

东南景天和玉米套种对 Zn 污染污泥的处理效应

黑亮^{1,2}, 吴启堂^{1*}, 龙新宪¹, 胡月明²

(1. 华南农业大学资源环境学院, 广州 510642; 2. 华南农业大学信息技术学院, 广州 510642)

摘要: 针对广州等地城市污泥重金属 Zn 超标的特点, 采用植物处理的方法, 将超富集重金属的植物东南景天和低累积作物玉米套种在污泥上, 希望在减少污泥重金属的同时, 使污泥稳定化和获得合格的农产品. 试验采用小区直接种植的方式, 3 个月测定植物产量和重金属含量以及处理后污泥的变化, 并利用室内盆栽试验初步研究了 2 种植物根系相互作用的机理. 小区试验结果表明, 与超富集东南景天单独种植相比, 套种显著提高了超富集东南景天提取 Zn 和 Cd 的效率, Zn 含量达 9 910 mg·kg⁻¹, 是单种的 1.5 倍, 而且生产出的玉米籽粒重金属含量符合食品和饲料卫生标准, 处理后的污泥生物稳定性明显提高. 超富集东南景天和玉米半透膜隔开的盆栽套种试验显示, 在套种条件下, 玉米对促进超富集东南景天吸收更多的重金属的部分原因是玉米根系降低溶液 pH 和提高 DOC 以及 Zn/Cd 浓度, 从而可向超富集东南景天一侧输送更多的水溶态 Zn/Cd.

关键词: 污泥; 重金属; 植物处理; 超富集植物; 套种

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)04-0852-07

Effect of Co-planting of *Sedum alfredii* and *Zea mays* on Zn-Contaminated Sewage Sludge

HEI Liang^{1,2}, WU Qi-tang¹, LONG Xin-xian¹, HU Yue-ming²

(1. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. College of Information Technology, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: The sewage sludge produced in Guangzhou and other cities contains heavy metals such as Zn which exceeds the national standard for agricultural use and should be taken into consideration. A phyto-treatment system consisted of metal hyperaccumulator *Sedum alfredii* Hance and low-accumulating corn was exploited to phytoextract metals from sludge, in order to reduce heavy metals in sludge and meanwhile to stabilize the sludge and gain innocuous agricultural products. The two plants were co-cropped directly on the sludge plots, the plant biomass and metal uptake were determined as well as the changes of the treated sludge. A pot experiment was conducted to study the interaction mechanisms between the two plant roots. The results of the experiment in plots showed that the efficiency of the phyto-extraction of Zn/Cd by *S. alfredii* was significantly improved by co-planting and Zn content in *S. alfredii* reached 9 910 mg·kg⁻¹, 1.5 folds of that in the mono-crop. Meanwhile the produced corn grain was conformed to the national standards for foods or feeds concerning heavy metals and the treated sludge was biologically stabilized. The results from the pot experiment studying the interaction mechanisms showed that corn roots, separated from *S. alfredii* with a mesh barrier, decreased pH in the sludge solution, increased DOC and resulted in higher Zn/Cd concentration than that of *S. alfredii* mono-crop, which caused more Zn/Cd transported to the *S. alfredii* side and then enhanced the uptake of the heavy metals by the hyperaccumulator.

Key words: sewage sludge; heavy metals; phytotreatment; hyper-accumulator; co-crop

随着我国污水处理量的提高, 污泥产生量越来越大^[1]. 2003 年产干污泥量约为 510×10^9 kg, 且仍呈上升趋势^[2]. 污泥含有丰富的植物可利用的氮、磷、微量元素及有机质, 是良好的有机肥源, 因此农业利用是欧美发达国家处置城市污泥的主要方法^[3]. 但污泥也含有一定量的 Cu、Pb、Zn、Ni、Cr、Hg、Cd 等重金属, 以及病原菌、寄生虫卵和有机污染物等有害物质^[4]. 其中, Zn、Cu 等重金属污染问题一直是我国污泥农用最主要的障碍因素^[5,6].

部分植物可在高浓度重金属条件下正常生长发育, 并在体内累积大量的重金属, 称为超累积植物(hyperaccumulator)^[7], 近年来在修复重金属污染土壤上得到广泛重视^[8,9]. 遏蓝菜(*Thlaspi caerulescens*)是

国际上研究最多的 Zn/Cd 重金属超累积植物^[10,11], 另一种 Zn/Cd 的超累积植物为东南景天(*Sedum alfredii* Hance), 在我国发现且比遏蓝菜有更大的生长量^[12]. 但是, 除了具有较大生物量的 As 超累积植物外^[13], 单独用超累积植物处理污染土壤, 需要较长时间(通常 3 a 以上). 选育吸收重金属少或运输到食用部位少的低累积作物品种(抗性品种), 与超富集植物同时种植, 有可能在治理污染土壤的同时,

收稿日期: 2006-04-23; 修订日期: 2006-08-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(40571141); 广东省自然科学基金项目(021007)

作者简介: 黑亮(1976~), 女, 博士后, 主要研究方向为污水污泥生物处理技术、环境信息系统.

