

卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂, 等. 混合螯合剂的不同施加方式对重金属污染土壤套种修复效果的影响[J]. 华南农业大学学报, 2016, 37(1): 29-34.

混合螯合剂的不同施加方式对重金属污染土壤套种修复效果的影响

卫泽斌¹, 郭晓方², 吴启堂¹, 陈晓红¹

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

摘要:【目的】开发具有应用前景的植物与化学联合修复重金属污染土壤的技术。【方法】通过盆栽试验,研究混合螯合剂(MC)的不同施用方式对东南景天 *Sedum alfredii* 和玉米 *Zea mays* 套种系统的影响,探讨 MC 作为植物提取的强化剂和重金属的淋洗剂对土壤的修复效果。【结果】东南景天和玉米套种情况下,MC 可以提高植物对重金属提取的效率,也可以淋洗出土壤中的部分重金属,其中 MC 分 2 次淋洗时淋出的重金属量显著大于单次淋洗。经过套种和 MC 淋洗后,土壤全量 Cd、Zn 和 Pb 含量降低幅度分别为 30.7% ~ 33.0%、11.9% ~ 14.7% 和 13.3% ~ 16.4%。东南景天和玉米套种的共有根际土壤微生物数量与单种植物的不同,施加 MC 后显著提高了套种共有根际的细菌和放线菌数量,然而,高剂量 MC 淋洗时共有根际的微生物数量又会下降。【结论】套种和 MC 淋洗联合技术对土壤重金属的去除量大于植物提取的;Pb 的去除主要靠淋洗,Zn/Cd 可以用植物提取去除,套种 + 淋洗可以加快对 Zn/Cd/Pb 复合污染土壤的修复。

关键词:重金属污染;套种;淋洗;东南景天;玉米;混合螯合剂
中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-411X(2016)01-0029-06

Effects of different application methods of mixed chelators on remediation of heavy metal contaminated soil in interplanting system

WEI Zebin¹, Guo Xiaofang², WU Qitang¹, CHEN Xiaohong¹

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

Abstract:【Objective】To develop a plant-chemical remediation technique in soil contaminated by heavy metals with application prospects. 【Method】Mixed chelators (MC) were applied to *Sedum alfredii* and *Zea mays* interplanting system with different application methods in pot experiments. As a fortification agent for phytoextraction and a washing agent for heavy metals, the effects of MC on soil remediation were studied. 【Result】The efficiency of heavy metal extraction by plants was improved and soil heavy metals could be partly leached by MC in *S. alfredii* and *Z. mays* interplanting system. Heavy metal amounts washed by MC twice were more than that of a single washing. Through interplanting and chemical washing, total Cd, Zn and Pb in soil decreased by 30.7% - 33.0%, 11.9% - 14.7% and 13.3% - 16.4% respectively. The number of soil rhizospheric microorganism was different from that of a single crop in the

收稿日期:2014-04-20 优先出版时间:2015-12-07
优先出版网址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20151207.1116.010.html>
作者简介:卫泽斌(1980—),男,讲师,博士, E-mail: wezebin@scau.edu.cn; 通信作者:吴启堂(1962—),男,教授,博士, E-mail: wuqitang@scau.edu.cn
基金项目:863 计划(2012AA06A202);广东省科技计划项目(2014A020216033,2012A030700004);广东省自然科学基金(S2011030002882);太原科技大学青年科技研究基金(20133004)

S. alfredii and *Z. mays* interplanting system. MC application increased the number of bacteria and actinomycetes in the interplanting system, while high dosage MC washing reduced the number of soil microorganisms. 【Conclusion】The removal of heavy metals by combining interplanting with chemical washing technology is more efficient than by phytoextraction. Zn and Cd removal can be achieved by phytoextraction while Pb removal mainly relies on MC washing. The interplanting and washing technique can accelerate remediation of Cd, Zn and Pb in combination pollution soils.

