

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第11期

Vol.35 No.11

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

南京北郊夏季近地层臭氧及其前体物体积分数变化特征	邵平, 安俊琳, 杨辉, 林旭, 吉东生 (4031)
亚青会期间南京污染气体与气溶胶中水溶性离子的分布特征	邹嘉南, 安俊琳, 王红磊, 邵平, 段卿, 薛国强, 庞博 (4044)
亚青会期间南京地区气溶胶浓度变化及其与能见度的关系	袁亮, 银燕, 李琦, 肖辉, 李力 (4052)
2013年10月长株潭城市群一次持续性空气污染过程特征分析	廖志恒, 范绍佳, 黄娟, 孙家仁 (4061)
在线单颗粒气溶胶质谱 SPAMS 对细颗粒物中主要组分提取方法的研究	付怀于, 闫才青, 郑玫, 蔡靖, 李小滢, 张延君, 周振, 傅忠, 李梅, 李磊, 张远航 (4070)
PM ₁₀ 可替代源成分谱的建立方法及其应用	陈强, 景毅, 吴焕波, 王芳 (4078)
夏季东海和南黄海一氧化氮的浓度分布、海-气通量和微生物消耗研究	王敬, 陆小兰, 杨桂朋, 徐冠球 (4085)
三峡库区典型农田小流域水体汞的时空分布特征	王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇 (4095)
浑太水系水体中不同粒径有机胶体荧光光谱特性	刘娜娜, 李斌, 刘瑞霞, 宋永会, 吴畏 (4103)
深圳湾流域 TN 和 TP 入海年通量变化规律研究	赵晨辰, 张世彦, 毛献忠 (4111)
滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性	熊强, 焦立新, 王圣瑞, 彭希琰 (4118)
金山湖闸坝型水体表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价	周晓红, 刘龙梅, 陈曦, 陈志刚, 张金萍, 李义敏, 刘彪 (4127)
西藏普莫雍错湖芯沉积物中重金属的垂向分布特征及生态风险评估	谢婷, 罗东霞, 杨瑞强 (4135)
西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析	袁宏林, 李星宇, 王晓昌 (4143)
城市不同下垫面降雨径流多环芳烃 (PAHs) 分布及源解析	武子澜, 杨毅, 刘敏, 陆敏, 于英鹏, 汪青, 郑鑫 (4148)
粗放型绿色屋面填料的介质组成对出水水质的影响	陈昱霖, 李田, 顾俊青 (4157)
饮用水处理中不同来源生物活性炭微生物群落多样性和结构研究	杜尔登, 郑璐, 冯欣欣, 高乃云 (4163)
压力强化混凝除藻工艺中藻毒素安全性研究	蒋新跃, 栾清, 丛海兵, 徐思涛, 刘玉娇, 朱学源 (4171)
基于膜特征参数变化的蛋白质超滤过程膜污染研究	王旭东, 张银辉, 王磊, 张慧慧, 夏四清 (4176)
臭氧氧化水溶液中对乙酰氨基酚的机制研究	曹飞, 袁守军, 张梦涛, 王伟, 胡真虎 (4185)
电辅助微生物反应器降解苯并噻唑效能的研究	刘春苗, 丁杰, 刘先树, 程旺斌 (4192)
铁铜复合氧化物纳米吸附剂的制备、表征及 As(Ⅲ) 吸附性能研究	张伟, 陈静, 张高生 (4198)
重金属铬胁迫下水蚯蚓的生理响应研究	楼菊青, 杨东叶, 曹永青, 孙培德, 郑平 (4205)
光质对蛋白核小球藻 (<i>Chlorella pyrenoidosa</i>) 生长特征及生化组成的影响研究	唐青青, 方治国, 嵇雯雯, 夏会龙 (4212)
常温低基质下碱度和溶解氧对厌氧氨氧化的影响	任玉辉, 王科, 李相昆, 马凯丽, 张杰 (4218)
Fe ²⁺ 和 Fe ³⁺ 对厌氧氨氧化污泥活性的影响	李祥, 黄勇, 巫川, 王孟可, 袁怡 (4224)
CSTR 中亚硝化颗粒污泥的变化过程研究	阴方芳, 刘文如, 王建芳, 吴鹏, 沈耀良 (4230)
盐度对好氧颗粒污泥硝化过程中 N ₂ O 产生量的影响	王珊珊, 梁红, 高大文 (4237)
硫酸盐还原反应器污泥驯化过程中微生物群落变化分析	曾国驱, 贾晓珊, 郑小红, 杨丽平, 孙国萍 (4244)
利用铅同位素方法量化不同端元源对南京土壤和长江下游悬浮物铅富集的影响	王成, 夏学齐, 张义, 廖启林, 杨忠芳, 季峻峰 (4251)
北京东南郊土壤剖面氟喹诺酮类抗生素分布特征	苏思慧, 何江涛, 杨蕾, 乔肖翠, 崔亚丰 (4257)
环境因素对土壤中几种典型四环素抗性基因形成的影响	张俊, 罗方园, 熊浩微, 焦少俊, 叶波平 (4267)
稻田土壤不同水分条件下硝化/反硝化作用及其功能微生物的变化特征	刘若萱, 贺纪正, 张丽梅 (4275)
典型岩溶土壤微生物丰度与多样性及其对碳循环的指示意义	靳振江, 汤华峰, 李敏, 黄炳富, 李强, 张家喻, 黎桂文 (4284)
变温环境对典型石灰土有机碳矿化的影响	王莲阁, 高岩红, 丁长欢, 慈恩, 谢德体 (4291)
铁氧化物与电子供体基质交互作用对红壤性水稻土中 DDT 还原脱氯影响	刘翠英, 徐向华, 王壮, 姚童言 (4298)
植物套种及化学强化对重金属污染土壤的持续修复效果研究	卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂, 龙新宪 (4305)
不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征	李洪建, 高玉凤, 严俊霞, 李君剑 (4313)
不同开垦年限黑土温室气体排放规律研究	李平, 郎漫, 徐向华, 李煜珊, 朱淑娟 (4321)
转 Cry1Ac 基因抗虫棉与其亲本棉花根际真菌多样性的比较	潘建刚, 焦海华, 白志辉, 齐鸿雁, 马安周, 庄国强, 张洪勋 (4329)
天津污灌区内气态汞的污染特征及在叶菜类蔬菜中的富集	郑顺安, 韩允垒, 郑向群 (4338)
1-硝基芘和 1,2-萘醌的联合细胞毒性和致 DNA 损伤	尚羽, 蒋玉婷, 张玲, 李怡 (4345)
鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究	卜贵军, 于静, 邱慧慧, 罗世家, 周大寨, 肖强 (4352)
污泥预植重金属 Cu 炭化及炭中重金属的稳定性研究	窦晓敏, 陈德珍, 戴晓虎 (4359)
上层曝气式生物反应器填埋工艺特性的研究	田颖, 王坤, 徐期勇 (4365)
硝酸盐连续回灌对生物反应器填埋场 N ₂ O 产生的影响	卞荣星, 孙英杰, 李晶晶, 张欢欢 (4371)
中国碳强度下降和碳排放增长的行业贡献分解研究	蒋晶晶, 叶斌, 计军平, 马晓明 (4378)
泛长三角地区工业污染重心演变路径及其驱动机制研究	赵海霞, 蒋晓威, 崔建鑫 (4387)
基于污染防治技术模拟的造纸行业环境管理方法研究	张雪莹, 温宗国 (4395)
大气棕色碳的研究进展与方向	闫才青, 郑玫, 张远航 (4404)
《环境科学》征稿简则 (4094) 《环境科学》征订启事 (4126) 信息 (4243, 4266, 4274, 4328)	

