

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第11期

Vol.36 No.11

**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

|                                                                           |                                                     |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 北京市大气气溶胶中糖类化合物的组成及来源 .....                                                | 梁林林, Guenter Engling, 段凤魁, 马永亮, 程远, 杜祯宇, 贺克斌 (3935) |
| 北京大气 PM <sub>2.5</sub> 与惰性 SiO <sub>2</sub> 的生物毒性比较 .....                 | 刘梦娇, 黄艺, 文航, 邱国玉 (3943)                             |
| APEC 期间北京及周边城市 AQI 区域特征及天气背景分析 .....                                      | 高庆先, 刘俊蓉, 王宁, 李文涛, 高文康, 苏布达 (3952)                  |
| 2000~2014 年北京市 SO <sub>2</sub> 时空分布及一次污染过程分析 .....                        | 程念亮, 张大伟, 李云婷, 陈添, 李金香, 董欣, 孙瑞雯, 孟凡 (3961)          |
| 利用 SPAMS 研究石家庄市冬季连续灰霾天气的污染特征及成因 .....                                     | 周静博, 任毅斌, 洪纲, 路娜, 李治国, 李雷, 李会来, 靳伟 (3972)           |
| 长江三角洲夏季一次典型臭氧污染过程的模拟 .....                                                | 张亮, 朱彬, 高晋徽, 康汉青, 杨鹏, 王红磊, 李月娥, 邵平 (3981)           |
| 珠江三角洲区域污染分布及其垂直风场特征 .....                                                 | 刘建, 吴兑, 范绍佳 (3989)                                  |
| 春季黄渤海海水中尿素分布特征及溶解态氮的组成 .....                                              | 李志林, 石晓勇, 张传松 (3999)                                |
| 洱海流域农业用地与入湖河流水质的关系研究 .....                                                | 庞燕, 项颂, 储昭升, 薛力强, 叶碧碧 (4005)                        |
| 大辽河主要污染源营养盐输入特征 .....                                                     | 马迎群, 张雷, 赵艳民, 秦延文, 潘晓雪, 曹伟, 刘志超, 杨晨晨 (4013)         |
| 三峡库区大宁河沉积物营养盐时空分布及其与叶绿素的相关性分析 .....                                       | 张永生, 李海英, 任家盈, 卢佳 (4021)                            |
| 不同地质背景水库区夏季水-气界面温室气体交换通量研究 .....                                          | 李建鸿, 蒲俊兵, 孙平安, 袁道先, 刘文, 张陶, 莫雪 (4032)               |
| 周丛生物存在下不同水层氧化还原带的分布及其与微生物的关联 .....                                        | 王逢武, 刘玮, 万娟娟, 杨嘉利, 刘雪梅, 向速林, 吴永红 (4043)             |
| 华北低平原区地下水中氟分布特征及形成原因: 以南皮县为例 .....                                        | 孔晓乐, 王仕琴, 赵焕, 袁瑞强 (4051)                            |
| 某市典型地段地表水及地下水中氟喹诺酮类抗生素分布特征 .....                                          | 崔亚丰, 何江涛, 苏思慧, 杨蕾, 乔肖刚 (4060)                       |
| 乳山湾邻近海域沉积物中好氧氨氧化微生物分布特征 .....                                             | 贺惠, 甄毓, 米铁柱, 张玉, 付璐璐, 于志刚 (4068)                    |
| 青木关地下河中溶解态甾醇来源及迁移、转化特征 .....                                              | 梁作兵, 沈立成, 孙玉川, 王尊波, 江泽利, 张媚, 廖昱, 谢正兰, 张远瞩 (4074)    |
| 多环芳烃在岩溶地下表层沉积物-水相的分配 .....                                                | 蓝家程, 孙玉川, 肖时珍 (4081)                                |
| 降雨期间岩溶地下河溶解态多环芳烃变化特征及来源解析 .....                                           | 江泽利, 孙玉川, 王尊波, 梁作兵, 任坤, 谢正兰, 张媚, 廖昱 (4088)          |
| 重庆南山老龙洞地下河系统重金属分布、迁移及自净能力 .....                                           | 任坤, 梁作兵, 于正良, 张宇, 王蓉, 袁道先 (4095)                    |
| 三峡水库消落带植物汞的分布特征 .....                                                     | 梁丽, 王永敏, 李先源, 唐振亚, 张翔, 张成, 王定勇 (4103)               |
| 物理和生物组合扰动对底泥微界面过程的影响 .....                                                | 王忍, 李大鹏, 黄勇, 刘焱见, 陈俊 (4112)                         |
| 超声、过硫酸钾协同去除水中诺氟沙星的效果 .....                                                | 魏红, 史京转, 李佳霖, 李克斌, 赵琳, 韩凯 (4121)                    |
| 载银活性炭活化过硫酸钠降解酸性橙 7 .....                                                  | 王忠明, 黄天寅, 陈家斌, 李文卫, 张黎明 (4127)                      |
| TiO <sub>2</sub> 降解迪美唑的动力学及活性物质分析 .....                                   | 陈冬梅, 喻泽斌, 孙蕾, 黄俊, 高丽红, 李明洁 (4135)                   |
| 单宁酸铁吸附去除水中无机氮的性能与机制研究 .....                                               | 张瑞娜, 李琳, 刘俊新 (4141)                                 |
| 间歇曝气式膜生物反应器对养猪沼液中兽用抗生素的去除特性 .....                                         | 丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 宋小燕, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (4148)         |
| 单级和两级串联臭氧-生物活性炭深度处理垃圾渗滤液比较研究 .....                                        | 杜安静, 范举红, 刘锐, 邱松凯, 文晓刚, 陈吕军 (4154)                  |
| 水力停留时间和溶解氧对陶粒 CANON 反应器的影响 .....                                          | 王会芳, 付昆明, 左早荣, 仇付国 (4161)                           |
| 氨氮对 AOB 抑制的形态及规律 .....                                                    | 崔剑虹, 李祥, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵 (4168)                         |
| 厌氧氨氧化与反硝化协同脱氮处理城市污水 .....                                                 | 张诗颖, 吴鹏, 宋吟玲, 沈耀良, 张婷 (4174)                        |
| 同步硝化反硝化耦合除磷工艺的快速启动及其运行特征 .....                                            | 冷璐, 信欣, 鲁航, 唐雅男, 万利华, 郭俊元, 程庆峰 (4180)               |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 对部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺脱氮效能的影响 .....               | 李祥, 陈宗姮, 黄勇, 袁怡, 刘忻, 张大林 (4189)                     |
| ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥亚硝化性能调控及稳态研究 .....                                 | 巫恺澄, 吴鹏, 沈耀良, 李月寒, 王建芳, 徐乐中 (4195)                  |
| 活化过硫酸盐对市政污泥调理效果的影响 .....                                                  | 徐鑫, 濮文虹, 时亚飞, 虞文波, 张诗楠, 宋健, 张昊, 何姝, 杨昌柱, 杨家宽 (4202) |
| 温度分化对 APBR 反应器性能及产甲烷菌群落的影响 .....                                          | 谢海迎, 汪鑫, 李牧原, 阎叙西, 五十岚泰夫, 罗锋 (4208)                 |
| 污染场地修复技术筛选方法及应用 .....                                                     | 白利平, 罗云, 刘俐, 周友亚, 颜增光, 李发生 (4218)                   |
| 基于 Monte Carlo 模拟的土壤重金属综合风险评价与案例分析 .....                                  | 杨阳, 代丹, 蔡怡敏, 陈卫平, 侯瑜, 杨锋 (4225)                     |
| 大港工业区土壤重金属污染及生态风险评价 .....                                                 | 张倩, 陈宗娟, 彭昌盛, 李发生, 谷庆宝 (4232)                       |
| 缙云山不同土地利用方式对土壤团聚体微生物量碳氮的影响 .....                                          | 李增全, 江长胜, 郝庆菊 (4241)                                |
| 不同秸秆翻埋还田对旱地和水田土壤微生物群落结构的影响 .....                                          | 兰木岭, 高明 (4252)                                      |
| 生草果园土壤微生物群落的碳源利用特征 .....                                                  | 杜毅飞, 方凯凯, 王志康, 李会科, 毛鹏娟, 张向旭, 王婧 (4260)             |
| 不同有机物料对东南景天修复重金属污染土壤效率的影响 .....                                           | 姚桂华, 徐海舟, 朱林刚, 马嘉伟, 柳丹, 叶正钱 (4268)                  |
| 组配改良剂对土壤-蔬菜系统铅镉转运调控的场地研究 .....                                            | 朱维, 刘丽, 吴燕明, 周航, 邓贵友, 杨文骏, 彭佩钦, 曾敏, 廖柏寒 (4277)      |
| 水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响 .....                                              | 王美娥, 彭驰, 陈卫平 (4283)                                 |
| 大庆湖泊群水体和淡水鱼中多环芳烃污染特征及生态风险评估 .....                                         | 王晓迪, 臧淑英, 张玉红, 王凡, 杨兴, 左一龙 (4291)                   |
| 覆盖层甲烷氧化动力学和甲烷氧化菌群落结构 .....                                                | 邢志林, 赵天涛, 高艳辉, 何芝, 杨旭, 彭绪亚 (4302)                   |
| 阳极内添加阳离子交换树脂提升铝压“三合一”膜电极 MFC 性能 .....                                     | 梅卓, 张哲, 王鑫 (4311)                                   |
| 应用基于单克隆抗体的免疫传感器检测环境中的茚和苯并茚 .....                                          | 李鑫, 乔琰, 钟国祯 (4319)                                  |
| 《环境科学》征订启事 (4224)      《环境科学》征稿简则 (4318)      信息 (4080, 4173, 4290, 4301) |                                                     |

