

DOI: 10.5846/stxb201405040883

杨洋, 陈志鹏, 黎红亮, 廖柏寒, 曾清如. 两种农业种植模式对重金属土壤的修复潜力. 生态学报, 2016, 36(3): - .

Yang Y, Chen Z P, Li H L, Liao B H, Zeng Q R. Study of the potential of two agricultural cropping patterns for remediating heavy metals from soils. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(3): - .

两种农业种植模式对重金属土壤的修复潜力

杨 洋¹, 陈志鹏², 黎红亮², 廖柏寒¹, 曾清如^{1,2,*}

1 湖南农业大学生物科学与技术学院, 长沙 410128

2 湖南农业大学资源与环境学院, 长沙 410128

摘要:植物修复农田土壤重金属污染需要经历一个长期的过程,而大部分用来修复的植物都不具备利用价值,不能给当地农民带来经济收入。因此,一些农作物由于其较大的生物量和一定的经济价值,在植物修复土壤重金属污染的应用中受到广泛关注。本研究是在重金属(Cu、Zn、Pb、Cd、As、Hg)复合污染的郴州矿区废弃农田种植油菜、玉米和油葵。研究油菜——玉米和油菜——油葵两种种植模式对土壤重金属污染的修复潜力。实验结果表明:三种作物在复合污染土壤中对重金属都表现出一定的耐性及吸收积累能力。向日葵的根和叶中重金属Cd、Cu的含量都很高,其中Cd在向日葵的各个部位的富集系数(BCF)及Cu在向日葵的根和叶的富集系数(BCF)都大于1。两种轮作模式对作物的产量没有明显的影响,收获得到的干物质量都很高,每年每公顷分别为油菜16.6t、玉米25.29t、油葵22.5t。两种种植模式都可以对土壤中的重金属进行有效的提取,油菜——油葵种植模式下提取重金属Cu、Pb、Cd、As的量较高,分别为:Cu 2408g hm⁻² a⁻¹, Pb 2027g hm⁻² a⁻¹, Cd 658.5g hm⁻² a⁻¹, As 250g hm⁻² a⁻¹, 油菜——玉米模式下Zn和Hg的提取量较高,分别为Zn 4987g hm⁻² a⁻¹和Hg 7.92g hm⁻² a⁻¹;对于多种重金属复合污染的土壤来说,油菜——油葵的种植模式要优于油菜——玉米的种植模式。总的来说,利用三种作物两两轮作的种植模式,在不影响作物产量的前提下大大的提高了作物对重金属的提取总量。三种作物在收获以后又可以用做工业原料,这就使得当地农民充分利用矿区废弃农田修复污染的同时又能从中获得一定经济效益。

关键词:耕地; 重金属污染; 农业种植模式; 大生物量; 植物修复

Study of the potential of two agricultural cropping patterns for remediating heavy metals from soils

YANG Yang¹, CHEN Zhipeng², LI Hongliang², LIAO Bohan¹, ZENG Qingru^{1,2,*}

1 College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China

2 College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China

Abstract: Plants needs cost many years to remediate heavy metal-contaminated croplands, and because some plants lack economic value, farmers often have no income during this period. Therefore, selecting suitable plants tolerant to heavy metals and producing products of economic value may be a key factor in promoting the practical application of phytoremediation polluted soils. Many studies have demonstrated that some cash crops, which have the ability to attain large biomasses and accumulate metals, are highly tolerant to metal pollution. In order to fully utilize farmland contaminated with heavy metals from mine tailings in Chenzhou, three cash crops (rape, corn, and sunflower) were investigated as candidate phytoextraction plants with the potential to overcome these disadvantages of phytoremediation. To identify the potential of two seasonal cropping patterns (rape and corn, rape and sunflower) to remediate heavy metal contaminated land in Chenzhou, field experiments were conducted using rape, corn, and sunflower at a site highly contaminated with heavy metals (Cu, Zn,

基金项目: 环境保护部公益性行业科研专项(201009047)

收稿日期: 2014-05-04; 网络出版日期: 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qzeng@163.com

Pb, Cd, As, and Hg) from mine tailings. The three cash crops demonstrated the potential to tolerate and accumulate heavy metals. Significant accumulations of Cu and Cd were found in leaves and roots of sunflower. The bioconcentration factors (BCF) of Cd in all sunflower parts (roots, stems, leaves, flower heads, and seeds) and the BCF of Cu in sunflower leaves and roots were more than 1. Both cropping patterns (rape-corn, rape-sunflower) performed well and had no significant effect on yield. Three cash crops produced high annual yields of dry biomass (rape: 16.6t/hm², corn: 25.29t/hm², sunflower: 25.25t/hm²) after one year rotations. Both cropping patterns absorbed a wide range of heavy metals from the soil due to their high biomass yields. Data obtained from the field experiment were used to estimate the amounts of heavy metals (g hm⁻² a⁻¹) extracted by the three cash crops grown in each of the two cropping patterns. The rape-sunflower cropping system extracted large amounts of Cu (2408g hm⁻² a⁻¹), Pb (2027g hm⁻² a⁻¹), Cd (658.5g hm⁻² a⁻¹), As (250g hm⁻² a⁻¹), while Zn (4987g hm⁻² a⁻¹) and Hg (7.92g hm⁻² a⁻¹) were extracted by the rape-corn cropping system. The rape-sunflower system performed better than rape-corn at remediating the heavy metal contaminated soil. Overall, the three cash crops tested are more suitable for phytoextraction than most conventional hyperaccumulator plants due to their larger biomass, although they have low bioconcentration factors. Cropping pattern had no effect on crop yield, but increased annual extraction of heavy metals from soil compared to single crop systems. Furthermore, rape, corn and sunflower are widely used as biofuel crops, so their seed oil could be for this purpose and the stems have great commercial value in ethanol and paper production. Using these crops and cropping systems for phytoextraction offers the possibility of producing some economic returns for farmers during the remediation process.