Key words: heavy metal pollution; interplanting; washing; *Sedum alfredii*; *Zea mays*; mixed chelator

随着我国经济社会的快速发展,特别是近 30 年来工业化和城市化进程,土壤重金属污染问题日趋严重^[1-3]。利用重金属超富集植物提取土壤中重金属的技术成本低、修复彻底^[4-7]。施加螯合剂可以提高植物对重金属的提取效率^[8],吴启堂等^[9-10]研制了包括味精废液等多种有机试剂混合而成的添加剂,该添加剂具有廉价和对地下水低污染等特点,能提高超富集植物提取 Zn/Cd 的效率。超富集植物东南景天 *Sedum alfredii* 与低累积玉米 *Zea mays* 套种修复重金属污染土壤,植物提取土壤重金属的效率得到明显提高,同时可以收获符合一定卫生标准的农产品^[11-13]。

土壤淋洗技术也是去除土壤重金属的有效技术手段^[14],利用淋洗剂溶解土壤中的重金属使其随淋洗液流出,然后对淋洗液进行后续处理,从而达到修复污染土壤的目的。Kos 等^[15]采用螯合诱导植物提取 + 可降解络合剂淋洗 + 透性墙过滤联合技术来修复重金属污染土壤,使植物修复技术更有效率,因为活化的重金属除了随淋洗液流出土壤,也能促进植物吸收。已有的研究^[16]表明用混合螯合剂 (Mixed of chelator, MC) 淋洗单独种植东南景天的重金属污染土壤的效果比 EDTA 和味精废液好。

东南景天和玉米套种,并施加螯合剂在酸性重金属污染农田上进行多次田间试验,5 次种植后土壤中 Zn 和 Cd 含量达到国家土壤环境质量二级标准^[17]。混合螯合剂的施用促进了土壤重金属的淋溶,降低了土壤重金属含量。混合螯合剂在土壤修复中可以用作诱导剂、也可用作土壤淋洗剂,本研究采用盆栽试验研究 MC 的不同施加方式 (螯合和淋洗) 对套种系统的影响。

1 材料与方法

1.1 材料

东南景天为浙江矿山型,剪取大小均一的枝条直接扦插;玉米品种为 Yunshi-5。

<http://xuebao.scau.edu.cn>

混合螯合剂 (MC) 主要成分为柠檬酸、EDTA 等,柠檬酸: EDTA: KCl (摩尔比) = 10: 2: 3。

1.2 试验设计及样品采集

本研究采用特殊试验用盆,在盆中间插入 2 张 300 目尼龙网将盆一分为三,2 张尼龙网间形成一个 2 mm 的共有根际区域。每盆装重金属污染土壤 2 kg (共有根际区域填充满土壤),污染土壤采自广东省乐昌市某铅锌矿废水污染农田,土壤 pH 7.40,土壤重金属 Cd、Zn 和 Pb 质量分数分别为 1.3、673.6 和 903.7 mg · kg⁻¹,土壤风干后,过 2 mm 筛。

试验在温室进行,试验设置 6 个处理: 1) 只种植玉米; 2) 只种植东南景天; 3) 套种,一侧种植东南景天、一侧种植玉米; 4) 套种 + MC,植物生长 2 个月后施加 MC,每千克土添加 MC 5 mmol,MC 溶于 200 mL 蒸馏水后均匀洒到土壤表面; 5) 套种 + MC 1 次淋洗,MC 溶于 500 mL 蒸馏水,从土壤表层缓慢加入,在盆子底部收集淋出液; 6) 套种 + MC 2 次淋洗,MC 溶于 1 L 蒸馏水,分 2 次淋洗土壤 (第 2 次淋洗在第 1 次淋洗后第 3 天)。每个处理 4 次重复,70 d 后收获东南景天和玉米的地上部和根系,并采集土壤。

用剪刀剪取东南景天和玉米地上部并称质量。收获的东南景天和玉米拿回实验室,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用。小心地倒出土壤,收集根系,拿回实验室处理干净,同地上部处理相同。采集两侧土壤和共有根际土壤,于样品室风干。

1.3 数据处理

土壤和植物样品分析参照《土壤农业化学分析方法》^[18] 中的方法进行,水样重金属分析采用《水和废水监测分析》^[19] 中的方法进行;可培养微生物数量采用平板法测定^[20]。所有数据用 Excel 软件处理, SAS 8.1 软件统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理的玉米茎叶生物量和重金属含量

