

大生物量植物治理重金属重度污染 废弃地可行性的研究

申时立^{1,2,3}, 黎华寿³, 夏北成^{2*}, 杨常亮¹

(1.云南大学工程技术研究院, 昆明 650091; 2.中山大学环境科学与工程学院, 广州 510275; 3.华南农业大学农业部生态农业重点开放实验室, 广州 510642)

摘要:研究在重金属 Cd、Cu、Pb 和 Zn 重度污染的矿山废弃地上种植天绿香和木薯, 探讨利用天绿香和木薯治理重金属污染废弃农田的可行性。实验结果表明, 通过种植天绿香和木薯均可实现对土壤中各重金属有效地提取。其中天绿香生物量可达 $10.07 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 对 4 种重金属的提取每年每公顷可分别达到 19 710 g Zn, 64.40 g Cd, 144.52 g Cu 和 1760 g Pb; 木薯生物量可达 $12.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 对 4 种重金属的提取每年每公顷可分别达到 11 095.45 g Zn, 30.58 g Cd, 712.07 g Cu 和 2 174.69 g Pb。天绿香和木薯既可对重金属进行提取, 同时还可作为能源植物实现对重金属污染废弃农田的复垦, 天绿香和木薯是原位修复重金属污染农田的可行性材料。

关键词:天绿香; 木薯; 重金属污染; 植物修复

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2013)03-0572-07 doi:10.11654/jaes.2013.03.024

A Field Experiment on Phytoextraction of Heavy Metals from Highly Contaminated Soil Using Big Biomass Plants of *Sauropus androgynus* and *Manihot* sp.

SHEN Shi-li^{1,2,3}, LI Hua-shou³, XIA Bei-cheng^{2*}, YANG Chang-liang¹

(1. Research Institute of Engineering and Technology, Yunnan University, Kunming 650091, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China; 3. Key Laboratory of Agricultural Environment of the Ministry of Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Heavy metals soil contamination is an important issue both in scientific research and practice. Farmland contamination of heavy metals has been much concerned due to potential human health risk. Hyperaccumulators are generally considered as phytoextraction plants because of their exceptionally large concentrations of metals in biomass without phytotoxicity symptoms. However, application of hyperaccumulator is limited by low biomass and environmental adaptability. In order to identify the potential of *S. androgynus* and cassava to remediate heavy metals contaminated land in Dabaoshan region. An experiment was set for *S. androgynus* and *Manihot* sp. (cassava) at a highly contaminated land by heavy metals (Cd, Cu, Pb and Zn) in this area. To determine the potential of *S. androgynus* and cassava to extract heavy metals, while and the potential economic income of cassava cultivation will be helpful to assess the value of reclamation seriously heavy metals contaminated soils. Results showed that *S. androgynus* and cassava could grow well and produce high biomass at the site. The plants extracted much heavy metal from soil due to their great biomass and relative high bioconcentration of metals in plants tissues. Comparing with hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*, *S. androgynus* and cassava were lower to extract Cd, but were much higher to extract Cu and Zn. In other hand, cassava was simultaneously an economic bioenergy plant easy to cultivate. The two plants could be used to reclaim heavy metals contaminated land in situ.

Keywords: *Sauropus androgynus*; *Manihot* sp.; heavy metals contamination; phytoremediation

收稿日期: 2013-01-10

基金项目: 广东省基金团队项目(06202438); 云南大学校基金项目(2012CG011)

作者简介: 申时立(1983—), 男, 云南昭通人, 助理研究员, 主要从事环境污染评价与修复方面的研究工作。E-mail: shenshili@126.com

