作用仅仅贡献了 TOE 增量的一部分. 其次,摇蚊幼虫通过构筑廊道及生物引灌作用,促使沉

积物好氧区体积显著增加,好氧微生物活性的恢复.由增强的微生物活性及沉积物中还原性物质的再氧化所致的 TOE 增量占据了绝大部分[19,20]. 在组合扰动中,外加的水动力作用使得表层的廊道大量掩埋,坍塌,摇蚊幼虫在惊扰和胁迫下会重塑新的廊道或者往深处迁徙构筑更深的廊道. 一方面,摇蚊幼虫自身活动加快了新陈代谢,消耗更多氧气; 另一方面,沉积物好氧区会向更深处延伸,好氧区/厌氧区体积比例进一步加大,更多被激活的好氧微生物对 TOE 的增量做出了巨大的贡献. 并且,物理扰动强度越大,沉积物中廊道被破坏的规模越大、程度越彻底,对摇蚊幼虫产生的胁迫作用越强,伴随着更多更深的廊道的形成,TOE 的增量也越来越大.

由于 DOE 的测定方法不同于 TOE,但其也反映了沉积物-水界面氧气扩散速率. 图 4 显示了 DOE 对不同物理扰动强度的响应规律. 图 5 显示,实验结束时(27 d),各实验装置中 DOE 随物理扰动强度的增加呈现微弱的递增趋势,暗示了 DOE 对物理扰动强度的响应程度较弱. 同时,研究表明添加生物对于 DOE 的影响也较小,水丝蚓密度60 000 ind·m^{-2}时,沉积物 DOE 仅增加了 13% ~ 14%[21]. 这是由于 DOE 仅仅表征了沉积物-水界面处氧的扩散速率,并不能很好地反映出生物因素以及微生物因素对氧需求的变化[12]. 因此,实验中计算了 TOE 与 DOE 的差值,以此来描述底栖生物对沉积物-水界面处氧扩散速率的影响(图 6). TOE 与 DOE 的差值随物理扰动强度增加明显增加,并且,计算可知,在 4 种物理扰动强度下,TOE 与 DOE 的差值占 TOE 的百分比达到 72.67%(平均值, 71.56% ~ 74.13%). 这进一步佐证了沉积物中生物及微生物因素的改变是 TOE 增加的根本原因.

2.2 沉积物微环境 pH 的响应规律

对于沉积物而言,pH 是影响氮磷等营养盐迁移

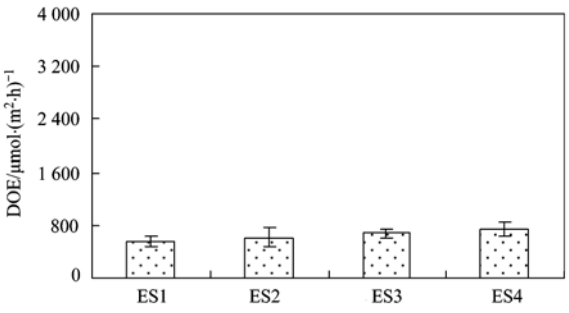


图 5 组合扰动下不同物理扰动强度对 DOE 的影响

Fig. 5 Effect of different physical intensity on DOE under combined disturbance

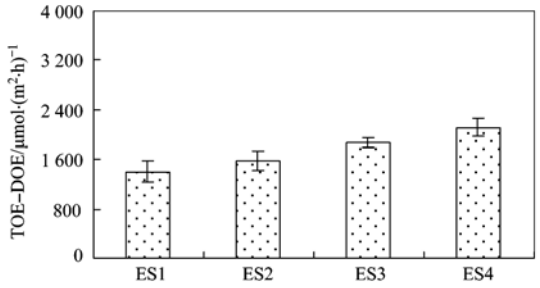


图 6 组合扰动下不同物理扰动强度对 TOE 与 DOE 差值的影响

Fig. 6 Effect of different physical intensity on the difference of TOE and DOE under combined disturbance

