

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第4期

Vol.35 No.4

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2008 ~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析 王洪强,贺千山,陈勇航,亢燕铭 (1215)

乌鲁木齐市东南郊一次降雪过程的化学组成及其悬浮态颗粒形态特征 陆辉,魏文寿,崔彩霞,何清,王瑶 (1223)

典型地区大气中多溴联苯醚和新型溴代阻燃剂的水平及组成分布 吴辉,金军,王英,李明圆,何松洁,徐萌,孙一鸣 (1230)

某焦化厂周边大气 PM₁₀ 重金属来源及健康风险评价 董婷,李天昕,赵秀阁,曹素珍,王贝贝,马瑾,段小丽 (1238)

基于车流和大气污染物浓度同步增量的机动车平均排放因子估算方法 李润奎,赵彤,李志鹏,丁文军,崔晓勇,许群,宋现锋 (1245)

珠江三角洲地区硫和氮沉降临界负荷研究 孙成玲,谢绍东 (1250)

低温等离子体-生物法处理硫化氢气体研究 李华琴,何觉聪,陈洲洋,黎宝仁,黄倩茹,张再利,魏在山 (1256)

太子河流域莠去津的空间分布及风险评价 郑磊,张依章,张远,朱鲁生,王志强 (1263)

一种大批量测定沉积物微量间隙水样品中溶解态磷和铁含量的方法 王燕,朱春刚,许笛,丁士明 (1271)

外源营养盐输入后水体中营养盐浓度的时空变化 傅玲,赵凯,王国祥,欧媛,范娟,毛丽娜,张佳,韩睿明 (1278)

基于物理过程的矿区地下水污染风险评价 孙法圣,程品,张博 (1285)

重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究 杨平恒,卢丙清,贺秋芳,陈雪彬 (1290)

重庆老龙洞地下河流域氮、磷及微生物污染调查研究 蓝家程,杨平恒,任坤,陈雪彬,徐昕,胡宁 (1297)

苦草 (*Vallisneria spiralis*) 根系对沉积物中各形态磷的影响 李振国,王国祥,张佳,马久远,魏宏农,俞振飞 (1304)

循环廊道湿地中氮归趋过程模拟研究 彭剑峰,宋永会,袁鹏,张雪妍,胡小明 (1311)

不同环境因素下太湖中四环素的自然消减 段伦超,王凤贺,纪莹雪,张帆,赵斌,王国祥 (1318)

再生水中 5 种抗生素抗性菌的紫外线灭活及复活特性研究 黄晶晶,汤芳,席劲璇,庞宇辰,胡洪营 (1326)

二级处理出水的 UV-TiO₂ 消毒及大肠杆菌和粪肠球菌复活试验 王西峰,龚昕,胡晓莲,任伯帜 (1332)

水中 C₆₀ 纳米颗粒的稳定性研究 方华,沈冰冰,荆洁,陆继来,王媛 (1337)

XDLVO 理论解析不同离子条件下海藻酸钠微滤膜污染 赵应许,纵瑞强,高欣玉,谢慧君,殷永泉,梁爽 (1343)

纳米零价铁催化过氧化氢强化修复 4-氯硝基苯污染地下水的研究 付融冰 (1351)

共存氯苯类同系物对六氯苯厌氧降解活性的影响 王琪,刘辉,姜林,唐军 (1358)

硫酸盐还原生物滤池对含镉废水去除效果试验研究 吴宣,谭科艳,胡希佳,顾远,杨宏 (1366)

基于氮平衡原理对南方污水处理厂中试脱氮工艺调控策略研究 姜应和,刘佩炬,王磊,田中凯,刘小英 (1372)

模拟电镀污泥阴离子浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响 陈燕,黄芳,谢鑫源 (1377)

电活性生物膜介导 Cu²⁺ 生物还原的试验研究 刘毅,周顺桂,袁勇,刘志 (1384)

模拟废旧线路板生物浸出液中铜的回收 程丹,朱能武,吴平霄,邹定辉,邢翊佳 (1391)

填埋垃圾浸提液与地下水污染物组成差异及成因 何小松,余红,席北斗,崔东宇,潘红卫,李丹 (1399)

化学合成施氏矿物与 H₂O₂ 共存体系下光化学处理垃圾渗滤液的研究 王鹤茹,宋永伟,徐峙辉,崔春红,周立祥 (1407)

处理 BPA 模拟废水的 SBR 工况参数对污泥有机毒性的影响研究 杨娜,陈秀荣,林逢凯,黄华,章斐,赵骏,丁毅 (1414)

剩余污泥厌氧消化甲烷生成势与产甲烷菌群多样性的比较研究 董慧岭,季民 (1421)

锰氧化菌 *Aminobacter* sp. H1 的分离鉴定及其锰氧化机制研究 晏平,姜理英,陈建孟,何智敏,肖少丹,蒋铁锋 (1428)

1 株铁基质自养反硝化菌的脱氮特性 王弘宇,杨开,张倩,季斌,陈丹,孙宇翀,田俊 (1437)

碘普罗胺降解菌 *Pseudomonas* sp. I-24 共代谢降解性能研究 徐冰洁,高品,薛昱,何梦琦,吴凡 (1443)

利用流式细胞术研究鞘氨醇单胞菌 GY2B 降解非过程中细菌表面特性的变化 张梦露,党志,伍凤姬,梁旭军,郭楚玲,卢桂宁,杨琛 (1449)

毒性有机物 BPA 与普通小球藻的相互影响特性研究 陈善佳,陈秀荣,闫龙,赵建国,章斐,江子建 (1457)

缺镁胁迫对普通小球藻光合生理及油脂积累的影响 王珊,赵树欣,魏长龙,于水燕,史吉平,张保国 (1462)

微囊藻毒素对水稻根系生长和抗氧化系统的影响 王妮敏,邓琦,邹华,梁婵娟 (1468)

东北春大豆品种东生 1 号对臭氧胁迫的响应 张巍巍,王光华,王美玉,刘晓冰,冯兆忠 (1473)

生物结皮的发育演替与微生物生物量变化 吴丽,张高科,陈晓国,兰书斌,张德禄,胡春香 (1479)

老化土壤中铅对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响 陈丽红,刘征涛,方征,王晓南,王婉华 (1486)

土壤重金属镉标准值差异比较研究与建议 赵晓军,陆泗进,许人骥,李伯苓,吴国平,魏复盛 (1491)

藏北可可西里地区土壤元素背景值研究 柏建坤,王建力,李潮流,康世昌,陈鹏飞 (1498)

三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析 胥焘,王飞,郭强,聂小倩,黄应平,陈俊 (1502)

浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析 厉炯慧,翁珊,方婧,黄佳蕾,陆芳华,卢宇浩,张洪铭 (1509)

西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征 张海珍,唐宇力,陆骏,周虹,徐芸茜,陈川,赵赞,王美娥 (1516)

生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价 解惠婷,张承中,徐峰,李海凤,田振宇,唐琛,刘文彬 (1523)