# 物理和生物组合扰动对底泥微界面过程的影响

王忍, 李大鹏\*, 黄勇, 刘焱见, 陈俊

(苏州科技学院环境科学与工程学院, 苏州 215009)

**摘要:** 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对底泥微界面和微环境特征的协同作用。结果表明, 组合扰动、生物扰动均导致溶解氧渗透深度(OPD)、总氧气交换速率(TOE)、含水率、总微生物活性显著增加, 并保持在高于对照实验的水平。并且, 组合扰动下, 这些指标随着物理扰动强度增加而有所增加。对于  $\text{Fe}^{2+}$  而言, 组合扰动和生物扰动均导致  $\text{Fe}^{2+}$  含量明显降低, 且降低幅度明显大于对照实验。 $\text{Fe}^{2+}$ 、含水率、总微生物活性在底泥 0~4 cm 内受扰动影响变化幅度较大。这可能是内源磷形态转化的“活性区域”。对组合扰动下 OPD、TOE、 $\text{Fe}^{2+}$ 、含水率、总微生物活性与物理扰动强度进行曲线拟合。结果表明, 各拟合方程均符合 2 阶多项式, 且当扰动强度  $\geq 34 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ , 组合扰动对上述指标产生“跃变式”叠加作用。这种改造效应可能是内源磷形态转化的主要诱发机制。

**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)11-4112-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.11.022

## Development of Sediment Micro-Interface Under Physical and *Chironomus plumosus* Combination Disturbance

WANG Ren, LI Da-peng\*, HUANG Yong, LIU Yan-jian, CHEN Jun

(School of Environmental Science and Engineering, University of Science and Technology of Suzhou, Suzhou 215009, China)

**Abstract:** Synergistic effect of physical and *Chironomus plumosus* combination disturbance on the characteristics of the micro-environment and micro-interface was investigated by the Rhizon samplers and Unisense micro sensor system. The results showed that the oxygen penetration depth (OPD), total oxygen exchange (TOE), water content and total microbial activity increased under the combination disturbance and bioturbation and were kept at the higher level, compared with the control. These parameters increased with the physical intensity under combination disturbance. However, the content of  $\text{Fe}^{2+}$  decreased under the combination disturbance and bioturbation and the decrease was more obvious than that in the control. The changes of the  $\text{Fe}^{2+}$ , the water content and the total microbial activity were large at 0-4 cm depth in the sediments. Therefore, the area might be the active area for the transformation of internal sedimentary phosphorus forms. The curve fitting was used for the OPD, TOE, the content of  $\text{Fe}^{2+}$ , the water content and the total microbial activity with the physical intensity under combination disturbance. It was observed that the second-order polynomial equation was suitable for the curve fitting. In addition, jump type synergistic effect was presented in the above mentioned parameters under combination disturbance when the physical intensity was higher than  $34 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ . The remodeling on the sediment micro-interface and micro-environment might be the main inducing mechanism for the transformation of internal phosphorus.

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

浅水湖泊中, 风浪、底栖生物、湖流、人为等干扰作用均会对底泥产生扰动作用, 从而影响磷在泥水界面间的交换, 进而对浅水湖泊(水体)富营养化发展进程起着重要作用<sup>[1~6]</sup>。在上述扰动方式中, 风浪和底栖生物是浅水湖泊中较为常见<sup>[7~9]</sup>, 但是两者对底泥界面产生的影响是不同的<sup>[10~13]</sup>。尽管已经有研究发现<sup>[14]</sup>, 两者组合扰动会对内源磷迁移转化产生协同作用。该研究只阐述了“条件-组合扰动”和“结果-内源磷迁移转化”, 但并未阐明“中间过程-微界面过程效应”, 即两者组合为何会对内源磷迁移转化产生协同作用。而“中间过程”可能更多地与扰动下的界面特征和底泥内部的环境因素变化有关。因此, 若要阐明“中间过程”, 则需要了解两者组合扰动对底泥微界面和底泥微环境产生了何种影响,

是否也存在协同作用。

因此, 本研究以摇蚊幼虫和物理机械扰动为对象, 通过改变物理扰动强度, 探讨组合扰动下底泥微环境及微界面物理、微生物特征的变化规律, 采用曲线拟合法<sup>[15]</sup>对获得数据进行处理, 进而阐明组合扰动对底泥微环境及界面特征各指标的叠加效应, 以期阐明组合扰动下“是什么”诱导了内源磷迁移转化提供基础理论依据。

收稿日期: 2015-03-19; 修订日期: 2015-06-19

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: 王忍(1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水体修复, E-mail: 515309180@qq.com

\* 通讯联系人, E-mail: ustslp@163.com

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 底泥柱样共 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, 尽可能地无扰动运回实验室. 同时采集上覆水 50 L. 采样点底泥及上覆水的理化性质见表 1.

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<br>/mg·L <sup>-1</sup> | pH  | TP<br>/mg·L <sup>-1</sup> | DTP<br>/mg·L <sup>-1</sup> | DIP<br>/mg·L <sup>-1</sup> | 含水率<br>/% | 烧失量 LOI<br>/% | Tot-P<br>/mg·g <sup>-1</sup> |
|-----|---------------------------|-----|---------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------|---------------|------------------------------|
| 上覆水 | 4.12                      | 8.2 | 0.105                     | 0.075                      | 0.036                      |           |               |                              |
| 底泥  |                           |     |                           |                            |                            | 51.63     | 5.42          | 0.201                        |

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底泥和上覆水驯化培养 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底泥柱样培养的上覆水. 采集的底泥柱样进行以下处理: 将每个柱样表层 10 cm 底泥切分成 5 层, 每层 2 cm, 相同层的底泥分别收集在同一桶中, 将各桶内底泥过 60 目金属筛除去其中的底栖生物和大颗粒物, 将过筛后的底泥混匀, 按原来顺序装入培养管中, 并用切片将底泥-水界面切成完全平整. 然后将滤后上覆水虹吸到底泥上, 尽可能不扰动表层底泥且保持底泥-水界面平整. 将制得的 6 根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, 用曝气沙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, 即底泥-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. 从培养水槽中取出底泥柱样, 将泥样柱上顶至适当位置, 使得采样孔位于底泥-水界面以下 1.5、2.5、3.5、4.5、5.5 cm 处 (分别采集泥面下 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. 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. 实验分别采用空白对照 (不加摇蚊幼虫、不加机械搅拌)、生物扰动 (投加摇蚊幼虫、不加机械搅拌)、组合扰动 (投加摇蚊幼虫、叠加机械搅拌) 这 3 种扰动模式. 具体实验分组及编号见表 2. 实验过程温度为室温.