转化的重要因素. 而扰动则会显著改变沉积物中 pH 值的分布规律(图 7). 图 7 显示,在表层 0 ~ 1 cm,各处理组 pH 呈现迅速递减趋势,从上覆水的 8.20 ± 0.10 减至 1 cm 处的 6.50 ± 0.30. 但从沉积物 1 ~ 5 cm 处, pH 趋于稳定. 并且,随着物理扰动强度的增加,pH 剖面从左向右平移,pH 增加的区域沿垂向上呈现逐渐扩张的趋势. 组合扰动下沉积物中 pH 的变化可主要归因于,摇蚊幼虫通过挖穴和构筑廊道加快了好氧微生物的恢复[22],大量好氧微生物的呼吸作用生产的二氧化碳降低了 pH 值. 同时,微生物不完全代谢产生的酸性物质也对 pH 的降低产生了一定的贡献. 此外,摇蚊幼虫通过生物引灌作用,加

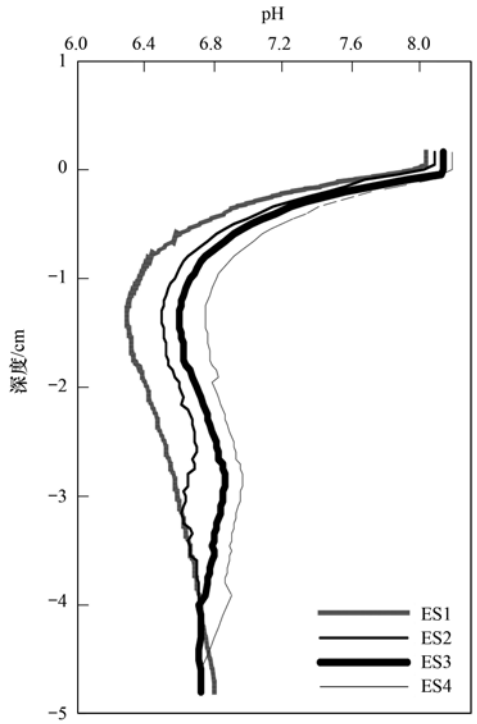


图 7 组合扰动下不同物理扰动强度对 pH 值的影响

Fig. 7 Effect of different physical intensity on pH under combined disturbance

速了上覆水与间隙水的交换,从而将沉积物中酸性物质中和.综合考虑,对于沉积物中的 pH 值而言,生物引灌所产生的碱化效应比微生物产生的酸化效应更大更直接.另外,物理扰动强度的增加胁迫摇蚊幼虫构筑更多更深的廊道,强化的生物引灌作用使得沉积物中 pH 增加的程度和区域相应地增大.摇蚊幼虫也能在沉积物较深处生存[23].

2.3　微环境 Fe^{2+} 的响应规律

Fe^{2+} 对环境中的氧化还原条件极为敏感,其也是沉积物对磷吸附和固定的良好指示剂.组合扰动下, Fe^{2+} 的变化规律也反映了物理和底栖生物组合扰动对微环境改造的效应(图 8).