* 通讯联系人, E-mail: qitangwu@pub.guangzhou.gd.cn

收获符合卫生标准的饲料或其它产品, 成为一种不需要间断农业生产、较经济合理地处理利用方法^[14]。但是, 超累积植物应用于城市污泥处理的研究鲜见报道。

本研究试图将东南景天与低累积玉米直接套种在 Zn 污染的城市污泥上, 期望能够去除污泥中含量过高的 Zn 等重金属, 同时使污泥稳定化和获得合格的农产品, 并且初步探讨 2 种植物根系间的交互作用机理, 以期为建立同步去除重金属和实现污泥稳定化的合理高效的植物处理系统提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试污泥

供试污泥取自广州大坦沙污水处理厂, 为未经消化的脱水污泥, 其主要理化性质见表 1, 其中重金属 Zn 超过国家标准。

表 1 污泥的理化性质

参数	污泥 I ¹⁾	污泥 II	农用标准 ²⁾	
			pH < 6.5	pH > 6.5
pH(土:水 = 1:2.5)	7.03	7.00		
GI ³⁾ / %	62.9	65.0		
大肠杆菌/MPN·g ⁻¹	4.7 × 10 ⁴	5.2 × 10 ⁵		
有机质/g·kg ⁻¹	260.9	278.4		
含水量/g·kg ⁻¹	838.2	812.3		
全 N/g·kg ⁻¹	31.7	24.5		
全 P/g·kg ⁻¹	19.4	19.3		
全 K/g·kg ⁻¹	17.2	20.2		
全 Zn/mg·kg ⁻¹	1 391.2	1 410.2	500	1 000
全 Cu/mg·kg ⁻¹	233.7	280.3	250	500
全 Cd/mg·kg ⁻¹	6.5	3.7	5	20
醋酸浸提 Zn/mg·kg ⁻¹	310.1	314.3		

1)污泥 I 用于小区试验, 污泥 II 用于盆栽试验; 2) pH < 6.5 和 pH > 6.5 土壤的污泥农用国家标准(GB 4284-1984); 3) GI: Germination index, 即水堇种子发芽系数^[15]

1.2 供试植物

2 种生态型东南景天, 即超富集东南景天(hyper-accumulating *Sedum alfredii* Hance)和非超富集东南景天(non-accumulating *Sedum alfredii* Hance)。超富集生态型取自浙江衢州古老铅锌矿, 非超富集生态型取自杭州九溪的茶园地。将 2 种植物移至华南农业大学环境科学与工程系玻璃温室, 在装有营养

土的育苗板上扦插繁殖, 培育新苗, 备用。
低累积玉米(*Zea mays* var. Huidan-4)种子购买于云南农科院育种中心, 将选好的玉米种子在育苗板的基质土上进行繁育。待玉米苗长至约 10 cm, 挑选大小、高度均匀的玉米苗用于移栽。

1.3 试验设计

试验分 2 部分, 具体设计如下:

1.3.1 玉米和东南景天套种小区试验

试验在体积为 0.9 m × 0.9 m × 0.9 m 的渗滤池中进行。在 18 个污泥池中, 装入 30 cm 厚(约 150 kg)的新鲜污泥 I, 污泥下为当地自然土壤(广州赤红壤)。试验设空白(无植物)、超富集东南景天单种、非富集东南景天单种、玉米单种、玉米和超富集东南景天套种、玉米和非富集东南景天套种共 6 个处理, 每个处理设 3 次重复。将玉米和东南景天移栽, 植物长出后每池保留玉米 6 株、东南景天 50 株。种植过程不施肥料, 期间浇水和除草, 于 3 个月后收获, 玉米分不同器官采收, 东南景天收获地上部分。

1.3.2 玉米和东南景天套种盆栽试验

试验采用非常规盆栽, 在玻璃温室中进行种植。选用长 29 cm, 宽 21 cm, 高 18 cm 的有机塑料容器, 侧底部有孔, 连有胶管, 可漏水, 每盆底部装有约 1 cm 厚细沙, 上面有 1 层尼龙网, 其上铺 5 kg 新鲜污泥 II。

盆栽试验共设 6 个处理: ①不种植物对照; ②超富集东南景天单种; ③非富集东南景天单种; ④玉米单种; ⑤玉米 + 超富集东南景天(半透膜隔开: 无根系接触、土壤溶液和根系分泌物可交流); ⑥玉米 + 非富集东南景天(半透膜隔开)。