上海滴水湖周边土壤和沉积物对磷的吸附特征 诸葛祥真,毕春娟,陈振楼,张焕焕,倪玮怡 (1531)

SDBS/Na⁺ 对红壤胶体悬液稳定性的影响 唐颖,李航,朱华玲,田锐,高晓丹 (1540)

稳定化处理对矿渣中重金属迁移转化的影响研究 赵述华,陈志良,张太平,潘伟斌,彭晓春,车融,欧英娟,雷国建,周鼎 (1548)

藻类水体 Cd²⁺ 毒性快速监测新方法研究 段静波,刘文清,张玉钧,赵南京,殷高方,肖雪,余晓娅,方丽 (1555)

用于 1,3-二硝基苯快速检测的免疫传感器研究 龙峰,施汉昌,王洪臣,盛建武 (1561)

Mg/Al 水滑石微波共沉淀法合成及其对 BrO₃⁻ 吸附性能的研究 钟琼,李欢 (1566)

污染场地修复决策支持系统的几个关键问题探讨 廖晓勇,陶欢,阎秀兰,赵丹,林龙勇,李尤 (1576)

城市区域土壤铅含量空间变异的多尺度研究进展 杨孟,李凤英,刁一伟,吴丹 (1586)

水中细菌内毒素污染特性及检测方法研究进展 张灿,刘文君,张明露,田芳,杨毅,安代志 (1597)

六价铬细菌还原的分子机制研究进展 李斗,赵由才,宋立岩,尹雅洁,王洋清,徐中慧 (1602)

农副食品加工工业高浓度废水的厌氧膜生物反应器技术 魏源送,郁达伟,曹磊 (1613)

《环境科学》征稿简则(1427) 《环境科学》征订启事(1497) 信息(1383, 1390, 1398, 1560)

苦草 (*Vallisneria natans*) 根系对沉积物中各形态磷的影响

李振国^{1,2}, 王国祥^{1*}, 张佳¹, 马久远¹, 魏宏农¹, 俞振飞¹

(1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023; 2. 湖南科技大学建筑与城乡规划学院, 湘潭 411201)

摘要: 采用磷分级提取的方法研究苦草 (*Vallisneria natans*) 生长过程中根系分布与沉积物不同形态磷和总磷的变化过程. 在实验开始后 20、50、80 d, 分别测定苦草根系在沉积物的分布及沉积物中各形态磷的垂直变化. 结果表明, 苦草根系在实验装置中垂直分布在 0~14 cm 区域内. 平均每株苦草根系根数为 58 条, 平均根长为 5.86 cm. 苦草根系生物量在沉积物深度 0~3、4~6、7~10、11~14 cm 分配的质量分数分别为 45.99%、32.75%、16.03%、5.23%. 沉积物中总磷 (TP), NaOH 提取磷 (NaOH-P) 和有机磷 (OP) 含量在苦草根系分布集中区域内显著降低 ($P < 0.05$). HCl 提取磷 (HCl-P) 和无机磷 (IP) 的含量无显著差异 ($P > 0.05$).

关键词: 苦草; 根系; 沉积物; 磷形态; 垂直分布

中图分类号: X173 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)04-1304-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.04.014

Effects on Phosphorus Fraction Distribution in Sediment by Roots of *Vallisneria natans*

LI Zhen-guo^{1,2}, WANG Guo-xiang¹, ZHANG Jia¹, MA Jiu-yuan¹, WEI Hong-nong¹, YU Zhen-fei¹

(1. College of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. School of Architecture and Urban Planning, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The present study explored phosphorus fractions in sediments with the growth of *Vallisneria natans*. Sediment samples in different layers were collected at 20, 50 and 80 d, and vertical change of several phosphorus fractions were measured in the samples. The root distributions and biomass of the *V. natans* were measured. Our results showed that roots were distributed between 0 and 14 cm in the experimental device. The average number of roots and average root length were 58 and 5.86 cm. After 80 days growth, the percentage of *V. natans* root biomass were 45.99%, 32.75%, 16.03% and 5.23% in the sediment with depths of 0-3, 4-6, 7-10 and 11-14 cm. Total phosphorus (TP) content, phosphorus extracted by NaOH (NaOH-P), and organic phosphorus (OP) levels remarkably decreased ($P < 0.05$) in the area with a high concentration of tape grass roots. The content of phosphorus extracted by HCl (HCl-P), and inorganic phosphorus (IP), showed no significant difference ($P > 0.05$). The results suggest that *V. natans* root affects the migration and transformation of phosphorus species in the sediment.

Key words: *Vallisneria natans*; root; sediment; phosphorus fraction; vertical distribution

根系不仅可以固定、支撑植物体, 从土壤溶液中吸收水分和矿物质, 储存碳水化合物; 而且可以进行多种生物化学反应, 影响根际微环境^[1, 2]. 沉水植物的茎叶可以直接从水中吸收水分和养分, 因此根系通常不发达, 主要起锚定植物体的作用^[3, 4]. Waisel 等^[5]研究发现沉水植物的根系对植物正常生长至关重要. Bole 等^[6]研究者发现水生维管植物的根系可以吸收磷和其他营养盐, 并在植物体内传输, 在水中磷浓度小于 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 沉水植物主要从沉积物中获取磷^[7-10]. 利用³²P 标记的研究也揭示出, 沉水植物主要通过根系吸收沉积物中的磷素^[11]. 沉积物中的磷与铁、铝、钙等元素以不同形式结合成各种形态的化合物, 不同结合态的磷具有不同的地球化学行为^[12]. 沉水植物对于不同形态磷

的影响受到了研究者们越来越多的关注, 明确了沉水植物对沉积物中松散结合态磷^[13]及 Fe、Al 结合态磷有显著影响, 对于有机磷中的活性有机磷有显著影响, 对其他形态的磷影响不显著^[14, 15].

苦草是一种多年生草本根生沉水植物, 广泛分布于我国淡水湖泊与河流中. 苦草具有发达的须根, 可以适应多种不同类型的基质^[16, 17], 因此在水环境修复工程中大量使用^[18, 19]. 本实验在温室模拟条件

收稿日期: 2013-05-07; 修订日期: 2013-10-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40873057, 41173078); 科技部国际合作项目 (2010DFB33960); 江苏省科技支撑计划项目 (BE2011690); 江苏省太湖水环境治理专项 (TH2011207)

作者简介: 李振国 (1980~), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为环境地理学和水生态环境修复, E-mail: zhenguo_li@126.com

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

下,使用湖泊沉积物培养苦草,比较随着苦草根系的发育,沉积物不同层次中各形态磷的变化,通过揭示沉水植物根系作用下沉积物中磷的迁移规律,以期利用沉水植物修复富营养湖泊提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

