

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第10期

Vol.37 No.10

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 $PM_{2.5}$ 清除作用	孙兆彬, 廖晓农, 王占山, 李梓铭, 赵秀娟, 花丛 (3679)
降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力	董群, 赵普生, 陈一娜 (3686)
北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评价	刘丹, 解强, 张鑫, 王海林, 闫志勇, 杨宏伟, 郝郑平 (3693)
浙江省制鞋行业挥发性有机物污染特征及其排放系数	徐志荣, 姚轶, 蔡卫丹, 李嫣, 许明珠, 王浙明 (3702)
2014 年 APEC 期间北京市 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 氧化性损伤能力研究	郭茜, 邵龙义, 王文华, 侯聪, 赵承美, 幸娇萍, 马施民 (3708)
武汉市洪山区夏季 $PM_{2.5}$ 浓度、水溶性离子与 PAHs 成分特征及来源分析	孙焰, 祁士华, 张莉, 邢新丽, 杨丹, 胡天鹏, 瞿程凯 (3714)
基于快速聚类方法分析常州市区 $PM_{2.5}$ 的统计特性	王振, 余益军, 徐圃青, 李艳萍, 夏京, 殷磊 (3723)
$PM_{2.5}$ 在线水溶性离子与滤膜采集-实验室检测的比对分析	杨懂艳, 刘保献, 石爱军, 张大伟, 丁萌萌, 周健楠, 富佳明, 景宽 (3730)
树木模拟燃烧排放烟尘中水溶性离子的组成	刘刚, 黄柯, 李久海, 徐慧 (3737)
轻型汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征	樊筱筱, 蒋靖坤, 张强, 李振华, 何立强, 吴烨, 胡京南, 郝吉明 (3743)
基于台架测试的我国船用柴油机废气排放因子	邢辉, 段树林, 黄连忠, 韩志涛, 刘勤安 (3750)
西安城区地表灰尘中邻苯二甲酸酯分布、来源及人群暴露	张文娟, 王利军, 王丽, 史兴民, 卢新卫 (3758)
生活垃圾焚烧厂垃圾的汞含量与汞排放特征研究	段振亚, 苏海涛, 王凤阳, 李智坚, 李韶璞, 王书肖 (3766)
三峡库区消落带土壤中硫酸盐还原菌对汞甲基化作用的影响	陈瑞, 陈华, 王定勇, 向玉萍, 申鸿 (3774)
城市化进程对地下河中溶解态正构烷烃来源的影响	廖昱, 孙玉川, 沈立成, 梁作兵, 王尊波 (3781)
基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价	王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 李宝杰 (3789)
贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价	何晓丽, 吴艳宏, 周俊, 邝海健 (3798)
多元数理统计法研究太子河本溪城市段水体 DOM 紫外光谱特征	钱锋, 吴婕, 于会彬, 宋永会, 张美, 孔令昊, 何孟常 (3806)
地下水中溶解性有机物的垂直分布特征及成因	何小松, 张慧, 黄彩红, 李敏, 高如泰, 李丹, 席北斗 (3813)
昆明市不同功能区排水管道沉积物性质	常海东, 金鹏康, 付博文, 李雪兵, 贾锐珂 (3821)
滇池水生植物分布对沉积物间隙水磷浓度的影响	丁帅, 王圣瑞, 张蕊, 肖焱波, 焦立新, 李乐, 王忠诚, 尹诗诗 (3828)
紫色母岩覆盖层控制底泥磷释放的效果及机制	黄雪娇, 石纹豪, 倪九派, 李振轮 (3835)
排水循环灌溉下稻田磷素时空分布特征	焦平金, 许迪, 朱建强, 于颖多 (3842)
快速高效去除微囊藻的 GO/QPEI 复合纳米材料	李洁, 肖琳 (3850)
一体式生物净化-沉淀池对微污染水体污染物的强化去除性能	王文东, 刘荟, 马翠, 韩雨, 常妮妮 (3858)
生物粉末活性炭-超滤组合工艺对微污染水源水中臭味物质的去除效能及其微生物特性	宣雍祺, 周丽, 邓慧萍, 蔡宙, 李大鹏, 刘刚 (3864)
聚硅酸对不同形态铝沉积行为的影响	赵园园, 张玥, 李素英, 石宝友, 李贵伟, 孙改清 (3870)
典型南方水源氨基酸浓度变化与去除	刘伟, 蔡广强, 卢小艳, 刘丽君, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (3877)
O_3 /UV 降解含氮杂环化合物喹啉	陈傲蕾, 常凤民, 汪翠萍, 徐恒, 吴静, 左剑恶, 王凯军 (3884)
蒽醌-2-磺酸钠促进 <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 脱色产氢机制与产能分析	胡金梅, 虞磊, 黄天寅 (3891)
2-丁烯醛生产废水中溶解性有机物的分级解析	孙秀梅, 宋广清, 席宏波, 周岳溪, 牛远方 (3899)
不同缺氧段硝酸盐氮浓度条件下连续流单污泥污水处理系统 PHA、TP 代谢	王晓玲, 员东丹, 白莉, 李紫棋, 余勇, 秦旭东, 张晓旭, 赵可 (3906)
长江口邻近海域沉积物中厌氧氨氧化细菌分布特征研究	付璐璐, 甄毓, 贺惠, 张玉, 米铁柱 (3914)
焦化废水活性污泥细菌菌群结构分析	蒙小俊, 李海波, 曹宏斌, 盛宇星 (3923)
黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究	刘洋, 黄懿梅, 曾全超 (3931)
苯酚对活性污泥活性及微型动物群落结构的影响	胡小兵, 饶强, 唐素兰, 姜晶, 谢瑞桃, 郝文静, 钟梅英 (3939)
城市生活污水和生活垃圾渗滤液抗生素抗性基因污染的比较研究	黄福义, 李虎, 安新丽, 欧阳纬莹, 苏建强 (3949)
菌株 <i>Desulfovibrio</i> sp. CMX 的 DNRA 性能和影响因素	谢柄柯, 张玉, 王晓伟, 孙超越, 周集体 (3955)
生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响	徐珊珊, 侯朋福, 范立慧, 薛利红, 杨林章, 王绍华, 李刚华 (3963)
模拟氮沉降对重庆缙云山马尾松林土壤呼吸和酶活性的季节性影响	曾清苹, 何丙辉, 李源, 夏力文, 杨龙龙, 邓雪梅, 李川 (3971)
生物炭添加和灌溉对温室番茄地土壤反硝化损失的影响	张文娟, 余冬立, Gamareldawla H. D. Agbna, 夏永秋 (3979)
土壤质地对自养固碳微生物及其同化碳的影响	王群艳, 吴小红, 祝贞科, 袁红朝, 隋方功, 葛体达, 吴金水 (3987)
土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟	施亚星, 吴绍华, 周生路, 王春辉, 陈浩 (3996)
组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控	王英杰, 邹佳玲, 杨文强, 周航, 廖柏寒 (4004)
几种有机物料对设施菜田土壤 Cd、Pb 生物有效性的影响	周贵宇, 姜慧敏, 杨俊诚, 张建峰, 张水勤, 梁雷 (4011)
蒙脱石对有机物料施入土壤磷形态和有效性的影响	宋贤威, 赵秀兰, 张进忠, 胡梦坤, 徐艳昭, 王明禹 (4020)
不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响	秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟荪琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (4030)
黑麦草和牵牛花对铬耐受能力和积累效果的指标表征研究	董冰冰, 陈友媛, 惠红霞, 陆维佳, 杨秀卿, 刘逸凡 (4044)
挥发性甲基硅氧烷的体外代谢行为	黎敏丹, 郑国贸, 万伟, 胡建英 (4054)
中药渣与城市污泥好氧共堆肥的效能	宿程远, 郑鹏, 阮祁华, 覃菁菁, 卢宇翔, 李俊兵 (4062)
《环境科学》征订启事 (3827)	《环境科学》征稿简则 (4053)
信息 (3736, 3930, 4043)	

