

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第7期

Vol.34 No.7

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

唐山市大气颗粒物 OC/EC 浓度谱分布观测研究 郭育红, 辛金元, 王跃思, 温天雪, 李杏茹, 封孝信 (2497)

北京东灵山地区主要大气污染物浓度变化特征 于阳春, 胡波, 王跃思 (2505)

奥运前期与奥运期间北京市大气细颗粒物特征比较分析 张菊, 欧阳志云, 苗鸿, 王效科, 任玉芬, 宋文质 (2512)

华东森林及高山背景区域臭氧变化特征及影响因素 苏彬彬 (2519)

北京市居家空气微生物粒径及分布特征研究 方治国, 孙平, 欧阳志云, 刘芃, 孙力, 王小勇 (2526)

民用燃煤源中多环芳烃排放因子实测及其影响因素研究 海婷婷, 陈颖军, 王艳, 田崇国, 林田 (2533)

醇类汽油车醇醛酮、芳香烃和烯烃类排放的试验研究 张凡, 王建华, 王小臣, 王建昕 (2539)

微波解吸-催化燃烧净化甲苯研究 曹晓强, 张浩, 黄学敏 (2546)

生物滴滤池对 BTEX 的去除及相应细菌群落分析 李建军, 廖东奇, 许玫英, 孙国萍 (2552)

炼油厂废水处理站挥发性羰基化合物成分谱研究 周博宇, 刘旺, 王伯光, 周咪, 黄青, 周磊 (2560)

春季东、黄海溶解甲烷的分布和海水交换通量 曹兴朋, 张桂玲, 马啸, 张国玲, 刘素美 (2565)

千岛湖湖泊区水体季节性分层特征研究 董春颖, 虞左明, 吴志旭, 吴春金 (2574)

新安江流域土地利用结构对水质的影响 曹芳芳, 李雪, 王东, 赵越, 王玉秋 (2582)

长江中下游草型湖泊浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析 孟睿, 何连生, 过龙根, 席北斗, 李中强, 舒俭民, 刁晓君, 李必才 (2588)

河口盐度梯度下溶解态核酸的微生物可利用性 杨青青, 李朋辉, 黄清辉 (2597)

水藻暴发的影响因素定量化研究初步 张卓, 宋志尧, 黄昌春, 俞肇元 (2603)

深水型水库藻类功能组时空演替及生境变化的影响 卢金锁, 胡亚潘 (2611)

结合水体光学分类反演太湖总悬浮物浓度 周晓宇, 孙德勇, 李云梅, 李俊生, 龚绍琦 (2618)

Subwet 模型在人工湿地设计中的应用 李慧峰, 黄津辉, 林超 (2628)

白洋淀荷茎叶提取液对铜绿微囊藻及四尾栅藻化感效应 何连生, 孟繁丽, 刁晓君, 李一葳, 孟睿, 席北斗, 舒俭民 (2637)

苦草 (*Vallisneria spiralis*) 对城市缓流河道黑臭底泥理化性质的影响 许宽, 刘波, 王国祥, 马久远, 曹勤, 周锋 (2642)

铁屑-微生物协同还原去除水体中 Cr(VI) 研究 汤洁, 王卓行, 徐新华 (2650)

铁铜催化剂非均相 Fenton 降解苯酚及机制研究 杨岳主, 李玉平, 杨道武, 段锋, 曹宏斌 (2658)

不同形态无机氮对水中微量药物安替比林光降解效能影响 赵倩, 陈超, 封莉, 张立秋 (2665)

邻苯二甲酸二甲酯的紫外光-H₂O₂ 降解机制研究 刘青, 陈成, 陈泓哲, 杨绍贵, 何欢, 孙成 (2670)

二胺基改性有序多孔 SBA-15 对溶液中 Cd²⁺ 离子的吸附研究 张萌, 杨亚提, 秦睿, 王力, 张增强, 李忠宏, 李荣华, 孟昭福 (2677)

酸化蛭石的表面有机修饰及其对疏水性微污染物的吸附 蒋争明, 于旭彪, 胡芸, 任源, 李雪辉, 韦朝海 (2686)

基于废陶瓷的多孔陶瓷研制及其对 Ni²⁺ 的吸附性能 张永利, 王承智, 史册, 尚玲玲, 马瑞, 董婉莉 (2694)

树皮支持的厌氧生物法去除地下水中的高氯酸盐 王蕊, 刘菲, 陈楠, 陈鸿汉 (2704)

Cr(VI) 污染地下水修复的 PRB 填料实验研究 朱文会, 董良飞, 王兴润, 翟亚丽 (2711)

化学沉淀法去除稀土湿法冶炼废水中钙与高浓度氨氮研究 王浩, 成官文, 宋晓薇, 徐子涵, 蒙金结, 董传强 (2718)

镍铁尾矿硫酸浸出动力学研究 陈安安, 周少奇, 黄鹏飞 (2729)

HRT 对 A²O 工艺中典型多环麝香迁移转化的影响 刘鹏程, 黄满红, 陈东辉, 陈亮 (2735)

发酵液作为 EBPR 碳源的动力学模拟 张超, 陈银广 (2741)

强化污泥利用水解反应器改善碳源与污泥减量作用研究 熊娅, 王强, 宋英豪, 朱民, 林秀军 (2748)

污泥胞外聚合物的提取方法及其对污泥脱水性能的影响 周俊, 周立祥, 黄焕忠 (2752)

不同粒径铁铝泥对砷(III) 的吸附效果 林璐, 胥嘉瑞, 吴昊, 王昌辉, 裴元生 (2758)

我国畜禽粪便污染的区域差异与发展趋势分析 仇焕广, 廖绍攀, 井月, 栾江 (2766)

浙北平原富硒土壤资源区硒来源的定量分离 徐明星, 潘卫丰, 岑静, 马学文 (2775)

三江平原土地利用方式变化对土壤锰形态影响 张仲胜, 吕宪国, 宋晓林 (2782)

吉林前郭水田土壤有机碳垂向分布规律和储量研究 汤洁, 张雯辉, 李昭阳, 张楠, 胡猛 (2788)

关中地区农田土壤有机碳固存速率及影响因素: 以陕西武功县为例 张晓伟, 许明祥 (2793)

三峡库区不同林草措施土壤活性有机碳及抗蚀性研究 黄茹, 黄林, 何丙辉, 周立江, 于传, 王峰 (2800)

土壤自养微生物同化碳向土壤有机碳库输入的定量研究: ¹⁴C 连续标记法 史然, 陈晓娟, 吴小红, 简燕, 袁红朝, 葛体达, 隋方功, 童成立, 吴金水 (2809)

西南丘陵区保护性耕作下小麦农田土壤呼吸及影响因素分析 张赛, 张晓雨, 王龙昌, 罗海秀, 周航飞, 马仲炼, 张翠微 (2815)

丹江口水库迁建区土壤有机氯农药的分布特征及风险评价 李子成, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 赵艳民, 时瑶 (2821)

农药企业场地苯系物污染风险及调控对策 虎博, 王铁宇, 杜立宇, 谭冰, 朱朝云, 吕永龙 (2829)

水分管理对硫铁镉在水稻根区变化规律及其在水稻中积累的影响 张雪霞, 张晓霞, 郑煜基, 王荣萍, 陈能场, 卢普相 (2837)

硝酸盐对沉积物中有机物氧化减量及微生物群落结构的影响 刘近, 邓代永, 孙国萍, 刘永定, 许玫英 (2847)

零价铁对脱色希瓦氏菌 S12 偶氮还原的促进作用 周庆, 陈杏娟, 郭俊, 孙国萍, 许玫英 (2855)

2 株好氧反硝化菌的筛选及其强化贫营养生物膜脱氮效果 全向春, 岑艳, 钱殷 (2862)

反硝化聚磷菌快速富集、培养及其荧光原位杂交技术鉴别 刘立, 汤兵, 黄绍松, 付丰连, 张启泰, 黎健彬, 罗建中 (2869)