半透膜隔开处理, 即在容器中间垂直隔有孔径为 35 μm 的尼龙筛网, 使 2 种植物根系分开, 以便收集各自的根区土壤。所有盆栽用品使用前用稀硝酸溶液浸泡过夜, 去离子水冲洗干净。每个处理 4 个重复, 随机摆放在玻璃温室内。将玉米和东南景天移栽, 植物长出后每盆保留玉米 2 株、东南景天 8 株。种植过程不施任何肥料, 期间浇去离子水和除草, 于 2 个月后收获。

1.4 样品的分析测定

1.4.1 污泥的分析测定

一部分新鲜污泥样品用于测定水分含量(105℃烘干称重法)、水堇(*Lepidium sativum* L.)种子发芽指数^[15]和大肠菌群数量(国标方法 GB 7959-1987); 另一部分在室内风干, 去除根系, 并磨碎, 过 60 目尼龙筛。用四分法取出部分样品, 包装登记后保存备用。污泥的全钾、全锌、全铜、全镉的测定采用

HCl-HNO₃-HF-HClO₄ 消煮-原子吸收光谱测定法(GB/T 17138-1997).污泥有效(水溶性和交换态)锌的测定采用醋酸(pH = 5)浸提法^[16].污泥中 N、P 和有机质含量采用农业化学常规分析方法^[17].

1.4.2 植物样品的分析测定

收获时,将植物分成不同的器官,分别用自来水和去离子水清洗,吸水纸吸干表面水,测定鲜重.再将样品置于烘箱内,105℃杀青 30 min,然后 70℃烘干 48 h,记录干重.干样用玛瑙粉碎机粉碎,过 0.25 mm 的尼龙网筛,备测重金属.重金属含量测定采用灰化-原子吸收光谱法,具体参照国家标准方法(GB/T 5009.13-1996至 GB/T 5009.15-1996)^[18],并且用植物标准样控制分析质量.

1.4.3 污泥溶液的分析测定

将新鲜污泥样品与去离子水按 1:10(以干质量计)的比例浸提 1 h,后在 4℃低温条件下,12 000 r/min离心 15 min,过 0.45 μm 纤维树脂滤膜,收集其

滤液.测定浸提滤液中水溶态重金属 Zn、Cu、Cd 含量、pH(pH 计电位法)、氨基酸(游离氨基酸分析法),水溶性有机物(DOC,重铬酸钾氧化法)^[19].

1.5 数据处理

采用 SAS 8.1 软件进行相关数据的统计分析,设定 5%的显著性水平,运用单因素随机排列方差分析,并用 Duncan 氏法进行平均值间的多重比较.

2 结果与讨论

2.1 玉米和东南景天套种小区试验的效果

玉米和东南景天套种的小区试验结果显示,单种和套种对同种植物的产量无显著影响(表 2).而单种或者套种的超富集东南景天的产量都比非富集东南景天高,差异显著.这可能是由于污泥中 Zn 等重金属含量比较高(表 1),对非富集东南景天的生长造成一定的毒害,导致其长势不如耐重金属的超富集东南景天.

表 2 小区试验不同植物处理的植株产量和 Zn 吸收总量					
Table 2 Plant yield and total Zn uptake by plants for different plant treatments in the plot experiment					
处理	干物产量/g·盆 ⁻¹		Zn 吸收总量/mg·盆 ⁻¹		
	玉米	东南景天	玉米	东南景天	合计
玉米	397.1 a ¹⁾	—	46.4 a	—	46.4 c
超富集东南景天	—	130.9 a	—	853.1 a	853.1 b
非富集东南景天	—	69.7 b	—	30.1 b	30.1 c
玉米 + 超富集东南景天	438.0 a	127.5 a	50.6 a	1283.2 a	1333.8 a
玉米 + 非富集东南景天	394.3 a	86.1 b	46.0 a	36.3 b	82.3 c

1)根据 Duncan 氏检验,同列中不同字母表示不同种植处理具有显著差异(p < 0.05)

玉米植株不同器官的重金属含量分析结果显示(表 3),不同处理间玉米 Zn、Cu 含量差异不显著.然而,与非富集东南景天套种的玉米 Cd 含量除了根内浓度外,其它器官的 Cd 浓度都要显著大于玉米单种处理,尤其茎叶内 Cd 含量差异明显,即可促进 Cd 向地上部的运输,其机理有待进一步探讨.

本试验所用玉米种子为经过筛选的低累积 Zn、Cd 的品种^[20],即使直接种植在 Zn、Cd 污染的污泥上,其籽粒中 Zn、Cd 含量也较低.玉米单种处理的 Zn 浓度(50.5 mg·kg⁻¹)基本与粮食卫生限定标准(表 4, Zn: 50 mg·kg⁻¹)持平.玉米套种东南景天的 2 个处理均略低于粮食卫生标准(为 45.9、46.4 mg·kg⁻¹);3 个处理中玉米地上部分的 Cu 含量均明显小于 Cu 的粮食卫生限定标准(10 mg·kg⁻¹);3 个处理玉米籽粒的 Cd 含量分别为 0.11、0.18、0.27

mg/kg,与非富集东南景天套种的处理超过粮食卫生标准(0.2 mg·kg⁻¹),但均明显低于饲料卫生限定标准(Cd:0.5 mg·kg⁻¹).因此,与超富集东南景天套种的玉米其籽粒中 Zn、Cd、Cu 含量均可符合粮食卫生标准,起码可用作饲料.而且玉米籽粒也可用作提炼生物柴油^[21],其中的重金属可不进入食物链.

