

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第12期

Vol.35 No.12

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(卷终)

北京雾霾天气生物气溶胶浓度和粒径特征	高敏,仇天雷,贾瑞志,韩梅琳,宋渊,王旭明(4415)
杭州大气颗粒物散射消光特性及霾天气污染特征	徐昶,叶辉,沈建东,孙鸿良,洪盛茂,焦荔,黄侃(4422)
太原市采暖季 PM _{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价	李丽娟,温彦平,彭林,白慧玲,刘凤娴,史美鲜(4431)
成都市城区 PM _{2.5} 中二次水溶性无机离子污染特征	李友平,周洪,张智胜,王启元,罗磊(4439)
北京市臭氧的时空分布特征	王占山,李云婷,陈添,张大伟,孙峰,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,潘丽波(4446)
南京北郊大气 VOCs 变化特征及来源解析	安俊琳,朱彬,王红磊,杨辉(4454)
祁连山中段降水化学的环境意义研究	李宗杰,李宗省,田青,宋玲玲,贾冰,郭瑞,宋耀选,苏索南,韩春坛(4465)
中亚热带典型林分不同层次氮硫湿沉降动态变化	孙涛,马明,王定勇,黄礼昕(4475)
本底大气 CO ₂ 观测分析过程中 QA/QC 方法的建立与评估	刘立新,周凌晔,夏玲君,王红阳,方双喜(4482)
轻型汽油车 CH ₄ 和 N ₂ O 排放因子研究	何立强,宋敬浩,胡京南,解淑霞,祖雷(4489)
煤燃烧超细微粒粒径谱演变及排放因子的实验研究	孙在,杨文俊,谢小芳,陈秋方,蔡志良(4495)
春、夏季长江口及其邻近海域溶解 N ₂ O 的分布和海-气交换通量	王岚,张桂玲,孙明爽,任景玲(4502)
珠江口水体组分的吸收特性分析	王珊珊,王永波,扶卿华,尹斌,李云梅(4511)
河流汇合处水体磷素形态特征及紫外光照的影响:以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江交汇为例	闫金龙,江韬,魏世强,李玲,郭念,李璐璐,刘江(4522)
基于太湖微囊藻毒素的叶绿素 a 阈值研究	魏代春,苏婧,纪丹凤,伏小勇,王骥,霍守亮,崔驰飞,唐军,席北斗(4530)
百花湖周边城市近郊小流域氮、磷输出时空特征	冯源嵩,林陶,杨庆媛(4537)
自然光照对淹水条件下三峡库区消落带典型土壤磷释放影响	郭念,江韬,魏世强,闫金龙,梁俭,卢松,高洁(4544)
垂直流人工湿地 LDHs 覆膜改性沸石基质强化除磷效果及其机制	张翔凌,陈俊杰,郭露,陈巧珍,王晓晓(4553)
三峡库区消落带 3 种植物淹水后汞的动态变化及其对水体的影响	张翔,张成,孙荣国,王定勇(4560)
纳米 TiO ₂ 对底泥中汞释放及活化的影响	张金洋,李楚娴,王定勇,周雄,孙荣国,张成,梁丽(4567)
首都水源地——洋河流域人为源多环芳烃(PAHs)排放清单估算及其影响分析	高佳佳,罗维,奚晓霞(4573)
石化工业园区有毒废水来源识别研究	杨茜,于茵,周岳溪,陈学民,伏小勇,王淼(4582)
污水处理厂中红霉素抗药性基因的污染特征及选择性因子	李侃竹,吴立乐,黄圣琳,何势,刘振鸿,薛罡,高品(4589)
2 种填料 BAF 深度处理印染废水沿程污染物变化规律研究	刘俊峰,范举红,刘锐,陈吕军,张永明(4596)
硫酸盐还原型甲烷厌氧氧化菌群驯化及其群落特征	席婧茹,刘素琴,李琳,刘俊新(4602)
MBR 处理腈纶废水的效能及微生物群落结构分析	魏健,宋永会,赵乐(4610)
制革废水的厌氧氨氧化 ABR 脱氮工艺研究	曾国驱,贾晓珊(4618)
生物滤池工艺的数值模拟与运行优化	邹宗森,施汉昌,陈向强,谢小青(4627)
气升装置对厌氧氨氧化污泥形态及性能的影响	李祥,黄勇,袁怡,周呈,陈宗短,张大林(4636)
给水厂污泥改良生物滞留填料除磷效果的研究	王建军,李田,张颖(4642)
北京地区不同城镇污水处理厂堆肥污泥的营养含量和重金属污染	白莉萍,齐洪涛,伏亚萍,李萍(4648)
电子垃圾拆解区污染池塘中鱼类多氯联苯及其代谢产物的组织分配及暴露风险	唐斌,罗孝俊,曾艳红,麦碧娴(4655)
广东罗非鱼养殖区水体和鱼体中重金属、HCHs、DDTs 含量及风险评价	谢文平,朱新平,郑光明,马丽莎(4663)
崇明典型水生生物中雌激素含量和分布特征	耿婧婧,叶爱丽,杨毅,刘敏,张婧,周俊良(4671)
啮虫脒光催化降解动力学的优化及其降解产物的分析	周文常,阳海,胡志斌,兰世林(4678)
氮添加对生长季寒温带针叶林土壤有效氮和酸化的影响	陈高起,傅瓦利,罗亚晨,高文龙,李胜功,杨浩(4686)
土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响	李鉴霖,江长胜,郝庆菊(4695)
上海市郊设施大棚次生盐渍化土壤盐分含量调查及典型对应分析	唐冬,毛亮,支月娥,张进忠,周培,柴晓彤(4705)
某铅酸蓄电池污染场地表层土壤重金属 Pb 空间分布预测研究	刘庚,牛俊杰,张朝,赵鑫,郭观林(4712)
海泡石对镉-铅复合污染钝化修复效应及其土壤环境质量影响研究	孙约兵,王朋超,徐应明,孙扬,秦旭,赵立杰,王林,梁学峰(4720)
盐碱区不同开发年限水田温室气体排放规律及影响因素	汤洁,方天儒,侯克怡,赵仁竹,梁爽(4727)
不同热解温度生物炭对 Cd(II) 的吸附特性	王震宇,刘国成,Monica Xing,李锋民,郑浩(4735)
碱土金属钙沉积对 Mn-Ce/TiO ₂ 低温 SCR 催化剂脱硝性能的影响	周爱奕,毛华峰,盛重义,谭月,杨柳(4745)
国内外水泥工业大气污染物排放标准比较研究	江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4752)
我国水泥工业大气污染物排放标准的修订历程与思考	江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4759)
《环境科学》第35卷(2014年)总目录	(4767)
《环境科学》征订启事(4617) 《环境科学》征稿简则(4654) 信息(4474, 4529, 4536, 4744)	