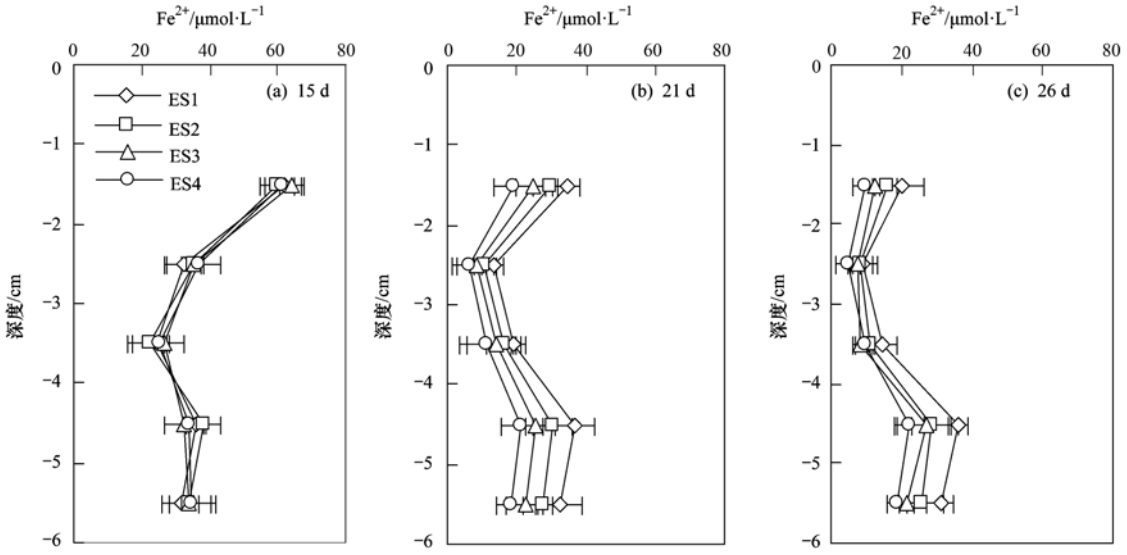


图 8　组合扰动下不同物理扰动强度对 Fe^{2+} 的影响

Fig. 8　Effect of different physical intensity on the Fe^{2+} profiles under combined disturbance

图 8(a)显示,在摇蚊幼虫加入前(15 d), ES1、ES2、ES3、ES4 中 Fe^{2+} 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,分别从 61.97、59.81、63.96 和 61.23 μmol·L^{-1} 减小到 24.30、22.58、27.02 和 25.40 μmol·L^{-1}. 大于 4 cm 后 Fe^{2+} 浓度随深度的增加而增大,分别增加到 36.33、38.35、34.49 和 34.81 μmol·L^{-1},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.与初始状态相比图[8(a)], 21 d 时,不同扰动强度下相对应深度间隙水中 Fe^{2+} 浓度呈现递减趋势.对比图 8(a)和图 8(b)发现,低强度物理扰动下 4 ~ 6 cm 处间隙水中 Fe^{2+} 浓度在这期间(15 ~ 21 d)几乎不变,但中高强度物理扰动下 Fe^{2+} 浓度却显著减小.也就是说,随着物理扰动的强度增大,间隙水中 Fe^{2+} 浓度减小的区域向更深处延伸.这进一步证明了笔者的推测——物理扰动迫使摇蚊幼虫向更深处构筑廊道,从而增加溶解氧渗透深度.然而,对比图 8(b)和图 8(c)发现,尽管物理扰动和底栖生物扰动仍在,但 Fe^{2+} 剖面(0 ~ 6 cm)在这期间几乎不变(21 ~ 26 d).由此推测,从第 21 d 开始,组合扰动下,间隙水中 Fe^{2+} 浓度已经趋近于相对稳定状态.

间隙水中二价铁是 Fe 的还原态,对氧化还原条件的改变极为敏感.通常,ORP 增大, Fe^{2+} 会迅速向 Fe^{3+} 转换; ORP 减小, Fe^{3+} 会逐步向 Fe^{2+} 回归.图 3 中 ORP 剖面的变化规律也间接证实了图 8 中 Fe^{2+} 的数量分布.研究发现生物扰动、生物引灌能将大量的电子供体(O_2、NO^{3-})转移到深处,增加沉积物中氧化区域体积,随着沉积物中的 Fe^{2+} 不断向氧化区迁移扩散, Fe^{2+} 逐步转化成水和铁氧化物,吸附水体中溶解行磷酸盐(DIP)并沉降到沉积物表面[24].也有研究表明,摇蚊幼虫扰动下,间隙水中的 Fe^{2+} 浓度呈现显著减小的趋势[6,25].本研究也展示了相类似的结果.由于水动力对于摇蚊幼虫的胁迫作用,导致摇蚊幼虫生物引灌效应所涉及的区域不断向沉积物深处延伸,这也正解释了低强度物理扰动处理组在 4 ~ 6 cm 处间隙水中 Fe^{2+} 浓度几乎不随时间的推移而发生改变,但中高强度物理扰动处理组 4 ~ 6 cm 处间隙水中 Fe^{2+} 浓度随时间的推移却显著减小的现象.