1 株反硝化除磷菌的鉴定及其反硝化功能基因研究 张倩, 王弘宇, 桑稳姣, 李孟, 杨开, 马放 (2876)

1 株高效 BBP 降解菌的分离与特性研究 陈湖星, 杨雪, 张凯, 钟秋, 郭佳, 王攀, 熊丽, 刘德立 (2882)

微生物-化学水解联合作用下烟嘧磺隆的降解 张小林, 李咏梅, 袁志文 (2889)

扑草净降解菌的分离、筛选与鉴定及降解特性初步研究 周际海, 孙向婷, 胡锋, 李辉信 (2894)

固定化 *Lysinibacillus cresolovorans* 的 PVA-SA-PHB-AC 复合载体制备及间甲酚的降解 李婷, 任源, 韦朝海 (2899)

生物破乳菌 *Alcaligenes* sp. S-XJ-1 表面活性物质提取与其破乳特性分析 黄翔峰, 张树聪, 彭开铭, 陆卫君, 刘佳 (2906)

A²O 工艺活性污泥中可培养丝状细菌的多样性 高莎, 金德才, 赵志瑞, 齐嵘, 彭霞微, 白志辉 (2912)

生活垃圾堆肥渗滤液污染物组成与演化规律研究 李丹, 何小松, 席北斗, 魏自民, 潘红卫, 赵国鹏, 崔东宇 (2918)

专辑征稿通知 (2551) 《环境科学》征稿简则 (2685) 《环境科学》征订启事 (2868) 信息 (2875)

苦草 (*Vallisneria spiralis*) 对城市缓流河道黑臭底泥理化性质的影响

许宽¹, 刘波^{1,2}, 王国祥^{1*}, 马久远¹, 曹勋¹, 周锋¹

(1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210046; 2. 南通大学地理科学学院, 南通 226000)

摘要: 以苦草 (*Vallisneria spiralis*) 和城市缓流河道黑臭底泥为研究对象采用模拟实验方法, 探讨了苦草对城市缓流河道黑臭底泥理化性质的影响. 结果表明, 苦草可以显著改善城市缓流污染河道底泥氧化还原环境. 实验期间表层底泥 Eh 从 -70 mV 升高至 90 mV; 减少致黑物质亚铁的含量, 实验组表层底泥降低 25%, 而对照却升高 38%; 促进铁、硫的自然循环, 防止亚铁、H₂S 的累积; 明显改善底泥黑臭现象, 实验组表层底泥第 7 d 出现约 3 mm 厚灰黄色氧化层, 氧化层随时间推移逐渐增厚, 第 28 d 厚度为 11 mm. 该氧化层无明显恶臭气味. 对照则在实验第 14 d 出现 1 mm 氧化层并维持至实验结束, 期间恶臭气味未消减; 种植苦草可显著提高沉积物致密程度, 降低底泥含水率, 有效改善表层底泥流动状态, 且在段头浜、河湾、人工湿地景观等处不影响防汛等功能, 对减少河道底泥冲刷迁移和抑制黑臭物质悬浮具有积极的生态学意义.

关键词: 苦草; 缓流河道; 黑臭底泥; 理化性质; Eh

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)07-2642-08

Influence of *Vallisneria spiralis* on the Physicochemical Properties of Black-odor Sediment in Urban Sluggish River

XU Kuan¹, LIU Bo^{1,2}, WANG Guo-xiang¹, MA Jiu-yuan¹, CAO Xun¹, ZHOU Feng¹

(1. School of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China; 2. School of Geographical Science, Nantong University, Nantong 226000, China)

Abstract: Using Indoor simulation method, the effect of *Vallisneria spiralis* on the physicochemical propertise of black and stink sediment was investigated. The surface sediment of urban sluggish river which had been heavily polluted was used as material in the study. The results showed that the redox environment of the sediment was significantly improved by *Vallisneria spiralis*. During the experiment, the Eh of surface sediment rose from -70 mV to 90 mV. The ferrous content was reduced by 25% in the experiment group while increased by 38% in the control group; the organic matter was decomposed effectively, prevented from natural decomposition to the smelly substances. There was a 3 mm thick greyish yellow oxide layer after 7 days in the experimental group, and the oxide layer gradually thickened over time. The thickness of the oxide layer reached 11 mm at the end of the experiment, and no significant odor was detected. On the contrary, the oxide layer in the control group was only 1 mm thick and the thickness remained unchanged. Meanwhile, an obnoxious odor existed during the whole experiment. The roots of *Vallisneria spiralis* had significant influence on the porosity of sediment. On one hand, the densification of sediment could be improved by *Vallisneria spiralis*. On the other hand, *Vallisneria spiralis* was able to change the state of the surface sediment flows, reduce the erosion of river sediment and inhibit the transfer of black-odor substances, which has a positive ecological meaning.

Key words: *Vallisneria spiralis*; sluggish river; black-odor sediment; physicochemical properties; Eh

近年来, 城市河流出现黑臭现象并备受关注^[1-3]. 大量耗氧有机污染物被排入城市河道中, 造成水体溶解氧降低^[4], 使上覆水和底泥呈还原态^[5]. 研究表明, 厌氧条件下产生的 FeS 是底泥主要致黑物质^[6], 而 H₂S、有机质在厌氧条件下分解出的 NH₃ 和厌氧放线菌分泌产生土臭素和异苻醇是底泥臭味的主要来源^[2, 7, 8].

目前城市河道黑臭现象的治理措施多集中于曝气充氧^[4, 9-12]或底泥疏浚^[13-15]. 因受河道水流特点的影响, 生态修复法应用较少, 尤其对于有防汛作用的河道来说, 水生植物不仅不易扎根生长, 且易被

水流冲走阻塞河道, 影响防汛功能. 但是, 由于城市化进程加快, 一些河道形成了许多段头浜、缓流河湾以及人工景观带. 这些地方水深较浅, 水流缓慢或者静止, 对防汛等功能没有干扰, 因此在这些地方优先使用生态修复法对底泥和水体进行修复具备一定的条件. 苦草 (*Vallisneria spiralis*) 属水鳖科苦草

收稿日期: 2012-10-26; 修订日期: 2012-12-10

基金项目: 江苏省太湖水环境治理专项基金项目 (TH2011207); 江苏省科技厅科技支撑计划项目 (BE2011690); 江苏省建设系统科技项目 (JS2011JH25); 科技部国际合作专项 (2010DFB33960)

作者简介: 许宽 (1987~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境生态修复, E-mail: xk0806@126.com

* 通讯联系人, E-mail: wangguoxiang@njnu.edu.cn

属多年生沉水植物,为我国最常见的沉水植物之一^[16],因其根系较为发达,叶片狭长,可随水流运动而波动,对水质的适应性较强,因而被认为是生态修复的先锋种。

本研究以城市污染河道底泥和苦草构建实验系统,采用室内模拟方法,通过对比对照和种植苦草条件下黑臭底泥理化性质变化的过程,探讨植物根系作用下底泥理化性质的变化规律,以期为城市污染缓流河道的治理工作提供相关理论

依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

九乡河是南京仙林地区主要生活污水排污河流,污染严重。实验材料取自九乡河表层沉积物,样品采集后迅速送至实验室,将底泥进行均化处理后至于冰箱 4℃ 保存备用。实验底泥基本理化性质见表 1。

表 1 实验底泥基本理化性质

Table 1 Physicochemical property of the sediment

指标	含水率 /%	烧失率 /%	亚铁 /g·kg ⁻¹	Eh/mV	pH	全氮 /mg·kg ⁻¹	氨氮 /mg·kg ⁻¹	硝氮 /mg·kg ⁻¹
数值	59.09	8.08	113.8	-72	6.70	3 017.8	188.26	25.03

