

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第2期

Vol.35 No.2

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

我国环境空气中颗粒物达标统计要求研究	王帅,丁俊男,王瑞斌,李健军,孟晓艳,杨彬,林宏 (401)
北京城区 PM _{2.5} 中致癌重金属季节变化特征及其来源分析	陶俊,张仁健,段菁春,荆俊山,朱李华,陈忠明,赵岳,曹军骥 (411)
北京地区冬春 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 污染水平时空分布及其与气象条件的关系	赵晨曦,王云琦,王玉杰,张会兰,赵冰清 (418)
北京市 PM _{2.5} 可吸入颗粒物反演及其时空分布分析	王艳慧,肖瑶 (428)
杭州市春季大气超细颗粒物粒径谱分布特征	谢小芳,孙在,杨文俊 (436)
春节期间南京市大气气溶胶粒径分布特征	王红磊,朱彬,沈利娟,刘晓慧,张泽峰,杨洋 (442)
南京市大气颗粒物中有机碳和元素碳粒径分布特征	吴梦龙,郭照冰,刘凤玲,刘杰,卢霞,姜琳琳 (451)
忻州市环境空气 PM ₁₀ 中有机碳和元素碳污染特征分析	史美鲜,彭林,刘效峰,牟玲,白慧玲,刘凤娟,杨花 (458)
广州某工业区大气中 PCDD/Fs 含量水平及其季节性变化特征	青亮,苏原,苏青,张素坤,任明忠 (464)
燃煤电厂锅炉 PM _{2.5} 排放危害度评价模型建立及案例分析	史妍婷,杜谦,高建民,边昕,王知涛,董鹤鸣,韩强,曹阳 (470)
中国南海大气降水化学特征	肖红伟,龙爱民,谢露华,肖化云,刘丛强 (475)
临安本底站酸雨长期观测特征分析	李正泉,马浩,毛裕定,冯涛 (481)
北京城区大气氮湿沉降特征研究	贺成武,任玉芬,王效科,毛宇翔 (490)
烟雾箱与数值模拟研究苯和乙苯的臭氧生成潜势	贾龙,徐永福 (495)
祁连山老虎沟 12 号冰川积雪中飞灰颗粒物的特征	董志文,秦大河,秦翔,杜志恒,陈记祖,任贾文 (504)
生活垃圾填埋场作业面恶臭散发率研究	羌宁,王红玉,赵爱华,袁文祥,邵俊,陈檬 (513)
生物滴滤塔处理苯酚气体研究	何觉聪,黄倩茹,陈洲洋,叶纪宏,罗雨薇,魏在山 (520)
国 V 柴油机燃用丁醇-柴油混合燃料颗粒粒径分布特性试验研究	楼狄明,徐宁,范文佳,张涛 (526)
翻堆频率对猪粪条堆肥过程温室气体和氨气排放的影响	赵晨阳,李洪枚,魏源送,钟佳,郑嘉嘉,韩圣慧,万合峰 (533)
CuBr ₂ 分解缓释-膜催化对零价汞的氧化性能研究	胡林刚,瞿赞,晏乃强,郭永福,谢江坤,贾金平 (541)
浙闽沿海岸域总溶解态无机锡的分布及影响因素研究	张许州,任景玲,刘宗广,樊孝鹏,刘诚刚,吴莹 (547)
基于双向算法的湖库允许纳污负荷量计算及案例	贾海峰,郭羽 (555)
北京平原区第四系地下水污染风险评价	郭高轩,李宇,许亮,李志萍,杨庆,许苗娟 (562)
不同季节辽河口营养盐的河口混合行为	张晋华,于立霞,姚庆祯,田琳 (569)
太湖南运河入湖河口沉积物氮素分布特征	马久远,王国祥,李振国,张佳,周锋,魏宏农,欧媛 (577)
亚热带地区潜流人工湿地木本植物筛选与净化潜力评价	陈永华,吴晓芙,郝君,陈明利,朱光玉 (585)
潜流人工湿地基质结构与水力特性相关性研究	白少元,宋志鑫,丁彦礼,游少鸿,何珊 (592)
凤眼莲对铜绿微囊藻生长及藻毒素与营养盐释放的影响	周庆,韩士群,严少华,宋伟,刘国峰 (597)
不同预氧化剂对长江原水氯(胺)化 DBPs 生成潜能的影响	田富箱,徐斌,荣蓉,陈英英,张天阳,朱贺振 (605)
溴化十六烷基吡啶改性沸石对水中菲的吸附作用	李佳,林建伟,詹艳慧,陈祖梅,王鹏钧 (611)
四环素光催化降解特性与选择性研究	宋晨怡,尹大强 (619)
微生物电解系统生物阴极的硫酸盐还原特性研究	符诗雨,刘广立,骆海萍,张仁铎,章莹颖 (626)
市政污水 A/DAT-IAT 系统中溶解性有机物表征与生态安全	杨赛,周启星,华涛 (633)
膜-生物反应器处理高盐废水膜面污染物特性研究	李彬,王志刚,安莹,吴志超 (643)
臭氧-曝气生物滤池组合工艺处理石化二级出水的试验研究	刘明国,吴昌永,周岳溪,高祯,王佩超,杨琦,董德 (651)
厌氧生物法处理果胶废水的研究	陈兵兵,杨春平,黎想,代传花,彭蓝艳 (657)
氧氟沙星在碳纳米管上的吸附机制研究	赵兴兴,于水利,王哲 (663)
平菇菌糠对废水中铜离子的生物吸附性能	胡晓婧,戴婷婷,顾海东,金羽,曲娟娟 (669)
基于流态化作用的吸附反应动力学和穿透特征	王君,王瑶,黄星,袁益龙,陈瑞晖,周航,周丹丹 (678)
广州城市污泥中重金属形态特征及其生态风险评价	郭鹏然,雷永乾,蔡大川,张涛,吴锐,潘佳钊 (684)
中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究	张小敏,张秀英,钟大洋,江洪 (692)
废旧电容器封存点土壤中的 PCBs 污染特征和健康风险评价	周玲莉,吴广龙,薛南冬,杨兵,李发生,丁琼,周丹丹,燕云仲,刘博,韩宝禄 (704)
深圳市表层土壤多环芳烃污染及空间分异研究	章迪,曹善平,孙建林,曾辉 (711)
洋河流域万全段重金属污染风险及控制对策	谭冰,王铁宇,朱朝云,李奇峰,徐笠,吕永龙 (719)
施用组配固化剂对盆栽土壤重金属交换态含量及在水稻中累积分布的影响	曾卉,周航,邱琼瑶,廖柏寒 (727)
螯合剂复配对实际重金属污染土壤洗脱效率影响及形态变化特征	尹雪,陈家军,吕策 (733)
<i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1 的锰氧化特性研究	周娜娜,柏耀辉,梁金松,罗金明,刘锐平,胡承志,袁林江 (740)
$n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 对混培养菌与纯培养菌同步脱氮除硫的影响	陈子爱,陈会娟,魏本平,刘刚金,邓良伟,吴力斌 (746)
杭州市空气微生物群落碳代谢特征研究	龚婵娟,许晶,方治国,楼秀芹,欧阳志云 (753)
鼠李糖脂逆胶束体系中纤维素酶的后萃研究	赵艳鸽,袁兴中,黄华军,崔凯龙,彭馨,彭子原,曾光明 (759)
黄海常见鱼类体内汞含量的种内和种间差异研究	朱艾嘉,许战洲,柳圭泽,邓丽杰,方宏达,黄良民 (764)
3 种 PAEs 对蚯蚓的毒性作用和组织酶活性影响的研究	王艳,马泽民,吴石金 (770)
新型保水剂应用于土壤-小白菜系统的环境安全评价	李希,贺纪正,郑袁明,郑明兰 (780)
黄河三角洲翅碱蓬湿地硫化氢和巯基硫排放动态研究	李新华,郭洪海,杨丽萍,朱振林,孙晓青 (786)
农田土壤 N ₂ O 产生的关键微生物过程及减排措施	朱永官,王晓辉,杨小茹,徐会娟,贾炎 (792)
《环境科学》征订启事 (691) 《环境科学》征稿简则 (800) 信息 (489,519,591,791)	