套种处理玉米茎叶生物量显著高于玉米单种处

理(表 1),套种处理的玉米茎叶生物量是单种玉米处理的 1.17 倍,与单种相比,套种增加了玉米的地上部生物量。与套种处理比较,MC 的施加(螯合和淋洗)增加了玉米茎叶的生物量,但差异不显著。

不同处理玉米茎叶重金属含量见表 1。套种处理的玉米茎叶 Zn 和 Cd 含量低于单种处理,Pb 含量高于单种处理,但处理间差异不显著。套种 + MC 处理的茎叶 Zn 含量最高,显著高于套种处理,MC 作为螯合剂提高了玉米茎叶 Zn 含量。MC 作淋洗剂时,玉米茎叶 Zn 含量低于 MC 作为螯合剂的处理,但与套种处理无显著差异,可见,MC 的不同施加方式会影响玉米茎叶的 Zn 含量。与套种处理相比,MC 的使用提高了玉米茎叶 Cd 含量,增幅 40% ~ 85%,但

只有 MC 淋洗 1 次时与套种达到显著差异,MC 作为螯合剂与作为淋洗剂时玉米茎叶 Cd 含量无显著差异。从表 1 可以看出,MC 的使用显著提高了玉米茎叶的 Pb 含量;套种 + MC 处理、套种 + MC 淋洗和套种 + MC 2 次淋洗处理的玉米茎叶 Pb 含量分别是套种处理的 6.2、4.1 和 3.9 倍。MC 作为淋洗剂的玉米茎叶 Pb 含量低于 MC 作为螯合剂时,MC 的不同施加方式会影响玉米茎叶 Pb 含量的提高幅度。MC 淋洗次数对玉米茎叶重金属含量没有影响。因此,与套种相比,MC 作为螯合剂和淋洗剂使用,提高了玉米茎叶中 Cd 和 Pb 的含量,2 种使用方式的提高程度不一样,MC 作为螯合剂时可提高玉米茎叶 Zn 含量。

表 1 玉米茎叶的生物量和重金属含量¹⁾

Tab.1 The shoot yields and concentrations of Zn, Cd and Pb in shoots of <i>Zea mays</i> under different treatments				
处理	生物量 ²⁾ /g	Zn/(mg·kg ⁻¹)	Cd/(mg·kg ⁻¹)	Pb/(mg·kg ⁻¹)
玉米	8.29 ± 0.55b	238.4 ± 1.3ab	0.663 ± 0.388ab	3.90 ± 0.61c
套种	9.76 ± 1.32a	237.4 ± 1.8b	0.396 ± 0.084b	4.36 ± 0.55c
套种 + MC	9.99 ± 0.75a	239.4 ± 0.3a	0.556 ± 0.083ab	26.93 ± 1.19a
套种 + MC 淋洗	10.44 ± 0.41a	236.8 ± 1.0b	0.735 ± 0.339a	17.71 ± 2.47b
套种 + MC 2 次淋洗	10.10 ± 0.78a	237.4 ± 0.2b	0.638 ± 0.209ab	16.78 ± 1.52b

1)表中数据是平均值 ± 标准误,同列数据后凡具有一个相同字母者表示差异不显著($P > 0.05$, Duncan's 法);2)此处的生物量是指半盆的生物量。

2.2 不同处理的东南景天生物量和重金属含量

不同处理的东南景天地上部生物量见表 2。与单种东南景天相比,套种处理提高了东南景天地上部生物量,增幅为 10%,但差异不显著。与套种处理相比,MC 的使用显著降低了套种东南景天的生物量,使其也低于单种东南景天的生物量。套种 + MC、套种 + MC 淋洗和套种 + MC 2 次淋洗 3 个处理间的东南景天生物量差异不显著,MC 的不同使用方式对东南景天生物量的影响不大。