苦草幼苗采自固城湖流域某池塘,带回实验室驯化培育 1 个月,选取长势相近,株高约为 16 cm、根长约为 4.5 cm 的幼苗作为实验用苗。

1.2 实验系统

实验在玻璃温室内进行。塑料透明容器高 20 cm,直径 8 cm,将底泥装满,移栽长势相近的 6 株苦草幼苗根部扦插在容器中,折合初始密度为 0.92

kg·m⁻²。将该容器放入水下,容器顶端距离水面 60 cm。上覆水为经日光曝晒 3 d 的自来水。其中,对照组装入相同的底泥但不移栽苦草。对照组和实验组分别设置原位测定和非原位测定(表 2),取样间隔为 7 d,实验共进行 28 d。实验系统静置 3 d 后测定各指标作为初始值(第 0 d)。实验期间水温于(28 ± 3)℃ 波动。

表 2 实验分组

Table 2 Groups of the experiment

项目	类型	容器数/个	测定指标
原位测定	对照组	3	底泥 Eh、pH
	实验组	3	
非原位测定	对照组	5	含水率、烧失率、亚铁、色泽与气味、苦草生长指标
	实验组	15	

如图 1 所示,需要原位测定的塑料容器,从顶端测量 2、6、10、14 cm 处打孔,可插入探头进行分层测定 Eh 和 pH(不测定期间,孔用橡皮塞塞住),可代表 0~4 cm、4~8 cm、8~12 cm、12~16 cm 这 4 层的情况。

1.3 测定指标与分析方法

苦草生长指标,分别测定株高、根长、地上生物量和地下生物量。底泥理化性质,色泽与气味采用文字描述法^[17];含水率采用 GB 7172-87 测定;烧失率采用 GB 7876-87 测定;亚铁采用光度法测定^[18];Eh 使用氧化还原电位仪测定;pH 采用电极法测定^[18]。每个指标测 3 个平行,文中均采用平均值,底泥数据误差控制在 7% 以内。

孔隙度采用公式(1)计算:

$$\text{POR} = \frac{[W_w - W_d] \times 100}{[W_w - W_d] + W_d/2.5} \quad (1)$$



图 1 底泥容器示意

Fig. 1 Container of the sediment

式中,POR 表示孔隙度,%; W_w 表示湿重,g; W_d 表示 105℃ 烘干 6 h 后质量,g。

2 结果与分析

2.1 苦草生长指标

由图 2 可知实验期间苦草各生长指标的变化过程. 其中,株高与地上生物量呈明显增长趋势,而根长与地下生物量仅有小幅增加. 谢贻发等^[19]研究不同底质对苦草生长的影响发现,河道底泥对苦草部分生长指标有显著抑制现象. 这可能是由于城市河道黑臭底泥高营养盐^[20, 21]和强还原环

境^[22]对苦草根系的毒害抑制作用所致^[23],使其根部生长非常缓慢^[19]. 但是叶片部分本身可以吸收水体中的营养物质以促进自身的生长^[24, 25],即使根部受到抑制,株高和地上生物量也分别保持了 $1.25 \text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $0.03 \text{ kg}\cdot(\text{d}\cdot\text{m}^2)^{-1}$ 的平均生长速率.

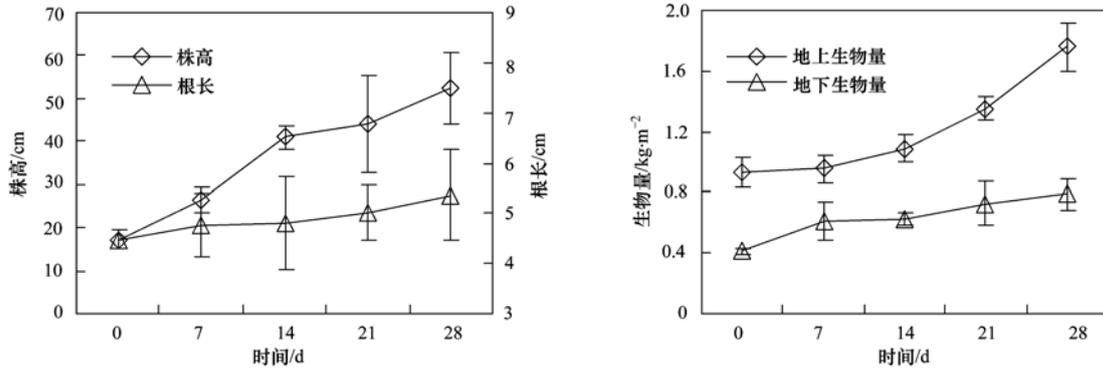


图 2 苦草生长指标

Fig. 2 Growth index of Vallisneria spiralis

2.2 底泥理化指标

2.2.1 亚铁

实验期间,对照组表层(0~4 cm)底泥亚铁升高 38% [图 3(a)],而实验组表层(0~4 cm)底泥亚铁降低了 25% [图 3(b)]. 考虑到苦草根系长度仅有 5 cm,因此在实验期间 6 cm 处的点位受根系的影响是从弱到强变化的,这就导致了对照组 6 cm 处亚铁呈先下降后升高的趋势 [图 3(a)],而实验组 6 cm 处则呈先升高后下降的相反趋势. 值得一提的

是,实验组深 8~12 cm 处亚铁高度稳定,实验期间稳定在 $115 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右,与对照组 $90 \sim 140 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 间波动形成鲜明对比,这可能是由于亚铁变化与底泥氧化还原环境变化的滞后性所致^[26]. 图 4(b) 可看出实验组该层 Eh 呈降低-升高-降低-升高的变化趋势,假设本实验条件下亚铁滞后氧化还原电位 7 d 变化,则会出现每次测定的亚铁值基本不变,即每次测得的亚铁值为一周前处于平衡位置的 Eh 值所对应的亚铁值.

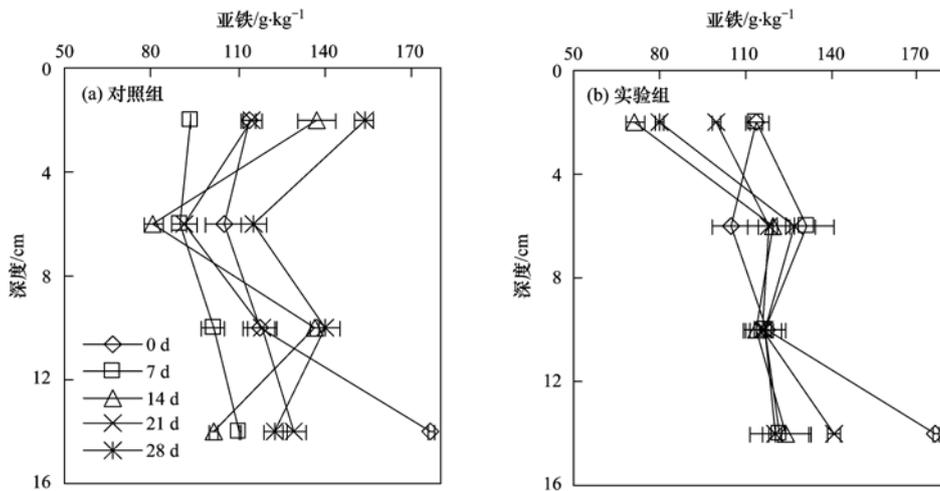


图 3 亚铁变化过程

Fig. 3 Variation process of Fe²⁺

2.2.2 Eh

由图 4 可得,各组 Eh 从上往下由“上低下

高”向“上高下低”转变,实验组尤其明显 [图 4 (b)]. 对照组表层底泥(0~4 cm) Eh 呈逐渐升

高趋势,并于第 28 d 出现正值,这是由于正常的大气复氧与泥水界面物质交换所致. 然而,实验组表层底泥 Eh 出现正值是在第 7~14 d 之间,表明苦草根系泌氧作用显著影响了底泥氧化还原电位,加速了黑臭底泥还原环境的改善. 比较 [图 4(a)] 与 [图 4(b)], 可以发现实验组表层底泥 Eh 在第 7 d 比初始升高 85%, 而对照组则在第 7 d 出现了降低 20% 的现象. 由此推断实验组

表层底泥不仅克服了底泥原位沉降稳定中 Eh 的降低过程,更加使得 Eh 迅速升高. 这一方面归功于根系在适应环境后较强的释氧作用^[27],图 2(b)显示 0~7 d 地下生物量增加了 45%, 根部的迅速生长势必带来更强的泌氧功能; 另一方面主要由于叶片光合作用使得上覆水溶解氧升高^[28, 29], 泥水界面溶解氧交换幅度加大, 促使表层底泥 Eh 数值显著升高.