螯合剂复配对实际重金属污染土壤洗脱效率影响及形态变化特征

尹雪, 陈家军*, 吕策

(北京师范大学环境学院, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875)

摘要: 乙二胺四乙酸二钠 (EDTA) 是土壤重金属污染洗涤修复中最常用的洗涤剂, 然而其难降解性会对环境产生不利影响。而污染场地重金属形态分布对其环境风险至关重要。以某化工场地多种重金属污染土壤为对象, 为减少 EDTA 用量, 开展室内振荡实验考察 EDTA 与 EDDS 复配对 As、Cd、Cu 及 Pb 的洗脱效果和最佳复配比条件下洗涤前后重金属形态变化。结果表明在最优洗脱条件下, As、Cd 和 Pb 去除率在 EDTA:EDDS = 7:3 时达到最高, 分别为 12.67%、38.71% 和 31.09%; Cu 在复配比为 9:1 时可达 16.91%。洗涤后, As 的铁锰氧化态含量升高, 会增加一定的环境风险; Cd 的形态分布大体与原土一致; Cu 和 Pb 的洗脱主要来自铁锰氧化态, 其中 Pb 的铁锰氧化态洗脱量最大, 而有机结合态所占百分比降幅最显著。复配体系不仅对 4 种重金属的洗脱率有一定提升, 洗涤后重金属有效态比例也有所降低, 对土壤重金属污染的修复具有指导意义。

关键词: 土壤洗涤; 重金属; EDTA; EDDS; 复配; 形态

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)02-0733-07

Impact of Compounded Chelants on Removal of Heavy Metals and Characteristics of Morphologic Change in Soil from Heavy Metals Contaminated Sites

YIN Xue, CHEN Jia-jun, LÜ Ce

(Key Laboratory of Water and Sediment Sciences of Ministry of Education, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Na₂EDTA (EDTA) has been extensively applied in remediation of soil contaminated by heavy metals (HMs). However, it poses a threat to the environment due to its difficulty of degradation. In addition, it is of great importance to clarify the morphological distribution of these metals in soil, as it is related to the environmental risk of contaminated sites. Thus, in order to cut back the use of EDTA, a series of batch washing experiments were conducted to evaluate the removal of arsenic, cadmium, copper, and lead from the contaminated soil collected in a chemical plant. Furthermore, adopting the optimal ratio of EDTA/EDDS, the change of morphological distribution of HMs before and after washing was studied. The results indicated that the removal of arsenic, cadmium and lead reached the maximum when the ratio of EDTA/EDDS was 7:3 and the optimal value was 12.67%, 38.71% and 31.09%, respectively. The removal of copper reached 16.91% at an EDTA/EDDS ratio of 9:1. After washing, the absolute Fe-Mn oxide fraction concentration of arsenic was higher, which would increase the environmental risk; the morphological fraction distribution of cadmium was similar to the original soil; the removal of copper and lead was mainly derived from the Fe-Mn oxide fraction; as to lead, the absolute concentration of Fe-Mn oxide fraction decreased dramatically, was and the same was observed for the percentage in the organic fraction. Employing the compounded system, the removal of HMs could be improved, and meanwhile the amounts of bioavailable HMs declined. Hence, it is beneficial for providing theoretical support for HMs remediation.

Key words: soil washing; heavy metals; EDTA; EDDS; compound; morphology

随着我国工业化和城镇化发展的不断推进,工业活动所造成土壤重金属污染日益严重。由于土壤重金属污染具有污染范围广、持续时间长、污染物隐蔽、无法被生物降解,并可通过食物链在生物体内不断富集,最终在人体内蓄积而危害健康的特点,因此日益引起人们的关注,重金属污染土壤修复则成为国际上的研究难点和热点^[1-3]。

土壤洗涤被认为是一种能有效治理土壤重金属污染的技术。乙二胺四乙酸二钠(简称 EDTA)作为

一种有效螯合剂,对大多数重金属均有较好的螯合作用。研究表明,依靠单一物质洗涤剂往往无法有效解决实际场地中多种重金属污染的问题,不同类型洗涤剂与 EDTA 混配是近年来相关研究的热点,

收稿日期: 2013-05-23; 修订日期: 2013-10-21

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20120003110033)

作者简介: 尹雪(1989~),女,硕士,主要研究方向为土壤重金属污染修复, E-mail: yx221@mail.bnu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: chenjiajun@bnu.edu.cn

常见的混配剂有无机盐、表面活性剂和有机酸等. Chaiyaraksa 等^[4]采用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ 和 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ EDTA}$ 混合溶液洗涤修复受 Cd 污染的土壤和河流底泥,在固液比为 1:2.5 时洗脱效果最佳. 蒋煜峰等^[5]研究表明,加入一定剂量的表面活性剂 SDS 能显著提高 EDTA 对 Pb 和 Cd 的解吸量. 针对不同类型试剂与 EDTA 混配洗脱重金属的研究较多,将两种螯合剂进行复配的研究较少. 由于 EDTA 生物降解性较差,易导致营养元素流失^[6~8],而常见的洗涤剂对重金属的洗脱效果远不如 EDTA,因此本研究引入一种新型螯合剂(S,S)-乙二胺-*N,N'*-二琥珀酸三钠(EDDS),作为 EDTA 的结构异构体,EDDS 具有对微生物群落影响较小、降解快等特点^[9,10]. 胡忻等^[11]比较了 EDTA 与 EDDS 对市污泥中的 Cu、Zn、Cd 和 Pb 的提取效应,得出 EDDS 具有与 EDTA 相似的提取效能. Hauser 等^[12]采用柱实验的方法,以 EDDS 为淋洗剂洗脱 Zn 和 Pb 污染,在 EDDS 和重金属的摩尔比为 10 时,去除率可达 60% 和 91%. Yip 等^[13]研究发现,EDDS 对多重金属污染土样中的 Pb 和 Zn 的洗脱效果要优于单一元

素污染的土样.