滇池水生植物分布对沉积物间隙水磷浓度的影响

丁帅^{1,2,3}, 王圣瑞^{1,2}, 张蕊^{1,2}, 肖焱波³, 焦立新^{1,2*}, 李乐^{1,2}, 王忠诚³, 尹诗诗³

(1. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 中国环境科学研究院国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 湖泊生态环境创新基地, 北京 100012; 3. 云南民族大学民族医药学院, 昆明 650500)

摘要: 为揭示滇池水生植物分布对沉积物间隙水磷的质量浓度的影响, 分别采集滇池有植物区域和无植物区域沉积物柱状样, 测定间隙水和上覆水溶解性总磷(DTP)、溶解性活性磷(SRP)和溶解性有机磷(DOP)的质量浓度, 分析其沉积物间隙水磷的垂向变化特征, 探讨水生植物对沉积物间隙水磷形态特征的影响及控制效果, 结果表明: ①水生植物对滇池不同湖区沉积物间隙水各形态磷的质量浓度影响显著, 但因分布站点不同、深度层次变化所呈现的规律也各不相同; ②水生植物显著降低了沉积物间隙水 DOP 的贡献率, 有植物区域 DOP 平均贡献为 32.87%, 无植物区域则平均贡献为 57.68%; ③水生植物抑制了沉积物无机磷的释放, 促进了 DOP 的转化. 有植物区域 SRP 沉积物-水界面扩散通量比无植物区域平均降低 39.99%; ④水生植物生长对沉积物间隙水各形态磷的浓度削减比较明显, 尤其是 DOP, 削减率达到了 38.02% ~ 85.49%. 因此分析水生植物对沉积物间隙水 DOP 贡献率及削减率, 对深入理解水生植物与间隙水 DOP 之间的关系及沉积物有机磷的矿化降解具有重要意义.

关键词: 水生植物; 沉积物; 间隙水; 磷; 控制效果

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)10-3828-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.10.021

Concentration of Phosphorus in Sediments Interstitial Water as Affected by Distribution of Aquatic Plants in Dianchi Lake

DING Shuai^{1,2,3}, WANG Sheng-rui^{1,2}, ZHANG Rui^{1,2}, XIAO Yan-bo³, JIAO Li-xin^{1,2*}, LI Le^{1,2}, WANG Zhong-cheng³, YIN Shi-shi³

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Research Center of Lake Eco-Environment, State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. School of Ethnic Medicine, Yunnan Minzu University, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to reveal the effect of aquatic plants distribution on the mass concentration of phosphorus in sediment interstitial water, the mass concentrations of Dissolved Total Phosphorus (DTP), Soluble Reactive Phosphorus (SRP) and Dissolved Organic Phosphorus (DOP) in the sediment interstitial water and overlying water from areas with or without plants in the same site of Dianchi were studied. The vertical variation characteristics of phosphorus forms in sediment interstitial water were analyzed to explore the effect of aquatic plants on the phosphorus forms in sediment interstitial water. The results showed: ①Aquatic plants had a significant effect on the phosphorus mass concentration of the sediment interstitial water in different Dianchi lakes. However, they varied with different distribution sites and depth. ②Aquatic plants significantly decreased the percentage of DOP contribution in the sediment interstitial water. The average contribution of DOP with aquatic plants was 32.87%, while that without plants reached 57.68%; ③Aquatic plants significantly inhibited the release of inorganic phosphorus in sediments and promoted the transformation of DOP. The SRP diffusion flux at sediment-water interface with aquatic plants was increased by 39.99% as compared with that without plants; ④The growth of aquatic plants significantly reduced the concentration of phosphorus in sediment interstitial water, especially DOP, and the reduction rate of the sediment interstitial water DOP was from 38.02% to 85.49%. Therefore, the analysis of the contribution and reduction rate of aquatic plants on the sediment interstitial water DOP was of great importance in understanding the relationship between aquatic plants and DOP, as well as the mineralization of organic phosphorus in sediments.

Key words: aquatic plants; sediment; interstitial water; phosphorus; control effect

湖泊富营养化已成为当前我国面临的最为突出的环境问题^[1], 磷作为影响湖泊富营养化的关键限制性因素^[2], 对湖泊水体生态系统和沉积物营养盐负荷都具有重要的作用^[3].

磷在沉积物-水界面上的迁移和转化不仅对上覆水磷浓度有重大的影响^[4], 而且对沉积物中磷的

矿化转移起着重要的作用^[5]. 间隙水作为沉积物-水

收稿日期: 2015-11-12; 修订日期: 2016-05-29

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07102-004); 国家自然科学基金项目(U1202235)

作者简介: 丁帅(1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊底泥污染治理, E-mail: 1249225817@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: jiaolx@craes.org.cn

界面磷交换的重要媒介,其中的磷既可通过扩散层迁移到上覆水体影响水质,也可被沉积物颗粒吸附转化为潜在释放磷或者被蓄积^[6].水生植物占据浅水水体生态系统的关键界面,通过茎叶和根尖吸附水体和沉积物间隙水中磷营养盐进而影响湖泊水体磷循环^[7,8].除此之外,水生植物根系分泌物促进嗜磷细菌滋生,加速沉积物-水界面磷循环,进而净化水质^[9].以往水生植物生长对湖泊水体富营养修复^[10]、沉积物间隙水无机磷的降解^[8]以及沉积物-水界面磷营养盐的扩散通量^[11]研究的较多,而从水生植物对沉积物间隙水长期作用的角度来考虑,其对沉积物间隙水 DOP 的影响罕见报道.本文通过研究滇池不同湖区沉积物间隙水磷形态组成,沉积物-水界面扩散通量,探讨并阐述水生植物分布对沉积物间隙水磷形态特征的影响及其释放控制效果和影响因素,进而了解水生植物生长与 DOP 之间的关系并且使水生植物修复作为滇池沉积物营养盐磷负荷修复的一种途径,以期为今后综合治理滇池污染提供一定的依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