与玉米套种的超富集东南景天的 Zn、Cd 含量比其单种时含量高,差异显著(表 5)。其中,Zn 含量达 9 910 mg·kg⁻¹,是单种的 1.5 倍,这有利于收获的超富集东南景天后续处理,回收植株内重金属.而 Cu 的含量,非富集东南景天高于超富集东南景天,套种的非富集东南景天比单种有所增加,但不显著.

植物修复的效率主要取决植物地上部分的重金属含量、生物量以及生长速率^[9].与玉米套种的超富集东南景天因其 Zn 浓度较高,导致其吸收 Zn 的总

表 3 不同种植处理玉米植株重金属的含量¹⁾

Table 3 Metal contents in corn plant for different plant treatments in the plot experiment				
重金属含量	器官	玉米	玉米 + 超富集东南景天	玉米 + 非富集东南景天
Zn/mg•kg ⁻¹	籽粒	50.5 ± 6.3 a	45.9 ± 0.4 a	46.4 ± 1.5 a
	根	100.1 ± 0.9 a	91.8 ± 7.5 a	118.1 ± 8.6 a
	茎	401.0 ± 12.4 a	378.4 ± 21.4 a	394.1 ± 17.7 a
	叶	72.2 ± 11.8 a	78.5 ± 0.6 a	63.9 ± 0.8 a
Cu/mg•kg ⁻¹	籽粒	3.0 ± 0.2 a	2.7 ± 0.2 a	2.9 ± 0.2 a
	根	13.1 ± 2.1 a	11.2 ± 1.3 a	19.0 ± 2.6 a
	茎	4.8 ± 0.3 a	5.4 ± 0.3 a	4.9 ± 0.5 a
	叶	5.9 ± 0.2 a	5.4 ± 0.1 a	6.1 ± 0.8 a
Cd/μg•kg ⁻¹	籽粒	111.6 ± 14.2 b	183.3 ± 15.8 ab	272.4 ± 41.0 a
	根	435.4 ± 9.6 a	490.7 ± 98.0 a	559.5 ± 64.9 a
	茎	418.3 ± 95.6 b	409.9 ± 33.0 b	830.7 ± 18.3 a
	叶	664.1 ± 53.1 c	848.9 ± 63.4 b	1 229.7 ± 127.5 a

1)数据为平均值 ± 标准误(n = 3). 根据 Duncan 氏检验, 同行中不同字母表示不同种植处理具有显著差异(p < 0.05)

表 4 粮食和饲料重金属卫生限定标准/mg•kg⁻¹

Table 4 Hygiene standards for heavy metals in cereal and feed/mg•kg ⁻¹			
项目	粮食标准值	标准代码	饲料标准值 标准代码
Zn	50	GB 13106-91	无
Cu	10, 20 (豆类)	GB 15199-94	无
Cd	0.2	GB 15201-94	0.5, 1.0(米糠) GB 13078-2001

表 5 不同种植处理东南景天中重金属的含量/mg•kg⁻¹

Table 5 Heavy metal contents in Sedum for different plant treatments in the plot experiment/mg•kg ⁻¹			
植物处理	Zn	Cu	Cd
超富集东南景天	6 538.3 ± 264.9 b ¹⁾	8.6 ± 0.6 b	8.6 ± 0.1 b
非富集东南景天	421.9 ± 38.8 c	12.7 ± 0.5 a	0.8 ± 0.03 c
套种超富集东南景天	9 910.3 ± 446.7 a	8.6 ± 0.7 b	15.4 ± 1.1 a
套种非富集东南景天	421.2 ± 0.9 c	13.1 ± 0.3 a	0.9 ± 0.01 c

1)数据为平均值 ± 标准误(n = 3). 根据 Duncan 氏检验, 同列中不同字母表示不同种植处理具有显著差异(p < 0.05)