植物套种及化学强化对重金属污染土壤的持续修复效果研究

卫泽斌¹, 郭晓方², 吴启堂^{1*}, 龙新宪¹

(1. 华南农业大学资源环境学院, 土壤环境与废物资源农业利用广东高校重点实验室, 广州 510642; 2. 太原科技大学环境与安全学院, 太原 030024)

摘要: 为了研究植物套种和螯合剂施用对重金属污染土壤的长期修复效果以及对地下水可能的环境风险, 采集广东省乐昌市铅锌矿开采造成的重金属污染土壤, 通过渗滤池(0.9 m × 0.9 m × 0.9 m)进行了7次植物种植试验(约2.5 a), 共设置了单种超富集植物东南景天(*Sedum alfredii*)、单种低累积玉米(*Zea mays*, cv. Yunshi-5)、东南景天和玉米套种、以及套种 + MC(混合螯合剂, 柠檬酸: 味精废液: EDTA: KCl 摩尔比 = 10:1:2:3, 5 mmol·kg⁻¹)4个处理, 连续监测植物、土壤和渗滤液的重金属含量变化。结果表明, 东南景天和玉米套种只适合在春夏季进行, 套种显著提高植物对Zn和Cd的提取效率; 在秋冬季, 套种或混合螯合剂均影响东南景天生长, 降低了东南景天对Zn和Cd的提取; 总体上单种东南景天处理对污染土壤的Zn和Cd的总提取量最大。然而, 土壤Zn、Cd和Pb含量降低幅度最大的为套种 + MC处理, 与初始值相比降低幅度分别为28%、50%和22%, 该处理土壤重金属含量的降低, 主要归于混合螯合剂作用下重金属向下层土壤迁移。渗滤水监测结果表明, 在试验期内, 施加混合螯合剂提高渗滤水重金属浓度, 但未明显超过地下水Ⅲ级标准。

关键词: 植物提取; 套种; 东南景天; 玉米; 混合螯合剂

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)11-4305-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.11.037

Continuous Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil by Co-Cropping System Enhanced with Chelator

WEI Ze-bin¹, GUO Xiao-fang², WU Qi-tang¹, LONG Xin-xian¹

(1. Key Laboratory of Soil Environment and Waste Reuse in Agriculture of Guangdong High Education Institutions, College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. School of Environment and Safety, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to elucidate the continuous effectiveness of co-cropping system coupling with chelator enhancement in remediating heavy metal contaminated soils and its environmental risk towards underground water, soil lysimeter (0.9 m × 0.9 m × 0.9 m) experiments were conducted using a paddy soil affected by Pb and Zn mining in Lechang district of Guangdong Province, 7 successive crops were conducted for about 2.5 years. The treatments included mono-crop of *Sedum alfredii* Hance (Zn and Cd hyperaccumulator), mono-crop of corn (*Zea mays*, cv. Yunshi-5, a low-accumulating cultivar), co-crop of *S. alfredii* and corn, and co-crop + MC (Mixture of Chelators, comprised of citric acid, monosodium glutamate waste liquid, EDTA and KCl with molar ratio of 10:1:2:3 at the concentration of 5 mmol·kg⁻¹ soil). The changes of heavy metal concentrations in plants, soil and underground water were monitored. Results showed that the co-cropping system was suitable only in spring-summer seasons and significantly increased Zn and Cd phytoextraction. In autumn-winter seasons, the growth of *S. alfredii* and its phytoextraction of Zn and Cd were reduced by co-cropping and MC application. In total, the mono-crops of *S. alfredii* recorded a highest phytoextraction of Zn and Cd. However, the greatest reduction of soil Zn, Cd and Pb was observed with the co-crop + MC treatment, the reduction rates were 28%, 50%, and 22%, respectively, relative to the initial soil metal content. The reduction of this treatment was mainly attributed to the downwards leaching of metals to the subsoil caused by MC application. The continuous monitoring of leachates during 2.5 year's experiment also revealed that the addition of MC increased heavy metal concentrations in the leaching water, but they did not significantly exceed the III grade limits of the underground water standard of China.

Key words: phytoextraction; co-crop; *Sedum alfredii*; *Zea mays*; mixture of chelators

近年来,土壤重金属污染问题,引起了各方面的广泛关注。重金属污染土壤已经影响到农产品质量和食品安全^[1],可能通过食物链给人类健康造成威胁。针对重金属污染土壤,研究人员发展了许多修复技术。目前研究者认为,利用重金属超富集植物

收稿日期: 2014-03-30; 修订日期: 2014-05-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41071306, 41371308, 31270675); 广东省科技计划项目(2010B031800006, 2012A030700003); 广东省自然科学基金团队项目(S2011030002882)

作者简介: 卫泽斌(1980~),男,讲师,主要研究方向为污染土壤修复, E-mail: wezebin@scau.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: wuqitang@scau.edu.cn

提取土壤中重金属的植物提取技术是一项低成本和有效的技术^[2],单纯利用超富集植物修复污染农田需要较长时间($>5\text{ a}$)^[3,4],农民没有了农产品收益. 因此,采取措施提高植物提取效率,并进行“边修复边生产”是必须的.

螯合诱导可以提高植物的提取效率^[5],其中众多文献报道 EDTA 的螯合诱导能力最强. 然而, EDTA 在环境中不易被生物降解,可能增加淋滤风险污染地下水^[6~9],另外价格较贵. EDTA 的同分异构体 EDDS(乙二胺二琥珀酸)及其金属螯合物易被生物降解,有望取代 EDTA^[10],但其价格更高. 针对上述问题,吴启堂等研究的包括味精废液在内多种有机试剂混合而成的添加剂,已证实能提高超富集植物提取 Zn/Cd 的效率,且具有廉价和对地下水低污染等特点^[11,12].

此外,采取合适的农艺措施也可以提高植物对重金属的提取效率. 例如,通过选择适当的植物种类进行间套种,可以提高超富集植物对重金属的吸收^[13]. 锌超富集植物 *Thlaspi caerulescens* 和同属的非超富集植物 *Thlaspi arvense* 套种在 Zn 污染土壤上,与单作相比,锌超富集植物 *Thlaspi caerulescens* 的吸 Zn 量显著增加^[14]. 将超富集植物东南景天(*Sedum alfredii* Hance)和可食部位累积重金属低累积的玉米(*Zea mays*)品种(低累积玉米)种植在含重金属的污泥上,在提取重金属的同时生产符合卫生标准的玉米籽粒,可用作动物饲料或粮食^[15].