于2015年6月底,通过GPS定位选择滇池全湖5个有水生植物生长的湖区进行柱状样采样,采样点位离岸边50~100 m,同时在每个点位附近相隔20~50 m处且无水生植物生长区采取柱状样(采样点位见图1).柱状沉积物样品采用管径为90 mm的硬质有机玻璃管重力采样器采集,柱状样两端封闭后保持避光垂直放置并及时带回实验室进行切割,同时运输过程要求平稳,避免沉积物-水界面受到剧烈扰动^[12].滇池5个采样点位的水质数据和植物种类分布见文献[13].

1.2 分析方法

采集好的柱状样带回实验室,其上覆水的采取方法和沉积物分割方法同文献[12],用虹吸管吸取柱状样上覆水,测定水质pH见文献[13].按0~2、2~5、5~8、8~12、12~16、16~20 cm 间隔对柱

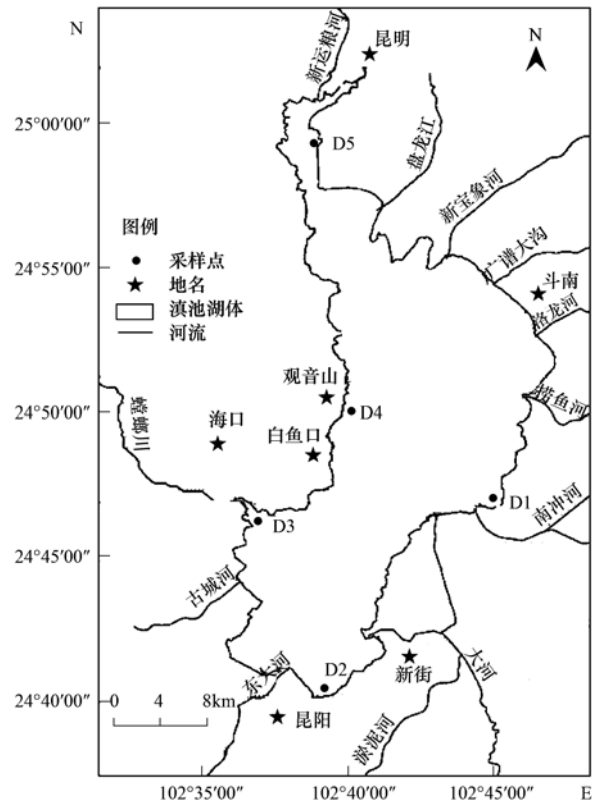


图1 滇池采样点示意图

Fig. 1 Sampling sites in Dianchi Lake

状沉积物样品进行切割,并测定其孔隙率,间隙水用高速离心机(5 000 r·min⁻¹)离心,然后通过0.45 μm 混合纤维膜进行过滤.上覆水和间隙水各磷指标(DTP、SRP 和 DOP)的具体测定方法见文献[14],溶解性总磷(DTP)采用过硫酸钾-钼锑抗分光光度法测定,SRP 采用钼锑抗分光光度法测定.

DOP = DTP - SRP (1)

式中,DTP 为溶解性总磷(mg·L⁻¹);SRP 为溶解性磷酸盐(mg·L⁻¹);DOP 为溶解性有机磷(mg·L⁻¹).沉积物总氮(TN)和有机质(OM)见文献[15],总磷(TP)和有机磷(OP)的测定见文献[14].w(粒径)采用中国环境科学研究院激光粒度仪(Mastersizer Hydro2000MU)测定,表1 为滇池5个采样点位沉积物基本理化性质.

表1 滇池5个采样点位沉积物基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the sediment from 5 sampling points in Dianchi Lake

站点	TN /mg·kg ⁻¹	TP /mg·kg ⁻¹	OP /mg·kg ⁻¹	OM/%	<4.00 μm(黏土) /%	4.00~63.00 μm (淤泥)/%	>63 μm(砂) /%
D1	4 595.08	1 661.69	158.79	12.33	14.54	68.63	16.83
D2	5 179.67	1 753.87	109.39	14.46	17.67	76.92	5.41
D3	5 789.54	1 675.51	192.80	14.06	13.63	40.91	45.46
D4	4 088.50	1 603.53	157.86	13.53	13.43	56.36	30.21
D5	5 950.83	695.39	153.27	37.10	8.32	25.86	65.82

1.3 沉积物-水界面磷扩散通量计算方法

磷在沉积物-水界面扩散通量按 Fick 扩散定律计算^[16],公式:

$$F = \varphi \cdot D_s \left(\frac{\partial C}{\partial Z} \right)_{Z=0} \quad (2)$$

式中, F 为营养盐通过沉积物-水界面的扩散通量 [$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$]; φ 为表层沉积物孔隙率, %; $\left(\frac{\partial C}{\partial Z} \right)_{Z=0}$ 为沉积物-水界面营养盐浓度梯度 [$\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{cm})^{-1}$]; D_s 为考虑沉积物弯曲效应后的分子实际扩散系数 ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

通常用 Ullman 给出的真实扩散系数 D_s 与孔隙率 φ 之间的经验公式^[17]:

$$D_s = \begin{cases} \varphi \cdot D_0, & \varphi \leq 0.7 \\ \varphi^2 \cdot D_0, & \varphi > 0.7 \end{cases} \quad (3)$$

式中, D_0 为无限稀释溶液理想扩散系数, 25℃ 时 SRP, $D_0 = 7.0 \times 10^{-6} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

孔隙率公式^[18]:

$$\varphi = \frac{(W_w - W_d) \times 100\%}{(W_w - W_d) + \frac{W_d}{2.5}} \quad (4)$$

式中, W_w 为沉积物湿重 (g); W_d 为沉积物干重 (g); 2.5 是湿沉积物密度与水密度比值的平均值.

1.4 数据统计分析

数据分析采用 Origin 8.6、Spss 17.0 和 Excel 2010.