与单种东南景天相比,套种降低了东南景天重金属含量(表 2)。套种 + MC 螯合处理的东南景天地上 Zn、Cd 和 Pb 含量高于其他处理,套种 + MC 处理的东南景天 Zn、Cd 和 Pb 含量分别是套种处理的 1.9、2.1 和 4.6 倍。MC 用作淋洗剂也提高了套种系统重金属含量,但增幅小于套种 + MC 处理;MC 1 次淋洗对东南景天 Zn、Cd 含量的增幅大于 MC 2 次淋洗,对 Pb 含量作用相反。

表 2 不同处理的东南景天地上部的生物量和重金属含量¹⁾

Tab.2 The shoot yields and concentrations of Zn, Cd and Pb in shoots of <i>Sedum alfredii</i> under different treatments				
处理	生物量 ²⁾ /g	Zn/(mg·kg ⁻¹)	Cd/(mg·kg ⁻¹)	Pb/(mg·kg ⁻¹)
东南景天	1.32 ± 0.18ab	2 656 ± 425b	12.07 ± 2.83ab	7.33 ± 1.32c
套种	1.45 ± 0.27a	2 041 ± 228b	9.12 ± 2.96b	4.94 ± 0.53c
套种 + MC	1.03 ± 0.26b	3 949 ± 1 428a	18.90 ± 4.77a	22.52 ± 11.10a
套种 + MC 淋洗	1.17 ± 0.16ab	2 363 ± 788b	12.39 ± 3.25ab	12.14 ± 2.44ab
套种 + MC 2 次淋洗	1.06 ± 0.25b	2 062 ± 421b	9.87 ± 2.64b	17.47 ± 5.32ab

1)表中数据是平均值 ± 标准误,同列数据后凡具有一个相同字母者表示差异不显著($P > 0.05$, Duncan's 法);2)此处的生物量是指半盆的生物量。

2.3 植物对重金属的提取

不同处理玉米和东南景天对重金属的提取量见表 3。与单种玉米相比,套种提高了玉米 Zn 提取量,

MC 的使用(螯合和淋洗)进一步提高了玉米对 Zn 的提取量;套种处理玉米 Zn 提取量是单种玉米的 1.2 倍。套种处理的玉米 Cd 提取量低于单种玉米,

但差异不显著。MC 的使用提高了玉米对 Cd 的提取,套种 + MC 淋洗和套种 + MC 2 次淋洗处理的玉米 Cd 提取量大于套种和单种玉米处理,其中单次淋洗大于 2 次淋洗。对 Pb 的提取,套种处理提高了玉米 Pb 提取量;套种联合 MC 处理显著提高了玉米 Pb 提取量,是套种处理的 4 ~ 6 倍。

套种 + MC 处理的东南景天重金属提取量最大,Zn、Cd 和 Pb 的提取量分别是套种处理的 1.3、1.4 和 3.5 倍(表 3);与单种东南景天相比,套种降低了重

金属提取量。与套种相比,套种 + MC 淋洗和套种 + MC 2 次淋洗处理降低了东南景天 Zn 提取量,套种 + MC 处理提高了 Zn 提取量,可见,MC 的不同使用方式会影响东南景天对 Zn 的提取。不同处理间东南景天 Cd 提取量差异不显著,MC 的 2 次淋洗降低了套种东南景天的 Cd 提取量。与套种相比,MC 的使用均提高了东南景天 Pb 提取量,MC 作淋洗剂的提高幅度低于作螯合剂时。

表 3 不同处理玉米和东南景天地上部对重金属的植物提取量¹⁾

Tab.3 The amounts of Zn, Cd and Pb absorbed by shoots of *Zea mays* or *Sedum alfredii* under different treatments mg