表 6 植物处理前后污泥重金属、水分含量和生物特性的变化

Table 6 Changes of heavy metal, water contents and biological parameters after different plant treatments							
处理	Zn/mg•kg ⁻¹	Cu/mg•kg ⁻¹	Cd/mg•kg ⁻¹	含水量/g•kg ⁻¹	大肠杆菌/MPN•g ⁻¹	GI ²⁾ /%	pH
新鲜污泥	1 391.2 ± 20.1 a ¹⁾	233.7 ± 2.2 a	6.5 ± 0.2 a	838.2 a	4.7 × 10 ⁴ a	60.9 b	7.0 a
空白(无植物)	1 219.0 ± 46.3 b	199.2 ± 4.5 b	5.6 ± 0.1 a	635.6 c	2.7 × 10 ² c	75.2 a	5.5 cd
玉米	1 273.9 ± 25.4 b	203.4 ± 8.7 b	5.9 ± 0.2 a	598.7 d	8.6 × 10 ² c	88.5 a	5.4 d
超富集东南景天	1 259.4 ± 27.6 b	202.0 ± 3.6 b	5.7 ± 0.1 a	655.4 b	2.0 × 10 ³ b	89.0 a	6.1 b
非富集东南景天	1 256.0 ± 50.7 b	192.4 ± 3.2 b	6.2 ± 0.5 a	662.1 b	2.4 × 10 ³ b	83.5 a	5.9 bc
玉米 + 超富集东南景天	1 203.8 ± 30.7 b	197.3 ± 1.6 b	5.7 ± 0.1 a	574.9 e	1.8 × 10 ² c	77.4 a	5.6 cd
玉米 + 非富集东南景天	1 251.5 ± 34.9 b	206.9 ± 2.4 b	5.8 ± 0.2 a	608.0 d	2.8 × 10 ² c	79.1 a	5.4 d

1)数据为平均值 ± 标准误(n = 3). 根据 Duncan 氏检验, 同列中不同字母表示不同种植处理具有显著差异(p < 0.05); 2)GI: Germination index, 即水堇种子发芽系数^[15]

量相对较大(表 2). 超富集东南景天和玉米 2 种植物合计的 Zn 吸收量与其它处理相比具有显著差异, 显著高于单种处理的超富集东南景天, 表明这种套种处理方式更有利于降低污泥中的重金属.

植物处理前后污泥重金属含量测定结果显示(表 6), 经处理后的污泥 Zn、Cu 含量与新鲜污泥相比都有显著下降, 但 Cd 含量在处理前后无显著差异. 综合 Zn、Cu、Cd 这 3 个重金属指标, 玉米和超富集东南景天的套种降低污泥重金属污染的效果较好, 经过 2 ~ 3 次植物处理后 Zn 可低于 1 000 mg•kg⁻¹. 空白(无植物)小区内的污泥可能由于雨水的淋洗, Zn、Cu、Cd 含量也比新鲜污泥低.

处理后污泥的各项生物指标见表 6. 污泥经植物处理后, 大肠杆菌的数量均比新鲜污泥有显著下降, 超富集东南景天与玉米套种的处理最低, 为 1.8

$\times 10^2 \text{ MPN} \cdot \text{g}^{-1}$, 其次为空白(无植物)对照, 非富集东南景天与玉米套种的处理为 $2.8 \times 10^2 \text{ MPN} \cdot \text{g}^{-1}$, 且这 3 个处理均低于加拿大国家堆肥标准(CAN-CCME/BNQ 0413-200)建议的 $1\,000 \text{ MPN} \cdot \text{g}^{-1}$ 的要求. 经植物处理后, 水堇种子发芽系数均高于国际上的 50% 的可接受水平^[15], 这说明经处理后的污泥对水堇发芽和根系伸长的抑制作用大大减少, 其生物稳定性得到显著改善. 水分含量由新鲜污泥的 $838.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降至植物处理后的 $600 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右, 最低的是玉米和超富集东南景天套种处理, 为 $574.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,