* 通信作者: 夏北成 E-mail: xiabch@mail.sysu.edu.cn

重金属污染农田的治理是目前研究的热点和难点问题,特别是重金属重度污染废弃地的研究治理需要继续进行大量的可行性论证。近年来由于矿山开采活动导致的农田废弃已经对周边人群造成影响,以大宝山为例,大宝山矿山开采活动所带来的重金属是造成横石河流域土壤重金属污染的主要原因。大宝山矿区作为一个多金属矿区大规模的开采大约开始于20世纪70年代^[1],矿山开采活动是造成土壤重金属污染的重要因子,特别是采矿所产生的酸性矿山废水造成的流域重金属污染^[2]。大宝山地区的食管和肝癌疾病的高发,尤其是上坝村,上坝村因此被称之为癌症村^[3]。当地居民的健康威胁主要来自于受重金属(主要是Cd、Cu、Pb和Zn)污染的食物,治理被重金属污染的农田刻不容缓。确认和减轻重金属污染对生态及周边人体健康所带来的风险是环境方面科研人员一项十分重要的工作^[4]。因为,农田重金属污染会对食品安全和饲料质量造成严重的影响^[2]。事实由于重金属的污染,大宝山矿区部分农田丧失农用价值,部分地区与重金属相关的病症高发。

植物修复用于治理重金属污染的土壤具有很好的发展前景,通过利用植物将重金属从土壤中转移到植物的地上部,从而实现土壤中重金属的转移。植物修复中的植物提取技术是一种能够实现对重金属污染治理的环境友好型治理措施^[5]。植物提取研究中通常利用超富集植物来研究对重金属的治理,因为超富集植物能够对重金属实现很高浓度的富集且不会出现毒害症状^[6-7]。虽然研究已经发现了400多种超富集植物,但多数超富集植物在大田环境下其提取重金属的效果不理想^[8]。而且大部分的超富集植物由于其农业生产要求太苛刻而难以野外种植,同时生物产量亦比较小,从而限制了超富集植物大规模的农田实践应用^[9-10],因为成功的植物提取与重金属耐性、富集浓度、生物量及农业生产技术要素等特性相关^[11]。但大部分的超富集植物多是发现于生长环境比较苛刻的地方,如矿区和热带^[12],综合分析目前超富集植物存在的限制因子,利用具有生物产量高、生长速度快、重金属耐受能力强特性的农作物作为植物提取材料是可行的^[13],目前大生物量的植物已经被用于治理重金属中度污染的土壤^[9],一些大生物量的树种不仅被成功用于恢复重金属污染破坏的土壤^[13],在治理重金属污染的同时这些材料还可用作生物燃料,带来了额外的收益。

天绿香是一种多年生灌木,主要生长在热带和亚

热带地区,对环境具有良好的适应能力和较高的生物量。有研究发现天绿香有富集Cd的特性^[14],考虑到大宝山重金属污染农田的现实情况,本文选用天绿香作为重金属提取材料。木薯是世界上第六大粮食作物,在非洲、拉美和亚洲部分地区是重要的粮食,作为生产生物乙醇的原材料木薯比其他作物有优势,如木薯在土壤贫瘠区较其他农作物如小麦、水稻、玉米及甘蔗更适宜于生长^[15]。

选用天绿香和木薯治理大宝山重金属(Cd、Cu、Pb和Zn)污染废弃地,主要是考虑:(1)天绿香对Cd有一定的富集潜力,生物量可观;(2)木薯良好的环境适应能力和可观的生物量,同时木薯用作生产生物燃料的原材料避免了重金属通过食物链危害人体健康。本文的目的在于探讨天绿香作为植物提取材料的可行性,探讨利用木薯复垦重金属污染废弃农田的可行性,从而为治理和复垦重金属污染的废弃农田提供选材参考及理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地描述

试验地位于广东省韶关翁源县新江镇上坝村(24°28'43.02"N, 113°47'49.64"E),实验用地为废弃农田,农田的灌溉用水来自横石河发源于多金属的大宝山矿区,大宝山矿区属于多雨、潮湿的亚热带性气候,作为流域的灌溉水源,横石河流域被采矿的酸性矿山废水(AMD)严重污染,酸性矿山废水(AMD)是造成重金属污染的主要污染源^[16-17]。横石河水是流域农田灌溉用水的主要来源,由于受到酸性矿山废水的污染,河水中富含Cu、Cd、Pb、Zn等重金属元素污染十分严重。健康风险评估结果表明,重金属污染给当地的人群健康造成威胁,其中Cd的影响尤为明显^[18],横石河流域土壤中的Cd、Pb、Zn背景值高于国家土壤质量标准(GB 15618—1995)(EQSS),其中Cd的污染最高,超过标准6倍^[19],重金属污染对当地的人群身体健康造成了严重威胁。污染的河水灌溉对流域农田造成污染,对周边生活的人群造成危害,有的区域土壤中重金属的浓度严重超标,导致农田被废弃,使其丧失了农用的基本功能。实验地选在上坝村,是中山大学环境科学与工程学院重金属污染治理研究基地,在废弃地上进行天绿香和木薯的种植。