作物		处理	Zn	Cd	Pb
玉米	单种		1.98 ± 0.12b	0.005 4 ± 0.003 1ab	0.032 0 ± 0.006 0c
	套种		2.32 ± 0.33a	0.003 9 ± 0.001 0b	0.043 0 ± 0.009 0c
	套种 + MC		2.39 ± 0.18a	0.005 5 ± 0.000 5ab	0.269 0 ± 0.029 0a
	套种 + MC 淋洗		2.47 ± 0.09a	0.007 6 ± 0.004 0a	0.185 0 ± 0.028 0b
	套种 + MC 2 次淋洗		2.40 ± 0.19a	0.006 4 ± 0.001 9ab	0.169 0 ± 0.007 0b
东南景天	单种		3.50 ± 0.75ab	0.015 9 ± 0.006 8a	0.009 6 ± 0.001 9b
	套种		2.93 ± 0.48ab	0.012 9 ± 0.004 6a	0.007 2 ± 0.001 9b
	套种 + MC		3.88 ± 1.10a	0.018 0 ± 0.009 7a	0.025 0 ± 0.017 7a
	套种 + MC 淋洗		2.80 ± 1.16ab	0.014 1 ± 0.006 7a	0.014 3 ± 0.004 4ab
	套种 + MC 2 次淋洗		2.16 ± 0.45b	0.010 3 ± 0.004 7a	0.018 3 ± 0.005 6ab

1)表中数据为平均值 ± 标准误,为半盆的数据,同种作物不同处理同列数据后凡具有一个相同字母者表示差异不显著($P > 0.05$, Duncan's 法)。

植物提取和淋洗对土壤重金属的去除见表 4,套种 + MC 诱导处理的植物总提取量最大。利用 MC 对套种系统进行淋洗可以去除土壤中部分重金属,MC 分 2 次淋洗去除的重金属大于 MC 1 次淋洗(表 4)。MC 对土壤 Pb 的淋洗量远大于植物 Pb 提取量,

Cd 淋洗量也大于 Cd 植物提取量。套种 + MC 淋洗和套种 + MC 2 次淋洗处理的植物提取和淋洗对土壤重金属的总去除量大于其他处理,植物提取和土壤淋洗联合技术对重金属的去除量大于植物提取技术的。

表 4 不同处理对重金属的植物总提取量和淋洗量¹⁾

Tab.4 The amounts of heavy metals extracted by phytoextraction and soil washing under different treatments mg

处理	Zn		Cd		Pb	
	植物提取	淋洗	植物提取	淋洗	植物提取	淋洗
玉米单种	1.98 ± 0.06d		0.005 ± 0.002b		0.032 ± 0.003cd	
东南景天单种	3.50 ± 0.38c		0.016 ± 0.003a		0.010 ± 0.001d	
套种	5.25 ± 0.28ab		0.017 ± 0.003a		0.050 ± 0.005c	
套种 + MC	6.27 ± 0.59a		0.024 ± 0.005a		0.294 ± 0.010a	
套种 + MC 淋洗	5.27 ± 0.55ab	3.33 ± 0.15a	0.022 ± 0.004a	0.056 ± 0.005b	0.199 ± 0.014b	14.7 ± 0.6b
套种 + MC 2 次淋洗	4.56 ± 0.26bc	3.76 ± 0.19a	0.017 ± 0.003a	0.072 ± 0.005a	0.187 ± 0.006b	17.2 ± 0.6a

1)表中数据是平均值 ± 标准误,为半盆的数据,同列数据后凡具有一个相同字母者表示差异不显著($P > 0.05$, Duncan's 法)。

2.4 土壤重金属情况

试验结束后土壤重金属含量均有所降低(表 5)。对土壤重金属的总去除量(包括植物提取和土壤淋洗)最大的套种 + MC 淋洗和套种 + MC 2 次淋

洗,相应的土壤重金属含量也最低。土壤经过套种和 MC 1 次和 2 次淋洗后,土壤全量 Cd、Zn 和 Pb 含量降低幅度分别为 30.7% ~ 33.0%, 11.9% ~ 14.7% 和 13.3% ~ 16.4%。套种 + MC 处理的土壤

Zn、Cd 和 Pb 含量低于套种处理,套种处理的土壤重金属全量低于单种玉米和单种东南景天处理。

MC 作为淋洗剂和螯合剂均促进了土壤重金属含量的降低。利用套种 + 淋洗联合技术修复污染土壤时,深层土壤施加碱性氯化铁后可以有效固定表层淋滤出的重金属^[21],从而使该联合技术更加完善;套种在田间修复土壤的同时会收获符合一定标准的玉米籽粒。