表 7 盆栽试验不同种植处理植物中的重金属含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 7 Heavy metal contents in plants for different plant treatments in the pot experiment/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$					
重金属	处理	东南景天	玉米根	玉米茎	玉米叶
Zn	超富集东南景天	$4\,242.6 \pm 623.1 \text{ b}^{1)}$	—	—	—
	非富集东南景天	$192.8 \pm 27.7 \text{ c}$	—	—	—
	玉米	—	$112.0 \pm 3.0 \text{ a}$	$276.9 \pm 12.8 \text{ a}$	$60.6 \pm 2.1 \text{ a}$
	超富集东南景天 + 玉米	$6\,129.8 \pm 184.2 \text{ a}$	$143.3 \pm 9.7 \text{ a}$	$199.2 \pm 21.5 \text{ b}$	$50.3 \pm 1.6 \text{ b}$
	非富集东南景天 + 玉米	$368.4 \pm 41.0 \text{ c}$	$125.7 \pm 7.6 \text{ a}$	$237.3 \pm 29.6 \text{ ab}$	$60.8 \pm 3.1 \text{ a}$
Cu	超富集东南景天	$9.3 \pm 0.4 \text{ b}$	—	—	—
	非富集东南景天	$10.2 \pm 1.1 \text{ b}$	—	—	—
	玉米	—	$21.0 \pm 1.5 \text{ a}$	$7.1 \pm 0.7 \text{ a}$	$8.0 \pm 0.5 \text{ a}$
	超富集东南景天 + 玉米	$9.6 \pm 1.2 \text{ b}$	$23.3 \pm 2.1 \text{ a}$	$6.1 \pm 0.5 \text{ a}$	$8.1 \pm 0.6 \text{ a}$
	非富集东南景天 + 玉米	$13.3 \pm 0.7 \text{ a}$	$19.8 \pm 1.0 \text{ a}$	$5.7 \pm 0.6 \text{ a}$	$6.6 \pm 0.4 \text{ b}$
Cd	超富集东南景天	$15.2 \pm 0.62 \text{ b}$	—	—	—
	非富集东南景天	$0.63 \pm 0.04 \text{ c}$	—	—	—
	玉米	—	$0.49 \pm 0.06 \text{ b}$	$0.37 \pm 0.04 \text{ ab}$	$0.50 \pm 0.06 \text{ a}$
	超富集东南景天 + 玉米	$19.4 \pm 0.93 \text{ a}$	$0.64 \pm 0.05 \text{ ab}$	$0.27 \pm 0.05 \text{ b}$	$0.29 \pm 0.02 \text{ b}$
	非富集东南景天 + 玉米	$0.80 \pm 0.14 \text{ c}$	$0.79 \pm 0.06 \text{ a}$	$0.53 \pm 0.04 \text{ a}$	$0.40 \pm 0.06 \text{ ab}$

1) 数据为平均值 $\pm$ 标准误 ($n = 4$). 根据 Duncan 氏检验, 同列中不同字母表示不同种植处理具有显著差异 ($p < 0.05$)

重金属含量、pH 和 DOC(表 8), 以了解套种条件下污泥溶液所发生的化学变化. 未种植超富集东南景天的各处理中, 污泥水溶态 Zn 含量都比较高, 处理间没有显著差异; 而种植超富集东南景天的处理中, 污泥水溶态 Zn 含量显著较低, 这说明种植超富集东南景天具有一定的处理效果. 种植非富集东南景天的污泥中水溶态 Cu 含量较低. 超富集东南景天和玉米半透膜隔开的套种处理中, 超富集东南景天一侧的污泥水溶态 Cd、Zn 的含量较低, 而玉米一侧的污泥中水溶态 Zn、Cd 浓度保持较高, 造成浓度梯度, 可向超富集东南景天输送更多的水溶态 Zn/Cd, 从而增强超富集东南景天对重金属的吸收. 也由于向超富集东南景天输送了水溶态 Zn/Cd, 使得玉米一侧的浓度较玉米单种有所降低, 减少了玉米的总吸收

且各个处理之间的差异显著. 污泥的 pH 经过处理后均有降低趋势, 这可能与植物在生长期根系分泌的一些有机酸类物质有关. 上述结果表明, 经过处理后, 污泥重金属 Zn、Cu 的含量都有所降低, 且其农业利用所要求的生物稳定性基本达到.

2.2 玉米和东南景天的根系交互作用机理

从表 7 可以看出, 玉米和超富集东南景天半透膜隔开的套种处理, 玉米茎叶 Zn、Cd 含量在各处理中最低, 这与小区试验结果相似.

将种植植物后的污泥收集, 测定污泥的水溶态

量, 表现出 2 种植物的竞争性吸收作用.

酸度是影响污泥重金属可移动性和生物有效性的主要因子. 表 6 显示, 玉米对污泥具有明显的酸化作用, 玉米单独种植时污泥的 pH 最低. 盆栽再次显示相同的作用(表 8). 而 2 种东南景天单独种植对污泥均无显著的酸化作用, 再次表明超富集植物不是靠根际酸化作用来实现对重金属的超富集功能的^[20], 同时也说明东南景天可得益于玉米的酸化作用而吸收更多的重金属.

在影响环境中重金属形态和有效性的诸多因素中, 水溶性有机物(DOC)虽然浓度不高, 但活性强, 能通过络合作用与重金属牢固结合, 从而起到至关重要的作用^[22~25]. 由表 8 可知, 在东南景天单种的处理中, DOC 含量均较低. 超富集东南景天和玉米

表 8 盆栽试验不同种植处理污泥溶液的重金属含量、pH 和 DOC¹⁾

Table 8 Heavy metals concentrations, pH and DOC in sludge solution for different plant treatments in the pot experiment