表 2 实验分组

Table 2 Situation of the experimental group

| 编号   | 内容                                    |
|------|---------------------------------------|
| ES11 | 不加摇蚊幼虫、不搅拌                            |
| ES21 | 20ind 摇蚊幼虫、不搅拌                        |
| ES31 | 20ind 摇蚊幼虫、120 r·min <sup>-1</sup> 搅拌 |
| ES32 | 20ind 摇蚊幼虫、150 r·min <sup>-1</sup> 搅拌 |
| ES33 | 20ind 摇蚊幼虫、180 r·min <sup>-1</sup> 搅拌 |
| ES34 | 20ind 摇蚊幼虫、240 r·min <sup>-1</sup> 搅拌 |

在第 17 d, 挑选活性较强的摇蚊幼虫, 向生物扰动组和组合扰动组柱样中加入相应条数的摇蚊幼虫, 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底泥中, 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 8 点, 开启恒速搅拌机 (IKA RW20 digital), 在底泥-水界面上方 1 cm 处对组合扰动组底泥柱样扰动 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.

实验期间, 所有实验均在黑暗环境中进行, 室温保持在 25~30℃, 共持续了 11 d (第 17~27 d). 间隙水在 15、21、26 d 采集, 每次抽取 2 mL 间隙水, 测定 Fe<sup>2+</sup> 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. 第 28 d 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 底泥切分成 3 层, 每层底泥 2

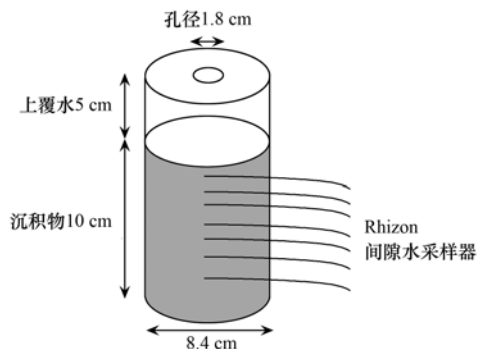


图1 实验培养管

Fig. 1 Experiment incubation tube

cm, 分别测定其含水率、底泥总微生物活性。

### 1.3 样品分析方法

上覆水中溶解氧(DO)和pH值分别通过便携式溶解氧测定仪(HQ30d)和数显pH计(pHs-3TC)测定。

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滤膜然后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。

沉积物中形态磷的数量分布参照文献[16]的方法。该法将形态磷分为4种:弱吸附态磷(NH<sub>4</sub>Cl-P)、铁铝结合态磷(Fe/Al-P)、钙结合态磷(Ca-P)、残渣磷(Res-P)。沉积物上总磷(Tot-P)以上述4种形态磷之和表示。

底泥氧剖面,溶解氧渗透深度(OPD),总氧气交换速率(TOE)均可用微电极系统(Unisense,丹麦)直接或间接测定。为了保证各处理组剖面具有相对一般性,在对应底泥柱样表层随机选取一点做穿刺测定,并在选点时避开了摇蚊幼虫所打的虫洞。

其中,自底泥-水界面至溶解氧浓度为零的深度记为溶解氧渗透深度(OPD)<sup>[17]</sup>,表层底泥中富含大量有机质,且微生物活性高,因此氧气进入底泥能迅速被消耗。因此,湖泊底泥OPD一般为几个毫米。利用氧剖面直接读出OPD数值<sup>[11]</sup>。

采用封闭上覆水法测定底泥TOE<sup>[18,19]</sup>。O<sub>2</sub>浓度用尖端细至100 μm的克拉克氧电极测定。每个培养管都配有一个自制的橡胶密封塞作为顶部盖。在橡胶塞的中心位置有一个直径为18 mm微电极插入孔用于O<sub>2</sub>浓度的测定。每间隔0.5 h记录一次上覆水中的O<sub>2</sub>浓度,直到上覆水中的O<sub>2</sub>浓度降至饱和浓度的80%。在测定过程中不外加搅拌,因此上覆水中O<sub>2</sub>浓度存在浓度梯度,为减小测定误差,每次测定上覆水O<sub>2</sub>浓度时,将氧电极尖端分别设置在

底泥-水界面以上0.5、1、1.5、2 cm处,每处记录3个数据。最终将记录的12个数据的均值作为此时上覆水中O<sub>2</sub>浓度。测定记录完一次O<sub>2</sub>浓度后立刻用小橡胶塞将孔堵上。整个测定过程在黑暗中进行,以避免光合作用产生的影响。

由于采用的是微电极系统测定每处O<sub>2</sub>浓度,每个点分别测定3次,事后对处理数据时发现,每处的3个数据相对标准偏差都在1%以下。

测定完毕后利用下式计算总氧气交换速率(TOE):

$$\text{TOE} = k \times V/A \quad (1)$$

式中, $k$ :上覆水中的O<sub>2</sub>浓度对时间 $t$ 的回归斜率,μmol·(L·h)<sup>-1</sup>;  $V$ :上覆水体积,L;  $A$ :底泥柱样的表面积,m<sup>2</sup>。

间隙水中Fe<sup>2+</sup>用邻菲罗啉分光光度法测定<sup>[20]</sup>。

将湿泥在105℃条件下烘12 h至恒重,通过前后质量差计算得底泥含水率(%)。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。

底泥总微生物活性用荧光素双醋酸酯(FDA)法测定,以单位干重底泥在单位时间内水解的FDA物质的量来表征<sup>[21]</sup>。

### 1.4 数据处理及分析方法

对物理扰动强度分别和溶解氧渗透深度(OPD)、总氧气交换速率(TOE)、间隙水Fe<sup>2+</sup>、含水率、总微生物活性的变化量进行曲线拟合。对拟合函数进行1次求导,若其为增函数,则说明随着物理扰动强度的增大,各指标变化量的改变速率也随之增大,进而证明了组合扰动中物理扰动强度对各指标的叠加效应。

## 2 结果与讨论

### 2.1 数据统计与处理

实验结束时,统计不同物理扰动强度下各组合扰动组OPD增加量、TOE增加百分比、0~6 cm底泥Fe<sup>2+</sup>总量减少百分比、0~6 cm底泥含水率增加量、总微生物活性增加量等指标的变化量(表3)。

为了阐明组合扰动对上述指标产生“跃变式”叠加作用,采用线性、多项式、指数3种拟合方式对表3数据进行曲线拟合。根据拟合最终结果比较发现,2阶多项式是最佳的拟合方式,因此只给出2阶多项式的拟合结果(图2)。

### 2.2 组合扰动对底泥微环境氧的协同作用

组合扰动中物理扰动从水平向、摇蚊幼虫从垂

表 3 实验结束时不同处理组各指标的变化量

| Table 3 Changes of the index in different treatments at the end of the experiment |                |               |                            |              |                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------------|----------------------------|--------------|-----------------|
| 转速<br>/r·min <sup>-1</sup>                                                        | OPD 增加量<br>/mm | TOE 增加量<br>/% | Fe <sup>2+</sup> 减少量<br>/% | 含水率增加量<br>/% | 总微生物活性增加量<br>/% |
| 0                                                                                 | 2.3            | 64.10         | 2.35                       | 2.70         | 0.12            |
| 120                                                                               | 3.7            | 64.67         | 3.92                       | 3.67         | 0.19            |
| 150                                                                               | 5.7            | 75.28         | 6.12                       | 4.58         | 0.29            |
| 180                                                                               | 5.9            | 85.38         | 6.84                       | 6.02         | 0.46            |
| 240                                                                               | 10.5           | 108.28        | 12.53                      | 8.27         | 0.64            |