2.4　微界面物理及微生物特征的响应规律

孔隙度是沉积物固体颗粒间隙所占的体积

占总沉积物体积的百分比. 通常,孔隙中填充的是间隙水. 与此相对应的是,这些间隙水质量占总沉积物质量的百分比就被视为含水率. 因此,孔隙度与含水率的变化趋势是一致的,彼此均可表征溶解物质在沉积物中的扩散能力[9]. 在不同物理扰动强度下,孔隙度与含水率的变化规律如图 9 所示.

图 9 显示,不同物理扰动强度下含水率和孔隙度均随着沉积物深度的增加呈现递减趋势. 在 0 ~ 6 cm 范围内,相同深度沉积物的含水率与孔隙度均随着物理扰动强度的增加呈现递增趋势,但随着沉积物深度增加,这种递增趋势逐渐减弱. 这说明高强度物理扰动对摇蚊幼虫具有较强的胁迫作用,强化其对沉积物内部改造. 在 6 ~ 10 cm 范围内,沉积物含水率与孔隙度几乎保持不变. 这暗示了,尽管物理扰动促使摇蚊幼虫在沉积物中更加活跃,但其活动场所也仅集中在 0 ~ 6 cm 沉积物中,而对更深层次沉积物的影响则较小.

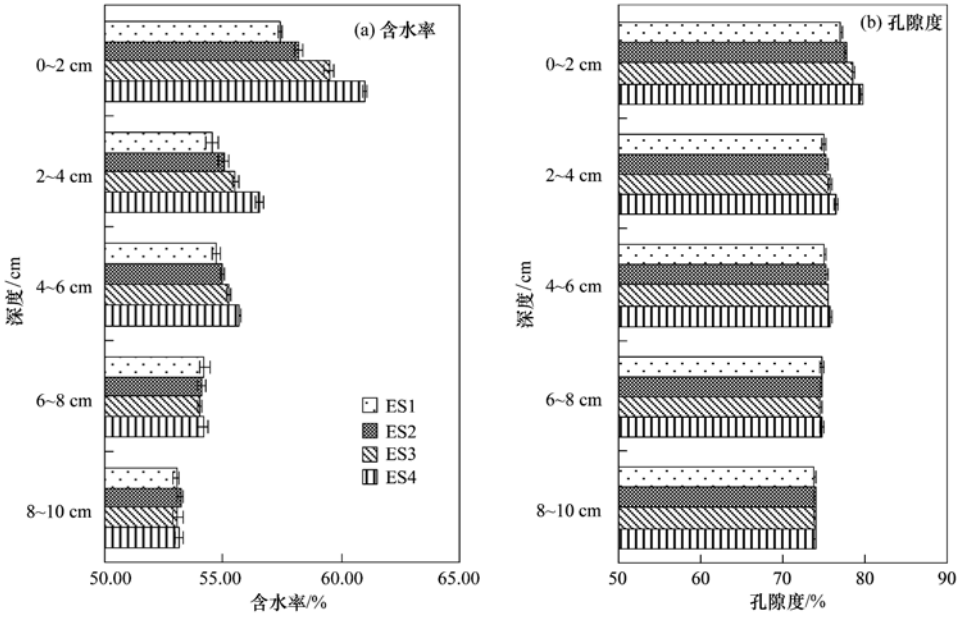


图 9 组合扰动下不同物理扰动强度对含水率和孔隙度的影响

Fig. 9 Effect of different physical intensity on the sediment water content and porosity under combined disturbance

溶解氧渗透深度的增加(图 2)以及含水率和孔隙度的显著改变(图 9)均为沉积物中微生物的恢复提供了有利条件(图 10).