沉积物采自南京师范大学内的池塘,用彼得森采泥器采集表层沉积物,去除杂质及动植物残体,过筛(孔径 1 mm)3 次,使其理化性质均匀一致,筛好的沉积物加水静置一周后备用。苦草种子采自南京固城湖,将种子平铺在细沙上,上覆 1 cm 深稀释 10 倍的 Hoagland 营养液,置于光照培养箱中(25℃ ± 2℃)使其萌发。

1.2 实验设计

将混匀后的沉积物放入一端密封的不透明高密度聚乙烯管(直径 × 高 = 10 cm × 25 cm),沉积物厚度为 20 cm,将管体放入一个容积较大的不透明聚乙烯桶(顶直径 × 底直径 × 高 = 155 cm × 135 cm × 105 cm,预先经过 5% 的 HCl 处理后用蒸馏水冲洗干净),缓慢注入 100 cm 深自来水。实验系统稳定 10 d 后栽种苦草。将苦草幼苗用蒸馏水冲洗干净后栽种于盛有沉积物的聚乙烯管中,每管栽种 3 株,栽种深度为 0.5 cm,栽种位置为实验管体中央。实验设置每次采集 6 个平行样。其中 3 个平行用来分析苦草根系生长状况,另外 3 个用来研究苦草对沉积物磷空间分布的影响,设置不种植物的聚乙烯管做对照。实验桶放置在南京师范大学水环境生态修复平台温室内。实验所采用沉积物与水体理化指标如表 1。

1.3 分析方法

实验开始后分别在 20、50、80 d 采样,每次取 6 个苦草处理,3 个对照处理。每次采样后,将其中 3 个平行管体中沉积物及苦草取出,用水小心冲洗附着沉积物,并将苦草根系置于超声波振荡器中振荡,以去除根系附着沉积物。用滤纸吸掉植物表面水分后,将植物的根、茎和叶分离,105℃ 杀青 2 h 后,80℃ 烘干至恒重,测定植物生物量。根数量、根长度统计测量参考文献[16]的方法。

将另外 3 个苦草实验管和对照管低温(-75℃)冷冻 48 h。将冷冻好的沉积物按每层 2 cm 纵向切割。将切割后的样品于室温风干后,去除植物根系过 100 目筛,置于密封袋中备用。

沉积物中磷形态的分析采用 Ruban 等^[20]在欧

洲标准测试委员会框架下发展的 SMT 分离方法。该方法分别采用 NaOH 和 HCl 提取获得 5 种形态磷,各形态磷间相互干扰小,是目前普遍应用的淡水沉积物磷研究方法。

表 1 实验系统初始状态水体理化指标¹⁾

项目	指标	含量
沉积物磷形态/mg·kg ⁻¹	TP	988.24 ± 38.83
	NaOH-P	298.07 ± 4.81
	HCl-P	337.33 ± 13.94
	IP	637.31 ± 19.51
	OP	330.70 ± 54.02
沉积物各粒径所占质量分数/%	0.01 ~ 2.00 μm	9.29
	2.00 ~ 20.00 μm	60.21
	20.00 ~ 2000.00 μm	30.5
	> 2000.00 μm	0
水/mg·L ⁻¹	TP	0.08 ± 0.01
	DTP	0.07 ± 0.01
	SRP	0.01 ± 0.00
	DOP	0.06 ± 0.01
	TN	1.25 ± 0.11
	NH ₄ ⁺ -N	0.18 ± 0.02
	NO ₃ ⁻ -N	0.09 ± 0.00
	DO	9.50 ± 0.41
	pH	7.60 ± 0.12

1) 表中数据为平均值 ± 标准差(n = 3),缩写代表为 TP = 总磷,NaOH-P = NaOH 提取磷,HCl-P = HCl 提取磷,IP = 无机磷,OP = 有机磷,DTP = 溶解性总磷,SRP = 溶解性活性磷,DOP = 溶解性有机磷,TN = 总氮,NH₄⁺-N = 氨氮,NO₃⁻-N = 硝酸盐氮,DO = 溶解氧

2 结果与分析

2.1 苦草根系在沉积物中的分布特征

实验 80 d,平均每株根数为 58 条,苦草根系长度总和为 339.70 cm,最大根长 28.50 cm,根系平均长度 15.86 cm,根系长度的众数为 8.00 cm(表 2),从统计分析来看苦草根系的分布特征是根短而数量众多。苦草根系生物量在 0 ~ 3 cm、4 ~ 6 cm、7 ~ 10 cm、11 ~ 14 cm 分配的质量分数分别为 45.99%、32.75%、16.03%、5.23%。根系生物量主要集中在深度 0 ~ 6 cm 内,占根系总生物量的 78.74%;在 7 ~ 14 cm 仅分布 21.26% 的根系生物量。

2.2 苦草根系对沉积物各形态磷的垂直分布的影响

实验期间沉水植物苦草不同程度地降低了沉积物中各形态磷的含量。苦草在不同生长阶段对沉积物各形态磷产生不同影响。在苦草生长早期实验开始后 20 d,沉积物中各形态磷的差异性均不显著(P > 0.05),在苦草旺盛生长期实验开始后 60 d 沉积物中各形态磷有明显下降。苦草根系分布在垂直方

向上集中在 0~6 cm 区域内. 苦草根系几乎垂直向下分布, 无明显弯曲, 这应该和沉积物实验前经过筛选, 无大型颗粒物阻挡有关. 方差分析表明, 实验结束时 (80 d) 沉积物 TP 在苦草根系集中分布区域内 (0~6 cm) 的含量显著低于苦草根系集中分布区域外部 (7~14 cm) ($P < 0.05$). 实验期间在垂直方向上沉积物表层 TP 含量在 0~6 cm 处根系集中分布区域内迅速降低, 从初始时的 $1011.36 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降至 830.63

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 沉积物底层 TP 的含量在垂直方向上 11 cm 处根系内外交界区域缓慢升高, 从 $974.84 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 升至 $996.10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 1). 因此, 在苦草根系分布区域内沉积物 TP 的含量显著低于非根系分布区, TP 的含量在根系集中分布区与非根系集中分布区交界处存在显著波动. 对照组总磷在初始的 20 d 里明显下降, 从初始的 $1011.36 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降至 $720 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 之后下降趋势变缓并逐渐稳定.