目前由于 EDDS 造价较高,尚无法进行大规模的应用,因此本研究构建以 EDTA 为主、EDDS 为辅的洗涤剂体系,在保证螯合剂对重金属洗脱效果的同时,希望通过 EDDS 替换部分 EDTA 以降低 EDTA 的难降解性对环境的不利影响. 以某化工厂重金属污染场地土壤为研究对象,比较不同洗涤条件对重金属的去除效果,分析最优条件下不同复配对重金属形态分布的影响,以期选择适当的污染土壤修复材料提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试土样

供试土样来自我国东北某市的废弃化工场地,主要受 As、Cd、Cu 和 Pb 污染. 将土壤样品室温风干、粉碎,并过 2 mm 孔径筛,阴凉贮存以备. 另取自然风干土样,用玛瑙研钵碾磨,过 0.15 mm 孔径筛后用于重金属形态和全量分析. 测定得到供试土样基本理化性质和重金属浓度如表 1 所示.

表 1 供试土样基本理化性质及重金属浓度

Table 1 Physical and chemical properties and heavy metal content in the tested soils

土壤类型	土壤密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	含水的质量 分数/%	pH	阳离子交换量 / $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	TOC / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	As / $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	Cd / $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	Cu / $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	Pb / $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$
砾砂	3.06	11.29	7.99	4.69	12.3	375	3.72	696	950

1.2 实验方法

1.2.1 参数优选实验

浓度:称取 2 g 土样置于一系列 100 mL 玻璃锥形瓶中,分别加入 30 mL(液固比 15:1)不同浓度的 Na_2EDTA (AR,广州西陇化工股份有限公司,简称 EDTA) 溶液,浓度设定为 10、25、50、75、100 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$. 本实验中所有的样品均采用 3 个平行样取平均值. EDTA 溶液的 pH 均用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 HNO_3 和 NaOH 调整为 4.5. 将上述混合液置于恒温振荡培养箱(HZQ-X100,江苏常州)中以 $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 振荡 18 h,再以 $5000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min,过 $0.45 \mu\text{m}$ 膜分离提取液,贮存在含有硝酸洗涤的聚乙烯瓶中. 采用 ICP-OES(Optima 7000DV,美国)测定提取液中重金属含量.

pH:EDTA 溶液浓度选取上一步中得到的最优值. pH 分别设定为 4.5、5.5、6.5、7.5、8.5,其他实验条件相同.

振荡频率:EDTA 溶液的 pH 选取上一步的最优值. 振荡转速分别设定为 50、100、150、200、250

$\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$,其他实验条件相同.

液固比:振荡转速采取上一步得到的最优值. 液固比分别采用 7.5:1、10:1、12.5:1、15:1、17.5:1,并对应加入不同数量的 EDTA 溶液,其他实验条件相同.

振荡时间:EDTA 浓度、pH、液固比和转速采用上述实验得到的优选值,处理时间分别设为 10、20、30 min 和 1、2、4、6、8、12、15、18、24、36 h.

1.2.2 复配实验

在室温下,称取 2 g 土样置于一系列 100 mL 玻璃锥形瓶中,EDTA 与 EDDS[(S,S)-乙二胺-*N,N'*-二琥珀酸三钠,美国 Sigma-Aldrich 公司]浓度、振荡强度、液固比、pH 和振荡时间均选取参数优选实验中的最优值,控制 EDTA 与 EDDS 投加比为 9:1、8:2、7:3、6:4、5:5,另设两组分别加入等量的 EDTA 和 EDDS 的洗涤液作为对照,其他实验操作和参数优选实验相同. 采用去离子水将洗脱过的土样冲洗 3 次并离心分离,烘干以备重金属形态测试使用. 受试土样中 4 种重金属污染物的形态提取方

法参照 BCR 法^[14]。

2 结果与讨论

2.1 洗涤条件对重金属去除率的影响

2.1.1 浓度

理论上来说, EDTA 能与绝大部分重金属离子以 1:1 的摩尔比形成金属螯合物, 土壤成分中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 和 Mn^{2+} 均能与目标重金属离子竞争螯合剂的结合点位^[15, 16]。因此, 过量的螯合剂才能使重金属有效态较为完全释放到溶液中, 达到理想的去除效果^[17, 18]。

重金属的洗脱去除率随 EDTA 浓度的变化情况如图 1(a) 所示, 随着 EDTA 浓度从 $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 4 种重金属的去除率也相应增加。EDTA 浓度与重金属的去除率基本呈正比关系。当 EDTA 的浓度达到最高为 $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 土样中重金属的去除率达到最大, As、Cd、Cu 和 Pb 的去除率分别为 7.88%、30.24%、17.86% 和 21.24%。因此本实验选取 $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 作为洗涤液浓度。

2.1.2 pH

洗涤液的 pH 是影响重金属去除率的一个重要因素, 因为其直接影响到重金属络合物的形成以及在土壤颗粒上的吸附状态^[19]。如图 1(b) 所示, 除 As 外, 其他 3 种重金属在 $\text{pH} < 6.5$ 时去除率较高。由于酸性条件下, 土壤中的重金属大多以阳离子形式存在, 迁移能力较强, 因而重金属去除率也较高^[20]。而土壤中的 As 大多以氧化物酸根离子形式存在, 在碱性条件更利于其解吸^[21], 故在 $\text{pH} > 6.5$ 时, 去除率有明显的上升趋势。综合考虑, 本实验选取 6.5 作为优选值。

2.1.3 转速

对于 Cu 和 As 来说, 转速对其去除率影响并不显著。Pb 的去除率随转速的提高增加趋势较为平稳。Cd 的去除率对转速响应的峰值出现在 $150 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 转速达到 $150 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 以后去除率有明显降低, 这是因为较大的振荡转速会导致土壤颗粒之间的相对运动降低, 减弱了碰撞作用而不利于污染物的洗脱^[22]。本实验选取 $150 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 作为最佳参数。