超富集植物东南景天和低累积玉米种植在中轻度重金属污染的农田上,同时研究了混合螯合剂的影响,结果显示套种和混合螯合剂提高了土壤重金属的去除效率,而且生产的玉米可用作动物饲料,在修复重金属污染的同时农民可以进行农业生产^[16]. 套种和混合螯合剂均强化了植物修复的效果,但是随着植物种植的持续进行,植物对重金属的提取效率是否会下降;以及添加混合螯合剂促进了植物对土壤重金属的提取,但活化的重金属可能产生淋滤风险,这些都需要进行长期研究. 本文在 1 a 渗滤池试验研究的基础上^[17],继续研究连续的螯合诱导植物提取和套种对重金属的去除情况,及其可能的淋滤风险,以明确该联合技术长期的修复效果,以期为重金属污染土壤的修复提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试植物分别为:①东南景天,取自浙江衢州

古老铅锌矿山,Zn/Cd 超富集植物^[18~20],剪取大小均匀枝条直接扦插;②玉米,低累积品种, yunshi-5^[21],购于云南省农业科学院育种中心.

供试试剂:混合螯合剂(MC),是一种提高土壤锌、镉污染植物修复效率的混合螯合剂(国家发明专利号: ZL03140098.1),且对地下水的污染较小^[11,22],混合螯合剂的配方为柠檬酸:味精废液: EDTA: KCl 摩尔比 = 10: 1: 2: 3,成分中柠檬酸和 EDTA(乙二胺四乙酸二钠)以及 KCl 均为分析纯试剂;味精废液:取自广州市味精厂,含谷氨酸钠 $68.94\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,pH 值为 5.23.

1.2 试验方案设计

(1)水泥渗滤池(小区)设计 试验在广州市华南农业大学资源环境学院环境科学与工程系网室,体积为 $0.9\text{ m}\times0.9\text{ m}\times0.9\text{ m}$ 的水泥池中进行,共 12 个水泥池,每个水泥池为 1 个小区. 在 12 个水泥池下层(20~90 cm)先装入当地自然土壤(广州赤红壤),然后在每个水泥池中装入 20 cm 厚的污染土壤. 下层土壤取自华南农业大学农场下层土壤,上层污染土壤取自广东乐昌某铅锌矿废水污染水稻田耕作层(0~20 cm)土壤,同时测定土壤湿基容重,采土时用内衬塑料袋的编织袋装土壤,以免土壤水分在运输过程中损失. 采回后根据土壤容重尽快称取所需土壤重,填入水泥池中,压紧使其至预定高度,以便尽量还原土壤在田间的原始状态. 两种土壤的基本理化性质见表 1. 在水泥池底部有一个 10 cm 的孔,并连接排水管,用玻璃瓶收集渗滤水样.

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Selected properties of the soil used in this study		
项目	耕层土壤	底层土壤
pH	6.59 ± 0.05	5.65 ± 0.03
砂粒/粉粒/黏粒/%	24/46/30	42/36/22
TN/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	2.61 ± 0.13	0.52 ± 0.07
TP/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.69 ± 0.04	0.64 ± 0.06
TK/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	11.66 ± 0.62	2.70 ± 0.13
OM/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	38.68 ± 1.28	11.68 ± 0.76
总 Fe/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	42.99 ± 1.62	19.31 ± 0.51
总 Zn/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	810 ± 11	50.3 ± 4.3
总 Cd/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	1.55 ± 0.02	0.049 ± 0.007
总 Pb/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	861 ± 9	102 ± 15

(2)小区试验处理方案 试验设置单种景天(种植东南景天)、单种玉米(每小区 6 棵)、套种(东南景天和玉米间套种)、套种 + MC(混合螯合剂)共 4 个处理,每个处理 3 次重复,所有的处理随机排列.

(3)植物的种植和混合螯合剂的添加方式 东

南景天采取扦插方式种植,东南景天的种植密度为:株行距 10 cm×10 cm,每小区 81 棵;玉米采取穴播的播种方式,根据供试玉米的栽培要点(3 500~4 500株·亩⁻¹)确定种植密度为:株行距 30 cm×60 cm,每小区共 6 株玉米,每穴播 3 粒种子,间苗时只留 1 株.玉米种植在东南景天的间隙,种植玉米的那一线不种东南景天,收获时可先收较高的玉米.

混合螯合剂的用量为 5 mmol·kg⁻¹,以 0~20

cm 土壤质量为计算基础(每小区按 186 kg 干土计).在东南景天收获前,将混合螯合剂溶于 2 L 蒸馏水,通过花洒淋于土壤表面,每次的施加时间见表 2,在混合螯合剂施加前后收集渗滤水.

(4)试验过程 第 1 次试验从 2008 年 4 月 1 日开始种植植物,最后 1 次在 2010 年 6 月 17 日收获.试验共种植了 4 次东南景天和 7 次玉米,每次种植的时间见表 2,植物生长期间施肥和除草.

表 2 试验植物的种植安排¹⁾

Table 2 Crop planting of 7 successive crops

东南景天			混合螯合剂 施加时间	玉米		
次数	种植时间	收获时间		次数	种植时间	收获时间
第 1 次	2008 年 4 月 5 日	7 月 5 日	2008 年 6 月 15 日、 6 月 21 日	第 1 次	2008 年 4 月 5 日	7 月 5 日
第 2 次	2008 年 9 月 27 日	2009 年 3 月 27 日,留茬 1 cm	2009 年 1 月 15 日	第 2 次	2008 年 7 月 8 日	9 月 24 日
第 3 次	2009 年 3 月 27 日, (留茬生长)	2009 年 6 月 23 日	2010 年 5 月 29 日	第 3 次	2008 年 9 月 27 日	2009 年 1 月 17 日
第 4 次	2009 年 10 月 14 日	2010 年 6 月 10 日	2010 年 5 月 31 日	第 4 次	2009 年 3 月 15 日	2009 年 6 月 23 日
				第 5 次	2009 年 7 月 8 日	2009 年 10 月 6 日
				第 6 次	2009 年 10 月 14 日	2010 年 3 月 8 日
				第 7 次	2010 年 3 月 10 日	2010 年 6 月 17 日

1) 东南景天在广东高温的 7~9 月不能正常生长

1.3 样品的采集与分析

玉米的采集和处理:玉米分茎叶和籽粒部分进行收获.每小区选取 100 g 左右玉米粒、置于信封中烘干(先在 105℃烘箱中杀青 30 min,然后在 65℃下烘干至恒重),粉碎贮存于封口袋中备测.每小区取 3 株代表性植株茎叶,拿回实验室清洗后,晾干、切碎、从中取 150 g 左右,置于信封中,烘干,粉碎贮存于封口袋中备测.