海泡石对镉-铅复合污染钝化修复效应及其土壤环境质量影响研究

孙约兵, 王朋超, 徐应明*, 孙扬, 秦旭, 赵立杰, 王林, 梁学峰

(农业部环境保护科研监测所, 产地环境质量重点实验室, 天津 300191)

摘要: 通过盆栽试验, 开展了海泡石钝化修复 Cd-Pb 复合污染土壤对 pH、重金属形态含量、水稻体内重金属累积特征以及土壤酶活性和微生物数量的影响研究。结果表明, 添加海泡石提高了土壤 pH 值, 污染土壤中 Cd 和 Pb 由活性较高的可提取态向活性低的有机结合态、铁锰氧化物结合态以及残渣态转化, 可溶态 Cd 和 Pb 含量分别较对照降低了 1.4% ~ 72.9% 和 11.8% ~ 51.4%。水稻体内各部分重金属含量总体上随海泡石含量增加而减少。与对照相比, 水稻茎、叶、糙米和稻壳中 Cd 含量最大可降低 39.8%、36.4%、55.2% 和 32.4%, 而相对应部位的 Pb 含量最大降幅也分别达到了 22.1%、54.6%、43.5% 和 17.8%。添加海泡石后在一定程度上改善了土壤环境质量, 过氧化氢酶和脲酶活性、细菌和放线菌数量有所增加, 蔗糖酶活性和真菌数目较对照有所降低, 但不显著 ($P > 0.05$)。pH、可溶态 Cd、Pb 含量以及脲酶和蔗糖酶活性与水稻体内 Cd、Pb 含量之间存在显著的相关关系, 可以用来评价土壤 Cd-Pb 复合污染钝化修复效率。

关键词: 钝化修复; 海泡石; 修复潜力; 土壤环境质量; 复合污染

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)12-4720-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.12.040

Immobilization Remediation of Cd and Pb Contaminated Soil: Remediation Potential and Soil Environmental Quality

SUN Yue-bing, WANG Peng-chao, XU Ying-ming, SUN Yang, QIN Xu, ZHAO Li-jie, WANG Lin, LIANG Xue-feng
(Key Laboratory of Original Environmental Quality, Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China)

Abstract: A pot experiment was conducted to investigate the immobilization remediation effects of sepiolite on soils artificially combined contamination by Cd and Pb using a set of various pH and speciation of Cd and Pb in soil, heavy metal concentration in *Oryza sativa* L., and soil enzyme activity and microbial quantity. Results showed that the addition of sepiolite increased the soil pH, and the exchangeable fraction of heavy metals was converted into Fe-Mn oxide, organic and residual forms, the concentration of exchangeable form of Cd and Pb reduced by 1.4%-72.9% and 11.8%-51.4%, respectively, when compared with the control. The contents of heavy metals decreased with increasing sepiolite, with the maximal Cd reduction of 39.8%, 36.4%, 55.2% and 32.4%, respectively, and 22.1%, 54.6%, 43.5% and 17.8% for Pb, respectively, in the stems, leaves, brown rice and husk in contrast to CK. The addition of sepiolite could improve the soil environmental quality, the catalase and urease activities and the amount of bacteria and actinomycete were increased to some extents. Although the fungi number and invertase activity were inhibited compared with the control group, it was not significantly different ($P > 0.05$). The significant correlation between pH, available heavy metal content, urease and invertase activities and heavy metal concentration in the plants indicated that these parameters could be used to evaluate the effectiveness of stabilization remediation of heavy metal contaminated soil.

Key words: immobilization remediation; sepiolite; remediation potential; soil environmental quality; combined pollution

环境保护部和国土资源部发布《全国土壤污染状况调查公报》指出, 全国土壤总的超标率为 16.1%, 其中土壤 Cd、Pb 点位超标率分别达到 7.0% 和 1.5%^[1], 如何安全有效地修复并利用这些受污染的重金属土壤已成为当前我国亟需解决的环境和社会问题。原位钝化修复原理是基于降低重金属污染风险为目的, 通过向污染土壤中添加有机、无机或杂化功能材料等, 以调节和改变土壤理化性质, 使其产生吸附、沉淀、离子交换、氧化-还原等反应, 改变重金属离子在土壤中的化学形态和赋存

状态, 抑制其在土壤中可迁移性和生物有效性, 降低农作物对重金属的吸收累积, 进而达到修复污染土壤的目的^[2~4]。作为农田重金属污染土壤该措施是一种十分行之有效的方法, 其具有成本低廉、操作方便、效果快速等特点, 使得其在污染土壤的治理中得到广泛应用, 尤其是适用于修复我国大面积、

收稿日期: 2014-04-28; 修订日期: 2014-07-08

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201203045); 国家自然科学基金项目(21107056, 21177068)

作者简介: 孙约兵(1978~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为污染土壤修复与生态治理, E-mail: sunyuebin78@163.com

* 通讯联系人, E-mail: ymxu1999@126.com

中轻度污染的农田土壤^[5, 6]。

施用钝化修复材料一方面可以有效降低重金属有效态含量,抑制植物对其吸收和累积,另一方面可以增加土壤稳定性,提升土壤肥力。研究发现,施用修复剂还能增加土壤脲酶和磷酸酶活性^[7],增大土壤大团聚体含量^[4],提高土壤微量营养元素的有效性^[8, 9]。投加赤泥、污泥、沸石和熟石灰后,土壤细菌、真菌、放线菌数目分别增加了 0.79 ~ 2.03 倍、0.02 ~ 2.25 倍和 0.86 ~ 4.28 倍^[9]。施用海泡石后,土壤过氧化氢酶活性比对照处理增加了 3.0% ~ 26.3%,脲酶活性呈现先增加后降低的趋势。真菌和放线菌数量分别增加了 2.4% ~ 28.6% 和 0.3% ~ 7.5%^[10]。然而,过多施用化学钝化修复剂对土壤 pH 的影响也很大,并直接影响土壤的理化性状^[11]和微量营养元素的吸收等^[12]。添加粉煤灰增加了土壤孔隙结构和结构组合,导致土壤的持水性降低,pH 显著提高,电导率明显降低^[12, 13],而且土壤中有效磷、铵态氮和水溶钾的含量随粉煤灰加入量的增加而显著降低^[12]。研究还发现添加修复剂在一定程度上影响土壤酶活性和微生物区系^[14]。甚至引起土壤过度石灰化,使土壤中重金属离子含量升高并导致农作物减产^[15]。因而,在评价重金属钝化修复效用时,仅仅利用传统的土化分析方法,如重金属总量和形态分析手段是不够的,还需要通过土壤某些物理或者生物学功能特征的恢复或改善来表征^[16, 17]。土壤酶活性表征土壤生物活性的高低,可以用作土壤质量变化的早期预测指标,而土壤微生物种群结构是表征土壤生态系统群落结构和稳定性的重要参数之一,可以较早地预测土壤养分及环境质量的变化过程,被认为是土壤重金属胁迫的一个最有潜力的敏感性生物学指标^[3, 7, 18]。在重金属污染土壤治理中,需兼顾钝化修复效率和环境效应,才能构建一套高效的、环境友好型农田重金属污染土壤治理的钝化修复技术体系和措施。本试验研究了海泡石钝化修复 Cd、Pb 复合污染土壤后水稻体内 Cd、Pb 含量特征和土壤环境质量特征及其相关关系,通过探索新的重金属污染钝化修复效率评价方法和手段,以期为黏土矿物材料钝化修复 Cd-Pb 复合污染土壤的大面积示范和推广应用提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤采自天津市郊农田,土壤类型为潮土。土壤用去离子水(土水比 1:2.5)浸提,用 pH 计测