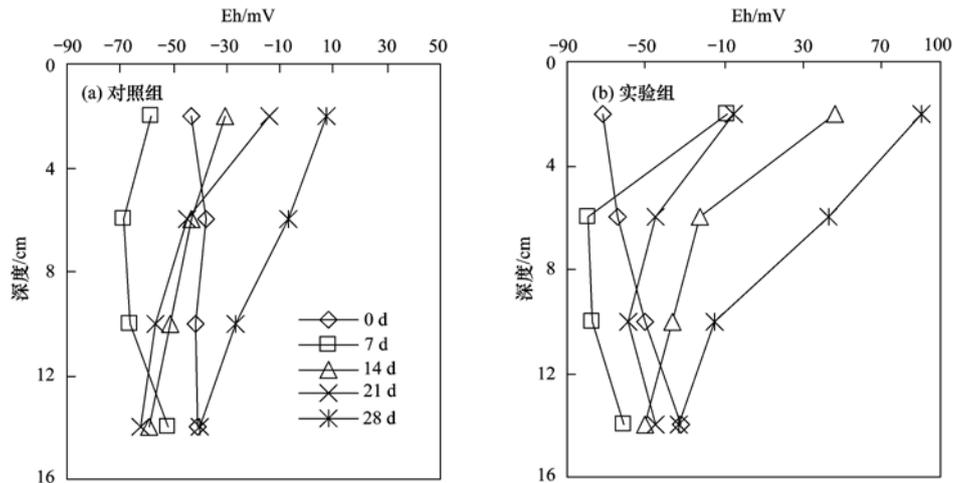


图 4 Eh 变化过程

Fig. 4 Variation process of Eh

2.2.3 pH

与对照组较为杂乱的变化曲线相比,实验组底泥 pH 从“上高下低”转为“上低下高”(图 5). 实验组表层底泥 pH 降低了 11%, 最底层 pH 则升高了 9% [图 5(b)]; 对于表层底泥,对照组 pH 在 6.6~6.9 间波动, 而实验组在第 7~14 d 间迅速下降 10% 并在维持在 6.2 左右. 图 2(b) 地下生物量反

映出植株在 0~7 d 迅速生长并在 7~14 d 间维持一定生物量不变,从时间上看正和 pH 急剧变化的过程相吻合,因此可以断定 pH 的变化过程与苦草根系生长和生理作用有着密不可分的关系.

pH 的降低可能由以下几点共同作用形成的. 首先, FeS 与氧气和水反应生成氢氧化铁及 SO_4^{2-} , 同时生成大量 H^+ ^[30], 即亚铁浓度降低导致 H^+ 浓度

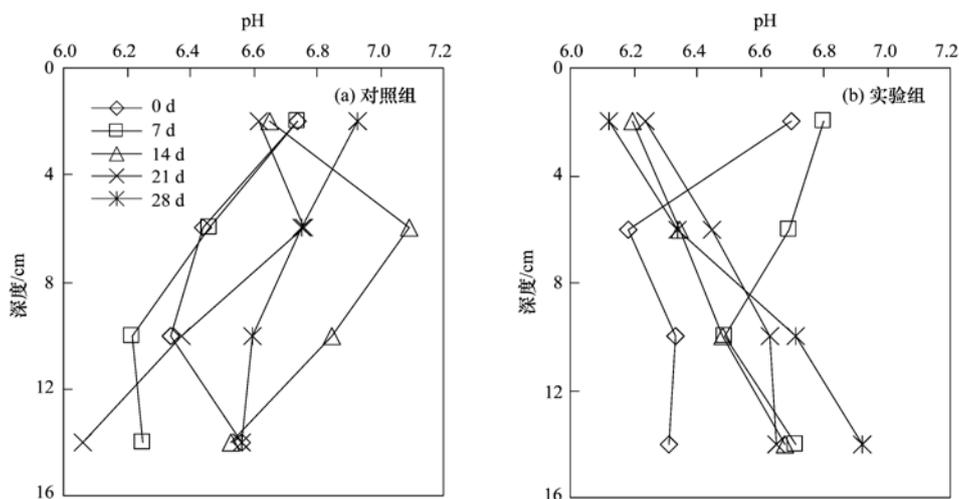


图 5 pH 变化过程

Fig. 5 Variation process of pH

升高,即 pH 降低,这便印证了实验组表层底泥亚铁与 pH 变化呈显著正相关($P < 0.05$)。其次,苦草呼吸作用分泌的 CO_2 通过根系汇聚在根系附近并逐渐扩散至根系周边底泥。 CO_2 与水结合生成 H^+ 与 HCO_3^- ,显然, H^+ 浓度的增加使得 pH 降低。再者,实验组表层底泥 pH 与株高呈显著负相关($P < 0.05$)。研究表明,水生植物在生长期根系会分泌有机酸物质^[31~33],即植物生理活动在一定程度上促进了 pH 的变化。

2.2.4 含水率

实验期间各组底泥含水率从表层到底层均呈降低趋势,且对照组表层含水率波动较大而底部含水

率变化小[图 6(a)],与其相反,实验组表层底泥含水率波动较小,而底部含水率有较大的波动范围[图 6(b)]。对照表层底泥稀疏松散;种植苦草后表层底泥致密,故使得含水率变化小,更有利于苦草根系的固定与伸展。另外,含水率会通过底泥间隙水影响到溶解态物质在底泥中的分布^[34],如有机质、氮磷等营养物质和溶解氧等,所以有苦草根系介入后,底层底泥含水率受影响的因素增多,在实验期间出现了较大波动,有利于促进溶解氧和有机质等物质的迁移与转化。而对照组底层底泥由于自然沉淀压实作用,底泥扰动少,故含水率波动范围不大。

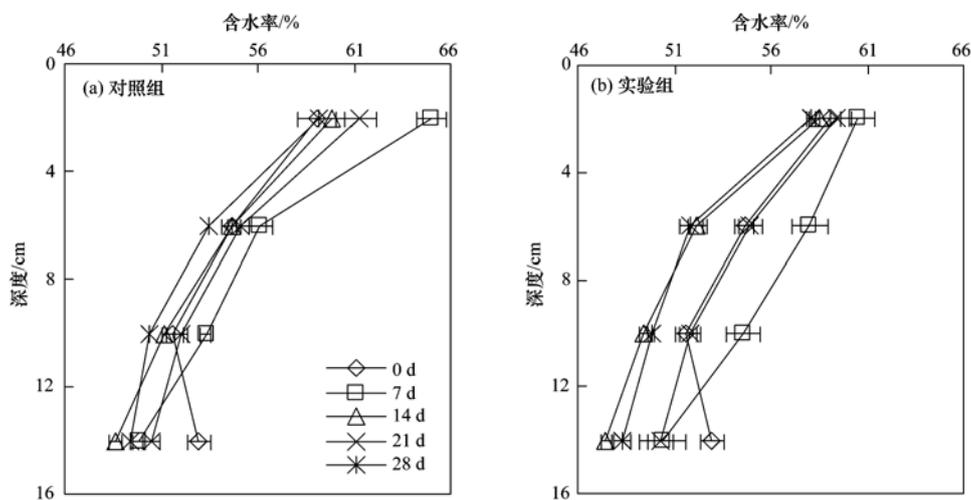


图 6 含水率变化过程

Fig. 6 Variation process of moisture content

2.2.5 烧失率

与对照组相比,实验组表层烧失率呈平稳下降趋势[图 7(b)],而对照则是在大幅波动中下降[图 7(a)]。烧失率在一定程度上反映出底泥有机质的含量。对照组表层底泥烧失率的波动可能与底泥异质性有很大关系^[35],然而在有植物作用的情况下,底泥有机质迁移与转化得到一定的程度的缓和稳定[图 7(b)]。实验期间,各组表层底泥烧失率均下降 20% 左右,但下降机制可能不同,详见 3.2 节讨论。