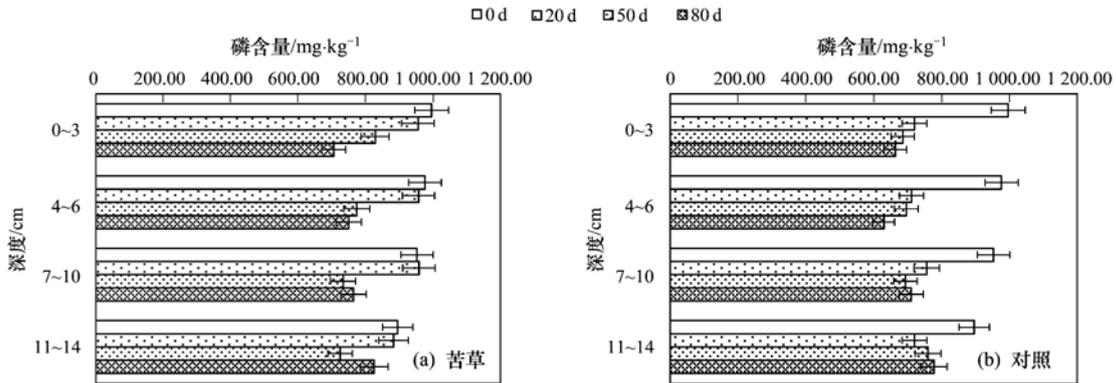


图 1 苦草根系对沉积物 TP 垂直分布的影响

Fig. 1 Effects of *V. natans* roots on TP vertical distribution in sediment

NaOH-P 在苦草根系集中分布区域内的含量显著低于非根系集中分布区域 ($P < 0.05$). 实验期间在根系集中分布区域 NaOH-P 的含量迅速降低, 从 $290.09 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降低至 $207.02 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 2). 在垂直方向上根系集中区域 (0~6 cm) NaOH-P 含量迅速降低, 在苦草根系集中分布区域内 (0~6 cm) 的含量显著低于苦草根系分布区域外部 (7~14 cm) ($P < 0.05$). 沉积物底

层 NaOH-P 的含量在垂直方向上 7 cm 处根系内外交界区域缓慢降低, 从 $296.54 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降至 $248.03 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 对照组 NaOH-P 的含量呈缓慢下降趋势, 从 $298.98 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降至 $216.10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 对照组 NaOH-P 在实验开始后 20 d 明显下降, 从初始的 $298.98 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 下降到 $251.90 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 之后稳定下来, 80 d 时又出现一次明显下降.

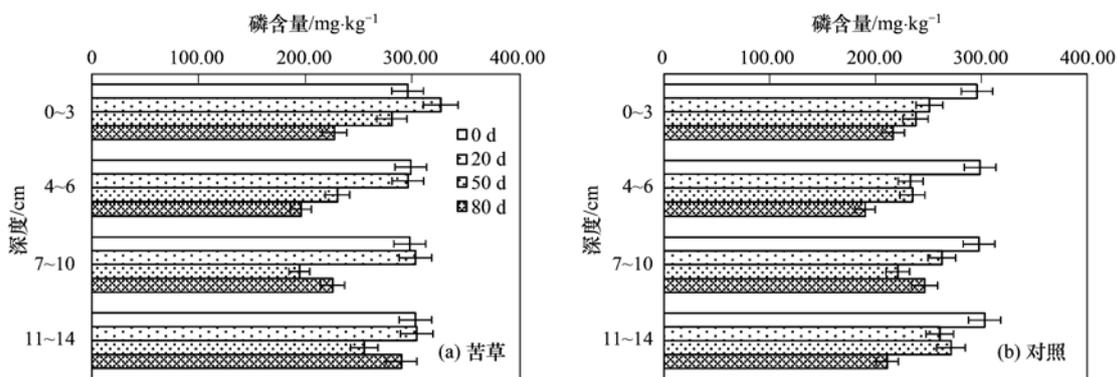


图 2 苦草根系对沉积物 NaOH-P 垂直分布的影响

Fig. 2 Effects of *V. natans* roots on NaOH-P vertical distribution in sediment

苦草根系集中分布区域内与非根系集中分布区中沉积物 HCl-P 含量无显著性差异 ($P > 0.05$). HCl-P 含量在沉积物空间上变化相对缓和, 在苦草根系内外分布区域均保持在 $350.00 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右 (图 3). 对

照组 HCl-P 在实验开始 20 d 后呈下降趋势, 从初始的 $336.06 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 下降到 $293.75 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 之后稳定下来, 80 d 时出现一次明显上升.

实验结束后, OP 在苦草根系分布区域内的含量

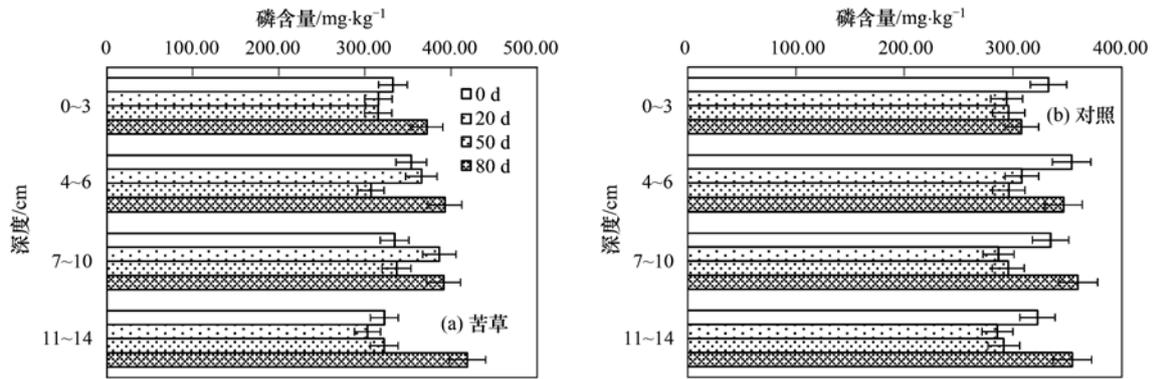


图3 苦草根系对沉积物 HCl-P 垂直分布的影响

Fig. 3 Effects of *V. natans* roots on HCl-P vertical distribution in sediment

显著低于非根系分布区域 ($P < 0.05$), 而 IP 在根系分布区域内外无显著性差异 ($P > 0.05$). 实验期间 OP 的含量迅速降低, 从 $314.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低至 $205.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 在垂直方向上沉积物表层 OP 含量在 6 cm 处根系集中分布区域内外交界区域迅速降低 ($361.78 \sim 256.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) (图 4). 沉积物底层 IP 的含量在垂直方向上 14 cm 处缓

慢升高 ($659.28 \sim 690.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) (图 5). OP 的含量在苦草根系内外空间分布上变化缓和, 在 $330.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间波动. 对照组 IP 和 OP 在实验 20 d 后明显下降, 分别从初始的 $640.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $314.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下降到 $531.61 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $295.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 之后下降趋势变缓并逐渐稳定.