定(PB-10, Sartorius),土壤基本理化性质按土壤农业常规分析方法测定。其基本理化性质为 pH 8.2,黏粒 29.0%,粉粒 61.6%,砂粒 9.4%,阳离子交换量(CEC) 14.7 cmol·kg⁻¹,有机质含量 20.0 g·kg⁻¹,全氮 1.3 mg·kg⁻¹,有效磷 66.7 mg·kg⁻¹,有效钾 328 mg·kg⁻¹。供试作物为水稻(*Oryza sativa* L.),品种为津原 47,由天津市农业科学院种子分公司提供。海泡石为河北易县海泡石公司生产,含少量白云石和滑石等杂质,pH 值 10.1,CEC 18 cmol·kg⁻¹,比表面积为 22.32 m²·g⁻¹,孔径为 1.4 nm。

1.2 试验方法

盆栽试验在农业部环境保护科研监测所网室内进行,土壤 Cd 和 Pb 含量设置为 5 mg·kg⁻¹和 2 000 mg·kg⁻¹,以 CdCl₂·2.5H₂O 和 Pb(NO₃)₂ 的形式加入。依据前期的研究,海泡石添加量设为 0、0.5%、1%、3% 和 5%,3 次重复。75% 含水量静置平衡 60 d 待用。选用饱满的水稻种子,用去离子水浸种 8 h,浸泡好的种子于 40℃ 恒温培养箱中进行催芽,待出芽后播种到整理好的苗床上,在秧苗约 30 cm 时,选取健壮、均一的秧苗移栽到花盆内(直径 = 25 cm,高 = 21 cm),于网室内自然光照及温度下培养,每天用清水补充水分蒸发部分,140 d 成熟后收获植物样品,测定 Cd 和 Pb 含量。

1.3 土壤和植物样品分析

1.3.1 土壤和植物 Cd 含量测定

植物收获后采集盆中土样,风干后过 1 mm 筛,混匀,备用。土壤 pH 值用去离子水(土水比 1:2.5)浸提,pH 值计(PB-10, Sartorius)测定。土壤中 Cd、Pb 可提取态含量采用美国 EPA 通用重金属生态环境风险评价方法-TCLP (Toxicity characteristic leaching procedure)法。原子吸收分光光度计(SOLAAT M6, Thermo Fisher Scientific, USA)测定。

土壤样品中 Cd 形态分析采用 Tessier 等的方法^[19]。分别以 8 mL 1.0 mol·L⁻¹ MgCl₂ 提取 1 h、8 mL 1.0 mol·L⁻¹ NaAc (pH 5.0) 提取 5 h、20 mL 0.04 mmol·L⁻¹ NH₂·HCl (pH 2.0) 96℃ 下提取 6 h、3 mL 30% H₂O₂ 和 20% HNO₃ (pH 2.0) 在 85℃ 提取 2 h,加入 3 mL 30% H₂O₂ (pH 2.0) 85℃ 提取 3 h,然后加 5 mL 3.2 mol·L⁻¹ NH₄Ac 和 20% HNO₃ 调整到 20 mL 常温下提取 0.5 h,分别获得 Cd 交换态(SE)、碳酸盐结合态(WSA)、铁锰氧化物结合态(OX)和有机结合态(OM),以差减法获得 Cd 残渣态(RES)含量。

水稻样品分为茎、叶、糙米和稻壳4部分,烘干至衡重,粉碎后备用. 植物和土壤样品采用 HNO_3 - HClO_4 法消化(体积比为3:1),原子吸收分光光度计(SOLAAT M6, Thermo Fisher Scientific, USA)测定Cd含量.

1.3.2 土壤酶活性测定

采用2, 3, 5-三苯基四唑氯化物显色法(TTC法)测定脱氢酶活性^[18],于波长485 nm处比色,单位为 $\text{mL} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. 采用苯酚-次氯酸钠比色法测定脲酶活性^[20],于波长578 nm处比色,单位(以 NH_4^+ -N计)为 $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. 采用3, 5-二硝基水杨酸比色法测定蔗糖酶活性^[18, 20],于波长508 nm处比色,单位为 $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$.

1.3.3 土壤微生物数量测定

土壤细菌、真菌和放线菌数量分别采用牛肉膏蛋白胨培养基、马丁氏培养基和改良高氏1号培养基培养^[21],采用平板计数法测定.

1.4 统计分析

所有检测的数据都重复3次,在计算机上用Microsoft Excel 2003进行平均值和标准差的运算,以 $\text{Mean} \pm \text{SD}$ 形式表示. 并利用最小显著性差异测验(LSD测验)进行样品差异显著性测验.

2 结果与讨论

2.1 不同处理对土壤pH值和重金属形态分布的影响

从表1可以看出,随海泡石含量的增加土壤pH值随之升高,比对照处理,增加了0.9%~2.3%. 其中,当海泡石含量达到1%时,土壤pH值显著增加($P < 0.05$). 这是由于海泡石具有较高的pH值(10.1),呈较强的碱性,导致土壤pH值升高. 土壤中Cd和Pb可溶态含量随海泡石添加量的增加而降低(图1),降幅分别为1.4%~72.9%和11.8%~51.4%,其中,当海泡石含量达到1%时,土壤Cd可溶态含量明显减少. 与之相反,土壤中碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态Cd含量分别比对照处理增加了10.0%~36.9%和16.5%~25.2%,而土壤中碳酸盐结合态和残渣态Pb含量分别比对照增加了3.0%~1.9%和10.8%~64.5%.

pH是影响重金属污染土壤钝化修复效率的重要因子^[6, 7, 22],其主要借助于对土壤中的物理、化学以及生物反应过程的影响来间接影响重金属的有效性^[22],其中包括酸碱度会影响重金属离子水解平衡、络合平衡和吸附-释放平衡等^[22~24]. Madejón