纵向来看,对照组第 28 d 各层底泥烧失率均低于第 0 d,平均降低 11.5%;然而实验组第二层和第四层底泥烧失率却高于第 0 d 的值[图 7(b)]。第二层底泥深度为 6 cm,正是苦草根系末梢边缘所在处,该处烧失率增加,可认为是植物分泌的有机酸等物质增加了该层有机质含量,掩盖了自然状态下有机质的自然分解。

3 讨论

3.1 改变底泥颜色

实验组表层底泥第 7 d 出现约 3 mm 厚灰黄色氧化层,氧化层随时间推移逐渐增厚,实验结束时该氧化层有 11 mm 厚。对照则在实验第 14 d 出现 1 mm 氧化层并维持至实验结束。李宽意等^[36]研究低溶解氧对苦草生长的影响时也发现苦草根系周围有黄褐色物质。

厌氧条件下产生的 FeS 是底泥主要致黑物质,因此底泥亚铁含量可定量描述底泥致黑物质的含量。而厌氧环境是亚铁生成并聚集的必要条件^[37],所以氧化还原电位可以从侧面佐证致黑物质的变化规律。研究表明,苦草根系的泌氧功能可使得底泥溶氧微环境得到显著改善^[36, 38],首先从氧化还原电位的变化趋势上可以看出,第 7 d 实验组表层 Eh 值已达到 -10 mV 左右[图 4(b)],这表明表层底泥强

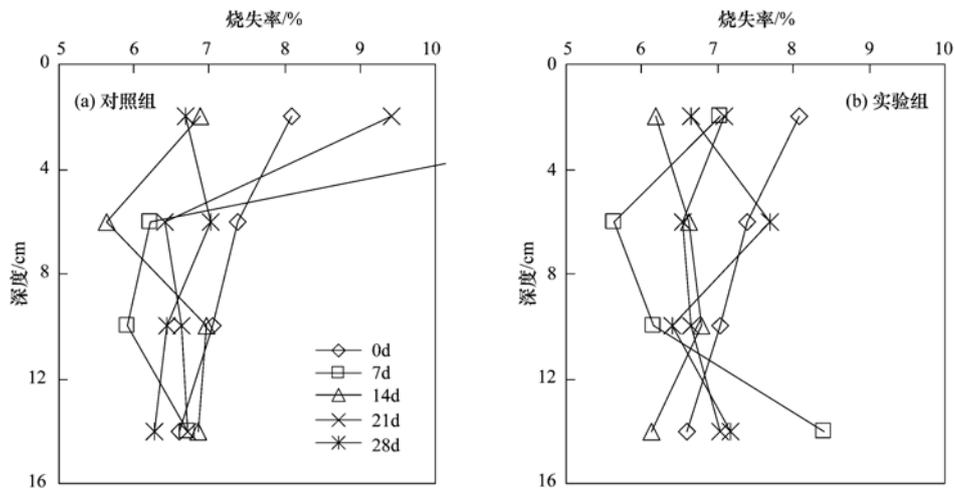


图 7 烧失率变化过程

Fig. 7 Variation process of ignition loss

还原环境已经得到有效遏制,氧的来源一部分是根系泌氧,另外上覆水向泥水界面输氧过程也不得忽视,苦草叶片的光合作用使得上覆水溶解氧水平已显著高于对照组,且表层底泥 Eh 与株高呈显著相关($P < 0.05$). 实验期间,黑色物质亚铁被逐渐氧化去除,沉积物恢复本身的黄褐色;同时由图 5 可知实验组表层底泥 pH 由 6.7 降至 6.1,该过程中铁离子发生水解以氢氧化物的形式沉淀^[30],并与根系吸附的磷结合形成黄色铁氧复合物^[38],促进了底泥颜色的变化.

不容忽视的是铁在自然水体中形态转化的循环过程^[30],该过程中水体上层的氧化能力随着循环不断向下迁移,自发改善水体底部厌氧环境,减少或者减轻黑臭现象的程度. 实验组由于苦草的作用,使得上覆水溶解氧高于对照组,促进了铁的自然循环. 而对照组由于泥水界面对氧气的剧烈消耗,使得铁循环过程在此中断,造成大量亚铁累积. 因此,曝气充氧也可以在一定程度上修复铁循环,打破亚铁的聚集,改善底泥颜色^[4].

3.2 改善底泥气味

实验组黄褐色底泥均无明显恶臭,然而对照组恶臭味道持续整个实验过程. 这表明,苦草根系不仅仅使底泥颜色发生改变,同时还使得致臭物质被去除. 一般认为,硫循环被厌氧环境打破会形成大量 H_2S 臭味气体^[30],同时有机质在厌氧条件下被分解也生成众多臭味气体^[39].

自然状况下,硫酸盐在缺氧环境以及硫酸盐还原细菌的作用下转化为 H_2S 并向上移动,在上覆水中再被氧化成硫酸盐. 对照组上覆水溶解氧被底泥

有机悬浮物消耗殆尽,无法完成对上逸气体的氧化过程,使得大量臭味气体 H_2S 逸出. 而实验组由于苦草的存在,表层底泥 Eh 一直呈快速增高趋势,表层底泥和上覆水均为好氧环境,即表明切断了恶臭产生的条件,截留上逸气体并转化为硫酸盐,显著改善底泥气味.

一般情况下,烧失率可以代表有机质的变化情况^[40]. 对照组表层底泥含水率与烧失率呈极显著相关($P < 0.01$),然而实验组中表层底泥含水率与烧失率无相关性,这表明沉水植物苦草的介入使得底泥性状发生了变化,进而使得有机质的变化过程发生改变. 对照组底泥烧失率下降,表明有机质含量降低,所以对对照底泥恶臭现象一直持续实验过程. 研究表明,在植物受到胁迫条件下,会主动释放特异性根系分泌物^[31],诱导根际环境中的微生物群落结构产生变化以及根际环境理化性质的变化,从而减轻污染物对植物根系的毒害程度^[41],植物根系分泌的有机物质与底泥中原有的有机物质相互混合相互作用^[42, 43],理论上表层底泥有机质含量应该升高,但是表层底泥烧失率在实验期间降低 20%,虽然与对照组自然降低相当,但说明一定存在有机质的分解作用,否则加上根系分泌的有机物质会使得烧失率升高,正如实验组第二层底泥的烧失率,根系分泌的有机物掩盖了自然分解的过程,使得有机质含量升高. 由于实验周期短,苦草对有机质的分解作用未能显著体现出来,有待进一步考察.