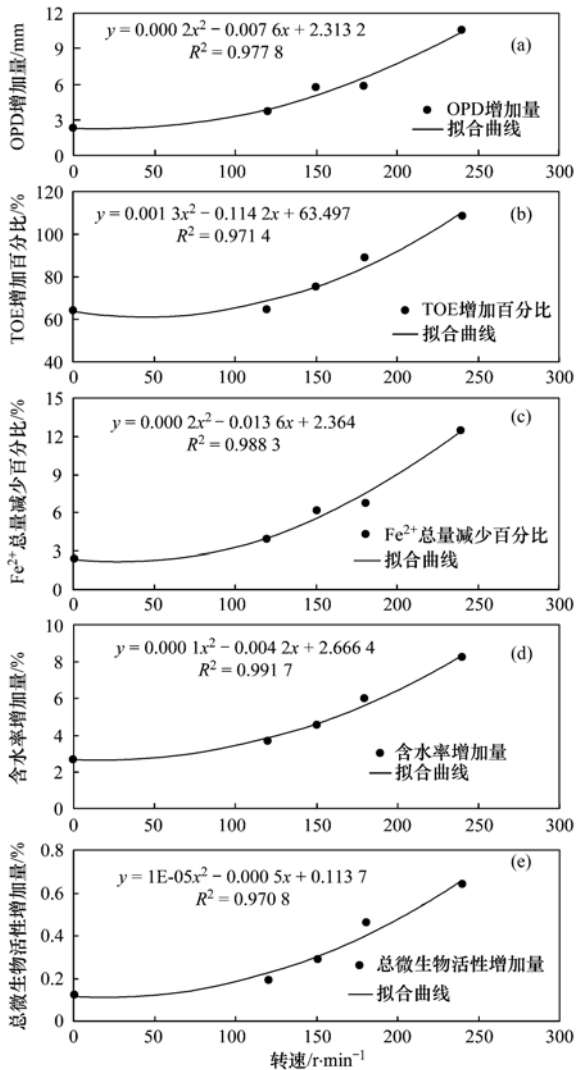
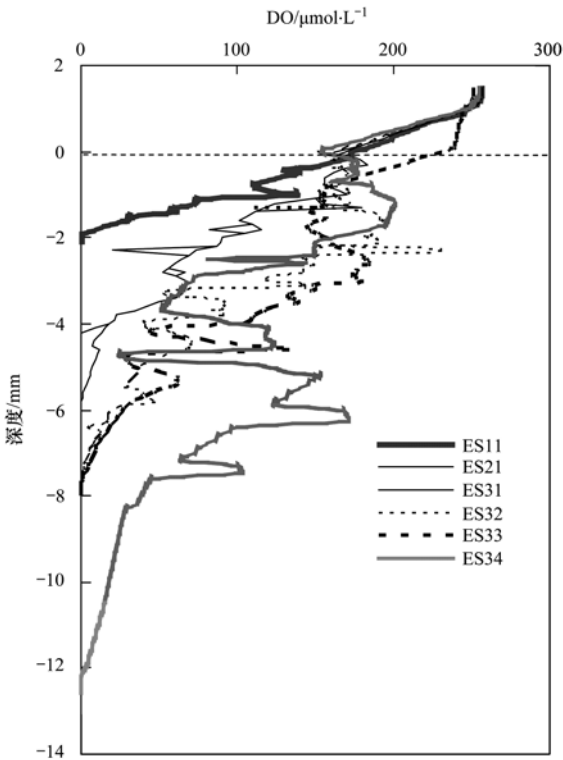


图 2 各指标的曲线拟合结果

Fig. 2 Fitting curve results of each index

向对底泥界面进行改造,两者因为互相促进,从而显著改变了溶解氧在底泥中的渗透深度(图 3)。

图 3 显示,组合扰动下溶解氧渗透深度(OPD)最高,并且随着扰动强度增加而增加,即按 ES31(20ind 虫,120 r·min<sup>-1</sup>搅)、ES32(20ind 虫,150 r·min<sup>-1</sup>搅)、ES33(20ind 虫,180 r·min<sup>-1</sup>搅)、ES34(20ind 虫,240 r·min<sup>-1</sup>搅)的顺序依次增大。实验结



0 mm 处虚线表示底泥-水界面(SWI)

图 3 组合扰动对底泥溶解氧剖面的影响

Fig. 3 Effects of combination of disturbance on sediment O<sub>2</sub> profiles of different treatments in experiment

束时,ES31、ES32、ES33、ES34 的 OPD 分别为 5.8、7.8、8.0、12.6 mm。组合扰动 OPD 的最低水平,也高于单纯的生物扰动组 ES21(20ind 虫,无搅),其 OPD 为 4.4 mm。组合扰动和单纯的生物扰动导致的 OPD 均大于对照实验 ES11(无虫,无搅)的 2.1 mm。将生物扰动组和组合扰动组分别减去空白组(ES11)得到各对应处理组 OPD 增加量(表 3)。

从表 3 中可以看出,单纯的生物扰动(摇蚊幼虫)导致 OPD 增加 2.3 mm,这主要归于摇蚊幼虫构筑 U 型廊道而导致的生物引灌作用,并由此产生环形氧化区<sup>[22]</sup>。组合扰动下 OPD 增加幅度更大,并且随着物理扰动强度增加而显著增加。这主要是由于组合扰动对溶解氧渗透深度产生了协同作用。因为

物理扰动会破坏摇蚊幼虫已构筑的表层廊道,迫使摇蚊幼虫向更深处构筑廊道,使得生物引灌作用得到强化,进而导致环形氧化区由表层向底泥更深处延伸;反之,伴随着新廊道的构筑,从而增大底泥的孔隙度和含水率,使得在同等物理扰动强度下,受到扰动的表层底泥深度增加,导致表层好氧底泥颗粒向深处迁移,从而增加 OPD 深度。

从图 2(a) 中可看出,底泥 OPD 增加量与物理扰动强度拟合曲线是 1 条开口向上的抛物线的一部分。因此,在生物扰动的基础上叠加物理扰动,对底泥 OPD 的增加不是简单的线性叠加关系。

该抛物线函数为:

$$y = 0.0002x^2 - 0.0076x + 2.3132 \quad (2)$$

式中,  $x$ : 转速,  $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $y$ : OPD 增加量, mm。

对该函数求导后,发现当  $x \geq 19 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  时,  $y$  是增函数,即当搅拌机转速大于  $19 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  (通常,太湖风浪产生的扰动强度均大于此值<sup>[23]</sup>) 时, OPD 增加的速度随着物理扰动强度的增加而加快。但 OPD 的增加与物理扰动强度并非呈线性关系,而呈“跃变式”递增,即在叠加物理扰动条件下, OPD 的增加是有“加速度”的。这进一步证明物理和底栖生物组合扰动对 OPD 的作用是相互促进的。

对于此抛物线的拐点 ( $x = 19 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ) 所对应的物理扰动强度,称之为“临界物理扰动强度”,即组合扰动对 OPD 增加量要产生“跃变式”的叠加作用所需的最低物理扰动强度。基于此,当实际物理扰动强度大于临界物理扰动强度时,物理扰动才会破坏摇蚊幼虫已构筑的表层廊道,组合扰动对 OPD 增加量的“跃变式”叠加作用才能发生;若实际物理扰动太小,小于临界物理扰动强度,物理扰动不足以破坏摇蚊幼虫已构筑的表层廊道,此时的扰动模式实际上只有单纯的生物扰动。简而言之,抛物线的拐点是生物扰动和组合扰动的分界点,拐点之前的曲线是生物扰动模式,拐点之后的曲线是组合扰动模式。

生物扰动对沉积物 OPD 的增加主要发生在刚投入沉积物时期的打洞筑穴阶段,此时产生生物引灌作用最大<sup>[24,25]</sup>,因此这一阶段沉积物 OPD 的增加量是最大的。摇蚊幼虫在构筑适量可供其生存的廊道并且穴居其中之后,若无外力破坏其已构筑好的廊道,摇蚊幼虫通常不再构筑新的廊道,但是当有适量扰动(拐点之前),其不足以迫使摇蚊幼虫向更深处打洞或者构筑新的廊道,但由于干扰也影响了摇蚊幼虫的正常活动,如活跃度降低,可能导致 OPD 降低,但当扰动强度增加至大于“临界物理扰动强