2 结果与分析

2.1 滇池不同湖区沉积物间隙水磷浓度垂向变化

滇池不同湖区沉积物间隙水各形态磷受水生植物影响随深度变化差异较大. 由图 2 可见, 不同站点沉积物间隙水 DTP 质量浓度变化在 $0.01 \sim 0.47 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, SRP 质量浓度变化在 $0 \sim 0.07 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 平均占 DTP 质量浓度的 50.22%; DOP 质量浓度变化在 $0 \sim 0.44 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 平均占 DTP 质量浓度的 49.78%. 水生植物生长显著影响沉积物间隙水各形态磷质量浓度分布, 但其影响程度因磷形态及沉积物性质表现各异. 除 D2 站点外, 其他站点沉积物间隙水有植物区域 DTP 和 DOP 的质量浓度均低于无植物区域, 而 D3 和 D4 站点有无植物区域 DOP 随深度所呈现的趋势和 DTP 一致. 水生植物对沉积物间隙水 SRP 质量浓度的影响与深度变化以及采样站点的不同有关, D3 和 D4 站点有植物区域 SRP 质量浓度随深度增加整体呈现增加趋势, 而无

植物区域则基本随深度的增加呈现先增加后降低趋势; D5 站点沉积物间隙水 SRP 的质量浓度在 $0 \sim 2 \text{cm}$ 区间有植物区域大于无植物区域, 而在 $2 \sim 20 \text{cm}$ 区间有植物区域间隙水 SRP 质量浓度随着深度的增加整体变化不太明显且均低于无植物区域; D2 站点有无植物区域 SRP 随深度变化区别于其他站点, 无植物区域随深度增加逐渐降低, 而有植物区域的波动性比较大, 但总体大于无植物区域.

2.2 水生植物对滇池不同湖区间隙水磷形态组成的影响

水生植物对沉积物间隙水磷形态组成贡献比较显著. 如图 3 可见, 无植物区域 SRP 对 DTP 的贡献变化在 24.07% ~ 60.02% 之间, 平均值为 42.32%; DOP 对 DTP 的贡献变化在 39.97% ~ 75.93% 之间, 平均值为 57.68%; 有植物区域 SRP 对 DTP 的贡献变化在 53.45% ~ 85.69% 之间, 平均值为 67.13%; DOP 对 DTP 的贡献变化在 14.31% ~ 46.55% 之间, 平均值为 32.87%. 相比较而言, D2 和 D3 站点无植物区域 DOP 对 DTP 的贡献显著高于 SRP, 平均值为 69.92%, D4 和 D5 站点无植物区域 DOP 对 DTP 的贡献略高于 SRP, 平均值为 54.30%, 而 D1 站点无植物区域沉积物间隙水以 SRP 对 DTP 的贡献较大, 为 60.02%. 5 个站点有植物区域沉积物间隙水均以 SRP 对 DTP 的贡献显著, 平均值为 67.13%, DOP 对 DTP 的贡献相对较低. 可见, 水生植物生长不仅吸收了间隙水 SRP^[8], 而且其根际环境效应也可能促进沉积物间隙水部分 DOP 的转化与降解^[19], 这种作用很有可能削减了 DOP 对 DTP 的贡献, 这与马凯等^[20]研究相符, 其中 D5 站点表现得尤为突出.

2.3 水生植物对滇池不同湖区泥源磷负荷的控制效果

水生植物生长削减了沉积物间隙水各形态磷的浓度, 同时影响沉积物-水界面磷的释放. 由表 2 可见, 5 个站点无植物区域沉积物间隙水 DTP 的浓度显著高于有植物区域, 其中有植物区域 DTP 浓度比无植物区域削减了 9.96% ~ 69.35%, 而水生植物对沉积物间隙水 DOP 的削减效果显著高于无机磷 SRP, 削减率为 38.02% ~ 85.49%. D1、D3 和 D4 站点水生植物对 SRP 的削减效果相对 D2 和 D5 比较显著, 削减率为 13.80% ~ 38.02%. 表 3 分析可知, D4 站点有无水生植物沉积物间隙水 DTP、SRP 和 DOP 浓度的 T 检验率都 < 0.05 显著, 而 D2 站点 SRP 浓度的 T 检验率 < 0.05 显著, D5 站点 DOP 浓度的 T 检验率 < 0.05 显著, 说明在总体水平上, 除