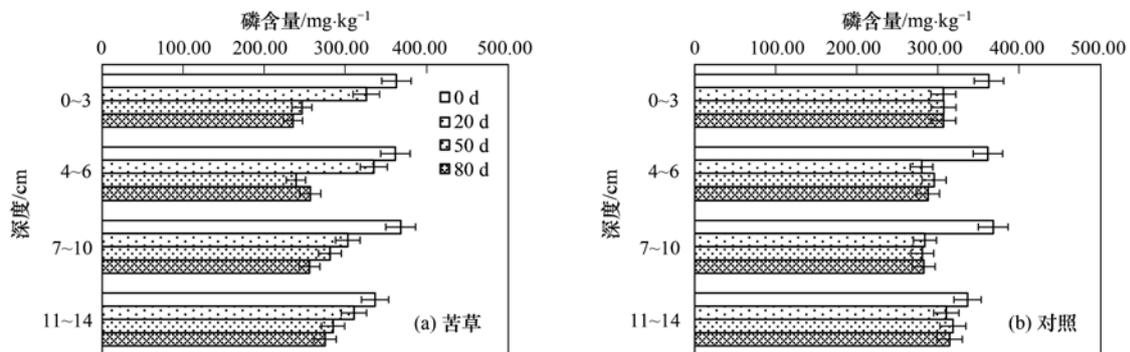


图4 苦草根系对沉积物 OP 垂直分布的影响

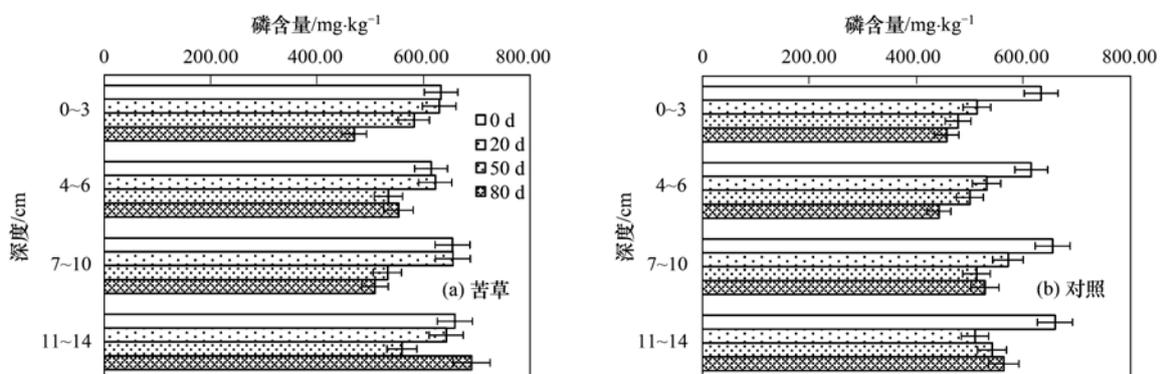
Fig. 4 Effects of *V. natans* roots on OP vertical distribution in sediment

图5 苦草根系对沉积物 IP 垂直分布的影响

Fig. 5 Effects of *V. natans* roots on IP vertical distribution in sediment

3 讨论

3.1 苦草根系对 TP 空间分布的影响

表 2 苦草组沉积物各形态磷之间相关系数矩阵¹⁾

Table 2 Matrix of correlation coefficients among different phosphorus fractions in sediment

	TP	OP	IP	NaOH-P	HCl-P
TP	1				
OP	0.790**	1			
IP	0.775**	0.672*	1		
NaOH-P	0.859**	0.682*	0.802**	1	
HCl-P	-0.058	-0.124	0.099	-0.177	1

1) * 表示相关性在 0.05 水平显著(双侧检验), ** 表示相关性在 0.01 水平显著(双侧检验)

相关分析表明 TP 与 OP、IP 和 NaOH-P 呈显著正相关,与 HCl-P 相关性不显著. TP 由 IP 和 OP 构成,实验期间苦草根系分布区域内外 OP 有显著性差异,而 IP 无显著性差异,故 OP 的变化是导致沉积物 TP 含量空间差异的主要原因. IP 与 NaOH-P 呈显著正相关,IP 主要由 NaOH-P 和 HCl-P 组成,两者占 IP 的比例在 90% 以上. 实验期间 IP 与 HCl-P 呈正弱相关,但与 NaOH-P 相关系数较高. 因此,沉积物 NaOH-P 含量的变化是导致 IP 空间分布变化的主要原因. 同时,实验期间沉积物根系泌氧显著改变了周边环境因子,pH 的降低和 Eh 的升高影响 OP 和 IP 之间转化,因此,苦草根系的生命活动造成的环境因子的改变是沉积物 TP 含量变化的内在驱动.

3.2 苦草根系对沉积物各形态磷空间分布的影响

NaOH-P 是与沉积物中易发生氧化还原作用的铁氧化物或铁氢氧化物结合的磷. 大部分的研究认为这种形式的磷是较易于释放的,在沉积物中起到指示污染物的作用^[21, 22]. 研究表明,富营养化程度较重的湖泊中,沉积物释放的磷中 50% 是 NaOH-P. 由于 NaOH-P 的易析出性,NaOH-P 在沉积物中能够被植物大量吸收利用^[23, 24]. 沉水植物苦草在生长的过程中通过发达的根系能够大量地吸收利用沉积物中的 NaOH-P,以满足自身生长的需要^[25, 26]. 这可能是导致 NaOH-P 在植物根系区域较低的原因之一. 在本实验条件下苦草植株体内磷含量为 3 158.01 mg·kg⁻¹,实验结束时苦草平均每株干重为 0.8025 g,因此平均每株富集磷总量为 2.534 mg.

另一方面沉水植物生长过程中通过体内的通气组织将氧气向根部运输,在根区周围形成富氧环境^[27],使根区沉积物环境由还原态向氧化态转化^[28, 29],导致沉积物中的 Fe²⁺ 逐渐氧化为 Fe³⁺, PO₄³⁻ 与 Fe³⁺ 结合,以 FePO₄ 的形式沉淀下来,在根系表面形成根斑^[30],影响沉积物中 NaOH-P 的含

为进一步研究沉积物中 TP 与各形态磷的关系,分别对 TP 的浓度与 NaOH-P、HCl-P、OP 和 IP 的浓度进行了 Pearson 相关分析(表 2).

量. 在本实验中也观察到了苦草根系表面褐色的根斑. 苦草根系的生长改变了原有的环境,使得沉积物中 NaOH-P 向其他形态磷转变,这可能是沉积物 NaOH-P 含量降低的另一个重要原因. 沉积物各形态磷之间相关分析表明 NaOH-P 与 IP 存在显著正相关,与 HCl-P 和 OP 存在弱相关. 据此推理,NaOH-P 与沉积物中其他形态磷含量存在较为密切的关系,但是由于根系的作用非常复杂,并且不同形态的磷也存在相互转换的过程,沉水植物对不同形态磷的具体影响机制还需进一步研究.

苦草在生长过程中,其根系的生长发育过程几乎全部是在沉积物中进行,在根系的生长过程中,根的释氧作用,增加了根系周边的溶解氧,引起底泥氧化还原条件的变化,在根周形成了根斑氧化层,同时沉水植物根系会分泌有机酸类物质(草酸、柠檬酸、马来酸、富马酸、酒石酸、苹果酸、琥珀酸、乳酸、乙酸等),而根系分泌物中的 H⁺ 或有机酸的增加必然导致根际 pH 值降低^[31],根际 pH 值的降低有利于提高根际周围难溶性物质的溶解度,有机酸也能作为螯合剂,与 Fe、Al、Ca 等阳离子螯合^[32],从而导致 NaOH-P 的释放. 这可能是导致苦草根系周围 NaOH-P 显著降低的另一个主要原因.