度”后,迫使摇蚊幼虫向更深处打洞或者构筑新的廊道,致使 OPD 显著增加。

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)。

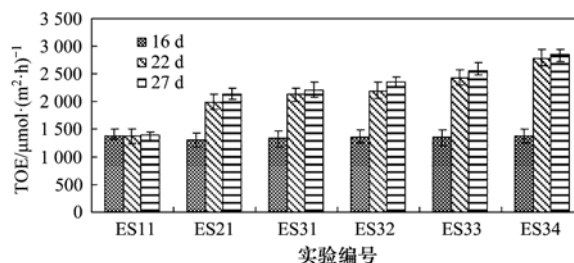


图 4 组合扰动对 TOE 的影响

Fig. 4 Effects of combination disturbance on TOE

图 4 显示,除对照实验 TOE 几乎保持不变外,单纯生物扰动和组合扰动均导致 TOE 明显增加。在组合扰动下,随着物理扰动强度增加, TOE 增加明显。但图 4 也显示, TOE 在 22 d 时增加幅度最大(与 16 d 相比),而 27 d 时增加幅度明显降低(与 22 d 相比)。这说明 TOE 的增加主要来源于摇蚊幼虫扰动,单纯摇蚊幼虫扰动导致 TOE 增加 64.10%,而叠加物理扰动后,即使在最大扰动强度 ( $240 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ) 下, TOE 增加为 108.28% (表 3)。但以往研究表明, TOE 增量主要来源于 2 个方面:一是摇蚊幼虫自身的呼吸作用消耗氧气,这只占一小部分,底泥 TOE 是羽摇蚊幼虫的呼吸速率的 3.2 倍<sup>[26]</sup>或 2.4 倍<sup>[27]</sup>;二是由增强的微生物活性及底泥中还原性物质的再氧化所致的 TOE 的增量占据了绝大部分<sup>[28,29]</sup>,但这与物理扰动强度密切相关。这在表 3 中可以计算得到,在  $240 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  下,单纯的物理扰动导致 OPD 增加 44.18%,这略低于底栖生物扰动(64.10%)。

从图 2(b) 可以看出, 2 阶多项式拟合曲线的决定系数高达 0.9714。说明 TOE 的拟合曲线与 OPD 十分相似。这也表明,组合扰动对 TOE 的影响与 OPD 类似,即 TOE 的增加与物理扰动强度呈“跃变式”递增关系。

### 2.3 组合扰动对底泥微环境 $\text{Fe}^{2+}$ 的协同作用

Lin 等<sup>[30]</sup>指出,在上覆水中磷含量较低时,有机磷、钙结合态磷存在向铁结合态磷、铝结合态磷转化的趋势。Nguyen<sup>[31]</sup>认为,外加磷更容易形成铁铝结合态磷。 $\text{Fe}^{2+}$  对环境中的氧化还原条件极为敏感,是铁在上覆水和间隙水中的还原态。因此,其很容易被氧化成  $\text{Fe}^{3+}$ ,在  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Fe}^{3+}$  转化过程中,对底泥界面磷的迁移转化有着重要影响。组合扰动对  $\text{Fe}^{2+}$  的影响极为明显(图 5)。

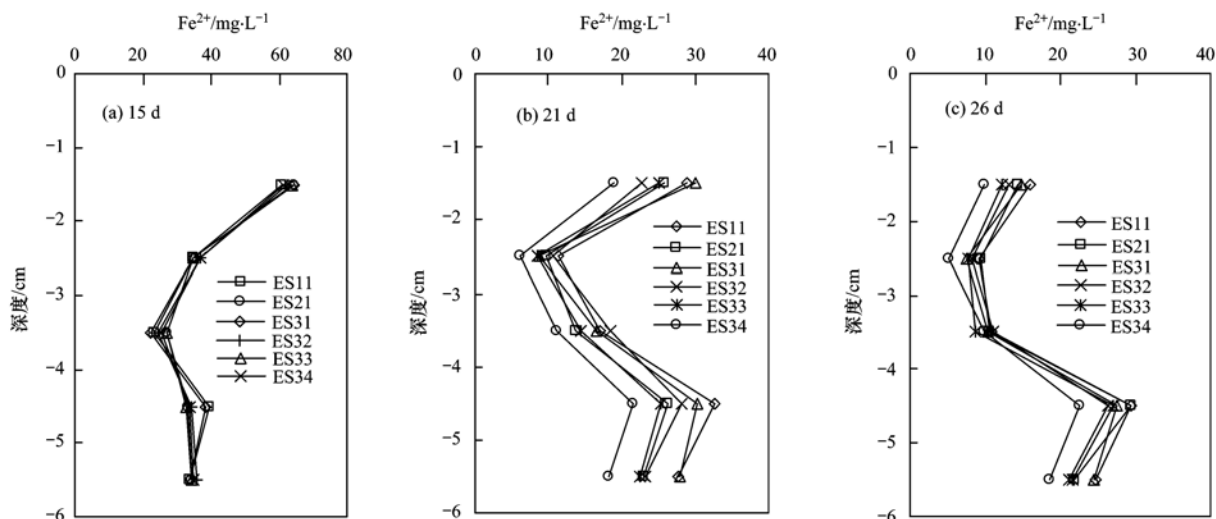
图5 组合扰动对间隙水  $\text{Fe}^{2+}$  剖面的影响Fig. 5 Effects of combination disturbance on the  $\text{Fe}^{2+}$  profiles in the pore water

图5(a)显示,在摇蚊幼虫加入前(15 d),各扰动组中  $\text{Fe}^{2+}$  剖面相似,无显著性差异。 $\text{Fe}^{2+}$  的变化呈先降低(0~4 cm)再增加(4~6 cm)的趋势。在加入摇蚊幼虫并叠加物理扰动后,各扰动组  $\text{Fe}^{2+}$  剖面变化明显[图5(b)]。与15 d  $\text{Fe}^{2+}$  剖面相比,21 d时各底泥相同深度处  $\text{Fe}^{2+}$  含量明显降低,特别是1.5 cm处。在1.5 cm,  $\text{Fe}^{2+}$  含量明显降低。与初始状态(15 d)相比,分别从60.70 (ES11)、64.21 (ES21)、63.01 (ES31、ES32、ES33、ES34的平均值)  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  降至28.99 (ES11)、25.69 (ES21)、24.16 (ES31、ES32、ES33、ES34的平均值)  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,而26 d时[图4(c)]该值则分别降至16.03 (ES11)、14.40 (ES21)、12.53 (ES31、ES32、ES33、ES34的平均值)  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。说明单纯的生物扰动和组合扰动均强化了溶解氧融入。与单纯生物扰动相比,组合扰动更有利于降低  $\text{Fe}^{2+}$  浓度。在组合扰动中,随着物理扰动强度增加,在相同深度  $\text{Fe}^{2+}$  降低幅度越大。这暗示了随着物理扰动的强度增大,间隙水中  $\text{Fe}^{2+}$  浓度减小的区域向更深处延伸。由此推测,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。将表层间隙水中  $\text{Fe}^{2+}$  浓度与深层间隙水中  $\text{Fe}^{2+}$  浓度相比较,前者明显大于后者。说明物理扰动对  $\text{Fe}^{2+}$  浓度降低的贡献要大于生物扰动。 $\text{Fe}^{2+}$  消失的原因主要有二:一是扰动促使间隙水与上覆水相互交换,物理扰动促使表层底泥悬浮,而生物扰动则通过生物引灌作用等强化间隙水与上覆水的交换,从而导致间隙水中  $\text{Fe}^{2+}$  含量降低。二是通过生物扰动强化溶解氧向底