2.1.4 液固比

液固比不仅是土壤洗涤修复工程应用中常涉及的工艺参数, 同时也直接关乎洗涤废液后续处理的费用问题^[23]。选取合适的液固比对控制洗涤修复成本至关重要。如图 1(d) 所示, 在 EDTA 过量的情

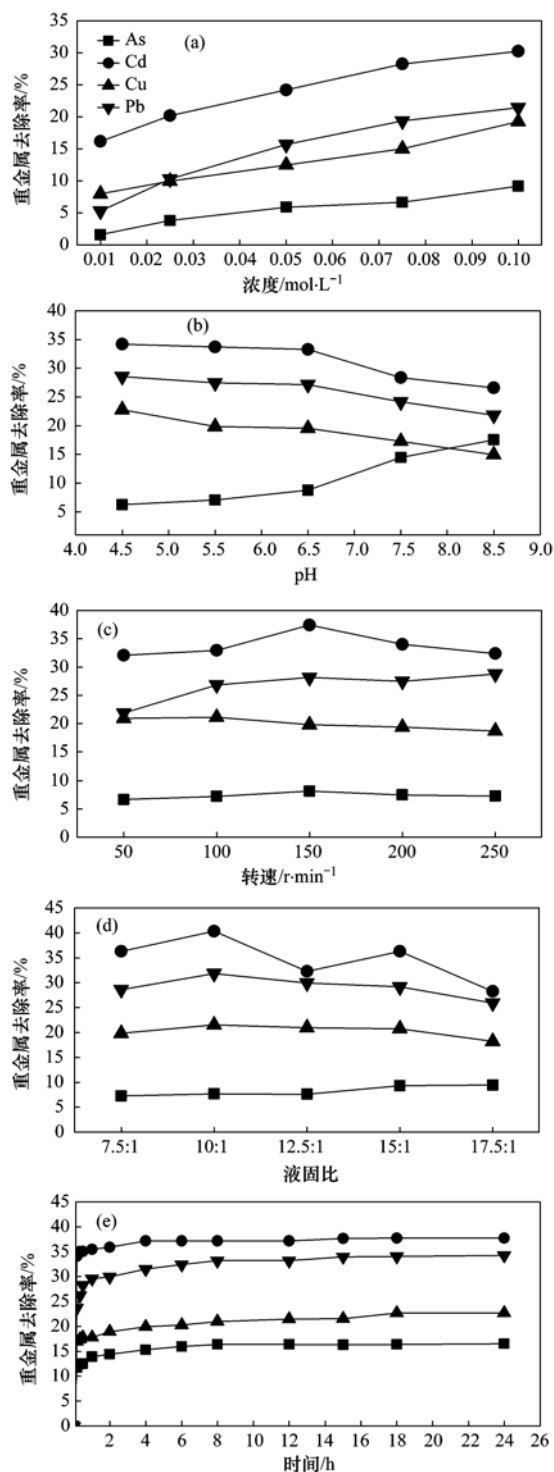


图1 洗脱条件对重金属去除率的影响

Fig. 1 Effect of washing factors on the removal rate of heavy metals

况下, As、Cu 和 Pb 的洗脱率随液固比变化趋势并不显著, 这与前人的研究结果一致^[24]。虽然 Cd 洗脱率没有呈现出规律性变化, 但在液固比为 10:1 时, Cd、Cu 和 Pb 的洗脱率均最佳。因此本实验选取 10:1 作为最佳液固比。

2.1.5 振荡洗涤时间

洗涤时间直接关系到重金属的吸附状态,对重金属的去除率有着重要影响^[25]. 由图 1(e)所示,在最初的 1 h 内,随着时间增加重金属去除率增幅较大,说明土壤颗粒表面结合较弱的重金属被快速释放出来^[26]. 当洗涤时间达 2 h 时,EDTA 对 As、Cd、Cu 和 Pb 的去除率分别为 11.96%、34.49%、16.52% 和 30.58%. 当洗涤时间增加到 8 h 时,As、Cd、Cu 和 Pb 的去除率分别为 14.12%、36.17%、19.52% 和 35.10%,此时有效态的重金属被较完全提取. 反应时间达 12 h 后,4 种重金属解吸状态已经逐渐达到平衡. 因此,选择振荡洗涤时间为 12 h.

2.2 复配对重金属去除率的影响

EDDS 和 EDTA 不同复配比条件下重金属洗脱去除率变化情况如图 2 所示.

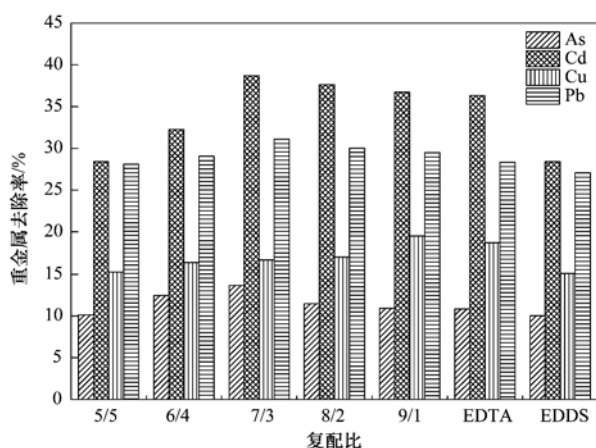


图 2 EDTA 与 EDDS 复配对重金属去除率的影响

Fig. 2 Effect of compound ratio of EDTA/EDDS on the removal rate of heavy metals

从图 2 可以看出,对于复配体系来说,As、Cd 和 Pb 去除率在 EDTA 与 EDDS 的复配比为 7:3 时达到最大,分别为 12.67%、38.71% 和 31.09%. As 的洗脱率并未发生明显变化,主要是因为螯合剂对类金属的洗脱效果一般,As 的解吸量一直维持在较为稳定的水平^[27]. 对于 Cd 和 Pb,较之单一洗涤剂,去除率增幅最大可达到 10.32% 和 4.01%. 在洗涤液的 pH 值较大时,土壤表面负电荷增加,对阳离子的静电吸引作用使重金属离子更易被吸附在表面^[28]. 随着液固比的增大,不断减小的 pH 值会促使重金属的解吸,因而去除率会逐渐升高;当 pH 值降低至小于其最大解吸量对应值时,此时,大量解吸的 Ca^{2+} 等矿物离子与重金属离子竞争作用占主导,影响螯合剂对目标重金属的捕集. 此外,增大复配比会降低洗脱液中 Na^+ 数目,这意味被交换的重金属离子数目减少,故洗脱率有所降低. Cu 去除率和

复配比呈正相关关系,并在 9:1 时达到最高,和单独投加 EDTA 的去除率接近,这与 Cu 和 EDTA 常数较大、形成的螯合物较为稳定有关.