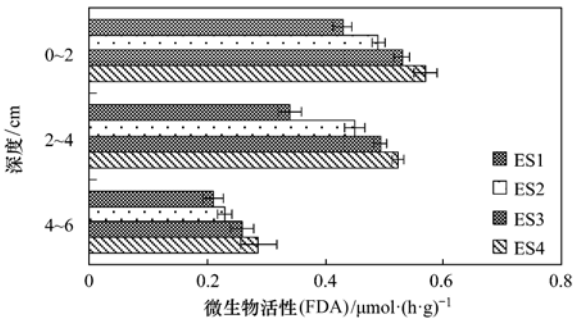


图 10 组合扰动下不同物理扰动强度对总微生物活性的影响

Fig. 10 Effect of different physical intensity on the total microbial activity under combined disturbance

图 10 显示,在不同物理扰动强度下,ES1、ES2、ES3 和 ES4 沉积物 0 ~ 6 cm 总微生物活性均值(以 FDA 计)分别为 0.33、0.39、0.43 和 0.46 μmol·(h·g)$^{-1}$. 说明物理扰动强度对总微生物活性具有促进作用. 在沉积物相同深度,随物理扰动强度增加,总微生物活性也呈增加趋势. 其中,在 0 ~ 2 cm 和 2 ~ 4 cm,这种增加趋势最明显. 但随着沉积物深度增加,总微生物活性对物理扰动强度的响应程度呈降低趋势,这与溶解氧渗透深度有关(图 2).

尽管本研究利用 Rhizon 间隙水采样技术和 Unisense 微电极技术从微观角度对组合扰动下沉积物微界面和微环境的响应进行解析,但值得指出的是,沉积物微界面和微环境的响应程度最高的区域应为摇蚊幼虫构筑廊道而产生的泥水界面及其泥水界面附近,尤其是廊道附近沉积物区域中有氧-无氧体积变化及其更替规律,这对于从形态磷转化机制的角度阐明内源磷迁移转化诱发机制极为关键.

3　结论

(1)组合扰动下,随着物理扰动强度增加,OPD、TOE、ORP、pH 显著增加,并且,沉积物中 DO 空间分布的差异性越显著.

(2)组合扰动下,沉积物中 Fe^{2+} 减小的区域和幅度随物理扰动强度增加而增加.

(3)组合扰动下,在 0 ~ 6 cm 沉积物范围内,相同深度的沉积物的含水率、孔隙度以及总微生物活性随着物理扰动强度的增加呈递增趋势.并且,对物理扰动强度的响应程度随着沉积物深度的递增逐渐减弱.

参考文献:

[1] 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.

[2] Li D P, Huang Y, Fan C X, *et al*. Contributions of phosphorus on sedimentary phosphorus bioavailability under sediment resuspension conditions [J]. Chemical Engineering Journal, 2011, **168**(3): 1049-1054.

[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] 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.

[5] 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.

[6] Welsh D T. It's a dirty job but someone has to do it: The role of marine benthic macrofauna in organic matter turnover and nutrient recycling to the water column [J]. Chemistry and Ecology, 2003, **19**(5): 321-342.

[7] 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.

[8] 王尚, 李大鹏. 不同扰动强度下城市重污染河道底泥对磷吸收和固定的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2171-2177.

[9] 范成新, 周易勇, 吴庆龙. 湖泊沉积物界面过程与效应[M]. 北京: 科学出版社, 2013. 18-21.

[10] 范成新, 相崎守弘, 福岛武彦, 等. 霞浦湖沉积物需氧速率的研究[J]. 海洋与湖沼, 1998, (5): 508-513.

[11] 张雷, 古小治, 王兆德, 等. 水丝蚓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.

[12] 王建军, 沈吉, 张路, 等. 湖泊沉积物-水界面氧气交换速率的测定及影响因素[J]. 湖泊科学, 2009, **21**(4): 474-482.

[13] Jorgensen B B, Revsbech N P. Diffusive boundary layers and the oxygen uptake of sediments and detritus [J]. Limnology and Oceanography, 1985, **30**(1): 111-122.

[14] Rasmussen H, Jorgensen B B. Microelectrode studies of seasonal oxygen uptake in a coastal sediment: Role of molecular diffusion [J]. Marine Ecology Progress Series, 1992, **81**: 289-303.

[15] Stookey L L. Ferrozine-a new spectrophotometric reagent for iron [J]. Analytical Chemistry, 1970, **42** (7): 779-781.

[16] 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.