泥深处渗透,在有氧-厌氧交替作用下,促进了  $\text{Fe}^{2+}$  与  $\text{Fe}^{3+}$  及其它铁氧化物间的相互转化。这一区域(2~4 cm)可能也是内源磷发生形态转化的“活跃区域”。前人也曾有类似研究<sup>[32]</sup>。

由图5可知,0~6 cm底泥  $\text{Fe}^{2+}$  总量减少百分比随着物理扰动强度的增大而增大。对比图5(b)和图5(c),可发现各扰动组  $\text{Fe}^{2+}$  剖面差异很小,说明第26 d时  $\text{Fe}^{2+}$  剖面已处于稳态。因此,以第26 d数据可计算0~6 cm底泥  $\text{Fe}^{2+}$  总量减少百分比(表3)。

从拟合结果图2(c)中可以看出2阶多项式拟合曲线的决定系数同样高达0.9883,说明  $\text{Fe}^{2+}$  含量与物理扰动强度呈抛物线关系,表明随着物理扰动强度增加,  $\text{Fe}^{2+}$  含量降低呈“跃变式”降低。

该抛物线函数为:

$$y = 0.0002x^2 - 0.0136x + 2.364 \quad (3)$$

式中,  $x$ : 转速,  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ;  $y$ :  $\text{Fe}^{2+}$  总量减少百分比, %。

求导之后得,当  $x \geq 34 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  时,  $y$  是增函数,即当搅拌机转速大于  $34 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  时,底泥间隙水  $\text{Fe}^{2+}$  降低速度随着物理扰动强度的增大而增大。所以物理和摇蚊幼虫组合扰动对底泥微环境  $\text{Fe}^{2+}$  的影响存在协同作用,而这种协同作用呈“跃变式”而非线性变化。

而对于转速低于  $34 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  物理扰动强度的组合扰动,其底泥  $\text{Fe}^{2+}$  减少速度是减小的,故此时的  $\text{Fe}^{2+}$  变化量不是很大。在前期实验<sup>[33]</sup>中发现低强度物理扰动处理组间隙水中  $\text{Fe}^{2+}$  随时间的推移变化

幅度不大,但中高强度物理扰动处理组间隙水中  $\text{Fe}^{2+}$  浓度随时间的推移却呈显著减小的现象。

#### 2.4 组合扰动对微界面物理和微生物特征的协同作用

含水率通常可用来表征溶解物质在底泥中的扩散能力<sup>[17]</sup>。本研究选择含水率来表征底泥微界面物理特征。在组合扰动下,底泥含水率变化见图 6。

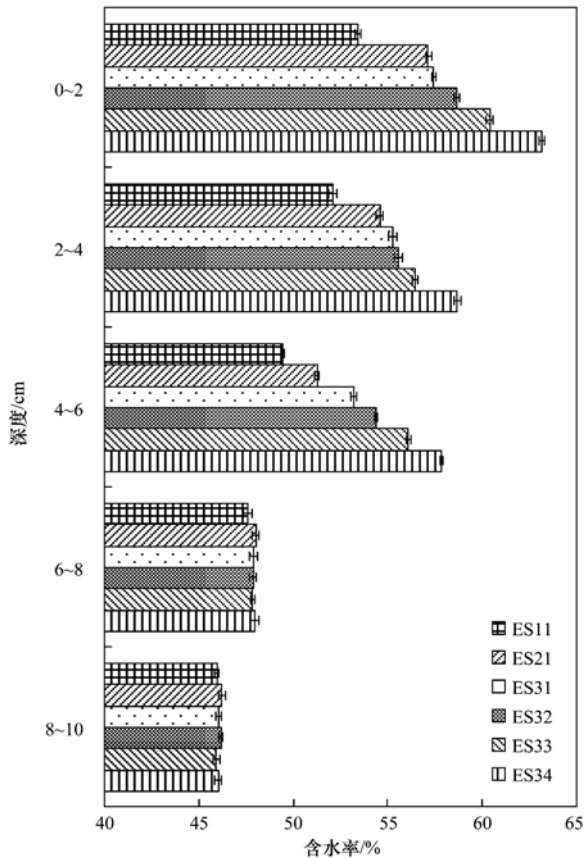


图 6 组合扰动对底泥含水率的影响

Fig. 6 Effects of combination disturbance on the sediment water content

图 6 显示,随着底泥深度不同,含水率明显不同。特别是在 0 ~ 6 cm 内,含水率明显高于 6 ~ 10 cm。不同扰动模式对含水率也有着不同影响,在 0 ~ 6 cm 内,组合扰动、生物扰动、对照实验含水率分别为 57.27% (ES31、ES32、ES33、ES34 的平均值)、54.33% (ES21)、51.63% (ES11),且这些数值均明显高于 6 ~ 10 cm 底泥内的含水率,46.97% (ES31、ES32、ES33、ES34 的平均值)、47.11% (ES21)、46.78% (ES11)。这说明在表层底泥(0 ~ 6 cm)中,含水率与扰动模式密切相关,组合扰动对底泥微界面的改造效应更高。然而,在 6 ~ 10 cm,底泥含水率与受扰动模式的影响较小。这也表明物理扰

动和生物扰动对底泥的改造主要集中在 0 ~ 6 cm 内。尽管物理扰动促使摇蚊幼虫在底泥中更加活跃,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。

根据图 6 可知,各扰动模式下,当底泥深度达到 6 cm 以上时,同一深度底泥含水率与物理扰动强度几乎无关,因此选择 0 ~ 6 cm 底泥含水率进行曲线拟合以进一步证实组合扰动的协同作用。

从拟合结果图 2(d)中可以看出,2 阶多项式拟合曲线的决定系数  $R^2 = 0.9917$ ,说明物理扰动强度与底泥含水率增加量呈现抛物线的关系。

该抛物线函数为:

$$y = 0.0001x^2 - 0.0042x + 2.6664 \quad (4)$$

式中,  $x$ : 转速,  $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $y$ : 含水率增加量, %。

进行求导之后,可以得出当  $x \geq 21 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  时,  $y$  是增函数,所以物理和摇蚊幼虫组合扰动对底泥微环境含水率的影响存在叠加作用,而这种协同作用呈“跃变式”而非线性变化。

实验结束时(28 d),不同扰动条件下 0 ~ 6 cm 底泥总微生物活性(图 7)。图 7 显示,在不同扰动条件下,组合扰动、生物扰动导致底泥总微生物活性显著增加,并处于高于对照实验的水平。并且,组合扰动下,随着物理扰动强度的增加,底泥总微生物活性也逐渐增加。

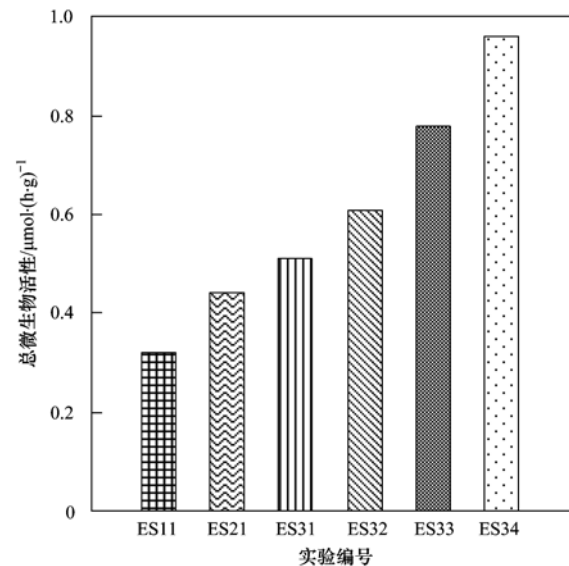


图 7 实验结束时各扰动组总微生物活性

Fig. 7 Total microbial activity in sediments of different treatments at the end of experiment

为了阐明组合扰动对总微生物活性的协同作用,计算了底泥总微生物活性在不同物理扰动强度下的增量(表 3)。

从图 2(e)中可以看出,2 阶多项式拟合曲线的决定系数  $R^2 = 0.9708$ . 因此,沉积物总微生物活性在不同物理扰动强度下的增量符合抛物线关系.