在洗涤液的 pH 值较大时,土壤表面的负电荷会增加,因而可使重金属离子更容易被吸附在土壤表面;随着液固比的增大,洗涤液中 pH 值的不断减小,促使重金属发生解吸,因而去除率会逐渐升高;当 pH 值至小于其最大解吸量对应的值时,会造成 Ca^{2+} 等矿物离子大量解吸与重金属离子形成竞争,影响螯合剂对目标重金属的作用. 另外,增大复配比,会降低洗脱液中的 Na^+ 数目,这意味被交换出的重金属离子数目将减少,故洗脱率将有所降低.

2.3 复配洗涤对重金属形态的影响

重金属污染对环境的危害程度,不仅取决于总量,还与其在土壤中的赋存形态密切相关,研究土壤中重金属的形态分布对于评估土壤修复效果和预测潜在的环境风险具有重要意义^[29, 30].

EDTA 与 EDDS 在不同复配比条件下,对 4 种重金属形态的洗脱效果如表 2 和图 3 所示.

如图 3(a)所示,除 EDDS 外,经过其他几组试剂的洗脱,As 的形态分布大致和原土相似,由于螯合剂更易捕获金属阳离子,土壤中 As 大多以氧化物酸根负离子形式存在^[31],所以复配体系对其洗脱效果基本一致. As 的铁锰氧化态含量有所升高,说明洗涤过程也促进了重金属形态之间的转化,增加了后续的环境风险^[32]. 因此对于本受试土样 As 的污染,EDDS 不适于作为洗涤剂进行修复.

结合表 2,每种试剂及复配体系对 Cd 均有一定的洗脱作用. 当复配比大于 7:3 时,随着复配比的增大,各个形态的去除量越接近单一使用 EDTA 时去除量. 图 3(b)直观地反映出不同复比对各个形态分布的影响不显著,具体表现为酸溶解态所占比例几乎不变,有机结合态所占比例下降.

对比 Cu 的各种形态洗脱量可知,贡献最大的是铁锰氧化态,占总去除量的 60% 以上. 结合图 3(c),当 EDTA 与 EDDS 比例在 9:1 时,Cu 的去除率最大,而有效态比重最小值出现在比例为 8:2 时,可见在洗涤过程中,洗涤剂对 Cu 各个形态均有一定洗脱效果.

两种螯合剂及其复配体系均能有效去除 Pb,并且 EDTA 对有效态洗脱效果要优于 EDDS,这与前人研究结果一致^[33]. 随着 EDTA 与 EDDS 比值的增大,Pb 的有效态有逐渐减小的趋势. 从表 2 和图 3(d)可以看出,Pb 各个形态中洗脱量最大的是铁锰

表 2 不同复配比条件下重金属的去除量¹⁾/μg·g⁻¹

Table 2 Removal of heavy metals at different compound ratio /μg·g ⁻¹						
重金属种类	复配比	酸溶解态	铁锰氧化态	有机结合态	残渣态	总去除量
As	5:5	11.02	-15.67	5.97	45.52	46.84
	6:4	11.86	-14.60	8.45	37.30	43.02
	7:3	11.08	-5.10	8.02	33.88	47.88
	8:2	11.18	-7.19	8.55	32.02	44.56
	9:1	12.02	-14.37	5.30	38.62	41.57
	EDTA	11.75	-14.26	7.65	40.95	46.09
	EDDS	11.66	-32.03	5.06	55.77	40.46
Cd	5:5	0.09	0.36	0.23	0.51	1.20
	6:4	0.12	0.25	0.25	0.45	1.06
	7:3	0.10	0.32	0.30	0.72	1.45
	8:2	0.09	0.38	0.26	0.69	1.40
	9:1	0.11	0.34	0.25	0.65	1.35
	EDTA	0.11	0.40	0.23	0.66	1.40
	EDDS	0.06	0.37	0.22	0.40	1.07
Cu	5:5	41.74	63.24	-12.65	14.04	106.37
	6:4	40.05	70.77	0.01	3.33	114.15
	7:3	39.26	76.00	2.37	-0.32	117.31
	8:2	34.06	89.29	0.01	-9.98	113.38
	9:1	30.84	81.29	-4.33	30.91	138.72
	EDTA	40.09	70.41	-18.22	38.48	130.75
	EDDS	37.96	64.94	-14.90	17.11	105.12
Pb	5:5	41.17	152.71	80.73	11.58	286.19
	6:4	39.87	146.27	85.49	16.93	288.56
	7:3	39.43	154.86	78.23	32.28	304.80
	8:2	39.99	162.15	90.91	7.66	300.71
	9:1	40.01	155.93	83.46	7.97	287.36
	EDTA	39.41	174.27	89.56	-24.38	278.86
	EDDS	39.26	150.64	73.85	10.12	273.87