东南景天的采集和处理:第 1、3、4 次种植的东南景天,夏天收获,将东南景天连根拔起,用剪刀剪取地上部,称取地上部即为每小区东南景天产量;第 2 次种植的东南景天(2008 年 9 月 27 日种植),至 2009 年 3 月时东南景天生物量已经较大,故安排收获,剪取地上部,留茬(约 1 cm)继续生长.收获的东南景天拿回实验室,用自来水冲洗干净,再用双蒸水漂洗 3 遍,晾干,置于信封中烘干,粉碎贮存于

封口袋中备测.

土壤和植物样品分析方法参照文献[23]方法进行,水样重金属分析采用文献[24]的方法进行.

1.4 数据分析方法

所有数据用 Excel 软件处理,多重比较(Duncan)统计分析由 SAS 8.1 数据统计软件完成.

2 结果与讨论

2.1 玉米产量和重金属含量

2.1.1 不同处理对玉米生物量的影响

持续种植试验的玉米籽粒和茎叶的总生物量见表 3,套种+MC 处理的总生物量显著大于单种玉米和套种玉米,可能是由于混合螯合剂中含有 N、P、K 等营养元素的原因^[12].单种玉米与套种的籽粒和茎叶生物量处理间没有显著差异,表明套种并不会明显影响玉米的生长.

表 3 不同处理玉米和东南景天的总生物量¹⁾/g·plot⁻¹

Table 3 Yields of grains and shoots for *Z. mays* among different treatments/g·plot⁻¹

处理	籽粒	茎叶	东南景天
单种景天	—	—	360.9±7.3 a
单种玉米	257.3±63.8 b	718.5±81.8 b	—
套种	342.8±46.2 b	837.5±85.5 b	255.2±12.8 b
套种+MC	661.4±84.2 a	1130.3±14.7 a	231.0±15.6 b

1) 表中数据是 3 次重复的平均值±标准误,根据 Duncan 检验(P=0.05),同列具有相同字母的数据无显著差异

2.1.2 玉米籽粒和茎叶重金属含量

玉米品种(yunshi-5)是经过多次验证的重金属低累积品种^[25],种植在中轻度重金属污染土壤上生产出的籽粒可用作饲料或粮食,茎叶用作有机肥.不同处理玉米籽粒的重金属含量范围见表4,食品中污染物限量(GB 2762-2012)中规定谷物Cd限量指标为0.1 mg·kg⁻¹,Pb的限量是0.2 mg·kg⁻¹;饲料卫生标

准(GB 13078-2001)中Cd为0.5 mg·kg⁻¹,Pb为5.0 mg·kg⁻¹;Zn没有颁布.对照以上标准,玉米籽粒可用作饲料.玉米茎叶中Zn、Cd和Pb的含量范围分别为106.0~422.1、0.219~1.429和3.69~15.16 mg·kg⁻¹,均低于有机肥的Cd和Pb的限量标准(NY 525-2011;Cd,3 mg·kg⁻¹;Pb,50 mg·kg⁻¹;Zn,没有颁布),玉米茎叶部分可用作有机肥.

表4 不同处理7次种植的玉米籽粒和茎叶的重金属含量范围和变异系数

Table 4 Range of concentration of Zn, Cd and Pb in the grains and stems of *Z. mays* under different treatments

元素	处理	籽粒			茎叶		
		含量范围 /mg·kg ⁻¹	平均值 /mg·kg ⁻¹	变异系数	含量范围 /mg·kg ⁻¹	平均值 /mg·kg ⁻¹	变异系数
Zn	单种玉米	32.64~43.53	37.63	0.107	119.2~304.5	175.1	0.384
	套种	31.92~39.17	34.84	0.071	119.3~422.1	203.5	0.491
	套种+MC	29.53~37.62	33.31	0.083	106.0~403.3	180.3	0.555
Cd	单种玉米	0.101~0.336	0.209	0.391	0.424~1.429	0.680	0.509
	套种	0.103~0.464	0.250	0.596	0.363~1.409	0.844	0.460
	套种+MC	0.060~0.462	0.212	0.787	0.219~0.755	0.519	0.404
Pb	单种玉米	0.068~0.317	0.226	0.430	3.69~9.315	6.03	0.335
	套种	0.046~0.777	0.299	0.888	4.47~13.11	6.92	0.443
	套种+MC	0.222~0.567	0.347	0.364	5.37~15.16	7.96	0.456

2.2 东南景天生物量和植物提取量

2.2.1 不同处理对东南景天生物量和重金属含量的影响

整个试验期的不同处理的东南景天的总生物量见表3,单种东南景天处理的总生物量大于所有套种处理,主要是由于套种影响了第2次和第4次种植的东南景天的生长(图1)^[17].第1、2次东南景天的研究结果见文献[17],对第3次种植的东南景天,套种和混合螯合剂增加了东南景天地上部生物量(图1),与单种东南景天相比,套种处理使东南景天的生物量提高了8.2%,套种+MC提高了35.8%.第3次种植的东南景天生物量远大于第1

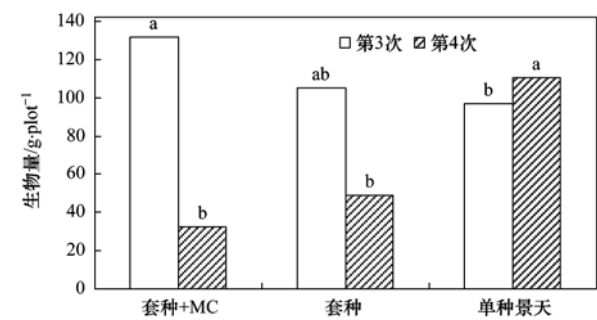
次(28~35 g·plot⁻¹),可能跟两次的种植方式不同有关,第1次为直接扦插,第3次为留茬生长.第4次种植(10月份扦插)的东南景天,套种处理和套种+MC处理的东南景天生长受到影响,东南景天的生物量降低幅度达55%以上(图1),前期的试验结果也显示10月种植的东南景天的生长会受到套种的影响^[17].

东南景天是Zn/Cd超富集植物,不同处理的东南景天地上部重金属含量范围见表5,不同种植时间东南景天重金属含量的变异大.从4次种植的平均值看,套种和MC提高了东南景天Zn、Cd和Pb含量,其中套种处理的提高幅度大.