该抛物线函数如下:

$$y = 1 \times 10^{-5}x^2 - 0.0005x + 0.1137 \quad (5)$$

式中, $x$ : 转速,  $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $y$ : 总微生物活性增加百分比, %.

进行求导之后,可以得出当  $x \geq 25 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  时,  $y$  是增函数,所以物理和摇蚊幼虫组合扰动对底泥微环境总微生物的影响存在叠加作用,而这种协同作用呈“跃变式”而非线性变化.

值得指出的是,采用曲线拟合方式探讨了组合扰动对 OPD、TOE、 $\text{Fe}^{2+}$ 、含水率、总微生物活性的协同作用. 发现组合扰动对上述指标的影响存在叠加作用,而这种叠加作用呈“跃变式”. 其作用机制主要是物理扰动干扰并迫使摇蚊幼虫放弃本来构筑的廊道或者向底泥更深入迁移,并且强化生物引灌作用,加快间隙水与上覆水交换,导致底泥内部出现有氧-厌氧交替出现区域. 从而不仅从底泥水平向(物理扰动),而且从垂向(生物扰动)对底泥微界面和微环境进行改造. 这暗示了这些被改造的区域可能是内源磷迁移转化的“活性区域”,而这种改造效应可能是内源磷形态发生转化的主要诱导机制.

### 3 结论

(1) 组合扰动和生物扰动均导致 OPD、TOE、含水率、总微生物活性增加,高于对照实验,并且随着物理扰动强度增加而增加. 此外,组合扰动和生物扰动导致  $\text{Fe}^{2+}$  含量明显降低,并且降低幅度高于对照实验.

(2) 曲线拟合表明 OPD、TOE、 $\text{Fe}^{2+}$ 、含水率、总微生物活性与物理扰动强度的关系符合 2 阶多项式. 也证明了组合扰动对底泥微界面和微环境改造存在协同作用,而这种协同作用更多体现的是“跃变式”.

(3) 组合扰动下底泥微界面和微环境的改造区域,可能是内源磷形态转化的“活性区域”.

#### 参考文献:

- [1] 李大鹏, 王晶, 黄勇. 反复扰动下磷在沉积物和悬浮物以及上覆水间的交换[J]. 环境科学, 2013, **34**(6): 2191-2197.
- [2] 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.
- [3] Li D P, Huang Y. Sedimentary phosphorus fractions and bioavailability as influenced by repeated sediment resuspension [J]. Ecological Engineering, 2010, **36**(7): 958-962.
- [4] 熊强, 焦立新, 王圣瑞, 等. 滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性[J]. 环境科学, 2014, **35**(11): 4118-4126.
- [5] 赵建刚, 乔永民. 汕头湾沉积物磷的形态分布与季节变化特征研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(6): 1823-1831.
- [6] 金晓丹, 吴昊, 陈志明, 等. 长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性[J]. 环境科学, 2015, **36**(2): 448-456.
- [7] 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.
- [8] 覃雪波, 孙红文, 彭士涛, 等. 生物扰动对沉积物中污染物环境行为的影响研究进展[J]. 生态学报, 2014, **31**(1): 59-69.
- [9] 王雪, 赵大勇, 曾巾, 等. 河蚬(*Corbicula fluminea*)扰动对表层沉积物中氨氧化菌群落结构和丰度的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2314-2321.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Kristensen E. Organic matter diagenesis at the oxic/anoxic interface in coastal marine sediments, with emphasis on the role of burrowing animals [J]. Hydrobiologia, 2000, **426**(1): 1-24.
- [13] 任朝亮, 宋进喜, 杨小刚, 等. 底栖动物扰动对河床渗透性的影响研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(11): 4275-4281.
- [14] 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.
- [15] 乔立山, 王玉兰, 曾锦光. 实验数据处理中曲线拟合方法探讨[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2004, **31**(1): 91-95.
- [16] Hietjes A H M, Lijklema L. Fractionation of inorganic phosphates in calcareous sediments[J]. Journal of Environmental Quality, 1980, **9**(3): 405-407.
- [17] 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.
- [18] 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, **29**(5): 508-513.
- [19] 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.
- [20] Stookey L L. Ferrozine—a new spectrophotometric reagent for iron[J]. Analytical Chemistry, 1970, **42**(7): 779-781.
- [21] 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.
- [22] Wang F Y, Tessier, A, Hare L. Oxygen measurements in the