1.2 试验设置

在约50 m²试验块上种植木薯和天绿香,将试验地划分10个小区,每个小区按照2 m×2 m大小划

分。天绿香和木薯各种植 4 个小区(重复),余下两个作为空白(不种植植物)。天绿香的种植密度按照 $9 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$ 插枝,木薯的种植密度亦按照 $9 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$ 插枝。天绿香和木薯的扦插枝条均取自华南农业大学,枝条长约 20 cm,直径约 0.5 cm。植物于 2010 年 3 月 31 日种植,2010 年 12 月 27 日收获。对植物进行常规的病虫害管理。收获的天绿香样品分为根、茎、叶、叶柄、花及子实分析,木薯分为薯块、糙皮、茎及叶片分析。

1.3 土壤检测

试验中的土壤样品采集应用随机采样法。在天绿香、木薯种植以及未种植植物的小区上分别随机采样(梅花形布点法采样),将土壤样品混合后把其中杂质拣出。一部分土壤风干用于检测 pH 和有效态重金属含量;一部分在 $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘干,研磨过 100 目的尼龙筛用于检测重金属含量。pH 的检测使用 Model 6230(JENCO, MA, China)型号 pH 计检测,使用鲁如坤的土壤农化分析方法中的重金属检测方法提取土壤中重金属^[20],提取的样品使用 ICP-OES(Perkin-Elmer Instruments, Optima5300DV)仪器检测重金属。土壤标准物质(GBW08303)买自国家标准物质研究中心(北京)。植物可提取态重金属含量使用 HCl($0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)和 CaCl_2 溶剂提取^[20]。

1.4 植物样品分析

将收获的植物样品用自来水和蒸馏水分别依次洗净,先在 100°C 的烘箱中杀青 1 h,再在 70°C 的烘箱中烘干,将样品研磨过筛,按照类别分析其中的重金属含量。植物标准物质(GB10014)购自国家标准物质研究中心(北京)。所有样品均使用 ICP-OES(Perkin-Elmer Instruments, Optima5300DV)仪器检测重金属。

1.5 生物富集系数计算

富集系数是衡量植物提取潜力的重要指标^[8,21-22],用来衡量天绿香和木薯对污染土壤中各重金属生物富集系数参考以下公式计算:

$$\text{BCF} = C_{\text{ht}} / C_{\text{soil}} \quad (1)$$

C_{ht} 指收获组织中重金属富集浓度, C_{soil} 指土壤中重金属浓度。

1.6 数据分析

实验数据使用 SPSS 17.0 软件分析,所有数据均用平均值加标准偏差的形式表示,对数据进行单因素方差分析($P < 0.05$)。

2 结果分析

2.1 试验地土壤重金属污染现状(种植前)

土壤受到酸性矿山废水影响的污染, pH 为 3.32。HCl 和 CaCl_2 溶剂提取的有效态重金属如表 1 所示。在种植植物后,土壤 pH 在种植天绿香后有所提高,达 4.15,种植木薯对土壤 pH(3.71)的影响不及种植天绿香的影响明显。

与国内外土壤重金属含量标准相比较,试验地重金属含量都很高,属于严重污染,特别是 Pb 和 Cd 的污染最为严重^[23]。

表 1 实验区土壤重金属的含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 1 Soil metal concentrations at the site($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Metal	HCl-extractable	CaCl_2 -extractable	Total
Cd	0.23 ± 0.02	0.20 ± 0.00	6.32 ± 0.58
Cu	28.21 ± 1.51	1.89 ± 0.08	660.16 ± 45.81
Pb	145.54 ± 5.02	4.53 ± 0.12	$2\,567.58 \pm 153.10$
Zn	19.68 ± 3.85	10.54 ± 0.08	548.90 ± 32.34