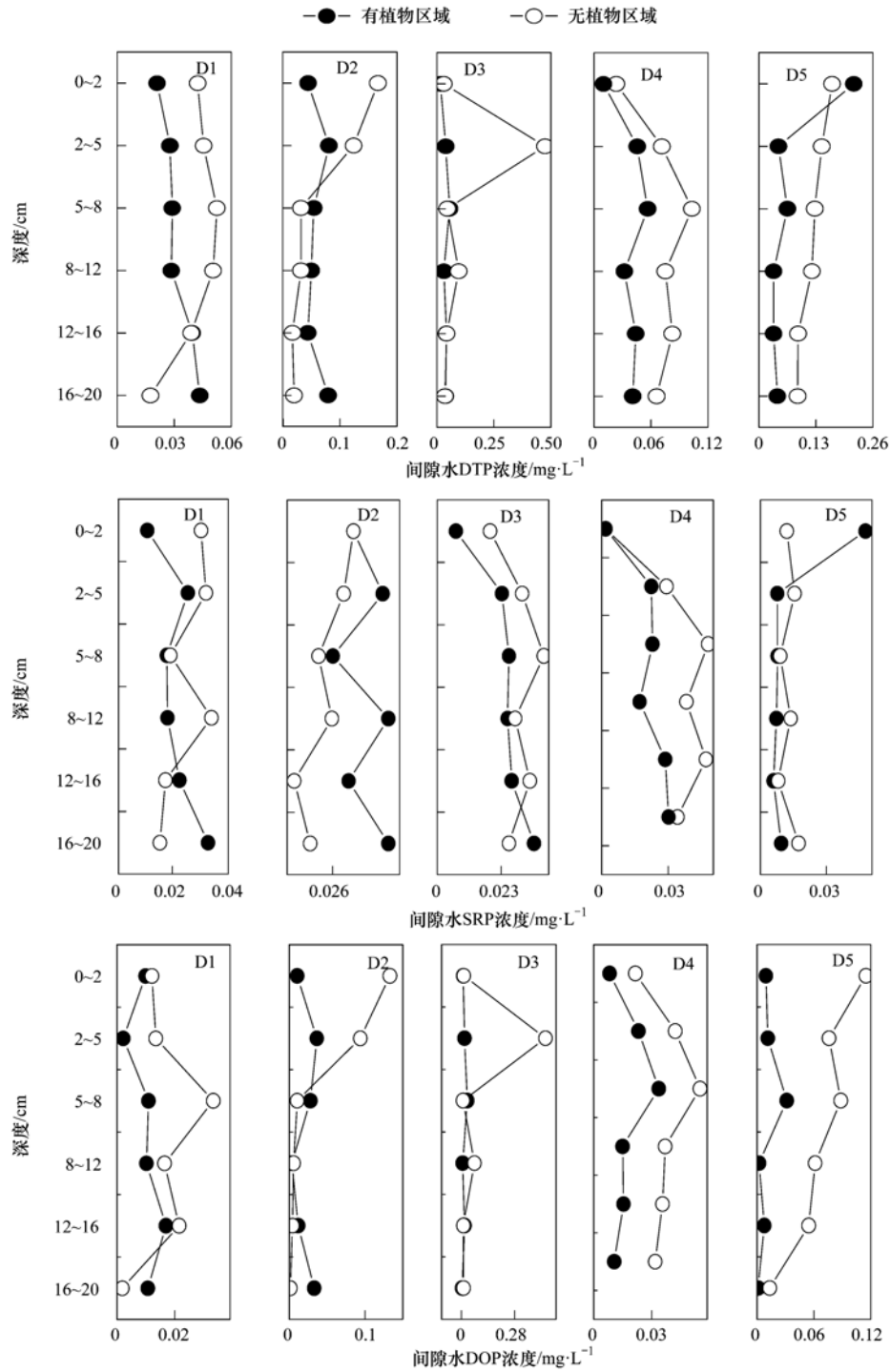


图2 水生植物对沉积物间隙水各形态磷的影响

Fig. 2 Influence of aquatic plants on phosphorus species in sediment interstitial water

D4 站点外其余各点水生植物的生长对沉积物间隙水各形态磷的影响不是很显著,这可能与不同站点底质性质等复杂环境因子有关^[21].水生植物生长对沉积物-水界面无机磷的扩散通量影响比较显著,不同站点有植物区域 SRP 的沉积物-水界面扩散通量变化在 $-0.10 \sim 0.02 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 之间,无植物区域 SRP 的沉积物-水界面扩散通量变化在 $-0.21 \sim$

$0.05 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 之间.其中,有植物区域 SRP 沉积物-水界面扩散通量比无植物区域平均降低 39.99%.可见,水生植物生长通过显著削减 SRP 沉积物-水界面的扩散通量达到控制磷释放的效果.

3 讨论

本研究中,滇池不同站点沉积物间隙水 SRP 质

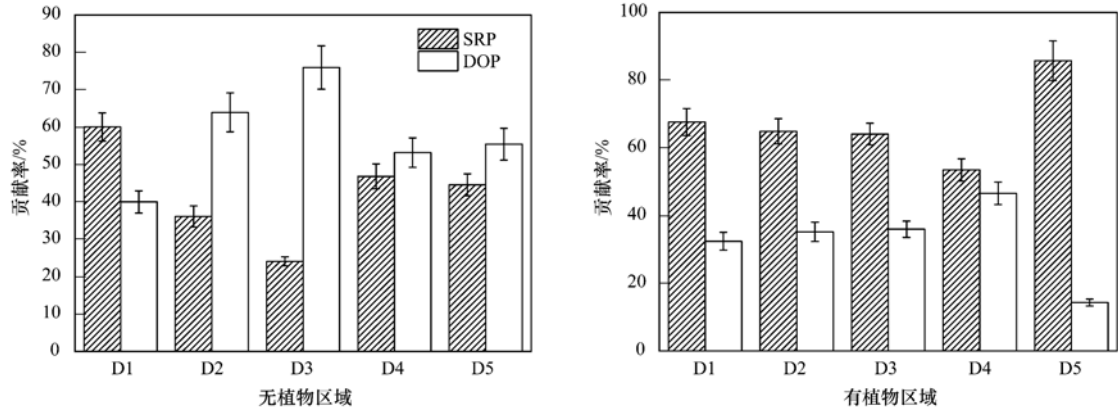


图 3 沉积物间隙水磷形态组成贡献

Fig. 3 Contribution of phosphorus species in sediment interstitial water

表 2 水生植物对沉积物间隙水磷浓度及其释放的控制效果

Table 2 Control effect of aquatic plant on concentration and release of phosphorus in sediment interstitial water

站点	处理	间隙水磷浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$		扩散通量/ $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$	
		DTP	SRP	DOP	SRP
D1	有植物	0.032	0.021	0.010	-0.029
	无植物	0.041	0.025	0.017	-0.011
	削减率/%	23.48	13.80	38.02	—
D2	有植物	0.058	0.038	0.021	0.005
	无植物	0.065	0.023	0.042	0.046
	削减率/%	9.96	—	50.48	—
D3	有植物	0.037	0.024	0.013	-0.020
	无植物	0.121	0.029	0.092	0.013
	削减率/%	69.35	18.45	85.49	—
D4	有植物	0.038	0.020	0.018	-0.098
	无植物	0.070	0.033	0.037	-0.041
	削减率/%	45.72	38.02	52.49	—
D5	有植物	0.073	0.062	0.010	0.022
	无植物	0.123	0.055	0.068	-0.207
	削减率/%	40.98	—	84.76	—

表 3 滇池不同湖区沉积物间隙水磷浓度配对样品 *T* 检验结果¹⁾

Table 3 Paired-Samples *T* test results of phosphorus concentration in interstitial water from sediment in different regions of Dianchi Lake

项目	DTP			SRP			DOP		
	<i>t</i>	df	Sig. (双侧)	<i>t</i>	df	Sig. (双侧)	<i>t</i>	df	Sig. (双侧)
D1 有植物-无植物	-1.210	5	0.280	-0.619	5	0.563	-1.497	5	0.195
D2 有植物-无植物	-0.240	5	0.820	3.414	5	0.019	-0.879	5	0.420
D3 有植物-无植物	-1.181	5	0.291	-1.655	5	0.159	-1.109	5	0.318
D4 有植物-无植物	-6.198	5	0.002	-2.993	5	0.030	-14.928	5	0.000
D5 有植物-无植物	-2.337	5	0.067	0.245	5	0.816	-4.689	5	0.005

1) Sig. >0.05 表示不显著; Sig. ≤0.05 表示显著

量浓度分布随深度增加比较明显,平均含量占 DTP 的 54.72%。有植物区域,不同站点(除 D2 站点)沉积物间隙水 SRP 质量浓度基本在 2~5cm 区间后随深度增加表现不太明显,而无植物区域间隙水 SRP 质量浓度则随深度增加各站点规律各异,但总体上明显高于有植物区域,说明水生植物生长对间隙水

SRP 的吸收利用极大可能地削减了间隙水 SRP 向上覆水扩散的趋势,这主要是因为间隙水 SRP 是水生植物吸收利用的主要磷形态^[22]。

溶解性有机磷 DOP 是沉积物磷释放的重要组成部分,对湖泊水体富营养化具有重要意义。有研究表明,夏季滇池湖体 DOP 的浓度平均占 DTP 的

55.30%,其中生物可利用的 DOP 所占 DTP 的比例较高^[23]. 以往研究中,水生植物主要通过根系和茎叶吸收利用无机磷,进而降低沉积物间隙水及湖泊上覆水 SRP 浓度,达到控制磷释放及净化水质的目的^[11,24],而关于水生植物与 DOP 之间的关系罕见报道. 本研究中,水生植物对滇池不同站点沉积物间隙水 DOP 的平均降解率为 62.25%. 同一站点(D1、D4 和 D5)有无植物区域沉积物间隙水 DOP 质量浓度随深度的增加呈现的规律比较明显且有植物区域沉积物间隙水 DOP 浓度的平均值均小于无植物区域,说明水生植物的生长对间隙水 DOP 的转化与降解有影响,这也证明了上面学者的研究^[19].