综上所述,苦草根系与叶片对表层底泥 Eh 产生巨大影响,显著改善了底泥还原环境,有效切断恶臭发生的外部条件,为硫循环提供顺畅环境,同时,

根系及根系附着微生物对有机质的分解从一定程度上移除了恶臭产生的内在因素。

3.3 改变底泥致密程度

城市河道表层底泥多呈流动稀疏状态,加上变化的水位与水流,更不利于水生植物扎根生长^[44]。含水率的变化从侧面反映出底泥的致密程度。孔隙度是指多孔体中所有孔隙的体积与多孔体总体积之比^[45],是反映底泥致密程度的指标之一^[46]。经计算可得各层底泥孔隙度的值。图8为直接受苦草根系影响的表层0~4 cm和次层4~8 cm底泥孔隙度的变化。可以发现,对照组表层底泥孔隙度平均值比实验组高3.72%,而次层则高1.19%。这表明根系作用强度越强孔隙度降低越多。孔隙度低说明底泥越致密,可以推断,随着时间推移苦草根系会使得底泥孔隙度继续降低。

值得注意的是曲线第7 d的峰值。在第0~14 d期间,对照组表层底泥孔隙度峰值显著大于实验组,而对于次层底泥则是对照组低于实验组。由图6可知,第7 d对照表层含水率比初始升高了12%,远远高于实验组的1.8%,这与孔隙度变化趋势相同。对照组表层和次层含水率与孔隙度均呈显著相关($P < 0.05$),即表明自然情况下,底泥的含水率与孔隙度变化存在一定关联^[47]。

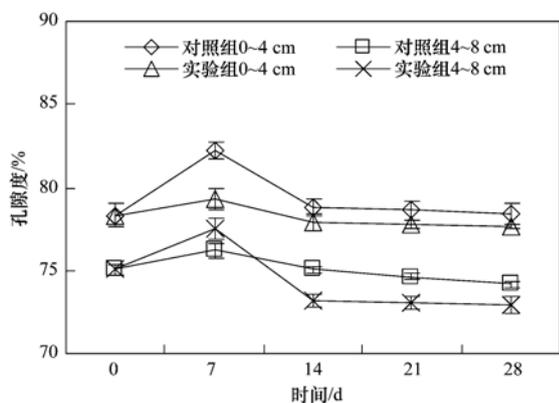


图8 孔隙度变化过程

Fig. 8 Variation process of POR

然而,实验组苦草根系影响底泥后含水率与孔隙度间的相关性大大削弱。这可能是因为自然条件下底泥含水率变化机制与实验组不同所致:首先,苦草生长期间需要吸收水分^[44],根系周围的水分会被吸收进植物体内,使得底泥含水率降低;其次,上节讨论的亚铁反应生成黄色铁氧复合物沉淀的过程中会消耗水^[30],也会促进底泥含水率降低。然而自然条件下底泥含水率的变化基本仅受作用于拥挤沉淀^[14,48]。苦草根系的存在大大加快底泥水分的消

耗,同时根系的生长过程会占据底泥中原来的空隙,促进底泥致密程度增加。

4 结论

(1) 苦草可以显著改善城市缓流污染河道底泥氧化还原环境。实验期间表层底泥 Eh 从 -70 mV 升至 90 mV; 减少致黑物质亚铁的含量,实验组表层底泥降低 25%,而对照却升高 38%; 有效分解有机质,防止其自然分解生成致臭物质; 促进铁、硫的自然循环,防止亚铁、 H_2S 累积。

(2) 苦草明显改善城市缓流污染河道底泥黑臭现象。实验组表层底泥第 7 d 出现约 3 mm 厚灰黄色氧化层,氧化层随时间推移逐渐增厚,实验结束时该氧化层有 11 mm 厚。该氧化层无明显恶臭气味。对照则在实验第 14 d 出现 1 mm 氧化层并维持至实验结束,实验期间恶臭气味未消减。

(3) 苦草根系对底泥孔隙度影响较大,即种植苦草可显著提高沉积物致密程度,降低底泥含水率,有效改善表层底泥流动状态,且在段头浜、河湾、人工湿地景观等处不影响防汛等功能,对减少河道底泥冲刷迁移和抑制黑臭物质悬浮具有积极的生态学意义。

参考文献:

- [1] Kim L H, Choi E, Stenstrom M K. Sediment characteristics, phosphorus types and phosphorus release rates between river and lake sediments[J]. *Chemosphere*, 2003, **50**(1): 53-61.
- [2] 方宇翹, 裴祖楠, 张国莹. 城市河流中黑臭现象的研究[J]. *中国环境科学*, 1993, **13**(4): 256-262.
- [3] 许宽, 刘波, 王国祥, 等. 城市污染河道沉积物可提取态氮的提取方式比较[J]. *湖泊科学*, 2012, **24**(4): 541-545.
- [4] 刘波, 王国祥, 王风贺, 等. 不同曝气方式对城市重污染河道水体氮素迁移与转化的影响[J]. *环境科学*, 2011, **32**(10): 2971-2978.
- [5] Hu J, Qiao Y, Zhou L, et al. Spatiotemporal distributions of nutrients in the downstream from Gezhouba Dam in Yangtze River, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2011, **19**(7): 2849-2859.
- [6] 应太林, 张国莹, 吴芯芯. 苏州河水体黑臭机理及底质再悬浮对水体的影响[J]. *上海环境科学*, 1997, **16**(1): 23-26.
- [7] 李巧霞, 潘纲, 王丹, 等. 太湖十八湾臭味物质变化规律及除臭方法[J]. *环境工程学报*, 2012, **6**(9): 3191-3195.
- [8] 温灼如, 张瑛玉, 洪陵成, 等. 苏州水网黑臭警报方案的研究[J]. *环境科学*, 1987, **8**(4): 2-7.
- [9] 李大鹏, 黄勇, 李伟光. 底泥曝气改善城市河流水质的研究[J]. *中国给水排水*, 2007, **23**(5): 22-25.
- [10] 李大鹏, 黄勇, 李伟光. 曝气预处理强化底泥对磷的吸附效果研究[J]. *中国给水排水*, 2007, **23**(19): 23-26.
- [11] 刘春光, 金相灿, 孙凌, 等. 不同氮源和曝气方式对淡水藻