2.2 生物量和植物组织中重金属的富集浓度

天绿香和木薯的生物量如图 1 所示。天绿香的总生物量可达 $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (干重),地上部的生物处理占总量的 78.48%;木薯的生物量达 $12.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (干重),块茎产量达 $8361 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。尽管在重金属的严重污染下,木薯和天绿香的生物量都未受到显著影响,亦未出现重金属毒害的症状。天绿香和木薯的高产量意味着其具有很好的耐受重金属污染的能力。但与实验室理想条件木薯的产量相比较,本试验中木薯的产量较低。据报道国内木薯的最高产量可达 $19.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[24],而国外有研究认为,在理想的实验室环境下木薯产量可达 $75 \sim 90 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[25-26]。但即便如此,试验中木薯的产量亦比大田实践中的超富集植物产量高,而且还能为废弃农田创收,起到复垦废弃农田的作用。

各种重金属在植物组织中的富集浓度如表 2 所示。虽然木薯生物量比天绿香高,但是除了对 Cu 的富集浓度比天绿香高外,木薯在其他 3 种重金属的富集浓度上均比天绿香低。

相对较高的重金属富集浓度和生物量,同时对重金属胁迫未表现出重金属毒害的症状,表明天绿香和木薯是重金属(Cd、Cu、Pb 和 Zn)的耐性植物,可以用于治理和复垦重金属(Cd、Cu、Pb 和 Zn)污染而导致废弃的农田。

2.3 生物富集系数

天绿香和木薯对各重金属的生物富集系数如表 3 所示。天绿香各组织的 Cu 和 Pb 富集系数均比较

小,对 Zn 的最高富集系数出现天绿香叶柄中,分别是 7.85 和 2.64。天绿香各组织对 Zn 的富集均较其他 3 种重金属高,显然在大田试验中天绿香对 Zn 具有很好的提取能力。天绿香对 Cd 的富集效果亦比较理想(考虑到土壤中可提取态 Cd 含量仅为 $0.23\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,表 1)。木薯对各重金属的富集系数均较小,但其较高的生物量亦能够对土壤中的重金属进行有效提取,事实上本文主要是考虑将其作为复垦重金属污染废弃地的植物修复材料加以探讨。

考虑到相对较高的重金属富集浓度和生物量,天绿香和木薯均可以作为治理重金属污染农田的植物提取材料。从生物富集系数可以分析天绿香对 Zn 和 Cd 的提取效果最好,同时天绿香对 Zn 和 Cd 的提取效果亦优于木薯。

2.4 天绿香和木薯对各重金属的提取

与超富集植物东南景天相比较,在大田环境下天绿香和木薯的 BCF 均较低,但提取的重金属总量较高,超富集植物东南景天在大田环境下的生物量约在 $0.85\sim1.8\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (干重),提取的 Cd、Cu 和 Pb 分别为

$184、29、7800\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2[24]}$ 。如表 4 所示,天绿香和木薯对土壤中的各重金属均进行了有效地提取。天绿香和木薯对 Cd 的提取量比东南景天的要低,但天绿香和木

表 3 天绿香和木薯对各重金属的富集系数
Table 3 Bioconcentration factors for different tissues of *S. androgynus* and cassava

Plant	Tissues	Cd	Cu	Pb	Zn
<i>S. androgynus</i>	Roots	0.44	0.12	0.15	3.22
	Stems	0.75	0.005	0.059	3.31
	Leaves	1.59	0.016	0.031	3.51
	Petioles	2.64	0.013	0.168	7.85
	Flower	1.62	0.026	0.010	1.06
	Seeds	0.66	0.011	0.001	0.23
	Weighted average for total plant	0.89	0.032	0.081	3.54
Cassava (<i>Manihot</i> sp.)	Starch(tubers)	0.48	0.093	0.048	1.33
	Cassava utilis	0.021	0.011	0.010	0.045
	Roots	0.015	0.010	0.013	0.045
	Stems	0.22	0.084	0.13	2.49
	Leaves	0.15	0.015	0.009	0.94
	Weighted average for total plant	0.38	0.085	0.067	1.60