1) 表中负值表示洗脱后重金属的浓度高于原土中对应部分的浓度

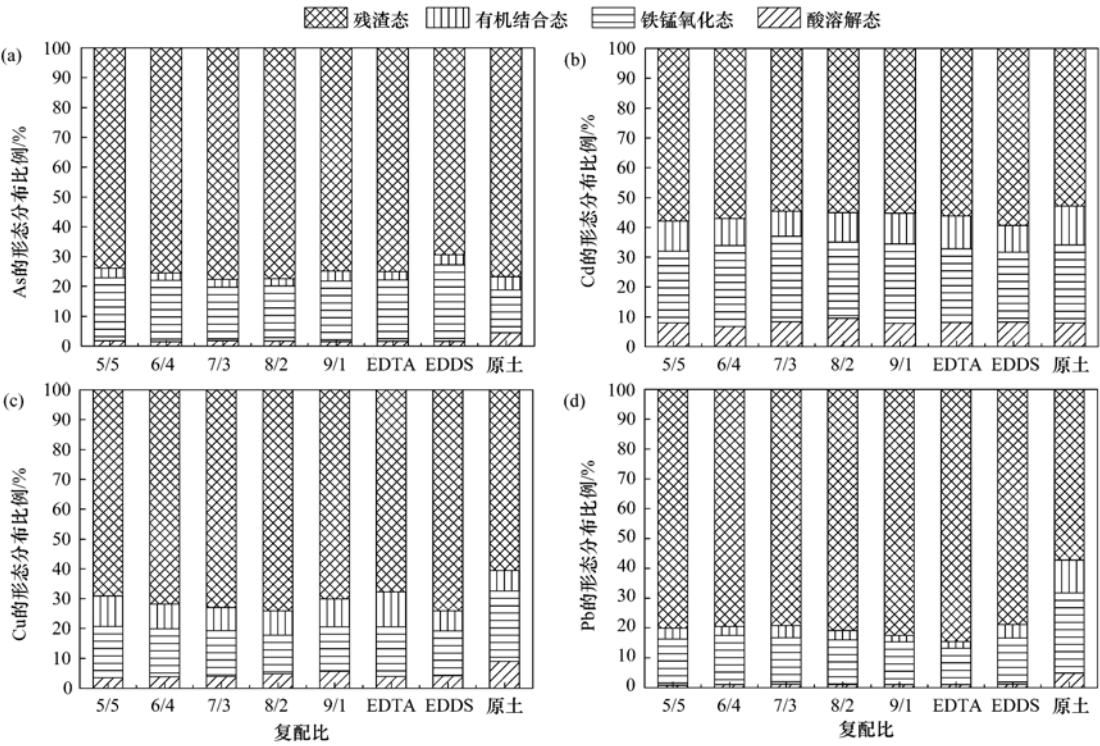


图 3 EDTA 与 EDDS 复配对重金属形态分布的影响

Fig. 3 Effects of compound ratio of EDTA/EDDS on the fractions of heavy metals

氧化态,占总去除量的 50% 以上,有机结合态也有较大贡献. 由于 EDTA 与 Pb 的螯合物较为稳定,因而复配体系中 EDTA 含量越多,Pb 的洗脱也更彻底.

总体来说,较之单一整合剂,复配体系尽管对重金属的去除总量提升效果不明显,但有效降低了每种重金属的有效态含量,并且不同复对比对重金属各个形态含量变化也产生了不同的影响,说明洗脱不仅仅是重金属污染物的去除过程,同时也存在重金属形态之间的转化. 因此,研究复对比对重金属形态分布影响规律对于洗涤修复技术的推广和后续环境影响的评估具有至关重要的意义.

3 结论

(1) EDTA 能有效洗脱土壤中 4 种重金属,去除率依次是 $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{As}$. 在 EDTA 浓度为 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、pH 为 6.5、液固比为 10:1 和振荡转速 $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下反应 12 h,可实现最佳洗脱效率.

(2) 较之单一洗脱剂,EDTA 与 EDDS 组成的复配体系对 4 种重金属的去除率均有一定程度的提升,As、Cd 和 Pb 的去除率在 EDTA/EDDS 为 7:3 时达到最大,分别为 12.67%、38.71% 和 31.09%; Cu 在复配比为 9:1 时,去除率可达 16.91%.

(3) 经过复配体系的洗涤修复,土壤中残留 As、Cd、Cu 和 Pb 的浓度得到削减,有效态比例也有所降低. 利用 EDTA 与 EDDS 复配不仅能有效洗脱重金属污染,同时也降低难降解的 EDTA 对环境的不利影响,在土壤重金属污染治理修复方面具有广阔的应用前景.

参考文献:

- [1] Mulligan C N, Yong R N, Gibbs B F. Heavy metal removal from sediments by biosurfactants[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2001, **85**(1-2): 111-125.
- [2] Finzgar N, Lestan D. The two-phase leaching of Pb, Zn and Cd contaminated soil using EDTA and electrochemical treatment of the washing solution[J]. *Chemosphere*, 2008, **73**(9): 1484-1491.
- [3] Conte P, Agretto A, Spaccini R, *et al.* Soil remediation: humic acids as natural surfactants in the washings of highly contaminated soils[J]. *Environmental Pollution*, 2005, **135**(3): 515-522.
- [4] Chaiyaraksa C, Sriwiriyanuphap N. Batch washing of cadmium from soil and sludge by a mixture of $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ and Na_2EDTA [J]. *Chemosphere*, 2004, **56**(11): 1129-1135.
- [5] 蒋煜峰,展惠英,袁建梅,等. 表面活性剂强化 EDTA 络合洗脱污灌土壤中重金属的试验研究[J]. *农业环境科学学报*, 2006, **25**(1): 119-123.
- [6] Pocięcha M, Lestan D. Novel EDTA and process water recycling method after soil washing of multi-metal contaminated soil[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **201**(30): 273-279.
- [7] Pocięcha M, Kastelec D, Lestan D. Electrochemical EDTA recycling after soil washing of Pb, Zn and Cd contaminated soil[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **192**(2): 714-721.
- [8] 刘霞,王建涛,张萌,等. 螯合剂和生物表面活性剂对 Cu、Pb 污染壤土的淋洗修复[J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1590-1597.
- [9] 石福贵,郝秀珍,周东美,等. 鼠李糖脂与 EDDS 强化黑麦草修复重金属复合污染土壤[J]. *农业环境科学学报*, 2009, **28**(9): 1818-1823.
- [10] Yan D Y S, Lo I M C. Enhanced multi-metal extraction with EDDS of deficient and excess dosages under the influence of dissolved and soil organic matter[J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(1): 78-83.
- [11] 胡忻,罗璐瑕,陈逸珺. 生物可降解的螯合剂 EDDS 提取城市污泥中 Cu, Zn, Pb 和 Cd[J]. *环境科学研究*, 2007, **20**(6): 110-114.
- [12] Hauser L, Tandy S, Schulin R, *et al.* Column extraction of heavy metals from soils using the biodegradable chelating agent EDDS[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(17): 6819-6824.
- [13] Yip T C M, Tsang D C W, Ng K T W, *et al.* Empirical modeling of heavy metal extraction by EDDS from single-metal and multi-metal contaminated soils[J]. *Chemosphere*, 2009, **74**(2): 301-307.
- [14] 李非里,刘丛强,宋照亮. 土壤中重金属形态的化学分析综述[J]. *中国环境监测*, 2005, **21**(4): 21-27.
- [15] 可欣,李培军,张昀,等. 利用乙二胺四乙酸淋洗修复重金属污染的土壤及其动力学[J]. *应用生态学报*, 2007, **18**(3): 601-606.
- [16] Voglar D, Lestan D. Pilot-scale washing of Pb, Zn and Cd contaminated soil using EDTA and process water recycling[J]. *Chemosphere*, 2013, **91**(1): 76-82.
- [17] Jean L, Bordas F, Bollinger J. Chromium and nickel mobilization from a contaminated soil using chelants[J]. *Environmental Pollution*, 2007, **147**(3): 729-736.
- [18] Zou Z, Qiu R, Zhang W, *et al.* The study of operating variables in soil washing with EDTA[J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(1): 229-236.
- [19] Udovic M, Lestan D. Pb, Zn and Cd mobility, availability and fractionation in aged soil remediated by EDTA leaching[J]. *Chemosphere*, 2009, **74**(10): 1367-1373.
- [20] Kuo S, Lai M S, Lin C W. Influence of solution acidity and CaCl_2 concentration on the removal of heavy metals from metal-contaminated rice soils[J]. *Environmental Pollution*, 2006, **144**(3): 918-925.
- [21] Zhao X, Dong D, Hua X, *et al.* Investigation of the transport and fate of Pb, Cd, Cr(VI) and As(V) in soil zones derived from moderately contaminated farmland in Northeast, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **170**(23): 570-577.