[17] 商景阁, 张路, 王建军, 等. 中国长足摇蚊幼虫和霍普水丝蚓扰动下沉积物氧气特征分析[J]. 水生生物学报, 2011, **35**(4): 610-615.

[18] Svensson J M, Leonardson L. Effects of bioturbation by tube-dwelling chironomid larvae on oxygen uptake and denitrification in eutrophic lake sediments[J]. Freshwater Biology, 1996, **35**(2): 289-300.

[19] Glud R N. Oxygen dynamics of marine sediments[J]. Marine Biology Research, 2008, **4**(4): 243-289.

[20] Hargrave B T. Similarity of oxygen uptake by benthic communities[J]. Limnology and Oceanography, 1969, **14**(5): 801-805.

[21] Lagauzère S, Pischedda L, Cuny P, *et al*. Influence of *Chironomus riparius* (Diptera, Chironomidae) and *Tubifex tubifex* (Annelida, Oligochaeta) on oxygen uptake by sediments. Consequences of uranium contamination [J]. Environmental Pollution, 2009, **157**(4): 1234-1242.

[22] Davis R B. Tubificids alter profiles of redox potential and pH in profundal lake sediment [J]. Limnology and Oceanography, 1974, **19**(2): 342-346.

[23] Edwards R W. The effect of larvae of *Chironomus riparius* meigen on the redox potentials of settled activated sludge[J]. Annals of Applied Biology, 1958, **46**(3): 457-464.

[24] Boström B, Andersen J M, Fleischer S, *et al*. Exchange of phosphorus across the sediment-water interface [J]. Hydrobiologia, 1988, **170**(1): 229-244.

[25] Lewandowski J, Laskov C, Hupfer M. The relationship between *Chironomus plumosus* burrows and the spatial distribution of pore-water phosphate, iron and ammonium in lake sediments [J]. Freshwater Biology, 2007, **52**(2): 331-343.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 36 No. 5

May 15, 2015

CONTENTS

Pollution of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Particulate Matters of Shenzhen ····· SUN Jian-lin, CHANG Wen-jing, CHEN Zheng-xia, *et al.* (1513)

Emission Characteristics of VOCs from Typical Restaurants in Beijing ····· CUI Tong, CHENG Jing-chen, HE Wan-qing, *et al.* (1523)

Characteristics Analysis of Sulfur Dioxide in Pearl River Delta from 2006 to 2010 ····· LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, *et al.* (1530)

Comparison Test Between $PM_{2.5}$ Continuous Monitoring System and Manual Sampling Analysis for $PM_{2.5}$ in Ambient Air ····· WANG Qiang, ZHONG Qi, CHI Ying, *et al.* (1538)

Determination and Emission of Condensable Particulate Matter from Coal-fired Power Plants ····· PEI Bing (1544)

Potential Carbon Fixation Capability of Non-photosynthetic Microbial Community at Different Depth of the South China Sea and Its Response to Different Electron Donors ····· FANG Feng, WANG Lei, XI Xue-fei, *et al.* (1550)

Remote Sensing Estimation of Chlorophyll-a Concentration in Inland Lakes Based on GOCI Image and Optical Classification of Water Body ····· FENG Chi, JIN Qi, WANG Yan-nan, *et al.* (1557)

Hydrochemical Characteristics and Sources of Qingshuijiang River Basin at Wet Season in Guizhou Province ····· LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, *et al.* (1565)

Temporal-spatial Variation and Source Identification of Hydro-chemical Characteristics in Shima River Catchment, Dongguan City ····· GAO Lei, CHEN Jian-yao, WANG Jiang, *et al.* (1573)

Response and Control Factors of Groundwater to Extreme Weather, Jiguan Cave, Henan Province, China ····· LIU Xiao, YANG Yan, PENG Tao, *et al.* (1582)

Impact of Rocky Desertification Treatment on Underground Water Chemistry and Dissolved Inorganic Carbon Isotope in Karst Areas ····· XIAO Shi-zhen, XIONG Kang-ning, LAN Jia-cheng, *et al.* (1590)