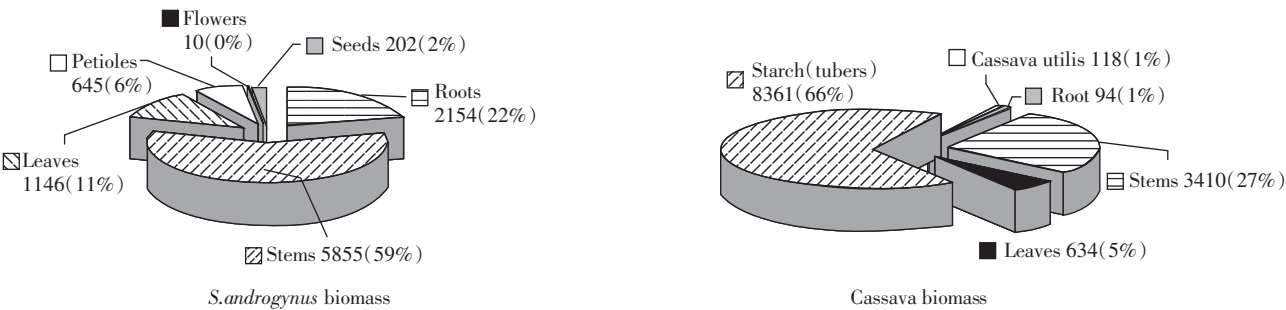


图 1 天绿香和木薯生物量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)
Figure 1 The biomass of *S. androgynus* and cassava($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

表 2 天绿香和木薯组织中重金属的富集浓度($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Table 2 Heavy metals contents in tissues of *S. androgynus* and cassava($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Plant	Tissues	Cd	Cu	Pb	Zn
<i>S. androgynus</i>	Roots	2.94 ± 0.15	83.87 ± 8.37	396.01 ± 23.15	$1\ 846.32\pm206.56$
	Stems	4.74 ± 0.31	3.15 ± 0.24	147.58 ± 14.67	$1\ 817.42\pm38.86$
	Leaves	10.07 ± 0.62	10.55 ± 1.03	76.75 ± 5.24	$1\ 925.33\pm101.76$
	Petioles	16.68 ± 1.16	8.90 ± 3.01	421.17 ± 25.91	$4\ 309.71\pm55.25$
	Flower	10.22 ± 0.34	17.43 ± 1.38	25.13 ± 6.38	580.18 ± 25.60
	Seeds	4.20 ± 0.35	7.14 ± 0.48	3.70 ± 0.74	123.66 ± 14.10
	Weighted average for total plant	0.89	0.032	0.081	3.54
Cassava(<i>Manihot</i> sp.)	Starch(tubers)	3.01 ± 0.03	61.62 ± 5.12	124.16 ± 8.45	730.58 ± 63.09
	Cassava utilis	0.13 ± 0.01	7.00 ± 0.83	24.60 ± 2.04	24.45 ± 2.42
	Roots	0.09 ± 0.01	6.36 ± 0.57	32.99 ± 2.87	24.71 ± 1.53
	Stems	1.40 ± 0.01	55.49 ± 4.59	327.19 ± 23.19	$1\ 364.50\pm34.46$
	Leaves	0.97 ± 0.02	9.78 ± 0.83	23.20 ± 1.98	517.63 ± 76.22

表 4 天绿香和木薯提取的重金属量($\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)Table 4 The amount of heavy metals extracted by *S. androgynus* and cassava($\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)

Plant	Tissues	Cd	Cu	Pb	Zn
<i>S. androgynus</i>	Roots	6.33	180.67	853.05	3 977.18
	Stems	27.75	18.44	864.14	10 641.72
	Leaves	11.55	12.10	88.00	2 207.58
	Petioles	10.77	5.75	271.92	2 782.52
	Flower	0.10	0.17	0.25	5.80
	Seeds	0.85	1.44	0.75	25.03
	Total plant	57.35	218.57	2 078.11	19 639.83
Cassava (<i>Manihot</i> sp.)	Starch(tubers)	25.17	515.20	1 038.10	6 108.38
	Cassava utilis	0.015	0.83	2.91	2.89
	Roots	0.008 5	0.60	3.11	2.33
	Stems	4.77	189.24	1 115.85	4 653.49
	Leaves	0.62	6.20	14.72	328.36
	Total plant	30.58	712.07	2 174.69	11 095.45