表 5 不同处理的土壤重金属全量¹⁾

Tab.5 Total heavy metal contents in soil under different treatments w/(mg·kg⁻¹)

处理	Zn	Cd	Pb
玉米单种	615 ± 62ab	1.25 ± 0.03ab	880 ± 29a
东南景天单种	630 ± 30a	1.27 ± 0.03a	875 ± 27a
套种	608 ± 21ab	1.11 ± 0.14b	831 ± 51ab
套种 + MC	605 ± 19ab	1.10 ± 0.14b	823 ± 64ab
套种 + MC 淋洗	594 ± 25ab	0.89 ± 0.05c	755 ± 29c
套种 + MC 2 次淋洗	575 ± 10b	0.92 ± 0.02c	783 ± 26bc

1)表中数据是平均值±标准误,同列数据后凡具有一个相同字母者表示差异不显著($P>0.05$,Duncan's 法)。

2.6 不同处理的根际土壤的微生物数量

玉米单种和东南景天单种的根际土壤的微生物有各自的特点,主要是东南景天根际土壤的真菌和放线菌数量远大于玉米,细菌数量差异不大(表 6)。套种处理会影响根际土壤微生物的数量,东南景天和玉米套种的共有根际土壤真菌和放线菌数量低于东南景天处理,与玉米处理的差异不大。

MC 的使用(螯合和淋洗)显著增加了套种共有根际土壤的细菌和放线菌数量,MC 作为螯合剂的增加幅度大于作为淋洗剂(表 6)。按着套种 + MC、套种 + MC 淋洗、套种 + MC 2 次淋洗的顺序,细菌和放线菌的数量依次降低。不同 MC 处理对套种共有根际土壤的真菌数量无明显影响。

表 6 不同处理根际土壤的微生物数量¹⁾

Tab.6 The number of rhizosphere soil microbes under different treatments

处理	细菌/(×10 ⁶ CFU·g ⁻¹)	真菌/(×10 ⁴ CFU·g ⁻¹)	放线菌/(×10 ⁵ CFU·g ⁻¹)
玉米单种	13.28 ± 2.38c	0.64 ± 0.16b	23.0 ± 2.3c
东南景天单种	7.12 ± 0.71c	8.34 ± 2.12a	141.9 ± 13.9b
套种	12.12 ± 0.66c	1.22 ± 0.12b	23.8 ± 1.2c
套种 + MC	72.64 ± 10.57a	1.81 ± 0.10b	257.1 ± 51.0a
套种 + MC 淋洗	38.53 ± 4.27b	1.29 ± 0.21b	70.8 ± 7.5c
套种 + MC 2 次淋洗	15.80 ± 1.04c	0.71 ± 0.06b	44.2 ± 10.4c

1)表中数据是平均值±标准误,同列数据后凡具有一个相同字母者表示差异不显著($P>0.05$,Duncan's 法)。

3 结论

1)套种处理的玉米茎叶的生物量均高于单种处理的,套种处理的茎叶 Cd 含量低于单种处理的。对于东南景天,套种处理的生物量大于单种处理的,但 Zn、Cd 和 Pb 含量低于单种处理的,套种处理并没有增加东南景天对 Zn、Cd 和 Pb 的提取。

2)与套种处理相比,混合螯合剂的施加提高了套种玉米的茎叶生物量,并提高了玉米茎叶 Cd 和 Pb 的含量。与其他处理相比,套种 + MC 处理的茎叶 Zn 含量最高,但与单种玉米处理并无显著差异;混合螯合剂的 3 种施加方式均提高了玉米对重金属的提取。