在沉积物垂直方向 0~6 cm 内 NaOH-P 的含量显著降低,这应该与苦草根系的垂直方向空间分布有关. 苦草根系长度绝大部分根长在 8 cm 左右. 而且在 0~10 cm 深度范围内聚集了根系生物量的近 95%,由于大量根系的存在,从而增大了根系和沉积物接触的表面积,因此苦草根系在垂直方向 0~6 cm 内的影响较强,从而导致了该区域 NaOH-P 含量相对较低.

HCl-P 主要指与自生磷灰石、沉积碳酸钙以及生物骨骼等的含磷矿物有关的沉积磷存在形态^[33],主要来自于生物颗粒的沉积和早期成岩作用形成的

氟磷灰石^[22, 23]. 它是沉积物中较为稳定的磷形态, 且常常被永久地掩埋于深层沉积物中而难于被生物所利用^[34]. 但影响磷形态转化的因素是多种的, 当在 pH 值较低的情况下 HCl-P 也可以从沉积物中释放出来. 在本实验条件下, HCl-P 在沉积物中变化较小. 苦草根系分布区域与非根系分布区域之间含量无显著差异.

OP 包括由陆源性排放物质组成的难降解性有机磷部分和由死亡的水生生物残体组成的可降解性有机磷其中可降解有机磷部分, 可以在早期成岩过程中随有机质的降解而释放, 或向其它结合态磷转化^[35, 36]. 沉积物 OP 多数以磷酸酯(包括肌醇六磷酸)、磷脂、核酸、磷蛋白和磷酸糖类以及一些未知的化合物等形态出现, 其中肌醇六磷酸是沉积物中有机磷的重要形态, 在需氧降解过程中肌醇六磷酸被有效地矿化成无机磷, 其矿化程度和速率与氧化还原条件极为相关^[24, 26]. 苦草根系发达, 泌氧能力强, 能够有效地改变根际沉积物氧化还原环境, 在本实验条件下, 培养 80 d 后沉积物有机质含量明显下降, 在根系集中分布的 0~6 cm 区域, 有机质含量从 5.40% 下降到 4.8%, 沉积物颜色发生明显变化, 根系集中分布区呈浅灰色, 非根系集中分布区沉积物呈深黑色, 表明苦草根系明显改善了沉积物氧化还原环境, 这是本实验中根系集中分布区 OP 含量显著下降的一个重要原因.

4 结论

(1) 苦草根系分布区域内沉积物中 TP、NaOH-P 和 OP 的含量显著降低. HCl-P 和 IP 的含量在苦草根系分布内外区域无显著性差异.

(2) 苦草根系分布区域内沉积物环境发生了明显改变, 有机质含量降低, 氧化还原条件显著改变. 苦草根系通过提高根系周围溶解氧, 改变沉积物环境, 来影响沉积物中各形态磷之间的迁移转化, 同时苦草生长过程中吸收利用大量沉积物中的磷, 从而导致了沉积物各形态磷含量的空间差异.

参考文献:

- [1] Cardon Z G. The rhizosphere: an ecological perspective [M]. Burlington: Academic Press, 2011. 1-30.
- [2] 张福锁, 申建波, 冯固. 根际生态学: 过程与调控 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2009.
- [3] 刘建康. 高级水生生物学 [M]. 北京: 科学出版社, 1999. 224-240.
- [4] 吴振斌. 水生植物与水体生态修复 [M]. 北京: 科学出版社, 2011. 40-53.
- [5] Waisel Y, Eshel A, Beeckman T. Plant roots: the hidden half [M]. (3rd ed.). New York: CRC Press, 2002. 23-29.
- [6] Bole J, Allan J. Uptake of phosphorus from sediment by aquatic plants, *Myriophyllum spicatum* and *Hydrilla verticillata* [J]. Water Research, 1978, **12**(5): 353-358.
- [7] McRoy C, Barsdate R. Phosphate absorption in eelgrass [J]. Limnology and Oceanography, 1970, **15**(1): 6-13.
- [8] Bristow J M, Whitcombe M. The role of roots in the nutrition of aquatic vascular plants [J]. American Journal of Botany, 1971, **58**(1): 8-13.
- [9] McRoy C, Barsdate R, Nebert M. Phosphorus cycling in an eelgrass (*Zostera marina* L.) ecosystem [J]. Limnology and Oceanography, 1972, **17**(1): 58-67.
- [10] Demarte J A, Hartman T. Studies of adsorption of ³²P, ⁵⁹Fe, and ⁴⁵Ca by water-milfoil (*Myriophyllum exalbescens* Fernald) [J]. Ecology, 1974, **55**(1): 188-194.
- [11] Carignan R, Kalf J. Quantification of the sediment phosphorus available to aquatic macrophytes [J]. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 1979, **36**(1): 1001-1005.
- [12] Gonsiorczyk T, Casper P, Koschel R. Phosphorus-binding forms in the sediment of an oligotrophic and an eutrophic hardwater lake of the Baltic Lake District (Germany) [J]. Water Science and Technology, 1998, **37**(3): 51-58.
- [13] 赵海超, 王圣瑞, 金相灿, 等. 黑藻对沉积物及土壤中不同形态磷的利用与转化 [J]. 湖泊科学, 2008, **20**(3): 315-322.
- [14] 周小宁, 王圣瑞, 金相灿. 沉水植物黑藻对沉积物有机、无机磷形态及潜在可交换性磷的影响 [J]. 环境科学, 2006, **27**(12): 2421-2425.
- [15] 胡俊, 丰民义, 吴永红, 等. 沉水植物对沉积物中磷赋存形态影响的初步研究 [J]. 环境化学, 2006, **25**(1): 28-31.
- [16] Xie Y H, Deng W, Wang J D. Growth and root distribution of *Vallisneria natans* in heterogeneous sediment environments [J]. Aquatic Botany, 2007, **86**(1): 9-13.
- [17] Xie Y H, An S Q, Yao X, et al. Short-time response in root morphology of *Vallisneria natans* to sediment type and water-column nutrient [J]. Aquatic Botany, 2005, **81**(1): 85-96.
- [18] 吴振斌, 邱东如, 贺锋. 水生植物对富营养化水体水质净化作用研究 [J]. 武汉植物学研究, 2001, **19**(4): 299-303.
- [19] 吴振斌, 邱东如, 贺锋. 沉水植物重建对富营养化水体氮磷营养水平的影响 [J]. 应用生态学报, 2003, **14**(8): 1351-1353.
- [20] Ruban V, Pardo P, Rauret G, et al. Development of a harmonised phosphorus extraction procedure and certification of a sediment reference material [J]. Journal of Environmental Monitoring, 2001, **3**(1): 121-125.
- [21] Sun S J, Huang S L, Sun X M, et al. Phosphorus fractions and its release in the sediments of Haihe River, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, **21**(3): 291-295.
- [22] Wang S, Jin X, Zhao H, et al. Phosphorus fractions and its release in the sediments from the shallow lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River area in China [J]. Colloids and