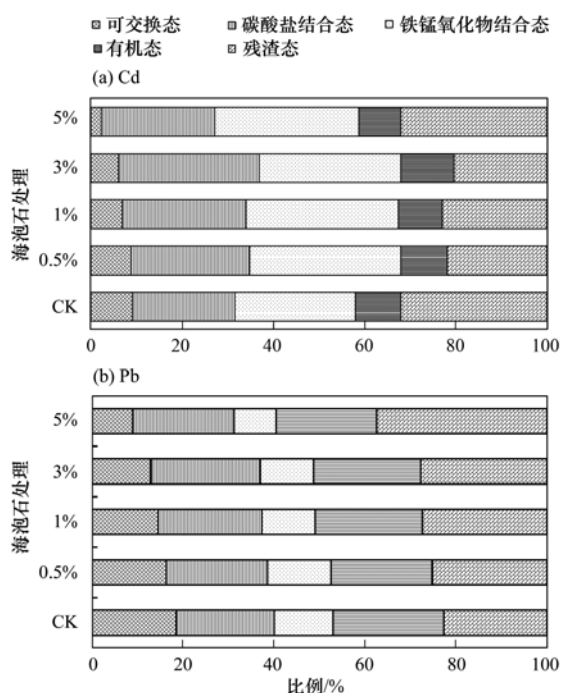


图1 不同含量海泡石处理下土壤Cd、Pb形态分布

Fig. 1 Cd and Pb speciation under different treatments of sepiolite

等^[25]研究发现,土壤pH值每增加一个单位,土壤中Cd、Zn、Ni等重金属可溶态含量最大可降低2倍. 前期研究发现,在1.25、2.5和 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd污染土壤中施加海泡石后,土壤可溶态Cd含量比例分别下降了10.5%、14.3%和9.3%^[7]. 在大田条件下,施用海泡石、石灰等材料后土壤Cd和Pb交换态含量最大可降低47.5%和57.6%^[26]. 施用海泡石后土壤pH值升高,促进土壤胶体和黏粒对重金属离子的吸附,有利于重金属氢氧化物或碳酸盐沉淀的生成.

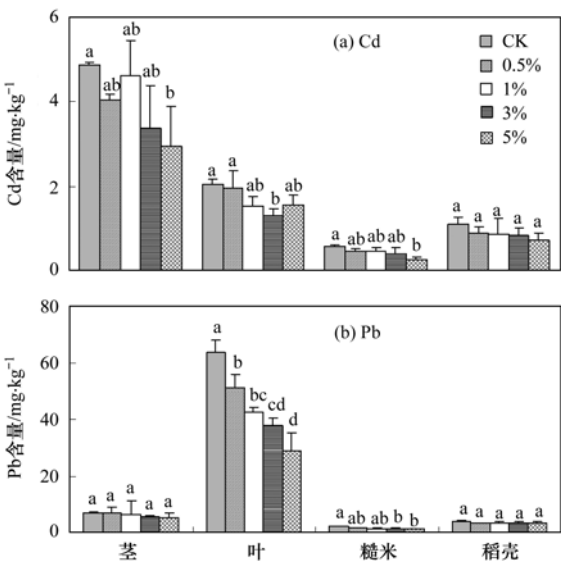
2.2 不同处理下水稻体内Cd、Pb含量

图2表示的是不同剂量处理海泡石对水稻体内Cd和Pb含量的影响. 水稻体内Cd含量分布特征表现为茎>叶>稻壳>糙米,而Pb在水稻体内分布规律为叶>茎>稻壳>糙米,这与王林等研究结果相一致^[26]. 从中可知,施用海泡石能有效降低水稻对重金属的吸收和累积,且总体上呈现出随海泡石含量的增加而降低的趋势. 与对照相比,水稻茎、叶、糙米和稻壳中Cd含量分别降低了5.1%~39.8%、0.4%~36.4%、21.2%~55.2%和17.4%~32.4%,其中5%海泡石处理显著降低茎部和糙米中Cd含量,而海泡石含量达到3%时,茎Cd含量才明显受到抑制($P < 0.05$). 水稻茎、叶、糙米和稻壳中Pb含量分别比对照处理降低了

3.7% ~ 22.1%、19.2% ~ 54.6%、18.7% ~ 43.5% 和 12.4% ~ 17.8%。其中,施用 1% ~ 5% 海泡石显著降低水稻叶部 Pb 含量,当海泡石含量达到 3% 时才明显降低糙米中 Pb 含量,而不同海泡石处理下水稻茎和稻壳中 Pb 含量变化则没有统计学差异 ($P > 0.05$)。富集系数是植物地上部重金属含量与土壤重金属含量的比值,可以用来表征土壤-植物体系中重金属迁移的难易程度,是反映植物将重金属吸收转移到体内能力大小的重要指标^[27]。虽然水稻体内各部分 Pb 含量要高于 Cd 含量,但 Cd 在土壤-水稻根-水稻地上部的迁移转运能力明显高于 Pb。

2.3 钝化修复对土壤环境质量的影响

土壤酶和微生物群落一起共同推动土壤的代谢过程,是土壤环境容量的重要评价指标之一^[17, 28]。过氧化氢酶作为土壤中的氧化还原酶类,其活性可以表征土壤腐殖质化强度大小和有机质转化速度^[17]。土壤蔗糖酶可以增加土壤中的易溶性营养物质,其活性与有机质的转化和呼吸强度有密切关



不同字母表示它们之间达到显著性差异($P < 0.05$),下同
图2 海泡石处理对水稻体内 Cd 和 Pb 含量的影响
Fig. 2 Cd and Pb concentrations in different tissues of rice treated with sepiolite

表1 不同处理下土壤 pH 和重金属富集系数

Table 1 Soil pH and bioaccumulation factor of heavy metals of sepiolite treated soil									
处理	pH	Cd 富集系数				Pb 富集系数			
		茎	叶	糙米	稻壳	茎	叶	糙米	稻壳
CK	7.85 ± 0.01c	0.98	0.41	0.12	0.22	0.01	0.06	0.00	0.00
0.5%	7.92 ± 0.01bc	0.81	0.39	0.09	0.18	0.01	0.05	0.00	0.00
1%	7.95 ± 0.04b	0.93	0.31	0.09	0.18	0.01	0.04	0.00	0.00
3%	7.98 ± 0.01ab	0.68	0.26	0.08	0.17	0.01	0.04	0.00	0.00
5%	8.03 ± 0.05a	0.59	0.31	0.05	0.15	0.01	0.03	0.00	0.00