- 类生长的影响[J]. 环境科学, 2006, **27**(1): 101-104.
- [12] 薛罡, 刘亚男, 汪永辉, 等. 曝气充氧条件下受污染河道的水质模型建立及应用[J]. 环境科学, 2010, **31**(3): 653-659.
- [13] 曹承进, 陈振楼, 王军, 等. 城市黑臭河道底泥生态疏浚技术进展[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2011, **23**(1): 32-42.
- [14] 沈乐. 苏州重污染河道底泥疏浚程度对水环境的影响[D]. 南京: 河海大学, 2007. 3-18.
- [15] 邢雅囡, 阮晓红, 赵振华. 城市河道底泥疏浚深度对氮磷释放的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, **34**(4): 378-382.
- [16] 王永平, 秦伯强. 贫、富营养湖泊中苦草的形态解剖结构比较[J]. 湖泊科学, 2011, **23**(1): 56-60.
- [17] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 92-93.
- [18] 金相灿. 湖泊富营养化调查规范[M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 216-219.
- [19] 谢贻发, 李传红, 刘正文, 等. 基质条件对苦草(*Vallisneria natans*)生长和形态特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(4): 1269-1272.
- [20] 黎慧娟, 倪乐意, 曹特, 等. 弱光照和富营养对苦草生长的影响[J]. 水生生物学报, 2008, **32**(2): 225-230.
- [21] 卢晓明, 宋英伟, 黄民生, 等. 上海城区中小河道沉水植被恢复的瓶颈问题及可行性分析[J]. 水资源保护, 2008, **24**(4): 26-30.
- [22] 张俊, 朱伟, 操家顺, 等. 水体底质异质对沉水植物生长的影响[J]. 水资源保护, 2006, **22**(4): 44-46.
- [23] Barko J W, Smart R M. Effects of organic matter additions to sediment on the growth of aquatic plants[J]. Journal of Ecology, 1983, **71**(1): 161-175.
- [24] Rattray M R, Williams H C, Brown J M A. Sediment and water as sources of nitrogen and phosphorus for submerged rooted aquatic macrophytes[J]. Aquatic Botany, 1991, **40**(3): 225-237.
- [25] Vanek T, Podlipna R, Fialova Z, et al. Uptake of xenobiotics from polluted waters by plants [M]. Netherlands: Springer-Verlag, 2010. 431-444.
- [26] 李陞, 吴文芳, 李金华, 等. 温度和电子传递体 AQDS 对铁还原细菌 *Shewanella putrefaciens* CN32 矿化产物的影响[J]. 地球物理学报, 2011, **54**(10): 2631-2638.
- [27] 夏劲, 王国祥, 王文林, 等. 慈姑(*Sagittaria trifolia*)根系泌氧特征[J]. 生态与农村环境学报, 2012, **28**(4): 422-426.
- [28] 宋玉芝, 杨美玖, 秦伯强. 苦草对富营养化水体中氮磷营养盐的生理响应[J]. 环境科学, 2011, **32**(9): 2569-2575.
- [29] 王立志, 王国祥, 俞振飞, 等. 苦草光合作用日变化对水体环境因子及磷质量浓度的影响[J]. 生态环境学报, 2010, **19**(11): 2669-2674.
- [30] 李真, 黄民生, 何岩, 等. 铁和硫的形态转化与水体黑臭的关系[J]. 环境科学与技术, 2010, **33**(6E): 1-3.
- [31] 高云霓, 刘碧云, 王静, 等. 苦草(*Vallisneria spiralis*)释放的酚酸类物质对铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)的化感作用[J]. 湖泊科学, 2011, **23**(5): 761-766.
- [32] 陆松柳, 胡洪营, 孙迎雪, 等. 3种湿地植物在水培条件下的生长状况及根系分泌物研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(7): 1901-1905.
- [33] 周华君, 王校常, 吴文彬. 根系分泌物对几种难溶磷活化作用的研究[J]. 西南农业大学学报, 2001, **23**(5): 401-403.
- [34] 许宽, 刘波, 王国祥, 等. 曝气和 pH 对城市污染河道底泥氮形态的影响[J]. 环境工程学报, 2012, **6**(10): 3553-3558.
- [35] Eville G, Lund J W G, Sanger J E, et al. Some relationships between algal standing crop, water chemistry, and sediment chemistry in the English lakes [J]. Limnology and Oceanography, 1974, **19**(4): 601-617.
- [36] 李宽意, 刘正文, 王春忠, 等. 低溶解氧对苦草生长的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2006, **15**(5): 670-673.
- [37] Stookey L L. Ferrozine a new spectrophotometric reagent for iron [J]. Analytical Chemistry, 1970, **42**(7): 779-781.
- [38] Christensen K K, Jensen H S, Andersen F Ø, et al. Interferences between root plaque formation and phosphorus availability for isoetids in sediments of oligotrophic lakes [J]. Biogeochemistry, 1998, **43**(2): 107-128.
- [39] 于建伟, 李宗来, 曹楠, 等. 无锡市饮用水臭味突发事件致嗅原因及潜在问题分析[J]. 环境科学学报, 2007, **27**(11): 1771-1777.
- [40] 张文河, 穆桂金. 烧失法测定有机质和碳酸盐的精度控制[J]. 干旱区地理, 2007, **30**(3): 455-459.
- [41] Benizri E, Dedourge O, Dibattista-Leboeuf C, et al. Effect of maize rhizodeposits on soil microbial community structure [J]. Applied Soil Ecology, 2002, **21**(3): 261-265.
- [42] Marschner H, 范晓晖. 根系分泌物对根际矿质养分的活化作用[J]. 土壤学进展, 1992, **20**(2): 46-47.
- [43] 丁维新, 蔡祖聪. 土壤有机质和外源有机物对甲烷产生的影响[J]. 生态学报, 2002, **22**(10): 1672-1679.
- [44] 鞠瑾. 植物湿地床对泰达再生水景观河道中氮磷的净化研究[D]. 重庆: 西南大学, 2007. 14-18.
- [45] 杨洪, 易朝路, 邢阳平, 等. 武汉东湖沉积物孔隙度与含水量[J]. 湖泊科学, 2004, **16**(1): 68-72.
- [46] Urban N R, Dinkel C, Wehrli B. Solute transfer across the sediment surface of a eutrophic lake: I. Porewater profiles from dialysis samplers[J]. Aquatic Sciences, 1997, **59**(1): 1-25.
- [47] 梁学礼. 土壤各种含水率测定的平行误差规定[J]. 水力发电, 1957, **4**(18): 24-26.
- [48] 许宽, 刘波, 王国祥, 等. 底泥曝气对城市污染河道内源氮变化过程的影响[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(12): 2935-2942.