- Surfaces A, Physicochemical and Engineering Aspects, 2006, **273**(1-3): 109-116.
- [23] Wang S R, Jin X C, Pang Y, *et al.* Phosphorus fractions and phosphate sorption characteristics in relation to the sediment compositions of shallow lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River region, China[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2005, **289**(2): 339-346.
- [24] Zhou W J, Wang K R, Zhang Y Z, *et al.* Phosphorus transfer and distribution in a soybean-citrus intercropping system [J]. *Pedosphere*, 2006, **16**(4): 435-443.
- [25] Zhou Y, Li J, Fu Y. Effects of submerged macrophytes on kinetics of alkaline phosphatase in Lake Donghu—I. Unfiltered water and sediments [J]. *Water Research*, 2000, **34**(15): 3737-3742.
- [26] Barko J, Gunnison D, Carpenter S. Sediment interactions with submersed macrophyte growth and community dynamics [J]. *Aquatic Botany*, 1991, **41**(1-3): 41-65.
- [27] Armstrong W, Cousins D, Armstrong J, *et al.* Oxygen distribution in wetland plant roots and permeability barriers to gas-exchange with the rhizosphere: a microelectrode and modelling study with *Phragmites australis*[J]. *Annals of Botany*, 2000, **86**(3): 687-703.
- [28] Wang S, Jin X, Bu Q. Effects of dissolved oxygen supply level on phosphorus release from lake sediments [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2008, **316**(1-3): 245-252.
- [29] Wang S R, Jin X C, Zhao H C, *et al.* Effects of organic matter on phosphorus release kinetics in different trophic lake sediments and application of transition state theory [J]. *Journal of Environmental Management*, 2008, **88**(4): 845-852.
- [30] Hupfer M, Dollan A. Immobilisation of phosphorus by iron-coated roots of submerged macrophytes [J]. *Hydrobiologia*, 2003, **506-509**(1-3): 635-640.
- [31] Somiya I, Tsuno H, Matsumoto M. Phosphorus release-storage reaction and organic substrate behavior in biological phosphorus removal[J]. *Water Research*, 1988, **22**(1): 49-58.
- [32] Li Y F, Luo A C, Wei X H, *et al.* Changes in phosphorus fractions, pH, and phosphatase activity in rhizosphere of two rice genotypes[J]. *Pedosphere*, 2008, **18**(6): 785-794.
- [33] Compton J, Cole D. Phosphorus cycling and soil P fractions in Douglas-fir and red alder stands [J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, **110**(1-3): 101-112.
- [34] Tian J R, Zhou P. Phosphorus fractions of floodplain sediments and phosphorus exchange on the sediment-water interface in the lower reaches of the Han River in China [J]. *Ecological Engineering*, 2007, **30**(3): 264-270.
- [35] Makarov M, Haumaier L, Zech W, *et al.* Organic phosphorus compounds in particle-size fractions of mountain soils in the northwestern Caucasus[J]. *Geoderma*, 2004, **118**(1-2): 101-114.
- [36] Turner B, Cade B, Condon L, *et al.* Extraction of soil organic phosphorus[J]. *Talanta*, 2005, **66**(2): 294-306.