系^[29]。土壤脲酶活性能在一定程度上反映土壤的供氮能力^[7, 29, 30]。土壤酶活性变化影响土壤养分释放及从土壤中获取养分的作物生长,因此,土壤酶活性的测定将有助于判断土壤重金属污染程度及其对作物生长的影响^[30, 31]。由图 3 可以看出,土壤过氧化氢酶活性总体上随海泡石含量增加呈现先增加后降低的趋势。当海泡石含量为 0.5% 时,过氧化氢酶活性达到最大,为对照处理的 102.7% 倍,且显著高于 3% 和 5% 海泡石处理 ($P < 0.05$)。施用不同剂量海泡石降低了土壤脲酶活性,与对照相比,降低了 0.9% ~ 7.0%,其中海泡石添加含量达到 3% 时,脲酶活性明显受到抑制 ($P < 0.05$)。土壤蔗糖酶活性随海泡石含量增加先增加后降低,当海泡石含量为 1% 时,蔗糖酶活性最强,且显著高于 5% 海泡石处理。与对照相比,0.5% 和 1% 海泡石处理下蔗糖酶活性分别增加了 2.9% 和 6.2%,而施加 3% 和 5% 海泡石后,土壤蔗糖酶活性则分别降低了 10.0% 和 17.0%,但不同处理之间未出现统计学差

异。前期研究发现,添加海泡石使得不同含量 Cd 污染土壤中过氧化氢酶、脲酶和蔗糖酶的活性分别比空白处理增加了 5.1% ~ 15.4%、14.2% ~ 28.8% 和 23.5% ~ 34.0%^[5]。这是由于施加海泡石降低了土壤重金属有效态含量,缓解了重金属对土壤酶活性的抑制效应,土壤环境质量在一定程度有所改善。利用沸石、赤泥和石灰修复重金属污染土壤时发现,土壤脱氢酶活性明显高于对照处理,分别增加 31%、60% 和 42%,而脲酶活性在添加赤泥和石灰处理后显著增加^[32]。

土壤微生物参与土壤生物地球循环、植物矿质元素的吸收和转运,在改良土壤结构、增加土壤肥力,提升植物抗病害能力和作物产量等方面发挥重要作用^[33],被认为是表征土壤质量变化最敏感、最有潜力的指标^[34]。从土壤微生物群落组成来看,不同含量海泡石处理下三大主要微生物类群的组成比例大体上一致,数量上仍以细菌为主,放线菌次之,真菌位居第三。施加海泡石后不同程度上提高污染

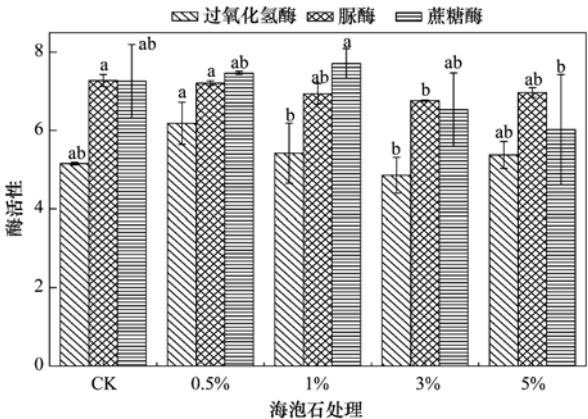
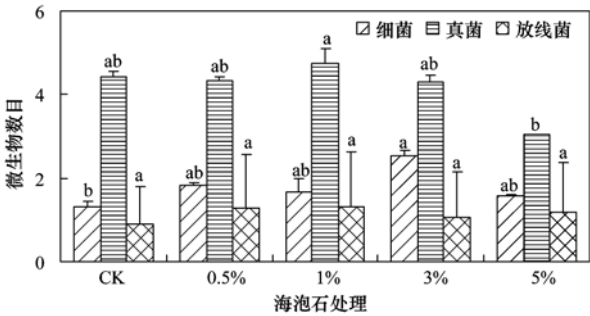


图3 施加海泡石处理对土壤酶活性的影响

Fig. 3 Soil enzyme activities after the addition of sepiolite

土壤中细菌和放线菌的数量,与对照相比,分别增加了 18.8% ~ 89.5% 和 19.6% ~ 46.9%. 其中,仅 3% 海泡石处理下土壤细菌数量明显高于对照处理,而不同含量海泡石处理下放线菌的数量则未呈现明显差异(图 4). 真菌的数量仅在 1% 处理有所增加,增幅达到 7.6%,其它含量海泡石处理下(0.5%、3% 和 5%) 分别比对照降低了 2.0%、2.4% 和 31.3%. 然而,不同含量海泡石处理下,仅 1% 和 5% 海泡石处理后土壤真菌数目之间存在明显统计学差异. 利用纳米羟基磷灰石修复重金属污染土壤的研究发现,土壤微生物活性和多样性指数显著性增加,显示污染土壤修复后微生物群落得到改良. 前期研究发现,施用海泡石后细菌和真菌数量分别比对照处理增加了 15.5% ~ 91.7% 和 45.6% ~



细菌、真菌和放线菌的单位分别为 10^7 、 10^4 和 10^6 CFU·g⁻¹

图4 不同含量海泡石对微生物数量的影响

Fig. 4 Effects of different contents of sepiolite on microbial quantity

96.5%, 而放线菌对数目则下降了 21.3% ~ 59.0%^[35].

3 相关性分析

本研究中,pH 值与土壤可溶态 Cd 和 Pb 含量、水稻体内各部分 Cd 和 Pb 含量、土壤酶活性以及真菌数量之间存在负相关关系(表 2). 其中,土壤 pH 值与可溶态 Cd 和 Pb 含量以及水稻叶和糙米 Pb 含量之间存在极显著负相关关系($P < 0.01$),与水稻叶、糙米和稻壳中 Cd 含量存在显著负相关关系($P < 0.05$). 然而,土壤 pH 值与细菌和放线菌数量之间存在正相关,但不明显($P > 0.05$). 由此可见,pH 是影响土壤重金属化学形态含量变化和土壤环境质量的因子^[36],可以用来评价重金属污染土壤钝化修复效应的关键参数^[5, 7].