有研究发现^[25],底泥中含一定量的砂,将会改变底泥物理性质,在同体积条件下,降低含水率,增加底泥容重,改变底泥密度,致使底泥微生物数量和酶活性明显增加,同时促进水生植物的生长,而水生植物的生长状况又与沉积物间隙水磷浓度的吸收存在一定关系,所以说明沉积物粒径大小间接地影响着水生植物对沉积物间隙水磷浓度的吸收. 本研究中 D5 站点的含砂量>D3 和 D4>D1 和 D2,可以推测 D5 站点水生植物比较多,同时有机质含量也在各站点中最高,说明有机质的来源可能属于植物碎屑. 根据文献^[13],D5 站点上覆水藻类(叶绿素含量)相对其它站点较多,这与滇池常年盛行西南风和藻类在北部地区堆积^[26]有关. 有研究表明,藻类堆积和死亡也会导致沉积物中 OP 和 Fe/Al-P 的释放,对沉积物间隙水磷浓度造成影响^[27]. 根据研究,水生植物通过根系吸收沉积物中的生物有效磷,有效减少沉积物间隙水中磷向上覆水的扩散量^[28],而这种作用主要在根尖分布层^[22]. 又因 6 月水生植物生长较旺盛,对其沉积物以及间隙水当中的营养盐吸收作用较强^[27],滇池不同站点有植物区域间隙水各形态磷随深度的增加而表现不同变化,这可能与不同水生植物种类、分布及根系发达程度有关. 另外,水生植物根际区特殊的环境,影响着不同微生物对有机物的分解程度,尤其能加速需氧微生物对有机物的分解,以及部分底栖生物的活动等也会造成沉积物间隙水 SRP 浓度的增加^[28],这些都极有可能说明水生植物的生长间接促进了沉积物-水界面需氧微生物对有机物的降解和矿化^[29]. 有研究发现,水生植物对根际周围有机质降解产生影响^[30],而有机质可以抑制沉积物 SRP 和 DTP 的释放,促进 DOP 释放^[31],进而得出水生植物生长通过影响有机质降解来间接影响沉积物间隙水 SRP 和 DOP 的浓度变

化^[21]. 除此之外,有研究表明水生植物生长改变了底质微环境,不仅植物根系分泌物是沉积物 DOP 的重要来源之一^[32],而且植物根系还是有些活性酶的主要载体^[33]. 因此,水生植物的生长在很大程度上有可能对沉积物有机磷的矿化降解起到了促进作用.

4 结论

(1)水生植物生长对滇池不同湖区沉积物间隙水各形态磷浓度的分布影响比较明显. 除 D2 站点外,其他站点沉积物间隙水有植物区域 DTP 和 DOP 的质量浓度均低于无植物区域,而 D3 和 D4 站点两者之间差异达到显著相关. 水生植物对沉积物间隙水 SRP 质量浓度的影响因深度变化和采样站点的不同呈现的规律也各异,其总体趋势较为明显.

(2)水生植物生长对沉积物间隙水 SRP 所占比例的提高较为明显,其中 D2、D3 和 D5 站点显得尤为突出,SRP 所占比例提高了近 1 倍多,相对而言,降低了 DOP 对 DTP 的贡献率. 有植物区域沉积物间隙水 SRP 和 DOP 平均贡献分别为 67.13% 和 32.87%,无植物区域沉积物间隙水 SRP 和 DOP 平均贡献分别为 42.32% 和 57.68%.

(3)水生植物生长对沉积物-水界面各形态磷的释放控制效果比较显著. 5 个站点无植物区域沉积物间隙水 DTP 的浓度显著高于有植物区域,其中有植物区域 DTP 浓度比无植物区域削减了 9.96%~69.35%,而水生植物对沉积物间隙水 DOP 的削减效果显著高于无机磷 SRP,削减率为 38.02%~85.49%. 水生植物抑制了沉积物无机磷的释放,促进了 DOP 的转化,其中,有植物区域 SRP 沉积物-水界面扩散通量比无植物区域平均降低 39.99%.

(4)水生植物生长促进沉积物-水界面需氧微生物对有机物的降解和矿化. 本研究中水生植物显著削减了沉积物间隙水 DOP 质量浓度,进而抑制了 DTP 由沉积物间隙水向上覆水的扩散趋势,降低了沉积物磷的释放负荷. 因此,水生植物修复将作为滇池沉积物营养盐磷负荷修复的一种途径,为以后综合治理滇池污染提供一定的依据.

参考文献:

- [1] 王明华,沈全华,唐晟凯,等. 伊乐藻对黄颡鱼池塘养殖水体净化效果的试验[J]. 水生态学杂志, 2009, 30(4): 48-51.
- [2] 陈秋敏,王国祥,葛绪广,等. 沉水植物苦草对上覆水各形态磷浓度的影响[J]. 水资源保护, 2010, 26(4): 49-52, 56.