- burrows of freshwater insects[J]. *Freshwater Biology*, 2001, **46**(3): 317-327.
- [23] 范成新, 张路, 秦伯强, 等. 风浪作用下太湖悬浮态颗粒物中磷的动态释放估算[J]. *中国科学(D 辑)*, 2003, **33**(8): 706-768.
- [24] Fisher J B, Lick W J, McCall P L, *et al.* Vertical mixing of lake sediments by tubificid oligochaetes [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1980, **85**(C7): 3997-4006.
- [25] Michaud E, Desrosiers G, Mermillod-Blondin F, *et al.* The functional group approach to bioturbation: The effects of biodiffusers and gallery-diffusers of the *Macoma balthica* community on sediment oxygen uptake [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2005, **326**(1): 77-88.
- [26] 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.
- [27] Granéli W. The influence of chironomus plumosus larvae on the exchange of dissolved substances between sediment and water [J]. *Hydrobiologia*, 1979, **66**(2): 149-159.
- [28] Svensson J, 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.
- [29] Glud R N. Oxygen dynamics of marine sediments[J]. *Marine Biology Research*, 2008, **4**(4): 243-289.
- [30] Lin C Y, Wang Z G, He M C. Phosphorus sorption and fraction characteristics in the upper middle and low reach sediments of the Daliao river systems, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **170**(1): 278-285.
- [31] 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.
- [32] Boström B, Andersen J M, Fleischer S, *et al.* Exchange of phosphorus across the sediment-water interface [J]. *Hydrobiologia*, 1988, **170**(1): 229-244.
- [33] 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.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                           |                                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Composition and Source Apportionments of Saccharides in Atmospheric Particulate Matter in Beijing .....                                                                   | LIANG Lin-lin, Guenter Engling, DUAN Feng-kui, <i>et al.</i> (3935)     |
| Comparing Cell Toxicity of <i>Schizosaccharomyces pombe</i> Exposure to Airborne PM <sub>2.5</sub> from Beijing and Inert Particle SiO <sub>2</sub> .....                 | LIU Meng-jiao, HUANG Yi, WEN Hang, <i>et al.</i> (3943)                 |
| Analysis on Regional Characteristics of Air Quality Index and Weather Situation in Beijing and Its Surrounding Cities During the APEC ...                                 | GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, WANG Ning, <i>et al.</i> (3952)            |
| Analysis About Spatial and Temporal Distribution of SO <sub>2</sub> and An Ambient SO <sub>2</sub> Pollution Process in Beijing During 2000-2014 .....                    | CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (3961)       |
| Characteristics and Formation Mechanism of a Multi-Day Haze in the Winter of Shijiazhuang Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer(SPAMS) .....                  | ..... ZHOU Jing-bo, REN Yi-bin, HONG Gang, <i>et al.</i> (3972)         |
| Modeling Study of A Typical Summer Ozone Pollution Event over Yangtze River Delta .....                                                                                   | ZHANG Liang, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (3981)                 |
| Distribution of Regional Pollution and the Characteristics of Vertical Wind Field in the Pearl River Delta .....                                                          | LIU Jian, WU Dui, FAN Shao-jia (3989)                                   |
| Distribution Characteristics of Urea and Constitution of Dissolved Nitrogen in the Bohai Sea and the Huanghai Sea in Spring .....                                         | LI Zhi-lin, SHI Xiao-yong, ZHANG Chuang-song (3999)                     |
| Relationship Between Agricultural Land and Water Quality of Inflow River in Erhai Lake Basin .....                                                                        | PANG Yan, XIANG Song, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (4005)              |
| Input Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients Pollution in the Primary Pollution Source of the Daliao River .....                                           | MA Ying-qun, ZHANG Lei, ZHAO Yan-min, <i>et al.</i> (4013)              |
| Temporal and Spatial Distribution of Nutrients in Daning River Sediments and Their Correlations with Chlorophyll in the Three Gorges Reservoir Area .....                 | ..... ZHANG Yong-sheng, LI Hai-ying, REN Jia-ying, <i>et al.</i> (4021) |
| Summer Greenhouse Gases Exchange Flux across Water-air Interface in Three Water Reservoirs Located in Different Geologic Setting in Guangxi, China .....                  | ..... LI Jian-hong, PU Jun-bing, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (4032)      |
| Distribution of Redox Zone at Different Water Layers in the Presence of Periphyton and the Responsible Microorganisms .....                                               | WANG Feng-wu, LIU Wei, WAN Juan-juan, <i>et al.</i> (4043)              |
| Distribution Characteristics and Source of Fluoride in Groundwater in Lower Plain Area of North China Plain: A Case Study in Nanpi County .....                           | ..... KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, ZHAO Huan, <i>et al.</i> (4051)       |
| Distribution Characteristics of Fluoroquinolones Antibiotics in Surface Water and Groundwater from Typical Areas in A City .....                                          | CUI Ya-feng, HE Jiang-tao, SU Shi-hui, <i>et al.</i> (4060)             |
| Distribution of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Sediments from Adjacent Waters of Rushan Bay .....                                                            | HE Hui, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (4068)                       |
| Sources, Migration and Conversion of Dissolved Sterols in Qingmuguan Underground River .....                                                                              | LIANG Zuo-bing, SHEN Li-cheng, SUN Yu-chuan, <i>et al.</i> (4074)       |
| Water-Sediment Partition of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Underground River .....                                                                             | LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, XIAO Shi-zhen (4081)                       |
| Variation Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Subterranean River During Rainfall Events .....                                        | JIANG Ze-li, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (4088)            |
| Distribution and Transportation Characteristics of Heavy Metals in Nanshan Laolongdong Subterranean River System and Its Capacity of Self-Purification in Chongqing ..... | ..... REN Kun, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (4095)     |
| Distribution of Mercury in Plants at Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir .....                                                                     | LIANG Li, WANG Yong-min, LI Xian-yuan, <i>et al.</i> (4103)             |
| Development of Sediment Micro-Interface Under Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combination Disturbance .....                                                       | WANG Ren, LI Da-peng, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4112)                  |
| Norfloxacin Solution Degradation Under Ultrasound, Potassium Persulfate Collaborative System .....                                                                        | WEI Hong, SHI Jing-zhuan, LI Jia-lin, <i>et al.</i> (4121)              |
| Degradation of Acid Orange 7 with Persulfate Activated by Silver Loaded Granular Activated Carbon .....                                                                   | WANG Zhong-ming, HUANG Tian-yin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (4127)     |
| Kinetics and Reactive Species Analysis of Dimetridazole Degradation by TiO <sub>2</sub> .....                                                                             | CHEN Dong-mei, YU Ze-bin, SUN Lei, <i>et al.</i> (4135)                 |
| Performance and Mechanism of Ferric Tannate in the Removal of Inorganic Nitrogen from Wastewater .....                                                                    | ZHANG Rui-na, LI Lin, LIU Jun-xin (4141)                                |
| Performance of an Intermittent Aeration Membrane Bioreactor for Removal of Veterinary Antibiotics from Piggery Wastewater .....                                           | DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (4148)                   |
| Advanced Treatment of Incineration Leachate with O <sub>3</sub> -BAC and Double O <sub>3</sub> -BAC .....                                                                 | DU An-jing, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4154)                  |
| Effects of Hydraulic Retention Time and Dissolved Oxygen on a CANON Reactor with Haydite as Carrier .....                                                                 | WANG Hui-fang, FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (4161)          |
| Inhibiting Form of Ammonium to AOB and Inhibiting Rule .....                                                                                                              | CUI Jian-hong, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4168)               |
| Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Denitrification for Treatment of Municipal Sewage .....                                                                                | ZHANG Shi-ying, WU Peng, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (4174)            |
| Rapid Start-up of Simultaneous Nitrification and Denitrification Coupled Phosphorus Removal Process and Its Performing Characteristics .....                              | LENG Lu, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (4180)                         |
| Effect of HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> on Nitrogen Removal Efficiency in Partial Nitritation-ANAMMOX Process .....                                                       | LI Xiang, CHENG Zong-heng, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4189)             |
| Research on Cultivation and Stability of Nitritation Granular Sludge in Integrated ABR-CSTR Reactor .....                                                                 | WU Kai-cheng, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (4195)             |
| Influence of the Application of Activated Persulfate on Municipal Sludge Conditioning .....                                                                               | XU Xin, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (4202)                   |
| Influence of Temperature on the Anaerobic Packed Bed Reactor Performance and Methanogenic Community .....                                                                 | XIE Hai-ying, WANG Xin, LI Mu-yuan, <i>et al.</i> (4208)                |
| Research on the Screening Method of Soil Remediation Technology at Contaminated Sites and Its Application .....                                                           | BAI Li-ping, LUO Yun, LIU Li, <i>et al.</i> (4218)                      |
| Comprehensive Risk Assessment of Soil Heavy Metals Based on Monte Carlo Simulation and Case Study .....                                                                   | YANG Yang, DAI Dan, CAI Yi-min, <i>et al.</i> (4225)                    |
| Heavy Metals Pollution in Topsoil from Dagang Industry Area and Its Ecological Risk Assessment .....                                                                      | ZHANG Qian, CHEN Zong-juan, PENG Chang-sheng, <i>et al.</i> (4232)      |
| Effects of Land Use Type on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Water-Stable Aggregates in Jinyun Mountain .....                                                | LI Zeng-quan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4241)                     |
| Influence of Different Straws Returning with Landfill on Soil Microbial Community Structure Under Dry and Water Farming .....                                             | LAN Mu-ling, GAO Ming (4252)                                            |
| Carbon Source Utilization Characteristics of Soil Microbial Community for Apple Orchard with Interplanting Herbage .....                                                  | DU Yi-fei, FANG Kai-kai, WANG Zhi-kang, <i>et al.</i> (4260)            |
| Effects of Different Kinds of Organic Materials on Soil Heavy Metal Phytoremediation Efficiency by <i>Sedum alfredii</i> Hance .....                                      | YAO Gui-hua, XU Hai-zhou, ZHU Lin-gang, <i>et al.</i> (4268)            |
| <i>In-situ</i> Study on Effects of Combined Amendment on Translocation Control of Pb and Cd in Soil-Vegetable System .....                                                | ZHU Wei, LIU Li, WU Yan-ming, <i>et al.</i> (4277)                      |
| Effects of Rice Cultivar and Typical Soil Improvement Measures on the Uptake of Cd in Rice Grains .....                                                                   | WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping (4283)                              |
| Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of PAHs in Water and Fishes from Daqing Lakes .....                                                              | WANG Xiao-di, ZANG Shu-ying, ZHANG Yu-hong, <i>et al.</i> (4291)        |
| Depth Profiles of Methane Oxidation Kinetics and the Related Methanotrophic Community in a Simulated Landfill Cover .....                                                 | XING Zhi-lin, ZHAO Tian-tao, GAO Yan-hui, <i>et al.</i> (4302)          |
| Enhanced Performance of Rolled Membrane Electrode Assembly by Adding Cation Exchange Resin to Anode in Microbial Fuel Cells .....                                         | MEI Zhuo, ZHANG Zhe, WANG Xin (4311)                                    |
| Development of a Monoclonal Antibody-Based Sensor for Environmental Pyrene and Benzo(a)pyrene Detection .....                                                             | LI Xin, QIAO Yan, ZHONG Guo-zhen (4319)                                 |

# 《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11月15日 第36卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 11 Nov. 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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                               | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>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<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE)<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版   | 科学出版社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                                 | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                    | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>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<br>(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