薯提取 Zn、Cu 的量均较东南景天高,同时天绿香和木薯还能对 Pb 进行有效提取。

3 结果与讨论

3.1 天绿香和木薯对土壤重金属提取潜力

植物提取重金属与其形态、土壤 pH 及其他因子有关^[2],植物提取的效率则和植物的富集能力及农业管理可操作性相关^[8]。生物富集系数是提取重金属植物材料的一个关键参考因子^[27],但是生物量会成为其有效性提取重金属的瓶颈,因此在选择植物作为重金属的提取材料时应当将其生物量作为一个重要的参考因子。实验结果表明,大田试验条件下天绿香和木薯的生物量比超积累植物东南景天的要高,相对于大田试验中东南景天 $0.85\sim 1.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的生物量^[28],天绿香 $10\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的产量约是东南景天的 5.4~11.8 倍;木薯产量达 $12.6\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,约是东南景天的 6.8~14.8 倍。

超富集植物有很高的 BCF 值,然而其生物量相对较低,通常情况下大部分农作物的生物量均比超积累植物高^[29],在一定条件下大生物量的植物对重金属的提取效果可能还会优于超积累植物。天绿香 Cd 和 Zn 的 BCF 值较 Cu 和 Pb 高,其地上部主要组织的 Cd 和 Zn 的 BCF 值均高于 1,而木薯的 BCF 值在各重金属上均小于 0.1,表明天绿香对各重金属的富集效果较木薯好。

有研究发现,在大田条件下种植的东南景天每年可提取的 Cd $184\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$,Zn $7800\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 及 Cu $29\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[28],在本试验中,单季天绿香所提取的 Zn、Cu 分别为 $19\,713.66\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $144.52\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$,单季木薯提

取的 Zn、Cu 分别为 $11\,095\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $712.07\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$,显著高于东南景天对 Zn 和 Cu 的提取。结果表明,天绿香和木薯均能对土壤中的重金属进行有效提取。虽然天绿香所提取的 Cd 量为 $57.35\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$,低于东南景天的 Cd $184\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$,木薯所提取的 Cd 量仅有 $30.58\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$,亦比东南景天低,但这主要是由于土壤中有效态 Cd 的含量比较低所致,经检测实验地土壤中有效态 Cd 的含量仅为 $0.23\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表 1),而有效态 Cd 的含量是控制植物吸收 Cd 的关键^[30]。

3.2 木薯作为能源植物复垦重金属污染废弃地的可行性

使用能源植物治理重金属污染的农田是一种既可有效去除土壤中重金属,同时对环境危害又相对较小的有效措施^[2]。利用其生产的材料作为生产生物燃料,从而避免了重金属通过食物链对人体的危害。而且在全球石化能源危机的背景下,生物燃料如今已被确认为最重要的替代性运输燃料之一^[31],木薯因其生物特性已经被作为潜在的能源植物加以研究^[32]。在国内木薯作为能源植物已经受到青睐,国家可再生能源中长期规划中将木薯立为能源植物材料的有益补充^[24],因此利用木薯复垦重金属污染的废弃地具有很大的研究价值和广阔的发展前景。

据文献报道称,木薯在热带地区的产量在 $5\sim 20\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间^[33],在理想的实验室条件下木薯产量最高可达 $90\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (FW)^[26]。国内的木薯产量水平较低,一般 $19.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[24],亦有报道木薯的产量可达 $19.5\sim 45\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,而通过合理密植最高可达 $90\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[25]。通过大田试验发现,在重金属严重污染的土壤上鲜薯的产量