- [3] 易文利, 王圣瑞, 万红莲, 等. 外加碳源及沉水植物狐尾藻对上覆水中各形态磷浓度的影响[J]. 江西农业学报, 2011, **23**(8): 127-129.
- [4] 何佳, 陈春瑜, 邓伟明, 等. 滇池水-沉积物界面磷形态分布及潜在释放特征[J]. 湖泊科学, 2015, **27**(5): 799-810.
- [5] 高丽, 周健民. 磷在富营养化湖泊沉积物-水界面的循环[J]. 土壤通报, 2004, **35**(4): 512-515.
- [6] 张润宇, 王立英, 吴丰昌, 等. 太湖春季沉积物间隙水中磷的分布特征及界面释放的影响[J]. 生态学杂志, 2012, **31**(4): 902-907.
- [7] Søndergaard M, Phillips G, Hellsten S, *et al.* Maximum growing depth of submerged macrophytes in European lakes [J]. *Hydrobiologia*, 2013, **704**(1): 165-177.
- [8] 王立志. 两种沉水植物对间隙水磷浓度的影响[J]. 生态学报, 2015, **35**(4): 1051-1058.
- [9] 王震宇, 温胜芳, 邢宝山, 等. 4 种水生植物根际磷素耗竭效应的比较[J]. 环境科学, 2008, **29**(9): 2475-2480.
- [10] 吴振斌, 邱东茹, 贺锋, 等. 沉水植物重建对富营养水体氮磷营养水平的影响[J]. 应用生态学报, 2003, **14**(8): 1351-1353.
- [11] 包先明, 陈开宁, 范成新. 沉水植物生长对沉积物间隙水中的氮磷分布及界面释放的影响[J]. 湖泊科学, 2006, **18**(5): 515-522.
- [12] 汪森, 严红, 焦立新, 等. 滇池沉积物氮内源负荷特征及影响因素[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(1): 218-226.
- [13] 丁帅, 焦立新, 王圣瑞, 等. 滇池水生植物分布对沉积物间隙水中不同形态氮的影响[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(5): 700-707.
- [14] 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. 254-279.
- [15] 孟亚媛, 王圣瑞, 焦立新, 等. 滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力[J]. 环境科学, 2015, **36**(2): 471-480.
- [16] Kaspar H F, Asher R A, Boyer I C. Microbial nitrogen transformations in sediments and inorganic nitrogen fluxes across the sediment/water interface on the South Island West Coast, New Zealand[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1985, **21**(2): 245-255.
- [17] Ullman W J, Sandstrom M W. Dissolved nutrient fluxes from the nearshore sediments of bowling Green bay, central great barrier reef lagoon (Australia) [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1987, **24**(3): 289-303.
- [18] 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.
- [19] 宋康, 王国祥, 王文林, 等. 菹草生长对沉积物间隙水中各形态磷浓度的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2012, **28**(2): 165-170.
- [20] 马凯, 蔡庆华, 谢志才, 等. 沉水植物分布格局对湖泊水环境 N、P 因子影响[J]. 水生生物学报, 2004, **27**(3): 232-237.
- [21] 易文利. 有机质对磷素在沉积物—水—沉水植物间迁移转化的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008. 42-45.
- [22] 赵海超, 王圣瑞, 罗永华, 等. 沉水植物对不同层次沉积物及土壤中磷迁移的影响[J]. 水土保持学报, 2007, **21**(5): 10-14.
- [23] 熊强. 滇池不同来源有机磷特征及其生物有效性[D]. 南昌: 南昌大学, 2014. 12-27.
- [24] Monbet P, McKelvie I D, Worsfold P J. Dissolved organic phosphorus speciation in the waters of the Tamar Estuary (SW England) [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, **73**(4): 1027-1038.
- [25] 张俊, 朱伟, 操家顺, 等. 水体底质异质性对沉水植物生长的影响[J]. 水资源保护, 2006, **22**(4): 44-46.
- [26] 李振国, 王国祥, 马久远, 等. 马来眼子菜群丛对太湖不同湖区沉积物磷形态的影响[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(7): 1872-1877.
- [27] 万能, 宋立荣, 王若南, 等. 滇池藻类生物量时空分布及其影响因子[J]. 水生生物学报, 2008, **32**(2): 184-188.
- [28] 黎颖治, 夏北成. 影响湖泊沉积物-水界面磷交换的重要环境因子分析[J]. 土壤通报, 2007, **38**(1): 162-166.
- [29] Gächter R, Meyer J S, Mares A. Contribution of bacteria to release and fixation of phosphorus in lake sediments [J]. *Limnology and Oceanography*, 1988, **33** (6part2): 1542-1558.
- [30] 杨春霞. 有机质及沉水植物对湖泊沉积物界面氮磷矿化与赋存的影响[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2009. 12-15.
- [31] 易文利. 湖泊沉积物中有机质含量对释放磷的影响[J]. 科学技术与工程, 2011, **11**(26): 6401-6404.
- [32] 莫妙兴. 沉水植物在富营养化水体中的环境效应研究[D]. 南京: 河海大学, 2007. 5-6.
- [33] 徐会玲. 两种沉水植物的净水功能及其对根际沉积物中磷的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009. 5-8.