表5 不同处理的4次种植的东南景天的重金属含量范围和变异系数

Table 5 Range of concentration of Zn, Cd and Pb of plant parts for *S. alfredii* under different treatments

元素	处理	含量范围 /mg·kg ⁻¹	平均值 /mg·kg ⁻¹	变异系数
Zn	单种景天	4 023~8 820	6 655	0.350
	套种	4 703~11 807	8 309	0.351
	套种+MC	4 578~11 451	7 928	0.354
Cd	单种景天	24.84~81.61	47.60	0.542
	套种	29.13~83.49	57.02	0.412
	套种+MC	25.96~72.39	47.68	0.399
Pb	单种景天	15.79~35.45	25.63	0.331
	套种	17.87~43.85	31.57	0.337
	套种+MC	12.43~37.49	28.29	0.393



第1次和第2次结果见文献[17]；第3次种植时间为2010年3~7月，第4次为2010年10月~次年6月

图1 不同处理东南景天的生物量

Fig. 1 Yields of plant parts for *S. alfredii* among different treatments

2.2.2 植物对重金属的提取

植物对重金属的总吸收量可以用单位面积的生物量与地上部重金属含量的乘积来表示,是表征植物提取效率的一个重要指标. 单种情况下东南景天对土壤重金属的总提取量远大于玉米(表6),两者套种在一起,也主要靠东南景天提取Zn和Cd. 单种东南景天对Zn和Cd的总提取量占土壤起始Zn

和Cd总量比例分别为1.7%和6.7%,而套种处理、套种+MC处理对Zn和Cd的总提取量占土壤起始Zn和Cd总量比例更低. 试验用的东南景天不是Pb超富集植物,对土壤Pb的吸收和提取也小,套种+MC处理的植物总提取Pb量仅占土壤起始Pb总量的0.009%,其他处理则更低.

从各次的提取量来看,东南景天第1次和第3次均为3~7月春夏季种植,套种处理对Zn、Cd、Pb的植物总提取量大于单种东南景天处理,说明东南景天和玉米在春夏季适合套种在一起,提高植物对重金属的提取. 第3次东南景天春季留茬生长,金属的提取量大于第1次,而第3次种植东南景天前的土壤重金属含量比起始值低,显示春季留茬生长有利于东南景天植物提取重金属.

第2次和第4次东南景天种植试验中,东南景天的扦插时间均在10月,混合整合剂降低了10月扦插的东南景天对重金属的提取,主要原因是东南景天在套种和MC作用下生物量降低的原因(图1).

表6 东南景天和玉米对重金属的吸收提取量¹⁾/mg·plot⁻¹

Table 6 Zn, Cd and Pb uptake by plants under different treatments /mg·plot⁻¹

元素	处理	第1次 (2008年4~7月)	第2次 (2008年10月~ 2009年3月)	第3次 (2009年3~7月)	第4次 (2009年10月~ 2010年6月)	总计 (2008年4月~ 2010年6月)
Zn	单种景天	153.1±5.8b	1 097±63a	390.8±16.0c	930.3±86.5a	2 571±82a
	单种玉米	—	—	—	—	108.1±22.9c
	套种	270.1±21.9a	641.8±95.6b	499.1±31.0b	593.9±151.9b	2 087±226ab
	套种+MC	306.6±18.7a	299.2±106.5c	618.6±36.3a	384.2±63.4b	1 718±182b
Cd	单种景天	0.882±0.129b	10.11±1.51a	2.416±0.169c	5.826±0.273a	19.24±1.44a
	单种玉米	—	—	—	—	0.430±0.068c
	套种	1.523±0.091a	4.900±1.134b	3.063±0.113b	4.122±0.950a	13.91±1.99b
	套种+MC	1.792±0.307a	2.843±1.385b	3.518±0.007a	1.570±0.423b	9.977±2.102b
Pb	单种景天	0.636±0.033b	3.626±0.394a	1.534±0.125b	3.968±0.626a	9.764±0.288b
	单种玉米	—	—	—	—	3.987±1.233c
	套种	2.369±0.043a	2.515±0.473ab	2.210±0.142a	2.903±0.761a	12.74±0.72a
	套种+MC	3.093±0.497a	1.955±0.335b	2.267±0.001a	3.017±0.348a	15.03±0.29a

1)表中数据是3次重复的平均值±标准误,根据Duncan检验(P=0.05),同一元素同列具有相同字母的数据无显著差异;单种玉米种植时间和次数与东南景天不同,故没有列出每次玉米的提取量数据,其总计为7次玉米对重金属的总提取量;而套种处理为4次东南景天和7次玉米对重金属的总提取量

2.3 土壤重金属含量变化

在种植试验过程中对土壤进行了两次采样,第一次土壤样品的采集在第2次收获东南景天后(约1a后),第二次土壤样品采集是在试验结束后,两次的土壤重金属含量见表7. 与土壤起始值相比,试验结束后的各处理的重金属含量均下降,单种景天、单种玉米和套种这3个处理间无显著差异. 对套种+MC处理,与试验起始值相比,1年种植试验后的

土壤Zn、Cd和Pb含量的降低幅度分别为6%、38%和12%;与第一次取样相比,试验结束后的土壤Zn、Cd和Pb含量的降低幅度分别为23%、18%和11%. 说明随着试验的持续进行,套种+MC处理的土壤Zn的持续下降,下降幅度大于其余处理.

试验结束后,不同处理的表层土壤重金属含量与起始值相比均有所下降,但与植物的总提取量相比(表6),并不完全吻合. 土壤Zn和Cd含量降低

幅度最大的为套种 + MC 处理,与起始值相比降低幅度分别为 28% 和 50%,然而相应的植物提取量并不是最大,对土壤 Zn、Cd 下降的贡献小于 10%,主要来自 MC 的施加促进了土壤重金属的淋滤,导致表层土壤 Zn 和 Cd 含量最低^[26],表层淋滤出的重金属向下层迁移,套种 + MC 处理的下层土壤的重金

属明显增加^[17]. 东南景天不是 Pb 超富集植物,植物提取量对土壤 Pb 含量降低的贡献较小,因此未施加 MC 的处理土壤 Pb 含量没有明显降低. MC 处理的土壤 Pb 含量降低幅度为 22%,绝大部分来源于 MC 导致的土壤 Pb 的淋滤,MC 处理的下层土壤 Pb 含量明显升高^[17].