约达 $23 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 和国内的一般产量相比较未受重金属污染的影响, 这对于已经废弃的农田而言无疑很有意义。试验中木薯总生物量可达 $12.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (干重), 干薯块产量达 $8361 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 按照 2007 年国内收购鲜薯的价格 ($0.48 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$) 估算^[24], 在重金属污染废弃地上生产的木薯可获约为 $736 \text{ 元} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$ 的收益。使用厌氧消化技术生产生物燃料的植物中 Cd、Pb、Zn 的浓度分别为 $6, 300, 900 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 远比食品安全标准要求低^[2], 本研究结果表明, 木薯对各重金属富集均低于文献中所提的标准, 因此生产的木薯产品可用于生物燃料(生物乙醇)的生产。按照目前鲜木薯生产乙醇的工艺, 1 t 木薯生产的乙醇可达 160 L 的标准计算^[24, 32], 本试验所生产木薯的生物乙醇产量理论上可达 $3680 \text{ L} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

综上可知利用木薯复垦重金属污染废弃的农田是可行的, 因木薯茎叶及生产燃料乙醇产生的残渣可以作为燃料原料, 对燃烧后的灰烬集中处理, 木薯吸收的重金属不会造成二次污染。相对于废弃农田而言木薯的种植可获得相对可观的收益, 而且在种植的同时还可以实现对污染物的提取。Meers 等认为使用能源植物即可实现对重金属污染地的治理, 同时还能逐步减少土壤中的污染物^[2], 因此通过种植木薯复垦重金属污染废弃地具有可行性。

4 结论

实验结果表明, 天绿香和木薯不仅能够对重金属重度污染的土壤上生长并获得可观的生物量, 同时还能对其中的重金属进行有效地提取。除对 Cu 的提取比木薯的低外, 天绿香对其他 3 种重金属的提取效果均优于木薯, 可将天绿香作为治理重金属严重污染农田的植物提取材料。在污染农田上的木薯可以用作生产生物燃料的原材料, 从而避免了重金属通过食物链所带来的危害, 所以可将木薯用于复垦重金属污染所导致废弃农田, 恢复重金属污染废弃农田的基本功能。

参考文献:

- [1] Chen A, Lin C, Lu W, et al. Well water contaminated by acidic mine water from the Dabaoshan Mine, South China: Chemistry and toxicity[J]. *Chemosphere*, 2007, 70(2): 248–255.
- [2] Meers E, Van Slycken S, Adriaenssens K, et al. The use of bio-energy crops (*Zea mays*) for ‘phytoattenuation’ of heavy metals on moderately contaminated soils: A field experiment[J]. *Chemosphere*, 2010, 78(1): 35–41.
- [3] Liu H, Probst A, Liao B. Metal contamination of soils and crops affected by the Chenzhou lead/zinc mine spill (Hunan, China)[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 339(1–3): 153–166.
- [4] Zhou J-h, Yang Q-w, Lan C-y, et al. Heavy metal uptake and extraction potential of two *Beckhamia nivea* (L.) Gaud. (Ramie) Varieties associated with chemical reagents[J]. *Water Air Soil Pollut*, 2010, 211(1–4): 359–366.
- [5] Gerlinde Wieshammer, Reinhard Unterbrunner, Teresa Bañares García, et al. Phytoextraction of Cd and Zn from agricultural soils by *Salix* spp. and intercropping of *Salix caprea* and *Arabidopsis halleri*[J]. *Plant and Soil*, 2007, 298: 255–264.
- [6] Baker A, McGrath S P, Sidoli C, et al. The possibility of in situ heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metal-accumulating plants[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 1994, 11(1–4): 41–49.
- [7] 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(1): 47–56.
- [8] Zhuang P, Yang Q W, Wang H B, et al. Phytoextraction of heavy metals by eight plant species in the field[J]. *Water Air Soil Pollut*, 2007, 184(1–4): 235–242.
- [9] Hammer D, Kayser A, Keller C. Phytoextraction of Cd and Zn with *salix viminalis* in field trials[J]. *Soil Use and Management*, 2003, 19(3): 187–192.
- [10] Cherian S, Oliveira M M. Transgenic plants in phytoremediation: recent advances and new possibilities[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(24): 9377–9390.
- [11] Manousaki E, Kalogerakis N. Phytoextraction of Pb and Cd by the mediterranean saltbush (*Atriplex halimus* L.): metal uptake in relation to salinity[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2009, 16(7): 844–854.
- [12] Garbisu C, Alkorta I. Phytoextraction: a cost-effective plant-based technology for the removal of metals from the environment [J]. *Biore-source Technology*, 2001, 77: 229–236.
- [13] Dickinson N M. Strategies for sustainable woodland on contaminated soils[J]. *Chemosphere*, 2000, 41(1–2): 259–263.
- [14] Anfu Y, L. Xiangjun, D. Renchang, et al. The research of cadmium accumulation and mechanism in *Sauropus androgynus* (L.) Merr.[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(10): 280–285.
- [15] Pimentel D. Ethanol fuels: energy Balance, economics, and environmental impacts are negative[J]. *Natural Resources Research*, 2003, 12(2): 127–134.
- [16] Morin K, N. Hutt, Environmental geochemistry of minesite drainage: practical theory and case studies[M]. MDAG Pub, 1997.
- [17] Alpers C N, D. W. Blowes, environmental geochemistry of sulfide oxidation[M]. American Chemical Society Columbus, OH, 1994.
- [18] Zhao H, Xia B, Fan C, et al. Human health risk from soil heavy metal contamination under different land uses near Dabaoshan Mine, Southern China[J]. *Sci Total Environ*, 2012(417–418): 45–54.
- [19] Zhou X, Xia B. Defining and modeling the soil geochemical background of heavy metals from the Hengshi River watershed (southern China): integrating EDA, stochastic simulation and magnetic param-