土壤可溶态 Cd 和 Pb 含量与水稻茎、叶、糙米

表2 不同参数间的相关性分析¹⁾

Table 2 Correlationship of the different parameters

	pH	可溶态 Cd	可溶态 Pb	茎 Cd	叶 Cd	米 Cd	壳 Cd	茎 Pb	叶 Pb	米 Pb	壳 Pb	过氧化氢酶	脲酶	蔗糖酶	细菌	真菌	放线菌
pH	1	-0.82 **	-0.92 **	-0.57	-0.72 *	-0.68 *	-0.71 *	-0.18	-0.96 **	-0.85 **	-0.27	-0.24	-0.54	-0.63	0.33	-0.51	0.42
可溶态 Cd		1	0.87 *	0.63	0.56	0.58	0.65 *	0.15	0.79 **	0.62	0.20	0.23	0.40	0.45	-0.15	0.55	-0.19
可溶态 Pb			1	0.67 *	0.52	0.81 **	0.51	0.46	0.95 **	0.76 *	0.31	0.13	0.60	0.67 *	-0.23	0.58	-0.18
茎 Cd				1	0.43	0.72 *	0.24	0.38	0.65 *	0.28	0.54	-0.19	0.58	0.49	-0.54	0.30	0.10
叶 Cd					1	0.26	0.52	-0.21	0.70 *	0.66 *	0.18	0.52	0.64 *	0.30	-0.48	0.16	-0.39
米 Cd						1	0.26	0.66 *	0.78 **	0.37	0.56	-0.21	0.51	0.68 *	-0.33	0.22	0.08
壳 Cd							1	-0.21	0.52	0.45	0.193	0.15	0.02	0.32	-0.35	0.14	-0.43
茎 Pb								1	0.31	0.01	0.43	-0.34	0.51	0.51	-0.24	-0.00	0.48
叶 Pb									1	0.83 **	0.38	0.17	0.67 *	0.61	-0.32	0.49	-0.36
米 Pb										1	0.05	0.40	0.52	0.33	-0.06	0.64	-0.61
壳 Pb											1	-0.62	0.51	-0.03	-0.63	-0.40	-0.12
过氧化氢酶												1	0.14	0.19	0.06	0.26	0.06
脲酶													1	0.33	-0.57	0.06	0.00
蔗糖酶														1	-0.26	0.39	0.24
细菌															1	0.42	-0.16
真菌																1	-0.29
放线菌																	1

1) * 为 $P < 0.05$, ** 为 $P < 0.01$

和稻壳中 Cd 和 Pb 含量、土壤酶活性以及真菌数量之间呈现正相关关系,但仅可溶态 Cd 含量与稻壳 Cd 含量之间、可溶态 Pb 含量与糙米 Pb 含量和蔗糖酶活性之间存在显著正相关($P < 0.05$),可溶态 Pb 含量与叶部 Pb 含量之间存在极显著正相关($P < 0.01$)。植物体内各部分重金属含量与土壤脲酶和蔗糖酶活性呈现正相关,其中叶 Cd 和 Pb 含量与脲酶活性以及糙米 Cd 含量与蔗糖酶活性之间存在显著正相关关系($P < 0.05$)。水稻茎、叶、糙米和稻壳重金属含量与细菌数量之间存在负相关,真菌数量与水稻体内各部分 Cd 含量之间存在正相关,但都不显著。崔红标等^[36]利用纳米羟基磷灰石修复重金属污染土壤,研究发现,过氧化氢酶和酸性磷酸酶对土壤重金属 Cu、Cd 活性变化比较敏感,可以作为重金属 Cu、Cd 污染土壤的评价指标。本研究中,投加海泡石降低了土壤可溶态 Cd 和 Pb 含量,缓解了重金属对土壤酶活性的毒性效应,以此同时也抑制了 Cd 和 Pb 在植物体内转移和富集。由于土壤脲酶和蔗糖酶活性与土壤可溶态 Cd 和 Pb 含量以及水稻体内 Cd 和 Pb 含量总体上存在正相关关系,且脲酶活性与叶 Cd 和 Pb 含量以及蔗糖酶与糙米 Cd 含量活性之间存在显著正相关关系,可以作为重金属钝化修复污染土壤的评价指标。

4 结论

(1)土壤 pH 值随海泡石施加含量增加而增大,污染土壤中的 Cd 和 Pb 由活性较高的可提取态向活性低的碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态以及残渣态转变,与对照相比,土壤可溶态 Cd 和 Pb 含量降幅分别达到了 1.4% ~ 72.9% 和 11.8% ~ 51.4%。

(2)施用海泡石抑制了水稻吸收和富集 Cd 和 Pb,总体上呈现出随海泡石含量的增加而降低的趋势,与对照相比,水稻茎、叶、糙米和稻壳中 Cd 含量分别降低了 5.1% ~ 39.8%、0.4% ~ 36.4%、21.2% ~ 55.2% 和 17.4% ~ 32.4%,水稻茎、叶、糙米和稻壳中 Pb 含量分别比对照处理降低了 3.7% ~ 22.1%、19.2% ~ 54.6%、18.7% ~ 43.5% 和 12.4% ~ 17.8%。

(3)在污染土壤添加海泡石后一定程度上改善了土壤环境质量,过氧化氢酶和蔗糖酶活性分别在海泡石含量为 0.5% 和 1% 时达到最高。而脲酶活性随海泡石含量增加而降低,但与对照相比变化不明显。施加海泡石后不同程度上提高污染土壤中细

菌和放线菌的数量,与对照相比,分别增加了 18.8% ~ 89.5% 和 19.6% ~ 46.9%。真菌的数量仅在 1% 处理有所增加,增幅达到 7.6%。

(4)土壤 pH 值与可溶态 Cd 和 Pb 含量以及水稻叶和糙米 Pb 含量之间存在极显著负相关关系($P < 0.01$),与水稻叶、糙米和稻壳中 Cd 含量存在显著负相关关系($P < 0.05$)。可溶态 Cd 含量与稻壳 Cd 含量之间、可溶态 Pb 含量与糙米 Pb 含量和蔗糖酶活性之间存在显著正相关($P < 0.05$),可溶态 Pb 含量与叶部 Pb 含量之间存在极显著正相关($P < 0.01$)。脲酶活性与叶 Cd 和 Pb 含量以及蔗糖酶与糙米 Cd 含量活性之间存在显著正相关关系。因而,pH、重金属可溶态含量以及脲酶和蔗糖酶活性可以用来评价重金属钝化修复效率。

参考文献:

- [1] 环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 北京, 2014.
- [2] 郭观林,周启星,李秀颖. 重金属污染土壤原位化学固定修复研究进展[J]. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1990-1996.
- [3] Sun Y B, Sun G H, Xu Y M, *et al.* Assessment of sepiolite for immobilization of cadmium-contaminated soils [J]. Geoderma, 2013, 193-194: 149-155.
- [4] Kumpiene J, Lagerkvist A, Maurice C. Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments-a review [J]. Waste Management, 2008, 28(1): 215-225.
- [5] 周启星,宋玉芳. 污染土壤修复原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [6] 孙约兵,徐应明,史新,等. 污灌区镉污染土壤钝化修复及其生态效应研究[J]. 中国环境科学, 2012, 32(8): 1467-1473.
- [7] Sun Y B, Sun G H, Xu Y M, *et al.* Assessment of natural sepiolite on cadmium stabilization, microbial communities, and enzyme activities in acidic soil [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(5): 3290-3299.
- [8] 华珞,刘秀珍,夏立江,等. 土壤对铜、镉、铅、氟的吸附及改良剂对土壤-植物系统中养分元素有效性的影响[J]. 华北农学报, 1994, 9(1): 57-62.
- [9] 郭文娟. 生物炭对镉污染土壤的修复效应及其环境影响行为[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
- [10] Sun Y B, Sun G H, Xu Y M, *et al.* In situ stabilization remediation of cadmium contaminated soils of wastewater irrigation region using sepiolite [J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, 24(10): 1799-1805.
- [11] Lombi E, Zhao F J, Zhang G Y, *et al.* In situ fixation of metals in soils using bauxite residue: Chemical assessment [J]. Environmental Pollution, 2002, 118(3): 435-443.
- [12] 张鸿龄,孙丽娜,孙铁珩. 粉煤灰钝化污泥人工土壤理化性质研究[J]. 环境科学, 2008, 29(7): 2068-2072.