- [22] Muherei M A, Junin R, Bin M A B. Adsorption of sodium dodecyl sulfate, Triton X100 and their mixtures to shale and sandstone: A comparative study [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2009, **67**(3-4): 149-154.
- [23] Andrade M D, Prasher S O, Hendershot W H. Optimizing the molarity of a EDTA washing solution for saturated-soil remediation of trace metal contaminated soils[J]. Environmental Pollution, 2007, **117**(3): 781-790.
- [24] Kim C, Lee Y, Ong S K. Factors affecting EDTA extraction of lead from lead-contaminated soils[J]. Chemosphere, 2003, **51**(9): 845-853.
- [25] Yip T, Tsang D C, Ng K T, *et al.* Kinetic Interactions of EDDS with Soils. 1. Metal Resorption and Competition under EDDS Deficiency[J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(3): 831-836.
- [26] Tsang D C W, Zhang W, Lo I M C. Copper extraction effectiveness and soil dissolution issues of EDTA-flushing of artificially contaminated soils[J]. Chemosphere, 2007, **68**(2): 234-243.
- [27] Zhang T, Wu Y X, Huang X F, *et al.* Simultaneous extraction of Cr(VI) and Cu(II) from humic acid with new synthesized EDTA derivatives[J]. Chemosphere, 2012, **88**(6): 730-735.
- [28] 刘亚男, 李取生, 杜焯锋, 等. 滩涂土壤淋洗过程中盐分变化及其对重金属的影响[J]. 环境科学, 2011, **32**(7): 2087-2091.
- [29] 罗燕, 秦延文, 张雷, 等. 大伙房水库沉积物重金属形态分析及污染特征[J]. 环境科学研究, 2011, **24**(12): 1370-1377.
- [30] 王玲玲, 刘琰, 郑丙辉, 等. 纳污水体中铬的迁移规律及各形态分配系数[J]. 环境科学研究, 2010, **23**(4): 426-429.
- [31] 唐敏, 张焕祯, 李亮. 砷污染土壤柠檬酸萃取修复技术研究[J]. 环境污染与防治, 2010, **32**(12): 31-34.
- [32] Lim M, Han G C, Ahn J W, *et al.* Leachability of arsenic and heavy metals from mine tailings of abandoned metal mines[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2009, **6**(11): 2865-2879.
- [33] Yip T C M, Yan D Y S, Yui M M T, *et al.* Heavy metal extraction from an artificially contaminated sandy soil under EDDS deficiency: Significance of humic acid and chelant mixture[J]. Chemosphere, 2010, **80**(4): 416-421.