处理	Zn/mg•kg ⁻¹	Cu/mg•kg ⁻¹	Cd/μg•kg ⁻¹	pH	DOC ²⁾ /mg•L ⁻¹
空白	1.83 ± 0.05 a	0.14 ± 0.02 a	3.48 ± 0.59 ab	5.94 ± 0.09 ab	160.5 ± 20.7 abc
超富集东南景天	1.51 ± 0.02 b	0.11 ± 0.03 a	3.10 ± 0.24 ab	6.15 ± 0.05 a	135.8 ± 15.3 bc
非富集东南景天	1.81 ± 0.08 a	0.10 ± 0.01 a	3.73 ± 0.18 ab	6.15 ± 0.07 a	140.7 ± 10.4 abc
玉米	1.86 ± 0.19 a	0.14 ± 0.02 a	4.38 ± 0.33 a	5.81 ± 0.08 b	177.8 ± 21.3 ab
超富集东南景天 + 玉米/超 ³⁾	1.49 ± 0.05 b	0.12 ± 0.01 a	2.73 ± 0.53 b	5.98 ± 0.08 ab	116.0 ± 21.5 c
超富集东南景天 + 玉米/玉	1.75 ± 0.12 ab	0.13 ± 0.03 a	3.85 ± 0.45 ab	5.93 ± 0.09 ab	200.0 ± 14.7 a
非富集东南景天 + 玉米/非	1.67 ± 0.12 ab	0.11 ± 0.01 a	3.20 ± 0.24 ab	5.97 ± 0.09 ab	167.9 ± 23.2 abc
非富集东南景天 + 玉米/玉	1.88 ± 0.11 a	0.13 ± 0.01 a	3.23 ± 0.36 ab	6.07 ± 0.06 ab	133.3 ± 20.4 bc

1)数据为平均值 ± 标准误(n = 4).根据 Duncan 氏检验,同列中不同字母表示不同种植处理具有显著差异(p < 0.05),相同字母为无显著差异;
2)溶液内氨基酸没有检出; 3)/超:表示超富集东南景天一侧;/玉:表示玉米一侧;/非:表示非富集东南景天一侧

半透膜隔开的套种处理,超富集东南景天一侧的污泥溶液 DOC 含量较低,而同一处理的玉米一侧,DOC 含量在各处理之中最高,单种玉米的 DOC 含量也较高,这可能和玉米的根系作用有关,是根系的分泌作用还是其它的作用机理,还待进一步研究.由于套种处理玉米一侧 pH 较低、DOC 含量较高的溶液化学特性可增加水溶态 Zn/Cd 浓度,从而促进更多的水溶态 Zn/Cd 向超富集东南景天一侧移动,有利于超富集东南景天吸收较多的重金属并富集在体内.

Whiting 等研究了锌超积累植物 *Thlaspi caerulescens* 和同属的非超积累植物 *Thlaspi arvense* 套种在添加 ZnO 或 ZnS 的土壤上的交互作用,与单种相比, *Thlaspi caerulescens* 的吸锌量显著增加,而与之互作的 *Thlaspi arvense* 吸锌量则明显降低,并将其原因推测为 *Thlaspi caerulescens* 有很强的吸锌能力,能优先吸收土壤中的锌,从而减少了 *Thlaspi arvense* 对锌的吸收^[26],并未查明更深层次的原因.王激清等通过温室土培盆栽试验研究了印度芥菜和油菜套种对各自吸收土壤中难溶态镉(CdCO₃)的影响,结果表明,与单种相比,套种对印度芥菜吸收镉的能力无显著影响,但却可以显著增加油菜植株体内的镉含量,即与 Whiting 等人的研究结果不同,也未探求其更深层次的原因^[27].本研究重现了 Whiting 等人研究结果,且初步查明了在套种条件下,玉米对促进超富集东南景天吸收更多重金属的原因是玉米根系降低溶液 pH 和提高 DOC 以及 Zn/Cd 浓度,对理解 2 种植物的相互作用机理具有一定的参考价值.然而,DOC 中主要起作用的成分以及溶液 pH 降低的作用因素,需要更深入地研究.

3 结论

- (1)超富集东南景天较适合与低累积经济作物如玉米套种,将二者直接种植在重金属污染的污泥上,产量未受明显影响,而且与单种超富集东南景天的相比,套种超富集东南景天提取重金属的效率明显提高,可缩短植物处理污泥所需的时间,同时可收获符合一定卫生标准的农产品,是 1 种创新的绿色组合模式.
- (2)在研究特种植物组合相互作用机理为目的的盆栽试验中,超富集东南景天和玉米半透膜隔开的套种处理,使得玉米茎叶内的重金属 Zn/Cd 含量降低,其原因在于超富集东南景天的竞争性吸收.
- (3)超富集东南景天和玉米半透膜隔开的套种处理中,超富集东南景天一侧的污泥水溶态 Zn/Cd 含量低,表明其对污泥重金属具有耗竭作用;而另外一侧的玉米根系使污泥溶液 pH 降低,DOC 含量高,水溶态 Zn/Cd 含量也高,可以向超富集东南景天输送更多的水溶态 Zn/Cd,从而明显增强后者吸收富集重金属的数量.