CONTENTS

Scavenging Effect of Rime and East Wind on PM _{2.5} Under Air Heavy Pollution in Beijing	SUN Zhao-bin, LIAO Xiao-nong, WANG Zhan-shan, <i>et al.</i> (3679)
Impact of Collision Removal of Rainfall on Aerosol Particles of Different Sizes	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (3686)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of VOCs During the Haze Period in the Winter in Beijing	LIU Dan, XIE Qiang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (3693)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Shoe-making Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, YAO Yi, CAI Wei-dan, <i>et al.</i> (3702)
Oxidative Capacity of the PM ₁₀ and PM _{2.5} in Beijing During 2014 APEC	GUO Qian, SHAO Long-yi, WANG Wen-hua, <i>et al.</i> (3708)
Concentration, Water-Soluble Ionic and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Composition and Sources of PM _{2.5} During Summer in Hongshan District, Wuhan	SUN Yan, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (3714)
Statistical Characteristics of Urban Changzhou PM _{2.5} Based on <i>k</i> -means Analysis	WANG Zhen, YU Yi-jun, XU Pu-qing, <i>et al.</i> (3723)
Comparison Test Between On-line Monitoring of Water-soluble Ions and Filter-based Manual Methods for PM _{2.5}	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, SHI Ai-jun, <i>et al.</i> (3730)
Chemical Composition of Water-soluble Ions in Smoke Emitted from Tree Branch Combustion	LIU Gang, HUANG Ke, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (3737)
Number Concentration and Size Distribution of Particles Emitted by Light-duty Gasoline Vehicles	FAN Xiao-xiao, JIANG Jing-kun, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (3743)
Testbed-Based Exhaust Emission Factors for Marine Diesel Engines in China	XING Hui, DUAN Shu-lin, HUANG Lian-zhong, <i>et al.</i> (3750)
Distribution, Source and Human Exposure of Phthalic Acid Esters (PAEs) in Surface Dust in Urban Area of Xi'an City, China	ZHANG Wen-juan, WANG Li-jun, WANG Li, <i>et al.</i> (3758)
Mercury Emission Characteristics and Mercury Concentrations of Municipal Solid Waste in Waste Incineration Plants	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (3766)
Role of Sulfate-Reducing Bacteria in Mercury Methylation in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Rui, CHEN Hua, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3774)
Impact of Urbanization on the Sources of Dissolved <i>n</i> -alkane in Underground River	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (3781)
Source Apportionment and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water from Yangtze River, China; Based on PMF Model	WANG Cheng-long, ZOU Xin-qing, ZHAO Yi-fei, <i>et al.</i> (3789)
Hydro-chemical Characteristics and Quality Assessment of Surface Water in Gongga Mountain Region	HE Xiao-li, WU Yan-hong, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (3798)
UV-Visible Spectra Properties of DOM from Taizi River in Benxi City Section by Multivariable Analysis	QIAN Feng, WU Jie-yun, YU Hui-bin, <i>et al.</i> (3806)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter in Groundwater and Its Cause	HE Xiao-song, ZHANG Hui, HUANG Cai-hong, <i>et al.</i> (3813)
Sediment Characteristics of Sewer in Different Functional Areas of Kunming	CHANG Hai-dong, JIN Peng-kang, FU Bo-wen, <i>et al.</i> (3821)
Concentration of Phosphorus in Sediments Interstitial Water as Affected by Distribution of Aquatic Plants in Dianchi Lake	DING Shuai, WANG Sheng-rui, ZHANG Rui, <i>et al.</i> (3828)
Efficiency and Mechanism of Capping with Purple Parent Rocks to Control Phosphorus Release from Sediments	HUANG Xue-jiao, SHI Wen-hao, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (3835)
Temporal and Spatial Distribution of Phosphorus in Paddy Fields Under Cyclic Irrigation of Drainage Water	JIAO Ping-jin, XU Di, ZHU Jian-qiang, <i>et al.</i> (3842)
GO/QPEI Nanocomposite for Fast and High-capacity Removal of <i>M. Aeruginosa</i>	LI Jie, XIAO Lin (3850)
Enhanced Pollutant Removal Performance of an Integrated Biological Settling Tank from Micro-polluted Water Bodies	WANG Wen-dong, LIU Hui, MA Cui, <i>et al.</i> (3858)
Odorants Removal and Microbial Characteristics in Treatment of Micro-polluted Source Water with Biological Powdered Activated Carbon-Ultrafiltration Combined Process	XUAN Yong-qi, ZHOU Li, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (3864)
Effect of Polysilicic Acid on the Deposition Behavior of Different Aluminum Species	ZHAO Yuan-yuan, ZHANG Yue, LI Su-ying, <i>et al.</i> (3870)
Concentration Variation and Removal of Amino Acids in Typical Drinking Sources in the South of China	LIU Wei, CAI Guang-qiang, LU Xiao-yan, <i>et al.</i> (3877)
Degradation of the Nitrogenous Heterocyclic Compound Quinoline by O ₃ /UV	CHEN Ao-lei, CHANG Feng-min, WANG Cui-ping, <i>et al.</i> (3884)
Impact of Anthraquinone-2-sulfonic Acid on the MO Decolorization, Hydrogen Production and Energy Creation During Anaerobic Fermentation of <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 with Sucrose	HU Jin-mei, YU Lei, HUANG Tian-yin (3891)
Classification and Analysis of Dissolved Organic Matter in 2-Buternal Manufacture Wastewater	SUN Xiu-mei, SONG Guang-qing, XI Hong-bo, <i>et al.</i> (3899)
Concentration of Nitrate in Main Anoxic Stage and PHA, TP Metabolism for Nitrogen and Phosphorus Removal in Single Sludge System with Continuous Flow	WANG Xiao-ling, YUAN Dong-dan, BAI Li, <i>et al.</i> (3906)
Distribution Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Bacteria in Sediments from the Adjacent Seas of Yangtze Estuary	FU Lu-lu, ZHEN Yu, HE Hui, <i>et al.</i> (3914)
Bacterial Community Composition of Activated Sludge from Coking Wastewater	MENG Xiao-jun, LI Hai-bo, CAO Hong-bin, <i>et al.</i> (3923)
Soil Bacterial Communities Under Different Vegetation Types in the Loess Plateau	LIU Yang, HUANG Yi-mei, ZENG Quan-chao (3931)
Effects of Phenol on Activity and Microfauna Community Structure of Activated Sludge	HU Xiao-bing, RAO Qiang, TANG Su-lan, <i>et al.</i> (3939)
Comparative Investigation of Antibiotic Resistance Genes Between Wastewater and Landfill Leachate	HUANG Fu-yi, LI Hu, AN Xin-li, <i>et al.</i> (3949)
Performance and Influencing Factors of Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium Process by the Strain <i>Desulfonitrospira</i> sp. CMX	XIE Bing-ke, ZHANG Yu, WANG Xiao-wei, <i>et al.</i> (3955)
Effect of Straw Incorporation and Domestic Sewage Irrigation on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	XU Shan-shan, HOU Peng-fu, FAN Li-hui, <i>et al.</i> (3963)
Seasonal Effect of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Respiration and Soil Enzyme Activity in Masson Pine Forest in Mt. Jinyun, Chongqing, China	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Biochar Amendment and Irrigation on Denitrification Losses in Greenhouse Tomato Fields	ZHANG Wen-juan, SHE Dong-li, Gamareldawla H. D. Agbna, <i>et al.</i> (3979)
Effects of Soil Texture on Autotrophic CO ₂ Fixation Bacterial Communities and Their CO ₂ Assimilation Contents	WANG Qun-yan, WU Xiao-hong, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3987)
Simulation of the Absorption, Migration and Accumulation Process of Heavy Metal Elements in Soil-crop System	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (3996)
Synergetic Control of Bioavailability of Pb, Cd and As in the Rice Paddy System by Combined Amendments	WANG Ying-jie, ZOU Jia-ling, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (4004)
Effects of Different Organic Materials on Bio-availability of Cd, Pb in a Contaminated Greenhouse Soil	ZHOU Gui-yu, JIANG Hui-min, YANG Jun-cheng, <i>et al.</i> (4011)
Effect of Montmorillonite on Fractions and Availability of Phosphorus in Soils Applied with Organic Fertilizer	SONG Xian-wei, ZHAO Xiu-lan, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4020)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Uptake by Chinese Cabbage at Different Soil pH and Cadmium Levels	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4030)
Characterization of Cr Tolerance and Accumulation in <i>Lolium perenne</i> L. and <i>Pharbitis purpurea</i> (L.) Voigt	DONG Bing-bing, CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, <i>et al.</i> (4044)
<i>In vitro</i> Metabolism of Volatile Methyl Siloxanes	LI Min-dan, ZHENG Guo-mao, WAN Yi, <i>et al.</i> (4054)
Efficiency of Aerobic Co-composting of Urban Sludge and Chinese Medicinal Herbal Residues	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, RUAN Qi-hua, <i>et al.</i> (4062)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年10月15日 第37卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 10 Oct. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行