表 7 不同处理后的表层土壤全量重金属含量¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 7 Total heavy metal contents of soil under different treatments /mg·kg⁻¹

处理	Zn		Cd		Pb	
	1 年后	试验结束后	1 年后	试验结束后	1 年后	试验结束后
单种景天	815.8 ± 29.6 a	613.1 ± 48.8 a	1.432 ± 0.013 a	1.282 ± 0.041 a	891.1 ± 21.5 a	872.4 ± 46.4 a
单种玉米	781.6 ± 31.9 a	680.8 ± 26.0 a	1.423 ± 0.035 a	1.454 ± 0.080 a	888.9 ± 12.8 a	844.4 ± 27.9 a
套种	727.9 ± 47.2 a	677.2 ± 24.6 a	1.441 ± 0.099 a	1.420 ± 0.106 a	829.2 ± 43.8 ab	869.0 ± 43.8 a
套种 + MC	756.5 ± 41.4 a	579.3 ± 29.4 a	0.951 ± 0.091 b	0.778 ± 0.014 b	754.5 ± 25.2 b	670.5 ± 28.7 b

1)表中数据是 3 次重复的平均值 ± 标准误,根据 Duncan 检验 ($P=0.05$),同列具有相同字母的数据无显著差异

2.4 重金属的淋滤对地下水的影响

不同处理的 11 次渗滤水重金属浓度见表 8,从平均值看,未施加混合螯合剂处理的渗滤水浓度均低,符合国家地下水质量标准Ⅲ(GB/T 14848)和荷兰干预值^[27];从含量范围来看,套种 + MC 处理的渗滤液重金属浓度最高,最高浓度出现在施加混合螯合剂后的初期降水时,其中 Zn 浓度低于国家地下水标准Ⅲ 1 mg·L⁻¹和荷兰干预值 0.8 mg·L⁻¹; Cd 的最高浓度为

0.007 3 mg·L⁻¹,低于国家地下水标准 0.01 mg·L⁻¹,略高于荷兰干预值 0.006 mg·L⁻¹; Pb 最高浓度为 0.053 mg·L⁻¹,略高于国家地下水标准 0.05 mg·L⁻¹,低于荷兰干预值 0.075 mg·L⁻¹. 混合螯合剂在第 2 年增加渗滤液中重金属浓度,可能与混合螯合剂的累积施用和深层土壤的吸附固定能力减弱有关. 这些监测结果显示,施加混合螯合剂增加了渗滤液中重金属含量,但未明显超过地下水Ⅲ级标准.

表 8 不同处理渗滤水的重金属浓度/mg·L⁻¹

Table 8 Heavy metal concentrations in leachates from deeper soil layer under different treatments/mg·L⁻¹

处理	Zn			Cd			Pb		
	范围值	平均值	变异系数	范围值	平均值	变异系数	范围值	平均值	变异系数
单种景天	0.017 ~ 0.159	0.111	0.430	0 ~ 0.002 0	0.000 7	1.07	0 ~ 0.022	0.008	1.20
单种玉米	0.016 ~ 0.116	0.071	0.451	0 ~ 0.002 0	0.000 7	1.16	0 ~ 0.034	0.007	1.17
套种	0.014 ~ 0.094	0.060	0.693	0 ~ 0.002 0	0.000 8	0.831	0 ~ 0.025	0.009	1.29
套种 + MC	0.113 ~ 0.477	0.231	0.493	0 ~ 0.007 3	0.002 9	0.833	0 ~ 0.053	0.032	0.532
地下水标准Ⅲ		1.0			0.01			0.05	
荷兰干预值		0.8			0.006			0.075	

3 讨论

与第 1 年试验结果^[17]相比,之后 1.5 a 的试验肯定了东南景天和玉米适合在春夏季套种,以及套种可收获符合饲料卫生标准的玉米. 第 1 年试验表明,施加混合螯合剂并没有显著增加渗滤液中重金属浓度,可能与下层土壤富含铁氧化物对重金属吸附固定有关^[28],郭晓方的研究也表明,下层土壤(40 ~ 80 cm)对 EDTA 络合态重金属吸附能力显著高于表层土壤^[29]. 随着时间的进行,施加螯合剂提高了渗滤液中重金属浓度,可能与深层土壤对重金属的吸附固定能力减弱有关. 在广东地区两处重金属污染农田进行的田间试验,施加混合螯合剂后,一年多

的监测也没有发现地下水受到明显影响^[29,30]. 对于施加螯合剂可能产生的地下水污染风险,可以通过在深层土壤添加固定剂有效固定表层淋滤下来的重金属^[31].

与第 1 年试验结果^[17]不同,发现第 3 次东南景天春季留茬生长,在土壤重金属含量降低的情况下,重金属的提取量大于第 1 次,显示东南景天春季留茬生长有利于提高植物产量和重金属提取量. 通过长期修复试验并得出,MC 长期多次施用不利于东南景天生长和提取 Zn/Cd,但是有利于该中性土壤(pH 6.59)重金属的降低,而且中性多金属(包括 Pb)污染土壤化学强化措施仍然是必须的,这样才能实现多重金属(如 Cd、Zn 和 Pb)污染土壤的同时修复.

4 结论

(1) 2.5 a 持续植物修复试验表明, 东南景天和玉米适合在 3~7 月套种在重金属污染土壤上, 提高植物对 Zn 和 Cd 的提取效率。然而在秋冬季节, 单种东南景天生长最好。总体来说, 单种东南景天处理对污染土壤的 Zn 和 Cd 的总提取量最大, 高于东南景天与玉米套种以及套种 + MC 处理。

(2) 土壤 Zn、Cd 和 Pb 含量降低幅度最大的为套种 + MC 处理, 与起始值相比降低幅度分别为 28%、50% 和 22%; 土壤重金属含量的降低, 主要归功于混合螯合剂作用下重金属从表层向下层淋滤。

(3) 2.5 a 的监测结果表明, 施加混合螯合剂提高渗滤水重金属浓度, 但未明显超过地下水 III 级标准。

参考文献:

- [1] Wang Q R, Dong Y, Cui Y, *et al.* Instances of soil and crop heavy metal contamination in China [J]. *Soil and Sediment Contamination*, 2001, **10**(5): 497-510.
- [2] Glass D J. Economic potential of phytoremediation [A]. In: Raskin I Y A, Ensley B D (Eds.). *Phytoremediation of Toxic Metals* [M]. John New York: Wiley & Sons, Inc., 2000. 15-31.
- [3] Baker A J M, McGrath S P, Reeves R D, *et al.* Metal hyperaccumulator plants: a review of the ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metal-polluted soils [A]. In: Terry N, Banuelos G (Eds.). *Phytoremediation of Contaminated Soil and Water* [M]. Boca Raton, Florida: Lewis Publisher, 2000. 85-107.
- [4] Robinson B H, Leblanc M, Petit D, *et al.* The potential of *Thlaspi caerulescens* for phytoremediation of contaminated soils [J]. *Plant and Soil*, 1998, **203**: 47-56.
- [5] Nowack B, Schulin R, Robinson B H. Critical assessment of chelant-enhanced metal phytoextraction [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(17): 5225-5232.
- [6] Lombi E, Zhao F J, Dunham S J, *et al.* Phytoremediation of heavy metal-contaminated soils: natural hyperaccumulation versus chemically enhanced phytoextraction [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, **30**(6): 1919-1926.
- [7] Meers E, Ruttens A, Hopgood M L, *et al.* Comparison of EDTA and EDDS as potential soil amendments for enhanced phytoextraction of heavy metals [J]. *Chemosphere*, 2005, **58**(8): 1011-102.
- [8] Römkens P, Bouwam L, Japenga J, *et al.* Potentials and drawbacks of chelate-enhanced phytoremediation of soils [J]. *Environmental Pollution*, 2002, **116**(1): 109-121.
- [9] Chen Y H, Li X D, Shen Z G. Leaching and uptake of heavy metals by ten different species of plants during an EDTA-assisted phytoextraction process [J]. *Chemosphere*, 2004, **57**(3): 187-196.
- [10] Tandy S, Bossart K, Mueller R, *et al.* Extraction of heavy metals from soils using biodegradable chelating agents [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(3): 937-944.
- [11] 吴启堂, 邓金川, 龙新宪. 提高土壤锌、镉污染植物修复效率的混合添加剂及其应用 [P]. 中国专利: ZL03140098.1, 2006.
- [12] Guo Z M, Wei Z B, Wu Q T, *et al.* Chelator-enhanced phytoextraction coupling with soil washing to remediate multiple-metals-contaminated soils [J]. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, 2008, **12**(3): 210-215.
- [13] 卫泽斌, 郭晓方, 丘锦荣, 等. 间套作体系在污染土壤修复中的应用研究进展 [J]. *农业环境科学学报*, 2010, **29** (增刊): 272-277.
- [14] Whiting S N, Leake J R, McGrath S P, *et al.* Hyperaccumulation of Zn by *Thlaspi caerulescens* can ameliorate Zn toxicity in the rhizosphere of cocropped *Thlaspi arvense* [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(15): 3237-3241.
- [15] Liu X M, Wu Q T, Banks M K. Effect of Simultaneous Establishment of *Sedum alfredii* and *Zea mays* on heavy metal accumulation in plants [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2005, **7**(1): 43-53.
- [16] Wu Q T, Wei Z B, Ouyang Y. Phytoextraction of metal-contaminated soil by *Sedum alfredii* H: Effects of Chelator and Co-planting [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2007, **180**(1-4): 131-139.
- [17] Wei Z B, Guo X F, Wu Q T, *et al.* Phytoextraction of heavy metals from contaminated soil by co-cropping with chelator application and assessment of associated leaching risk [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2011, **13**(7): 719-729.
- [18] 杨肖娥, 龙新宪, 倪吾钟, 等. 东南景天 (*Sedum alfredii* H)——一种新的锌超积累植物 [J]. *科学通报*, 2002, **47**(13): 1003-1006.
- [19] Yang X E, Long X X, Ye H B, *et al.* Cadmium tolerance and hyperaccumulation in a new Zn-hyperaccumulating plant species (*Sedum alfredii* Hance) [J]. *Plant and Soil*, 2004, **259**(1-2): 181-189.
- [20] Ye H B, Yang X E, He B, *et al.* Growth Response and Metal Accumulation of *Sedum alfredii* to Cd/Zn Complex-Polluted Ion Levels [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2003, **45**(9): 1030-1036.
- [21] Samake M, Wu Q T, Mo C H, *et al.* Plants grown on sewage sludge in South China and its relevance to sludge stabilization and metal removal [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2003, **15**(5): 622-662.
- [22] Wu Q T, Deng J C, Long X X, *et al.* Selection of appropriate organic additives for enhancing Zn and Cd phytoextraction by hyperaccumulators [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, **18**(6): 1113-1118.

- [23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [24] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 246-366.
- [25] Guo X F, Wei Z B, Wu Q T, *et al.* Cadmium and zinc accumulation in maize grain as affected by cultivars and chemical fixation amendments [J]. *Pedosphere*, 2011, **21** (5): 650-656.
- [26] 周建利, 吴启堂, 卫泽斌, 等. 套种条件下混合螯合剂对污染土壤 Cd 淋滤行为的影响[J]. *环境科学*, 2011, **32** (11): 3440-3447.
- [27] Swartjes F A. Risk-based assessment of soil and groundwater quality in the Netherlands: standards and remediation urgency [J]. *Risk Analysis*, 1999, **19** (6): 1235-1249.
- [28] Contin M, Mondini C, Leita L, *et al.* Enhanced soil toxic metal fixation in iron (hydr) oxides by redox cycles [J]. *Geoderma*, 2007, **140** (1-2): 164-175.
- [29] 郭晓方. 化学淋洗剂在重金属污染土壤修复中的作用及环境风险[D]. 广州: 华南农业大学, 2012.
- [30] 周建利. 铅锌矿废水污染土壤联合修复技术及对地下水的影响[D]. 广州: 华南农业大学, 2009.
- [31] 吴启堂, 卫泽斌, 丘锦荣, 等. 一种利用化学淋洗和深层固定联合技术修复重金属污染土壤的方法[P]. 中国专利: ZL200910040403.8, 2011-04-27.