3)与套种处理相比,混合螯合剂的使用降低了东南景天的生物量,但提高了东南景天的重金属含量。与套种 + MC 处理相比,MC 作淋洗剂时的东南景天重金属提取量有所降低,但 MC 可以将部分重金属淋洗出土壤,其中 MC 分 2 次淋洗时淋出的重金属的量显著大于单次淋洗。套种 + MC 处理植物对重金属的提取量最高,而套种 + MC 2 次淋洗对土壤重金属的去除量最高;淋洗和套种联合处理重金属污染土壤后,重金属全量明显降低,套种和化学淋洗对重金属的去除大于单一植物提取。土壤经过套种和 MC 1 次和 2 次淋洗后,土壤全量 Cd、Zn 和 Pb 降幅分别为 30.7% ~ 33.0%, 11.9% ~ 14.7% 和 13.3% ~ 16.4%。

4)共有根际土微生物数量处理间存在显著差异,套种 + MC 处理细菌和放线菌数量均最高;与其

http://xuebao.scau.edu.cn

他处理相比,东南景天单种处理的真菌数量最高。

参考文献:

- [1] 陈怀满. 土壤-植物系统中的重金属污染[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 71-125.
- [2] ZHAO F J, MA Y B, ZHU Y G, et al. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies[J]. Environ Sci Technol, 2015, 49(2): 750-759.
- [3] LI Z Y, MA Z W, KUIJP VAN DER T J, et al. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment[J]. Sci Total Environ, 2014, 15(468/469): 843-853.
- [4] LI Z, WU L H, HU P J, et al. Repeated phytoextraction of four metal-contaminated soils using the cadmium/zinc hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola*[J]. Environ Pollut, 2014, 189: 176-183.
- [5] GLASS D J. Economic potential of phytoremediation[M]// RASKIN I Y A, ENSLEY, B. D. Phytoremediation of Toxic Metals. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000: 15-31.
- [6] ALI H T, KHAN E, SAJAD M A. Phytoremediation of heavy metals: Concepts and applications[J]. Chemosphere, 2013, 91(7): 869-881.
- [7] SHEORAN V, SHEORAN A S, POONIA P. Role of hyperaccumulators in phytoextraction of metals from contaminated mining sites: A review[J]. Crit Rev Env Sci Tec, 2011, 41(2): 168-214.
- [8] NOWACK B, SCHULIN R, ROBINSON B H. Critical assessment of chelant-enhanced metal phytoextraction[J]. Environ Sci Technol, 2006, 40(2): 5225-5232.
- [9] 邓金川, 吴启堂, 龙新宪, 等. 几种有机添加剂对遏蓝菜和东南景天吸收提取 Zn 的效应[J]. 生态学报, 2005, 25(10): 2562-2568.
- [10] 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: ZL03140098.1[P]. 2006-03-22.
- [11] 卫泽斌, 吴启堂, 龙新宪. 利用套种和混合添加剂修复重金属污染土壤[J]. 农业环境科学学报, 2005, 25(6): 1262-1263.
- [12] WU Q T, WEI Z B, OUYANG Y. Phytoextraction of metal contaminated soil by hyperaccumulator *Sedum alfredii* H: Effects of chelator and co-planting[J]. Water Air Soil Poll, 2007, 180(1/2/3/4): 131-139.
- [13] WU Q T, HEI L, WONG J W C, et al. Co-cropping for phyto-separation of zinc and potassium from sewage sludge[J]. Chemosphere, 2007, 68(10): 1954-1960.
- [14] PETERS W R. Chelant extraction of heavy metals from contaminated soil[J]. J Hazard Mater, 1999, 66(1/2): 151-210.
- [15] KOS B, LESTAN D. Induced phytoextraction/soil washing of lead using biodegradable chelate and permeable barriers[J]. Environ Sci Technol, 2003, 37(2): 624-629.
- [16] 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]. Pract Period Hazard, Toxic, Radioact Waste Manag, 2008, 12(3): 210-215.
- [17] 周建利, 邵乐, 朱凰榕, 等. 间套种及化学强化修复重金属污染酸性土壤: 长期田间试验[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 1056-1065.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [19] 国家环保局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境出版社, 2002: 246-366.
- [20] 龙新宪, 刘洪彦, 戴军, 等. 两种生态型东南景天根际与非根际土壤微生物特征的差异性[J]. 土壤学报, 2009, 46(3): 547-552.
- [21] 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: ZL200910040403.8[P]. 2011-04-27.

【责任编辑 霍欢】