Difference of Karst Carbon Sink Under Different Land Use and Land Cover Areas in Dry Season ····· ZHAO Rui-yi, LIANG Zuo-bing, WANG Zun-bo, *et al.* (1598)

Vertical Migration Characteristics of Organochlorine Pesticides in Overlying Soil in Karst Terranes and Its Impact on Groundwater ····· SUN Yu-chuan, WANG Yong-qi, LIANG Zuo-bing, *et al.* (1605)

Pollution Status and Migration of Mercury in the Sediments of Nansi Lake in Shandong Province ····· CAO Fei-fei, YANG Li-yuan, PANG Xu-gui, *et al.* (1615)

Response of Sediment Micro Environment and Micro Interface to Physical Disturbance Intensity Under the Disturbance of *Chironomus plumosus* ····· SHI Xiao-dan, LI Yong, LI Da-peng, *et al.* (1622)

Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition and Associated Impact on N Transport in the Watershed of Red Soil Area in Southern China ····· HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, *et al.* (1630)

Effect of Different Purple Parent Rock on Removal Rates of Nitrogen, Phosphorus and Organics in Landscape Water ····· HUANG Xue-jiao, LIU Xiao-chen, LI Zhen-lun, *et al.* (1639)

Effects of *Litchi chinensis* Defoliation on Growth and Photosynthesis of *Microcystis aeruginosa* ····· WANG Xiao-xiong, JIANG Chen-chun, LI Jin-wei, *et al.* (1648)

Toxicity of *Coptis chinensis* Rhizome Extracts to Green Algae ····· CHEN Ya-nan, YUAN Ling (1655)

Formation Mechanism of the Disinfection By-product 1,1-Dichloroacetone in Drinking Water ····· DING Chun-sheng, MENG Zhuang, XU Yang-yang, *et al.* (1662)

Degradation Kinetics and Formation of Disinfection By-products During Linuron Chlorination in Drinking Water ····· LING Xiao, HU Chen-yan, CHENG Ming, *et al.* (1668)

Interference for Various Quench Agents of Chemical Disinfectants on Detection of Endotoxin Activities in Water ····· ZHANG Can, LIU Wen-jun, SHI Yun, *et al.* (1674)

Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Dairy Manure Biochar ····· MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, DIAO Jing-ru, *et al.* (1678)

Absorption of Uranium with Tea Oil Tree Sawdust Modified by Succinic Acid ····· ZHANG Xiao-feng, CHEN Di-yun, PENG Yan, *et al.* (1686)

Effect of Membrane Wettability on Membrane Fouling and Chemical Durability of SPG Membranes ····· ZHANG Jing, XIAO Tai-min, ZHANG Jing, *et al.* (1694)

TiO_2-Induced Photodegradation of Levofloxacin by Visible Light and Its Mechanism ····· GUO Hong-sheng, LIU Ya-nan, QIAO Qi, *et al.* (1700)

Performance of Novel Macromolecule Flocculant in the Treatment of Wastewater Containing Cr(Ⅵ) Ions ····· WANG Gang, DU Feng-ling, CHANG Qing, *et al.* (1707)

On-line Estimation for the Amount of Stored PHA in Activated Sludge Based on OUR-HPR Measurements ····· ZENG Shan-wen, WANG Ze-yu, GAO Jing, *et al.* (1713)

Formation Mechanism of Self-forming Dynamic Membrane During Separation of High-concentration Sewage Sludge Fermented for Acid Production ····· HUANG Shuai, LIU Hong-bo, YIN Bo, *et al.* (1720)

Influence of Air Flux on Municipal Sludge Biodrying in a Pilot Scale Test ····· ZHANG Yu, HAN Rong, LU Wen-jing, *et al.* (1727)

Extraction of Heavy Metals from Sludge Using Biodegradable Chelating Agent *N*,*N*-bis(carboxymethyl) Glutamic Acid Tetrasodium ····· WU Qing, CUI Yan-rui, TANG Xiao-xiao, *et al.* (1733)

Biodiversity and Function Analyses of BIOLAK Activated Sludge Metagenome ····· TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin, *et al.* (1739)