- [13] 苏德纯, 张福锁, Wong J W C. 粉煤灰钝化污泥对土壤理化性质及玉米重金属累积的影响[J]. 中国环境科学, 1997, **17**(4): 321-325.
- [14] 彭桂香, 蔡婧, 林初夏. 超积累植物和化学改良剂联合修复镉镉污染土壤后的微生物特征[J]. 生态环境, 2005, **14**(5): 654-657.
- [15] Chlopecka A, Adriano D C. Mimicked in-situ stabilization of metals in a cropped soil: Bioavailability and chemical form of zinc [J]. Environmental Science and Technology, 1996, **30**(11): 3294-3303.
- [16] de Mora A P, Ortega-Calvo J J, Cabrera F, *et al.* Changes in enzyme activities and microbial biomass after “in situ” remediation of a heavy metal-contaminated soil [J]. Applied Soil Ecology, 2005, **28**(2): 125-137.
- [17] Lee S H, Lee J S, Choi Y J, *et al.* In situ stabilization of cadmium-, lead-, and zinc-contaminated soil using various amendments [J]. Chemosphere, 2009, **77**(8): 1069-1075.
- [18] Huang C, Deng L J, Gao X S, *et al.* Effects of fungal residues return on soil enzymatic activities and fertility dynamics in paddy soil under a rice-wheat rotation in Chengdu Plain [J]. Soil & Tillage Research, 2010, **108**(1-2): 16-23.
- [19] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. Analytical Chemistry, 1979, **51**(7): 844-851.
- [20] 关菰萌. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [21] 沈萍, 范秀容, 李广武. 微生物学实验 [M]. (第三版). 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [22] Markiewicz-Patkowska J, Hursthouse A, Przybyla-Kij H. The interaction of heavy metals with urban soils: sorption behaviour of Cd, Cu, Cr, Pb and Zn with a typical mixed brownfield deposit [J]. Environment International, 2005, **31**(4): 513-521.
- [23] 刘清, 王子健, 汤鸿霄. 重金属形态与生物毒性及生物有效性关系的研究进展[J]. 环境科学, 1996, **17**(1): 89-92.
- [24] 李晓晨, 赵丽, 印华斌. 浸提剂 pH 值对污泥中重金属浸出的影响[J]. 生态环境, 2008, **17**(1): 190-194.
- [25] Madejón E, de Mora A P, Felipe E, *et al.* Soil amendments reduce trace element solubility in a contaminated soil and allow regrowth of natural vegetation [J]. Environmental Pollution, 2006, **139**(1): 40-52.
- [26] 王林, 徐应明, 梁学峰, 等. 广西刁江流域 Cd 和 Pb 复合污染稻田土壤的钝化修复[J]. 生态与农村环境学报, 2012, **28**(5): 563-568.
- [27] 孙约兵, 周启星, 任丽萍. 镉超富集植物球果蕀菜对镉-砷复合污染的反应及其吸收积累特征[J]. 环境科学, 2007, **28**(6): 1355-1360.
- [28] 刘善江, 夏雪, 陈桂梅, 等. 土壤酶的研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, **27**(21): 1-7.
- [29] Tripathia S, Chakraborty A, Chakrabarti K, *et al.* Enzyme activities and microbial biomass in coastal soils of India [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2007, **39**(11): 2840-2848.
- [30] 田海霞, 和文祥, 乔园, 等. Hg 的土壤酶效应初步研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(5): 913-919.
- [31] 沈国清, 陆贻通, 洪静波. 重金属和多环芳烃复合污染对土壤酶活性的影响及定量表征[J]. 应用与环境生物学报, 2005, **11**(4): 479-482.
- [32] Garau G, Castald P, Santona L, *et al.* Influence of red mud, zeolite and lime on heavy metal immobilization, culturable heterotrophic microbial populations and enzyme activities in a contaminated soil [J]. Geoderma, 2007, **142**(1-2): 47-57.
- [33] Artursson V, Finlay R D, Jansson J K. Interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and bacteria and their potential for stimulating plant growth [J]. Environmental Microbiology, 2006, **8**(1): 1-10.
- [34] 任天志, Grego S. 持续农业中的土壤生物指标研究[J]. 中国农业科学, 2000, **33**(1): 68-75.
- [35] Wallenius K, Rita H, Mikkonen A, *et al.* Effects of land use on the level, variation and spatial structure of soil enzyme activities and bacterial communities [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2011, **43**(7): 1464-1473.
- [36] 崔红标, 田超, 周静, 等. 纳米羟基磷灰石对重金属污染土壤 Cu/Cd 形态分布及土壤酶活性影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(5): 874-880.