CONTENTS

Analysis of Characteristics of Black Carbon Concentration in Shanghai from 2008 to 2012	WANG Hong-qiang, HE Qian-shan, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (1215)
Chemical Characteristics and Insoluble Particulates' Surface Morphology of a Snowfall Process in the Southeastern Suburb of Urumqi	LU Hui, WEI Wen-shou, CUI Cai-xia, <i>et al.</i> (1223)
Comparative Study of the Level and Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers and New Brominated Flame Retardants in the Atmosphere of Typical Urban WU Hui, JIN Jun, WANG Ying, <i>et al.</i> (1230)
Source and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Ambient Air PM ₁₀ from One Coking Plant	DONG Ting, LI Tian-xin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1238)
Estimation of Average Traffic Emission Factor Based on Synchronized Incremental Traffic Flow and Air Pollutant Concentration	LI Run-kui, ZHAO Tong, LI Zhi-peng, <i>et al.</i> (1245)
Study on Critical Loads of Sulfur and Nitrogen in the Pearl River Delta	SUN Cheng-ling, XIE Shao-dong (1250)
Hydrogen Sulfide Removal by the Combination of Non-Thermal Plasma and Biological Process	LI Hua-qin, HE Jue-cong, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (1256)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Atrazine in Taizi River Basin, China	ZHENG Lei, ZHANG Yi-zhang, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1263)
Development of a Method for Measuring Dissolved Reactive Phosphorus (DRP) and Dissolved Ferrous Iron in Large Batch in Pore Water Samples of Sediments with Micro-volumes WANG Yan, ZHU Chun-gang, XU Di, <i>et al.</i> (1271)
Temporal and Spatial Variation of Water Nutrient Level After Exogenous Nutrient Input	FU Ling, ZHAO Kai, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (1278)
Physical Process Based Risk Assessment of Groundwater Pollution in the Mining Area	SUN Fa-sheng, CHENG Pin, ZHANG Bo (1285)
Hydrogeochemical Characteristics of a Typical Karst Groundwater System in Chongqing	YANG Ping-heng, LU Bing-qing, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (1290)
Investigation of Nitrogen, Phosphorus and Microbial Contamination in Laolongdong Underground River System of Chongqing	LAN Jia-cheng, YANG Ping-heng, REN Kun, <i>et al.</i> (1297)
Effects on Phosphorus Fraction Distribution in Sediment by Roots of <i>Vallisneria spiralis</i>	LI Zhen-guo, WANG Guo-xiang, ZHANG Jia, <i>et al.</i> (1304)
Modeling Nitrogen Transformation in a Novel Circular-Flow Corridor Wetland	PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, YUAN Peng, <i>et al.</i> (1311)
Natural Attenuation of Tetracycline in the Water of Taihu Lake Under Different Environmental Conditions	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, JI Ying-xue, <i>et al.</i> (1318)
Inactivation and Reactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria During and After UV Disinfection in Reclaimed Water	HUANG Jing-jing, TANG Fang, XI Jin-ying, <i>et al.</i> (1326)
Photoreactivation of <i>Escherichia coli</i> and <i>Enterococcus faecalis</i> in the Secondary Effluent Disinfected by UV-TiO ₂	WANG Xi-feng, GONG Xin, HU Xiao-lian, <i>et al.</i> (1332)
Stability of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, SHEN Bing-bing, JING Jie, <i>et al.</i> (1337)
Fouling Behavior of Sodium Alginate During Microfiltration at Various Ionic Compositions; XDLVO Approach	ZHAO Ying-xu, ZONG Rui-qiang, GAO Xin-yu, <i>et al.</i> (1343)
Enhanced Remediation of 4-Chloronitrobenzene Contaminated Groundwater with Nanoscale Zero-valence Iron (nZVI) Catalyzed Hydrogen Peroxide (H ₂ O ₂)	FU Rong-bing (1351)
Effect of the Coexistence of Chlorobenzene Homologue on Anaerobic Degradation of Hexachlorobenzene	WANG Qi, LIU Hui, JIANG Lin, <i>et al.</i> (1358)
Research on Removal Efficiency of Cd(II)-bearing Wastewater by Sulfate-reducing Biological Filter	WU Xuan, TAN Ke-yan, HU Xi-jia, <i>et al.</i> (1366)
Control Strategies of Nitrogen Removal Process in a Pilot Test of the Southern WWTP Based on the Nitrogen Balance	JIANG Ying-he, LIU Pei-ju, WANG Lei, <i>et al.</i> (1372)
Effect of Simulated Inorganic Anion Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	CHEN Yan, HUANG Fang, XIE Xin-yuan (1377)
Microbial Reduction of Cu ²⁺ Mediated by Electroactive Biofilms	LIU Yi, ZHOU Shun-gui, YUAN Yong, <i>et al.</i> (1384)
Copper Recovery from Artificial Bioleaching Lixivium of Waste Printed Circuit Boards	CHENG Dan, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1391)
Difference of Contaminant Composition Between Landfill Leachates and Groundwater and Its Reasons	HE Xiao-song, YU Hong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1399)
Photochemical Degradation of Landfill Leachate Facilitated by Combined Schwertmannite and H ₂ O ₂	WANG He-ru, SONG Yong-wei, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (1407)
Effects of Operating Parameters on Organic Toxicity of Sludge Treating Synthetic Bisphenol A Wastewater	YANG Na, CHEN Xiu-rong, LIN Feng-kai, <i>et al.</i> (1414)
Comparative Study on Biological Methane Potential and Methanogen Biodiversity in the Anaerobic Digestion of Excess Sludge	DONG Hui-yu, JI Min (1421)
Isolation and Identification of Mn Oxidizing Bacterium <i>Aminobacter</i> sp. H1 and Its Oxidation Mechanism	YAN Ping, JIANG Li-ying, CHEN Jian-meng, <i>et al.</i> (1428)
Nitrate Removal by a Strain of Nitrate-Dependent Fe(II)-Oxidizing Bacteria	WANG Hong-yu, YANG Kai, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (1437)
Study on the Iopromide-Degrading Characteristics of Strain <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 via Co-Metabolism	XU Bing-jie, GAO Pin, XUE Gang, <i>et al.</i> (1443)
Using Flow Cytometry to Explore the Changes of <i>Sphingomonas</i> sp. GY2B Bacterial Surface Characteristics in the Process of Degrading Phenanthrene ZHANG Meng-lu, DANG Zhi, WU Feng-ji, <i>et al.</i> (1449)
Research on Characteristic of Interrelationship Between Toxic Organic Compound BPA and <i>Chlorella vulgaris</i>	CHEN Shan-jia, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i> (1457)
Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthetic Physiology and Triacylglyceride (TAG) Accumulation of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Shan, ZHAO Shu-xin, WEI Chang-long, <i>et al.</i> (1462)
Effects of Microcystins on Growth and Antioxidant System of Rice Roots	WANG Wei-min, DENG Yu, ZOU Hua, <i>et al.</i> (1468)
Responses of Soybean Cultivar Dongsheng-1 to Different O ₃ Concentrations in Northeast China	ZHANG Wei-wei, WANG Guang-hua, WANG Mei-yu, <i>et al.</i> (1473)
Development and Succession of Biological Soil Crusts and the Changes of Microbial Biomasses	WU Li, ZHANG Gao-ke, CHEN Xiao-guo, <i>et al.</i> (1479)
Effects of Lead on the Growth and Reproduction of <i>Eisenia fetida</i> with Aged Soils	CHEN Li-hong, LIU Zheng-tao, FANG Zheng, <i>et al.</i> (1486)
Soil Heavy Metal Cadmium Standard Limit and Range of Background Value Research	ZHAO Xiao-jun, LU Si-jin, XU Ren-ji, <i>et al.</i> (1491)
Study on Soil Element Background Values of the Hoh Xil Area in North Tibet	BAI Jian-kun, WANG Jian-li, LI Chao-liu, <i>et al.</i> (1498)
Transfer Characteristic and Source Identification of Soil Heavy Metals from Water-Level-Fluctuating Zone Along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area XU Tao, WANG Fei, GUO Qiang, <i>et al.</i> (1502)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Analysis for Soil Around Haining Electroplating Industrial Park	LI Jiong-hui, WENG Shan, FANG Jing, <i>et al.</i> (1509)
Sources and Spatial Distribution of Typical Heavy Metal Pollutants in Soils in Xihu Scenic Area	ZHANG Hai-zhen, TANG Yu-li, LU Jun, <i>et al.</i> (1516)
Distribution and Assessment of Mercury in the Ambient Soil of a Municipal Solid Waste Incinerator	XIE Hui-ting, ZHANG Cheng-zhong, XU Feng, <i>et al.</i> (1523)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Soils and Sediments Surrounding Dishui Lake in Shanghai	ZHUGE Xiang-zhen, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1531)
Impact of SDBS/Na ⁺ on Red Soil Colloidal Stability	TANG Ying, LI Hang, ZHU Hua-ling, <i>et al.</i> (1540)
Effects of Stabilization Treatment on Migration and Transformation of Heavy Metals in Mineral Waste Residues	ZHAO Shu-hua, CHEN Zhi-liang, ZHANG Tai-ping, <i>et al.</i> (1548)
Study on a New Method of Fast Monitoring Toxicity of Cd ²⁺ by Algal in Water	DUAN Jing-bo, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, <i>et al.</i> (1555)
Immunosensor for Rapid Detection of 1,3-Dinitrobenzene	LONG Feng, SHI Han-chang, WANG Hong-chen, <i>et al.</i> (1561)
Mg/Al Layered Double Hydroxides Prepared by Microwave-Assisted Co-Precipitation Method for the Removal of Bromate	ZHONG Qiong, LI Huan (1566)
Discussion on Several Key Points of Decision Support System for Remediation of Contaminated Sites	LIAO Xiao-yong, TAO Huan, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (1576)
A Review of Multi-Scale Studies on Spatial Variation of the Lead (Pb) Concentration in Urban Soils	YANG Meng, LI Feng-ying, DIAO Yi-wei, <i>et al.</i> (1586)
Review on Characteristics and Detecting Assay of Bacterial Endotoxin Contamination in Water Environment	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (1597)
Advances in Molecular Mechanism of Bacterial Reduction of Hexavalent Chromium	LI Dou, ZHAO You-cai, SONG Li-yan, <i>et al.</i> (1602)
Anaerobic Membrane Bioreactors for Treating Agricultural and Food Processing Wastewater at High Strength	WEI Yuan-song, YU Da-wei, CAO Lei (1613)

《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)

2014年4月15日 35卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 4 Apr. 15, 2014

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