Characteristics of Nitrogen Removal by a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium YL ····· LIANG Xian, REN Yong-xiang, YANG Lei, *et al.* (1749)

Biodegradation Characteristics and Kinetics of *p*-nitrophenol by Strain *Arthrobacter* sp. CN2 ····· REN Lei, SHI Yan-hua, JIA Yang, *et al.* (1757)

Biodegradation of Pyrene by Intact Cells and Spores of *Brevibacillus brevis* ····· LIU Zhi-chen, YE Jin-shao, PENG Hui, *et al.* (1763)

Investigation of Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in Landfill ····· LI Lei, XU Jing, ZHAO You-cai, *et al.* (1769)

Investigation of Antibiotic Resistance of Indigenous Bacteria and Abundance of Class I Integron in Matrix of Constructed Wetlands of Different Configurations ····· MAI Xiao-bei, TAO Ran, YANG Yang, *et al.* (1776)

Effects of Nitrate and CH_4 on Anaerobic Oxidation of BETX in Landfill Cover Soils ····· LIU Rong, LONG Yan, WANG Li-li, *et al.* (1785)

Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Planted Larch Forest in Shanxi Plateau ····· YAN Jun-xia, LI Hong-jian, LI Jun-jian, *et al.* (1793)

Effects of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration and Temperature Sensitivity in Spring Maize Field in Semi-Arid Regions on Loess Plateau ····· JIANG Ji-shao, GUO Sheng-li, WANG Rui, *et al.* (1802)

Distribution Characteristics of Heavy Metals in the Street Dusts in Xuanwei and Their Health Risk Assessment ····· ZHANG Wen-chao, LÜ Sen-lin, LIU Ding-yu, *et al.* (1810)

Spatial Distribution of Magnetic Properties of Street Dust in Baoji City and Its Implications of Environment ····· ZHANG Jun-hui, WANG Jin, ZHANG Jian, *et al.* (1818)

Effect of Long-term Fertilizer Application on the Stability of Organic Carbon in Particle Size Fractions of a Paddy Soil in Zhejiang Province, China ····· MAO Xia-li, LU Kou-ping, SUN Tao, *et al.* (1827)

Effects of Different Reclaimed Scenarios on Soil Microbe and Enzyme Activities in Mining Areas ····· LI Jun-jian, LIU Feng, ZHOU Xiao-mei (1836)

Soil Microorganism Characteristics and Soil Nutrients of Different Wetlands in Sanjinag Plain, Northeast China ····· XIAO Ye, HUANG Zhi-gang, WU Hai-tao, *et al.* (1842)

Strengthening Effects of Sodium Salts on Washing Kerosene Contaminated Soil with Surfactants ····· HUANG Zhao-lu, CHEN Quan-yuan, ZHOU Juan, *et al.* (1849)

Effects and Biological Response on Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil ····· YANG Qian, WU Man-li, NIE Mai-qian, *et al.* (1856)

Enhanced Phytoextraction of Heavy Metals from Contaminated Soils Using *Sedum alfredii* Hance with Biodegradable Chelate GLDA ····· WEI Ze-bin, CHEN Xiao-hong, WU Qi-tang, *et al.* (1864)

Speciation Characteristics and Bioavailability of Heavy Metals in Oasis Soil Under Pb, Zn Combined Stress ····· JIN Cheng, ZHAO Zhuan-jun, NAN Zhong-ren, *et al.* (1870)

Influence of Sulfur on the Formation of Fe-Mn Plaque on Root and Uptake of Cd by Rice (*Oryza sativa* L.) ····· WANG Dan, LI Xin, WANG Dai-chang, *et al.* (1877)

Effects of Ozone on Photosynthesis of Several Plants ····· LI Miao-miao (1888)

A Method Research on Environmental Damage Assessment of a Truck Rollover Pollution Incident ····· CAI Feng, ZHAO Shi-bo, CHEN Gang-cai, *et al.* (1902)

《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　刘　毅　汤鸿霄　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 5 月 15 日　第 36 卷　第 5 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 36　No. 5　May 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