CONTENTS

Variation Characteristics of Surface Ozone and Its Precursors During Summertime in Nanjing Northern Suburb	SHAO Ping, AN Jun-lin, YANG Hui, <i>et al.</i> (4031)
Distribution Characteristics of Pollution Gases and Water Soluble Ion in Aerosol During the Asian Youth Games of Nanjing, China	ZOU Jia-nan, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4044)
Aerosol Concentration Variation in Nanjing During Asian Youth Games and the Relationship Between Aerosol Concentration and Visibility	YUAN Liang, YIN Yan, LI Qi, <i>et al.</i> (4052)
Characteristic Analysis of a Multi-day Pollution Event in Chang-Zhu-Tan Metropolitan Area During October 2013	LIAO Zhi-heng, FAN Shao-jia, HUANG Juan, <i>et al.</i> (4061)
Application of On-line Single Particle Aerosol Mass Spectrometry (SPAMS) for Studying Major Components in Fine Particulate Matter	FU Huai-yu, YAN Cai-qing, ZHENG Mei, <i>et al.</i> (4070)
Establishment and Application of Replaceable Source Profiles of PM ₁₀	CHEN Qiang, JING Yi, WU Huan-bo, <i>et al.</i> (4078)
Distribution, Flux and Biological Consumption of Carbon Monoxide in the East China Sea and the South Yellow Sea in Summer	WANG Jing, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4085)
Spatial and Temporal Distribution of Mercury in Water of a Small Typical Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (4095)
Fluorescence Characteristics of Fractionated Colloidal Organic Matter in Freshwater from Hunhe and Taizihe Watersheds	LIU Na-na, LI Bin, LIU Rui-xia, <i>et al.</i> (4103)
Variations of Annual Load of TN and TP in the Deep Bay Watershed, Shenzhen	ZHAO Chen-chen, ZHANG Shi-yan, MAO Xian-zhong (4111)
Characteristics and Bioavailability of Organic Phosphorus from Different Sources of Sediments in Dianchi Lake	XIONG Qiang, JIAO Li-xing, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (4118)
Heavy Metals Distribution Characteristics and Ecological Risk Evaluation in Surface Sediments of Dammed Jinshan Lake	ZHOU Xiao-hong, LIU Long-mei, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4127)
Vertical Distribution Pattern and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Sediment Core from Pumoyum Co, Tibet	XIE Ting, LUO Dong-xia, YANG Rui-qiang (4135)
Heavy Metals Pollution and Analysis of Seasonal Variation Runoff in Xi'an	YUAN Hong-lin, LI Xing-yu, WANG Xiao-chang (4143)
Distribution and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Urban Rainfall Runoff	WU Zi-lan, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4148)
Influence of the Substrate Composition in Extensive Green Roof on the Effluent Quality	CHEN Yu-lin, LI Tian, GU Jun-qing (4157)
Investigation of the Microbial Diversity and Structure of Biological Activated Carbon from Different Sources in Drinking Water Treatment Process	DU Er-deng, ZHENG Lu, FENG Xin-xin, <i>et al.</i> (4163)
Microcystin Safety Study During <i>Cyanobacteria</i> Removal by Pressure Enhanced Coagulation Process	JIANG Xin-yue, LUAN Qing, CONG Hai-bing, <i>et al.</i> (4171)
Membrane Fouling Based on Change of Membrane Characteristic Parameters During Ultrafiltration of Protein	WANG Xu-dong, ZHANG Yin-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (4176)
Impact Factors and Degradation Mechanism for the Ozonation of Acetaminophen in Aqueous Solution	CAO Fei, YUAN Shou-jun, ZHANG Meng-tao, <i>et al.</i> (4185)
Degradation of Benzothiazole in Electro-Assisted Microbial Reactor	LIU Chun-miao, DING Jie, LIU Xian-shu, <i>et al.</i> (4192)
Preparation and Evaluation of Fe-La Composite Oxide Nanoabsorbent for As(III) Removal from Aqueous Solutions	ZHANG Wei, CHEN Jing, ZHANG Gao-sheng (4198)
Physiological Responses of Tubificidae to Heavy Metal Chromium Stress	LOU Ju-qing, YANG Dong-ye, CAO Yong-qing, <i>et al.</i> (4205)
Effects of Light Quality on the Growth Characteristics and Biochemical Component of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	TANG Qing-qing, FANG Zhi-guo, JI Wen-wen, <i>et al.</i> (4212)
Influence of Alkalinity and DO on ANAMMOX Bioreactor at Normal Temperature and Low Substrate Concentration	REN Yu-hui, WANG Ke, LI Xiang-kun, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Fe ²⁺ and Fe ³⁺ on the Activity of ANAMMOX	LI Xiang, HUANG Yong, WU Chuan, <i>et al.</i> (4224)
Research on Change Process of Nitrosation Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	YIN Fang-fang, LIU Wen-ru, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (4230)
Effects of Salinity on N ₂ O Production During Nitrification Using Aerobic Granular Sludge	WANG Shan-shan, LIANG Hong, GAO Da-wen (4237)
Analysis of Microbial Community Variation in the Domestication Process of Sludge in a Sulfate-reducing Reactor	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan, ZHENG Xiao-hong, <i>et al.</i> (4244)
Quantifying the Influence of Different Matrices on Pb Accumulation in the Soil from Nanjing and Suspended Matter from the Lower of the Yangtze River with Pb Isotopic Technique	WANG Cheng, XIA Xue-qi, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4251)
Contamination Characteristics of Fluoroquinolones in Different Kinds of Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	SU Si-hui, HE Jiang-tao, YANG Lei, <i>et al.</i> (4257)
Effect of Environmental Factors on the Formation of Several Typical Tetracycline Resistance Genes in Soil	ZHANG Jun, LUO Fang-yuan, XIONG Hao-hui, <i>et al.</i> (4267)
Response of Nitrification/Denitrification and Their Associated Microbes to Soil Moisture Change in Paddy Soil	LIU Ruo-xuan, HE Ji-zheng, ZHANG Li-mei (4275)
Microbial Community Abundance and Diversity in Typical Karst Ecosystem to Indicate Soil Carbon Cycle	JIN Zhen-jiang, TANG Hua-feng, LI Min, <i>et al.</i> (4284)
Effects of Variable Temperature on Organic Carbon Mineralization in Typical Limestone Soils	WANG Lian-ge, GAO Yan-hong, DING Chang-huan, <i>et al.</i> (4291)
Influence of the Interaction Between Iron Oxide and Electron Donor Substances on 1,1,1-Trichloro-2,2-bis(<i>p</i> -chlorophenyl)ethane (DDT) Reductive Dechlorination in Hydragic Acrisols	LIU Cui-ying, XU Xiang-hua, WANG Zhuang, <i>et al.</i> (4298)
Continuous Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil by Co-Cropping System Enhanced with Chelator	WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (4305)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow at Different Sampling Scales	LI Hong-jian, GAO Yu-feng, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4313)
Study on Regularity of Greenhouse Gas Emissions from Black Soil with Different Reclamation Years	LI Ping, LANG Man, XU Xiang-hua, <i>et al.</i> (4321)
Comparison Between Transgenic Insect-Resistant Cotton Expressing CryI _{Ac} Protein and Its Parental Variety in Rhizospheric Fungal Diversity	PAN Jian-gang, JIAO Hai-hua, BAI Zhi-hui, <i>et al.</i> (4329)
Concentrations of Mercury in Ambient Air in Wastewater Irrigated Area of Tianjin City and Its Accumulation in Leafy Vegetables	ZHENG Shun-an, HAN Yun-lei, ZHENG Xiang-qun (4338)
Combined Effects of 1-Nitropyrene and 1,2-Naphthoquinone on Cytotoxicity and DNA Damage in A549 Cells	SHANG Yu, JIANG Yu-ting, ZHANG Ling, <i>et al.</i> (4345)
Influence of Organic Matter Evolution During Composting on the Bioavailability of Heavy Metals	BU Gui-jun, YU Jing, DI Hui-hui, <i>et al.</i> (4352)
Carbonization of Heavy Metal Cu Implanted Sewage Sludge and Stability of Heavy Metal in the Resulting Char	DOU Xiao-min, CHEN De-zhen, DAI Xiao-hu (4359)
Technological Characteristics of Bioreactor Landfill with Aeration in the Upper Layer	TIAN Ying, WANG Shen, XU Qi-yong (4365)
Impact of Nitrate Continuous Injection on N ₂ O Releases from Bioreactor Landfill	BIAN Rong-xing, SUN Ying-jie, LI Jing-jing, <i>et al.</i> (4371)
Research on Contribution Decomposition by Industry to China's Carbon Intensity Reduction and Carbon Emission Growth	JIANG Jing-jing, YE Bin, JI Jun-ping, <i>et al.</i> (4378)
Shifting Path of Industrial Pollution Gravity Centers and Its Driving Mechanism in Pan-Yangtze River Delta	ZHAO Hai-xia, JIANG Xiao-wei, CUI Jian-xin (4387)
Method for Environmental Management in Paper Industry Based on Pollution Control Technology Simulation	ZHANG Xue-ying, WEN Zong-guo (4395)
Research Progress and Direction of Atmospheric Brown Carbon	YAN Cai-qing, ZHENG Mei, ZHANG Yuan-hang (4404)

《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11月15日 第35卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 11 Nov. 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