CONTENTS

Observation of Size Distribution of Atmospheric OC/EC in Tangshan, China	GUO Yu-hong, XIN Jin-yuan, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2497)
Changing Characteristics of the Main Air Pollutants of the Dongling Mountain in Beijing	YU Yang-chun, HU Bo, WANG Yue-si (2505)
Characteristic Comparative Study of Particulate Matters in Beijing Before and During the Olympics	ZHANG Ju, OUYANG Zhi-yun, MIAO Hong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Impact Factors of O ₃ Concentrations in Mountain Background Region of East China	SU Bin-bin (2519)
Studies on the Size Distribution of Airborne Microbes at Home in Beijing	FANG Zhi-guo, SUN Ping, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (2526)
Emission Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Residential Coal Combustion and Its Influence Factors	HAI Ting-ting, CHEN Ying-jun, WANG Yan, <i>et al.</i> (2533)
Experimental Research on Alcohols, Aldehydes, Aromatic Hydrocarbons and Olefins Emissions from Alcohols Fuelled Vehicles	ZHANG Fan, WANG Jian-hai, WANG Xiao-cheng, <i>et al.</i> (2539)
Combination Process of Microwave Desorption-Catalytic Combustion for Toluene Treatment	CAO Xiao-qiang, ZHANG Hao, HUANG Xue-min (2546)
Removal of BTEX by a Biotrickling Filter and Analysis of Corresponding Bacterial Communities	LI Jian-jun, LIAO Dong-qi, XU Mei-ying, <i>et al.</i> (2552)
Source Profile of Volatile Carbonyl Compounds in Wastewater Treatment Plant of an Oil Refinery	ZHOU Bo-yu, LIU Wang, WANG Bo-guang, <i>et al.</i> (2560)
Distribution and Air-Sea Fluxes of Methane in the Yellow Sea and the East China Sea in the Spring	CAO Xing-peng, ZHANG Gui-ling, MA Xiao, <i>et al.</i> (2565)
Study on Seasonal Characteristics of Thermal Stratification in Lacustrine Zone of Lake Qiandao	DONG Chun-ying, YU Zuo-ming, WU Zhi-xu, <i>et al.</i> (2574)
Effects of Land Use Structure on Water Quality in Xin'anjiang River	CAO Fang-fang, LI Xue, WANG Dong, <i>et al.</i> (2582)
Canonical Correspondence Analysis Between Phytoplankton Community and Environmental Factors in Macrophytic Lakes of the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	MENG Rui, HE Lian-sheng, GUO Long-gen, <i>et al.</i> (2588)
Microbial Bioavailability of Dissolved Nucleic Acids Across the Estuarine Salinity Gradient	YANG Qing-qing, LI Peng-hui, HUANG Qing-hui (2597)
Elementary Quantitative Study on Factors of Phytoplankton Bloom	ZHANG Zhuo, SONG Zhi-yao, HUANG Chang-chun, <i>et al.</i> (2603)
Spatiotemporal Succession of Algae Functional Groups and the Influence of Environment Change in a Deep-water Reservoir	LU Jin-suo, HU Ya-pan (2611)
Hyperspectral Remote Sensing of Total Suspended Matter Concentrations in Lake Taihu Based on Water Optical Classification	ZHOU Xiao-yu, SUN De-yong, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (2618)
Application of Subwet Model in the Design of Constructed Wetland	LI Hui-feng, HUANG Jin-hui, LIN Chao (2628)
Allelopathic Effect of <i>Nelumbo nucifera</i> Stem and Leaf Tissue Extract on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Scenedesmus quadricauda</i>	HE Lian-sheng, MENG Fan-li, DIAO Xiao-jun, <i>et al.</i> (2637)
Influence of <i>Vallisneria spiralis</i> on the Physicochemical Properties of Black-odor Sediment in Urban Sluggish River	XU Kuan, LIU Bo, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (2642)
Removal of Cr(VI) by Iron Filings with Microorganisms to Recover Iron Reactivity	TANG Jie, WANG Zhuo-xing, XU Xin-hua (2650)
Degradation of Phenol with a Fe/Cu-Catalytic Heterogeneous-Fenton Process	YANG Yue-zhu, LI Yu-ping, YANG Dao-wu, <i>et al.</i> (2658)
Effect of Different Forms of Inorganic Nitrogen on the Photodegradation of Antipyrine in Water	ZHAO Qian, CHEN Chao, FENG Li, <i>et al.</i> (2665)
Degradation Mechanisms of Dimethyl Phthalate in the UV-H ₂ O ₂ System	LIU Qing, CHEN Cheng, CHEN Hong-zhe, <i>et al.</i> (2670)
Adsorption of Cd ²⁺ Ions in Aqueous by Diamine-Modified Ordered Mesoporous SBA-15 Particles	ZHANG Meng, YANG Ya-ti, QIN Rui, <i>et al.</i> (2677)
Surface Organic Modification of Acid Vermiculite and Its Adsorption of Hydrophobic Micro Pollutants in Aqueous Solutions	JIANG Zheng-ming, YU Xu-biao, HU Yun, <i>et al.</i> (2686)
Preparation of Porous Ceramics Based on Waste Ceramics and Its Ni ²⁺ Adsorption Characteristics	ZHANG Yong-li, WANG Cheng-zhi, SHI Ce, <i>et al.</i> (2694)
Perchlorate Removal from Underground Water by Anaerobic Biological Reduction with Bark	WANG Rui, LIU Fei, CHEN Nan, <i>et al.</i> (2704)
Experimental Study on the Remediation of Chromium Contaminated Groundwater with PRB Media	ZHU Wen-hui, DONG Liang-fei, WANG Xing-run, <i>et al.</i> (2711)
Removal of Calcium and High-strength Ammonia Nitrogen from the Wastewater of Rare-earth Elements Hydrometallurgical Process by Chemical Precipitation	WANG Hao, CHENG Guan-wen, SONG Xiao-wei, <i>et al.</i> (2718)
Leaching Kinetics of Josephinite Tailings with Sulfuric Acid	CHEN An-an, ZHOU Shao-qi, HUANG Peng-fei (2729)
Effects of HRT on Fate of Typical Polycyclic Musk by A ² O Process	LIU Peng-cheng, HUANG Man-hong, CHEN Dong-hui, <i>et al.</i> (2735)
Kinetic Simulation of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Fermentation Broth as Carbon Source	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (2741)
Effluent Carbon Source Improvement and Sludge Reduction by Hydrolysis Reactor with Enhanced Sludge Utilization	XIONG Ya, WANG Qiang, SONG Ying-hao, <i>et al.</i> (2748)
Optimization of Extracellular Polymeric Substance Extraction Method and Its Role in the Dewaterability of Sludge	ZHOU Jun, ZHOU Li-xiang, WONG Woo-chung (2752)
Effectiveness of Arsenite Adsorption by Ferric and Alum Water Treatment Residuals with Different Grain Sizes	LIN Lu, XU Jia-rui, WU Hao, <i>et al.</i> (2758)
Regional Differences and Development Tendency of Livestock Manure Pollution in China	QIU Huan-guang, LIAO Shao-pan, JING Yue, <i>et al.</i> (2766)
Quantitative Partitioning of Soil Selenium in the Selenium-Rich Area of Northern Zhejiang Plain	XU Ming-xing, PAN Wei-feng, CENG Jing, <i>et al.</i> (2775)
Effects of Land Use on Manganese Distribution and Fractions in Wetland Soil of Sanjiang Plain, Northeast China	ZHANG Zhong-sheng, LU Xian-guo, SONG Xiao-lin (2782)
Research on Vertical Distribution Pattern and Reserve of Organic Carbon in Paddy Field Soil of Qiangou, Jilin	TANG Jie, ZHANG Wen-hui, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (2788)
Soil Organic Carbon Sequestration Rate and Its Influencing Factors in Farmland of Guanzhong Plain; A Case Study in Wugong County, Shanxi Province	ZHANG Xiao-wei, XU Ming-xiang (2793)
Effects of Biological Regulated Measures on Active Organic Carbon and Erosion-Resistance in the Three Gorges Reservoir Region Soil	HUANG Ru, HUANG Lin, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (2800)
Quantifying Soil Autotrophic Microbes-Assimilated Carbon Input into Soil Organic Carbon Pools Following Continuous ¹⁴ C Labeling	SHI Ran, CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (2809)
Analysis of Soil Respiration and Influence Factors in Wheat Farmland Under Conservation Tillage in Southwest Hilly Region	ZHANG Sai, ZHANG Xiao-yu, WANG Long-chang, <i>et al.</i> (2815)
Distribution Characteristics and Risk Evaluation of Organochlorine Pesticides in Soil from Relocation Areas of the Danjiangkou Reservoir	LI Zi-cheng, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2821)
Risk Assessment and Countermeasure of BTEX in Pesticide Factory	PANG Bo, WANG Tie-yu, DU Li-yu, <i>et al.</i> (2829)
Accumulation of S, Fe and Cd in Rhizosphere of Rice and Their Uptake in Rice with Different Water Managements	ZHANG Xue-xia, ZHANG Xiao-xia, ZHENG Yu-ji, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Nitrate on Organic Removal and Microbial Community Structure in the Sediments	LIU Jin, DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (2847)
Zero-Valent Iron-Enhanced Azoreduction by the <i>Shewanella decolorationis</i> S12	ZHOU Qing, CHEN Xing-juan, GUO Jun, <i>et al.</i> (2855)
Isolation, Identification of Two Aerobic Denitrifiers and Bioaugmentation for Enhancing Denitrification of Biofilm Under Oligotrophic Conditions	QUAN Xiang-chun, CEN Yan, QIAN Yin (2862)
Rapid Enrichment and Cultivation of Denitrifying Phosphate-Removal Bacteria and Its Identification by Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization Technology	LIU Li, TANG Bing, HUANG Shao-song, <i>et al.</i> (2869)
Identification of a Denitrifying Polyphosphate-accumulating Organism (DPAO) and Study on Its Denitrifying Functional Genes	ZHANG Qian, WANG Hong-yu, SANG Wen-jiao, <i>et al.</i> (2876)
Isolation and Characterization of a Highly Efficient BBP-degrading Bacterium	CHEN Hu-xing, YANG Xue, ZHANG Kai, <i>et al.</i> (2882)
Degradation of Nicosulfuron by Combination Effects of Microorganisms and Chemical Hydrolysis	ZHANG Xiao-lin, LI Yong-mei, YUAN Zhi-wen (2889)
Isolation, Screening and Identification of Prometryne-Degrading Bacteria and Their Degrading Characteristics	ZHOU Ji-hai, SUN Xiang-wu, HU Feng, <i>et al.</i> (2894)
Preparation of PVA-SA-PHB-AC Composite Carrier and <i>m</i> -Cresol Biodegradation by Immobilized <i>Lysinibacillus cresolivorans</i>	LI Ting, REN Yuan, WEI Chao-hai (2899)
Extraction of Surface Active Substance and Analysis of Demulsifying Characteristics for the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, ZHANG Shu-cong, PENG Kai-ming, <i>et al.</i> (2906)
Diversity of Culturable Filamentous Bacteria in the Activated Sludge from A ² O Wastewater Treatment Process	GAO Sha, JIN De-cai, ZHAO Zhi-rui, <i>et al.</i> (2912)
Composition and Transformation of Leachates During Municipal Solid Waste Composting	LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (2918)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年7月15日 34卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 7 Jul. 15, 2013

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行