CONTENTS

Concentration and Size Distribution of Bioaerosols at Non-haze and Haze Days in Beijing	GAO Min, QIU Tian-lei, JIA Rui-zhi, <i>et al.</i> (4415)
Light Scattering Extinction Properties of Atmospheric Particle and Pollution Characteristics in Hazy Weather in Hangzhou	XU Chang, YE Hui, SHEN Jian-dong, <i>et al.</i> (4422)
Characteristic of Elements in PM _{2.5} and Health Risk Assessment of Heavy Metals During Heating Season in Taiyuan	LI Li-juan, WEN Yan-ping, PENG Lin, <i>et al.</i> (4431)
Pollution Characteristics of Secondary Water-soluble Inorganic Ions of PM _{2.5} in Urban Chengdu, China	LI You-ping, ZHOU Hong, ZHANG Zhi-sheng, <i>et al.</i> (4439)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Ozone in Beijing	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, CHEN Tian, <i>et al.</i> (4446)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Northern Suburb of Nanjing	AN Jun-lin, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4454)
Environmental Significance of Wet Deposition Composition in the Central Qilian Mountains, China	LI Zong-jie, LI Zong-xing, TIAN Qing, <i>et al.</i> (4465)
Dynamics of Nitrogen and Sulfur Wet Deposition in Typical Forest Stand at Different Spatial Levels in Simian Mountain, Mid-subtropical Region	SUN Tao, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4475)
Establishment and Assessment of QA/QC Method for Sampling and Analysis of Atmosphere Background CO ₂	LIU Li-xin, ZHOU Ling-xi, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (4482)
An Investigation of the CH ₄ and N ₂ O Emission Factors of Light-duty Gasoline Vehicles	HE Li-qiang, SONG Jing-hao, HU Jing-nan, <i>et al.</i> (4489)
Experimental Study on the Size Spectra and Emission Factor of Ultrafine Particle from Coal Combustion	SUN Zai, YANG Wen-jun, XIE Xiao-fang, <i>et al.</i> (4495)
Distributions and Air-Sea Fluxes of Dissolved Nitrous Oxide in the Yangtze River Estuary and Its Adjacent Marine Area in Spring and Summer	WANG Lan, ZHANG Gui-ling, SUN Ming-shuang, <i>et al.</i> (4502)
Spectral Absorption Properties of the Water Constituents in the Estuary of Zhujiang River	WANG Shan-shan, WANG Yong-bo, FU Qing-hua, <i>et al.</i> (4511)
Characteristics of Phosphorus Forms and the Effects of UV Light in the Confluences Water of Qujiang-Jialing River and Fujiang-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4522)
Research on the Threshold of Chl-a in Lake Taihu Based on Microcystins	WEI Dai-chun, SU Jing, JI Dan-feng, <i>et al.</i> (4530)
Temporal and Spatial Characteristic of Nitrogen and Phosphorus Output in the Suburb Watershed Around the Baihua Lake	FENG Yuan-song, LIN Tao, YANG Qing-yuan (4537)
Effects of Light Irradiation on Phosphorous Releases from Typical Submerged Soils of Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoirs Areas	GUO Nian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4544)
Analysis on the Removal Efficiency and Mechanisms of Phosphorus by Modified Zeolites Substrates Coated with LDHs Reacted by Different Metal Compounds in Laboratory-Scale Vertical-Flow Constructed Wetlands	ZHANG Xiang-ling, CHEN Jun-jie, GUO Lu, <i>et al.</i> (4553)
Mercury Dynamics of Several Plants Collected from the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area During Flooding and Its Impact on Water Body	ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (4560)
Effect of Nano-TiO ₂ on the Release and Activation of Mercury in Sediment	ZHANG Jin-yang, LI Chu-xian, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4567)
Estimation Inventory of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from Anthropogenic Sources and Its Impacts within the Yanghe Watershed, an Important Water-Source Site of Beijing, China	GAO Jia-jia, LUO Wei, XI Xiao-xia (4573)
Source Identification of Toxic Wastewaters in a Petrochemical Industrial Park	YANG Qian, YU Yin, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (4582)
Investigation of Pollution Characteristics of Erythromycin Resistance Genes in a Sewage Treatment Plant and the Relevant Selective Factors	LI Kan-zhu, WU Li-le, HUANG Sheng-lin, <i>et al.</i> (4589)
Variation of Pollutants Along the Height of Two Media BAF During Advanced Treatment of Dyeing Wastewater	LIU Jun-feng, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4596)
Acclimatization and Characteristics of Microbial Community in Sulphate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XI Jing-ru, LIU Su-qin, LI Lin, <i>et al.</i> (4602)
Capability and Microbial Community Analysis of a Membrane Bioreactor for Acrylic Fiber Wastewater Treatment	WEI Jian, SONG Yong-hui, ZHAO Le (4610)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX ABR Process in Tannery Wastewater Treatment	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan (4618)
Numerical Simulation and Operation Optimization of Biological Filter	ZOU Zong-sen, SHI Han-chang, CHEN Xiang-qiang, <i>et al.</i> (4627)
Effect of Gas-lift Device on the Morphology and Performance of ANAMMOX Sludge	LI Xiang, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4636)
Water Treatment Residual as a Bioretention Media Amendment for Phosphorus Removal	WANG Jian-jun, LI Tian, ZHANG Ying (4642)
Nutrient Contents and Heavy Metal Pollutions in Composted Sewage Sludge from Different Municipal Wastewater Treatment Plants in Beijing Region	BAI Li-ping, QI Hong-tao, FU Ya-ping, <i>et al.</i> (4648)
Polychlorinated Biphenyls and Their Methylsulfonyl Metabolites in Fish from an Electronic Waste Recycling Site in South China: Tissue Distribution and Human Dietary Exposure	TANG Bin, LUO Xiao-jun, ZENG Yan-hong, <i>et al.</i> (4655)
Residues and Health Risk Assessment of HCHs, DDTs and Heavy Metals in Water and <i>Tilapia</i> s from Fish Ponds of Guangdong	XIE Wen-ping, ZHU Xin-ping, ZHENG Guang-ming, <i>et al.</i> (4663)
Concentration and Distribution Characteristics of Estrogen in Aquatic Organism from Chongming Island	GENG Jing-jing, YE Ai-li, YANG Yi, <i>et al.</i> (4671)
Photocatalytic Degradation of Acetamiprid by TiO ₂ and Xe Lamp: Kinetics and Degradation Intermediates	ZHOU Wen-chang, YANG Hai, HU Zhi-bin, <i>et al.</i> (4678)
Effects of Nitrogen Addition on Available Nitrogen Content and Acidification in Cold-temperate Coniferous Forest Soil in the Growing Season	CHEN Gao-qi, FU Wa-li, LUO Ya-chen, <i>et al.</i> (4686)
Impact of Land Use Type on Stability and Organic Carbon of Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Jian-lin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4695)
Investigation and Canonical Correspondence Analysis of Salinity Contents in Secondary Salinization Greenhouse Soils in Shanghai Suburb	TANG Dong, MAO Liang, ZHI Yue-e, <i>et al.</i> (4705)
Spatial Distribution Prediction of Surface Soil Pb in a Battery Contaminated Site	LIU Geng, NIU Jun-jie, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4712)
Immobilization Remediation of Cd and Pb Contaminated Soil: Remediation Potential and Soil Environmental Quality	SUN Yue-bing, WANG Peng-chao, XU Ying-ming, <i>et al.</i> (4720)
Rules and Impact Factors of Greenhouse Gases Emission in the Saline-Alkali Paddy Fields in Different Years	TANG Jie, FANG Tian-ru, HOU Ke-yi, <i>et al.</i> (4727)
Adsorption of Cd(II) Varies with Biochars Derived at Different Pyrolysis Temperatures	WANG Zhen-yu, LIU Guo-cheng, Monica Xing, <i>et al.</i> (4735)
Poisoning Effect of Ca Depositing Over Mn-Ce/TiO ₂ Catalyst for Low-temperature Selective Catalytic Reduction of NO by NH ₃	ZHOU Ai-yi, MAO Hua-feng, SHENG Zhong-yi, <i>et al.</i> (4745)
A Comparative Study on Domestic and Foreign Emission Standards of Air Pollutants for Cement Industry	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4752)
Revision Process and Thinking of Emission Standard of Air Pollutants for Cement Industry	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4759)

《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12月15日 第35卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 12 Dec. 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