- ters[J]. *J Hazard Mater*, 2010, 180(1-3):542-551.
- [20] Lu r k, ed. Agricultural soil analysis. Beijing: China Agricultural Science Press, 1999: 474-492.
- [21] Mertens J, Luyssaert S, Verheyen K. Use and abuse of trace metal concentrations in plant tissue for biomonitoring and phytoextraction[J]. *Environmental Pollution*, 2005, 138(1):1-4.
- [22] Zhao F J, Lombi E, McGrath S P. Assessing the potential for zinc and cadmium phytoremediation with the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*[J]. *Plant and Soil*, 2003, 249:37-43.
- [23] Meng F, Shi Y, Wu W. Development of soil environmental quality standards of heavy metal for non-polluted agricultural products in China[J]. *Agro-envirom Protection(in Chinese)*, 2000, 19(6):356-359.
- [24] Tian Y, Zhao L, Meng H, et al. Estimation of un-used land potential for biofuels development in(the) People's Republic of China[J]. *Applied Energy*, 2009, 86:S77-S85.
- [25] Dai D, Hu Z, Pu G, et al. Energy efficiency and potentials of cassava fuel ethanol in Guangxi region of China[J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(13-14):1686-1699.
- [26] EL-Sharkawy M A. Cassava biology and physiology[J]. *Plant Molecular Biology*, 2003, 53:621-641.
- [27] McGrath S P, Zhao F J. Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2003, 14(3):277-282.
- [28] Hammer D, Keller C. Phytoextraction of Cd and Zn with *Thlaspi caerulescens* in field trials[J]. *Soil Use and Management*, 2003, 19(2):144-149.
- [29] Ow D W. Heavy metal tolerance genes;prospective tools for bioremediation[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 1996, 18(1-4):135-149.
- [30] Delarosa G, Peraltavidea J, Montes M, et al. Cadmium uptake and translocation in tumbleweed(*Salsola kali*), a potential Cd-hyperaccumulator desert plant species;ICP/OES and XAS studies [J]. *Chemosphere*, 2004, 55(9):1159-1168.
- [31] Silalertruksa T, Gheewala S H. Security of feedstocks supply for future bio-ethanol production in Thailand[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(11):7476-7486.
- [32] Chumnong Sorapipatanaa, S. Y. Life cycle cost of ethanol production from cassava in Thailand[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15:1343-1349.
- [33] Fermont A M, P. J. A. v. A. , P. Tittonell, , M. T. van Wijk, K. E. Giller Closing the cassava yield gap;An analysis from smallholder farms in East Africa[J]. *Field Crop Res*, 2009, 112:24-36.