参考文献:

[1] 肖本益,刘俊新. 污水处理系统剩余污泥碱处理融胞效果研究[J]. 环境科学, 2006, 27(2): 319 ~ 323.

[2] 何培松,张继荣,陈玲,等. 污泥的特性研究与再利用前景分析[J]. 生态学杂志, 2004, 23(3): 131 ~ 133.

[3] Smith S R. Agricultural Recycling of Sewage Sludge and the Environment [M]. Guildford (UK): CAB International, 1996. 1 ~ 6.

[4] 张学洪,陈志强,吕炳南. 污泥农用的重金属安全性试验研究[J]. 中国给水排水, 2000, 16(12): 18 ~ 21.

[5] 莫测辉,吴启堂. 论城市污泥农用资源化与可持续发展[J]. 应用生态学报, 2000, 11(1): 157 ~ 160.

- [6] 周立祥,王艮梅. 污水污泥中重金属的细菌淋滤效果研究[J]. 环境科学学报, 2001, **21**: 504 ~ 506.
- [7] Brooks R R. Plants that Hyperaccumulate Heavy Metals[M]. Wallingford(UK): CAB International, 1998. 357.
- [8] Salt D E, Blaylock M, Nanda-Kumar P B A. Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants[J]. Biotechnology, 1995, **13**: 468 ~ 474.
- [9] Ebbs S D, Kochian L V. Phytoextraction of zinc by oat (*Avenasativa*), barley (*Hordeum vulgare*), and Indian mustard (*Brassica juncea*) [J]. Environ. Sci. Technol., 1998, **32**: 802 ~ 806.
- [10] Robinson B H, Lcblanc M, Petit D, *et al.* The potential of *Thlaspi caerulescens* for phytoremediation of contaminated soils[J]. Plant and Soil, 1998, **203**: 47 ~ 56.
- [11] Whiting S N, de Souza M P, Terry N, *et al.* Rhizosphere bacteria mobilize Zn for hyperaccumulation by *Thlaspi caerulescens*[J]. Sci. Technol., 2001, **35**: 3144 ~ 3150.
- [12] 杨肖娥, 龙新宪, 倪吾钟, 等. 东南景天——一种新的锌超积累植物[J]. 科学通报, 2002, **47**(13): 1003 ~ 1006.
- [13] 陈同斌, 韦朝阳. 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征[J]. 科学通报, 2001, **47**: 207 ~ 210.
- [14] 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, **24**(6): 1262 ~ 1263.
- [15] Zucconi F, Pera A, Forte M, *et al.* Evaluating toxicity of immature compost[J]. Biocycle, 1981, **22**: 54 ~ 57.
- [16] Ure A M, Quevauviller P H, Muntau H, *et al.* Speciation of heavy metals in soils and sediments: An account of the improvements and harmonization of extraction techniques undertaken under the auspices of the Commission of the European Communities [J]. Int . J . Environ. Anal. Chem., 1993, **51**: 135 ~ 151.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [18] 中国预防医学科学院标准处编. 食品卫生国家标准(4)[M]. 北京: 中国标准出版社, 1997. 232 ~ 247.
- [19] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. (第三版). 北京: 中国环境科学出版社, 1997. 354 ~ 356.
- [20] Moussa S, Wu Q T. Plants grown on sewage sludge in South China and its relevance to sludge stabilization and metal removal[J]. J. Environ. Sci., 2003, **15**(5): 622 ~ 627.
- [21] Altın R, Cetinkaya S, Yucesu H S. The potential of using vegetable oil fuels as fuel for diesel engines[J]. Energy Conversion and Management, 2001, **42**: 529 ~ 538.
- [22] McGrath S P, Zhao F J, Lombi E. Plant and rhizosphere processes involved in phytoremediation of metal-contaminated soils[J]. Plant and Soil, 2001, **232**: 207 ~ 214.
- [23] Businelli M, Altieri R, Giusquiani P L, *et al.* Complexation capacity of dissolved organic matter from pig slurry: a gel filtration and dialysis study[J]. Water Air & Soil Pollution, 1999, **113**: 385 ~ 394.
- [24] Hollis L, Muench L, Playle R. Influence of dissolved organic matter on copper binding, and calcium on cadmium binding by gills of rainbow trout [J]. Journal of Fish Biology, 1997, **50**(4): 703 ~ 720.
- [25] Breault R F, Colman J A, Aiken G R, *et al.* Copper speciation and binding by organic matter in copper- contaminated stream water[J]. Environ. Sci. Technol., 1996, **30**(12): 3477 ~ 3486.
- [26] 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]. Environ. Sci. Technol., 2001, **35**(15): 3237 ~ 3241.
- [27] 王激清, 茹淑华, 苏德纯. 印度芥菜和油菜互作对各自吸收土壤中难溶态镉的影响[J]. 环境科学学报, **24**(5): 890 ~ 894.