CONTENTS

Form of the Particulate Matter Ambient Air Standards in China	WANG Shuai, DING Jun-nan, WANG Rui-bin, <i>et al.</i> (401)
Seasonal Variation of Carcinogenic Heavy Metals in PM _{2.5} and Source Analysis in Beijing	TAO Jun, ZHANG Ren-jian, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (411)
Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} and PM ₁₀ Pollution Status and the Correlation of Particulate Matters and Meteorological Factors During Winter and Spring in Beijing	ZHAO Chen-xi, WANG Yun-qi, WANG Yu-jie, <i>et al.</i> (418)
Inversion and Spatial-Temporal Distribution Analysis on PM _{5.0} Inhalable Particulate in Beijing	WANG Yan-hui, XIAO Yao (428)
Characterization of Ultrafine Particle Size Distribution in the Urban Atmosphere of Hangzhou in Spring	XIE Xiao-fang, SUN Zai, YANG Wen-jun (436)
Size Distributions of Aerosol During the Spring Festival in Nanjing	WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (442)
Size Distributions of Organic Carbon and Elemental Carbon in Nanjing Aerosol Particles	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (451)
Characterization of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ in Xinzhou City	SHI Mei-xian, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> (458)
Seasonal Variation of Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Atmosphere of an Industrial Area, Guangzhou	QING Xian, SU Yuan, SU Qing, <i>et al.</i> (464)
Hazard Evaluation Modeling of Particulate Matters Emitted by Coal-Fired Boilers and Case Analysis	SHI Yan-ting, DU Qian, GAO Jian-min, <i>et al.</i> (470)
Chemical Characteristics of Precipitation in South China Sea	XIAO Hong-wei, LONG Ai-min, XIE Lu-hua, <i>et al.</i> (475)
Analysis of Acid Rain Characteristics of Lin'an Regional Background Station Using Long-term Observation Data	LI Zheng-quan, MA Hao, MAO Yu-ding, <i>et al.</i> (481)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition in Beijing Urban Area	HE Cheng-wu, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (490)
Studies of Ozone Formation Potentials for Benzene and Ethylbenzene Using a Smog Chamber and Model Simulation	JIA Long, XU Yong-fu (495)
Characteristics of Fly Ash Particles Deposition in the Snowpack of Laohugou Glacier No. 12 in Western Qilian Mountains, China	DONG Zhi-wen, QIN Da-he, QIN Xiang, <i>et al.</i> (504)
Odor Emission Rate of Municipal Solid Waste from Landfill Working Area	QIANG Ning, WANG Hong-yu, ZHAO Ai-hua, <i>et al.</i> (513)
Gaseous Phenol Removal in a Bio-Trickling Filter	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (520)
Particulate Distribution Characteristics of Chinese Phrase V Diesel Engine Based on Butanol-Diesel Blends	LOU Di-ming, XU Ning, FAN Wen-jia, <i>et al.</i> (526)
Effects of Turning Frequency on Emission of Greenhouse Gas and Ammonia During Swine Manure Windrow Composting	ZHAO Chen-yang, LI Hong-mei, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (533)
Oxidation of Mercury by CuBr ₂ Decomposition Under Controlled-Release Membrane Catalysis Condition	HU Lin-gang, QU Zan, YAN Nai-qiang, <i>et al.</i> (541)
Distributions and Influencing Factors of Total Dissolved Inorganic Antimony in the Coastal Area of Zhejiang and Fujian	ZHANG Xu-zhou, REN Jing-ling, LIU Zong-guang, <i>et al.</i> (547)
Calculation of Allowable Pollution Loads for Lake and Reservoir Based on Bi-direction Algorithm and Its Case Study	JIA Hai-feng, GUO Yu (555)
Risk Assessment of Quaternary Groundwater Contamination in Beijing Plain	GUO Gao-xuan, LI Yu, XU Liang, <i>et al.</i> (562)
Mixing Behavior of Nutrients in Different Seasons at Liaohe Estuary	ZHANG Jin-hua, YU Li-xia, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (569)
Distribution of Nitrogen in the Sediment of Taige South River Estuary	MA Jiu-yuan, WANG Guo-xiang, LI Zhen-guo, <i>et al.</i> (577)
Selection and Purification Potential Evaluation of Woody Plant in Vertical Flow Constructed Wetlands in the Subtropical Area	CHEN Yong-hua, WU Xiao-fu, HAO Jun, <i>et al.</i> (585)
Correlation of Substrate Structure and Hydraulic Characteristics in Subsurface Flow Constructed Wetlands	BAI Shao-yuan, SONG Zhi-xin, DING Yan-li, <i>et al.</i> (592)
Impacts of <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms Stress on the Growth Characteristics, Microcystins and Nutrients Release of <i>Microcystis aeruginosa</i>	ZHOU Qing, HAN Shi-qun, YAN Shao-hua, <i>et al.</i> (597)
Effects of Different Pre-oxidants on DBPs Formation Potential by Chlorination and Chloramination of Yangtze River Raw Water	TIAN Fu-xiang, XU Bin, RONG Rong, <i>et al.</i> (605)
Adsorption of Phenanthrene from Aqueous Solution on Cetylpyridinium Bromide (CPB)-Modified Zeolite	LI Jia, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (611)
Characteristics and Selectivity of Photocatalytic-Degradation of Tetracycline Hydrochloride	SONG Chen-yi, YIN Da-qiang (619)
Characterization of Biocatalysed Sulfate Reduction in a Cathode of Microbial Electrolysis System	FU Shi-yu, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (626)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in A/DAT-IAT System for Municipal Wastewater Treatment Based on Ecological Safety	YANG Sai, ZHOU Qi-xing, HUA Tao (633)
Membrane Surface Fouling Properties in MBRs for High-Salinity Wastewater Treatment	LI Bin, WANG Zhi-wei, AN Ying, <i>et al.</i> (643)
Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Ozone-biological Aerated Filter	LIU Ming-guo, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (651)
Treatment of Pectin Wastewater by Anaerobic Biological Process	CHEN Bing-bing, YANG Chun-ping, LI Xiang, <i>et al.</i> (657)
Sorption Mechanism of Ofloxacin by Carbon Nanotubes	ZHAO Xing-xing, YU Shui-li, WANG Zhe (663)
Biosorption Characteristics of Cu ²⁺ by Spent Substrate of <i>Pleurotus</i> Oyster	HU Xiao-jing, ZANG Ting-ting, GU Hai-dong, <i>et al.</i> (669)
Adsorption Dynamics and Breakthrough Characteristics Based on the Fluidization Condition	WANG Jun, WANG Yao, HUANG Xing, <i>et al.</i> (678)
Characteristics of Speciation and Evaluation of Ecological Risk of Heavy Metals in Sewage Sludge of Guangzhou	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, CAI Da-chuan, <i>et al.</i> (684)
Spatial Distribution and Accumulation of Heavy Metal in Arable Land Soil of China	ZHANG Xiao-min, ZHANG Xiu-ying, ZHONG Tai-yang, <i>et al.</i> (692)
Pollution Patterns and Health Risk Assessment for Polychlorinated Biphenyls in Soils from a Capacitor Storage Site	ZHOU Ling-li, WU Guang-long, XUE Nan-dong, <i>et al.</i> (704)
Occurrence and Spatial Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Shenzhen, China	ZHANG Di, CAO Shan-ping, SUN Jian-lin, <i>et al.</i> (711)
Risk Assessment and Countermeasures of Heavy Metals Pollution in Wanquan Segment of Yanghe River	TAN Bing, WANG Tie-yu, ZHU Zhao-yun, <i>et al.</i> (719)
Effects of Group Matching Curing Agent on Exchangeable Pb, Cd, Zn Contents in the Potted Soils and their Accumulation in Rice Plants	ZENG Hui, ZHOU Hang, QIU Qiong-yao, <i>et al.</i> (727)
Impact of Compound Chelants on Removal of Heavy Metals and Characteristics of Morphologic Change in Soil from Heavy Metals Contaminated Sites	YIN Xue, CHEN Jia-jun, LÜ Ce (733)
Characterization of Manganese Oxidation by <i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1	ZHOU Na-na, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (740)
Effects of the Ratio of NO ₃ ⁻ -N to NO ₂ ⁻ -N on the Removal of Sulfide and Nitrogen by Mixed Culture and Pure Culture	CHEN Zi-ai, CHEN Hui-juan, WEI Ben-ping, <i>et al.</i> (746)
Carbon Metabolic Characteristics of Airborne Microbes in Hangzhou	GONG Chan-juan, XU Jing, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i> (753)
Study on the Backward Extraction of Cellulase in Rhammolid Reverse Micelles	ZHAO Yan-ge, YUAN Xing-zhong, HUANG Hua-jun, <i>et al.</i> (759)
Inner- and Inter-Species Differences of Mercury Concentration in Common Fishes from the Yellow Sea	ZHU Ai-jia, XU Zhan-zhou, LIU Gui-ze, <i>et al.</i> (764)
Study on the Effect of Enzymatic Activity and Acute Toxicity of Three PAEs on <i>Eisenia foetida</i>	WANG Yan, MA Ze-min, WU Shi-jin (770)
Environmental Safety Assessment on the New Super Absorbent Polymers Applied into a Soil-Chinese Cabbage System	LI Xi, HE Ji-zheng, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> (780)
Study on Dynamics of Hydrogen Sulfide and Carbonyl Sulfide Emission Fluxes from <i>Suaeda salsa</i> Marsh in the Yellow River Estuary	LI Xin-hua, GUO Hong-hai, YANG Li-ping, <i>et al.</i> (786)
Key Microbial Processes in Nitrous Oxide Emissions of Agricultural Soil and Mitigation Strategies	ZHU Yong-guan, WANG Xiao-hui, YANG Xiao-ru, <i>et al.</i> (792)

《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2月15日 35卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 2 Feb. 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