Key Words: farmland; heavy metal pollution; cropping patterns; high biomass; phytoremediation

随着全球经济的发展,人们对金属制品的需求日益增大,使得采矿和冶金行业的迅速发展,由此引发的矿区周边土壤重金属污染和其他环境问题已经引起人们的严重关注^[1-2]。采矿过程中会产生大量的矿石、矿渣、尾矿及粉尘,它们都含有较高浓度的重金属,是土壤重金属污染的主要来源之一^[3]。这些废物中的重金属可以通过大气沉降、土壤的径流和淋溶等各种途径转移到矿区周边的农田和水体当中,造成重金属污染,从而影响农作物的产量和质量,并且通过食物链逐步进入人体,危害到人类的身体健康,严重制约了我国农业生产以及农产品安全问题^[4-5]。湖南是有名的有色金属之乡,矿产资源十分丰富,已发现的有色金属矿产 17 种,可开发的矿床 340 多处^[6-7]。研究发现,有色金属开发所引起的 Pb、Cd、As、Hg 等重金属土壤污染面积高达 2.8 万 km², 占全省总面积的 13%^[8]。近二三十年的调查表明,湖南省由于有色金属采矿引起的重金属污染事件屡见不鲜。湘潭、郴州、衡阳、冷水江等地的矿区周边大部分农田都受重金属严重污染,使得当地的粮食、蔬菜和引用水都有不同程度的重金属污染,当地居民由于长期食用这些重金属超标的食物,他们的癌症和各种疾病的发病率都有明显高于其他地区^[9-12]。

植物修复相对于物理、化学等其他修复方法,属于安全、成本低、环境友好型的重金属污染治理措施^[13-14],在矿区土壤重金属污染治理中得到广泛的应用。自植物修复发展以来,已经发现了几百种超富集植物可以用来提取土壤中的重金属,但通常这些超富集植物对于环境的适应力较差、生长缓慢、生物量小,在实际的农田环境下不能很好生长,对重金属的吸收积累量达不到理想的效果^[15-17]。因此,在治理矿区农田重金属污染时,采用一些生物量较大、符合当地种植条件的、有较强重金属耐受能力、又可以吸收提取重金属的非食用性农作物或者其他大生物量植物来进行修复^[14-15,18-19],比野外的一些超富集植物在应用和修复潜力上有明显的优势,在修复重金属污染的同时又可能带来一定的经济效益。

在一些农作物修复土壤重金属的研究当中,大部分的研究都还是集中在盆栽实验和实验室水培研究^[20-21],很少有人野外条件下研究农作物对重金属修复潜力^[22]。本文是在郴州矿区受重金属污染的荒废农田,调整其传统的水稻、蔬菜种植结构,选取油菜、油葵和玉米三种农作物,以油菜——油葵、油菜——玉米这种两两结合的轮作种植模式来治理污染矿区废弃地。油菜、油葵及玉米都是南方较常见的经济作物,将它

们应用到重金属污染的农田很容易被当地农民接受,且这三种作物都对重金属有很强的耐性和吸收富集的能力,被认为是一类对土壤重金属有修复潜力的非超富集植物^[23]。本文的目的在于研究这些作物在该污染地区对重金属的吸收富集特性,探讨利用油菜——油葵、油菜——玉米这种种植模式对复垦及治理重金属污染废弃农田的可行性,为类似地区的重金属污染耕地的农业安全利用和农业种植模式提供有利的技术支撑。

1 材料和方法

1.1 试验地点概况

试验地点位于郴州市苏仙区塘溪乡石虎埔村(N25°49.572', E113°09.223'),该地区年平均气温 15℃—18℃,气候湿润,适合植物生长。“有色金属博物馆”之称的柿竹园有色金属矿区就位于该区,多年的采矿、选矿以及对矿渣的随意堆积,已经对周围的生态环境和人们的生活造成了危机^[9,24]。试验用地选在尾砂矿污染的废弃农田,在上面进行油菜——油葵和油菜——玉米两种轮作模式的种植。

1.2 试验设计

在试验田上划分两个相邻的 15m×5m 的试验小区,前一年的 11 月份在两个小区上都种植油菜,来年 5 月份进行油菜的收割;接着继续翻耕土地,6 月中上旬分别在两个小区种植玉米和油葵,9、10 月份收割玉米和油菜。油菜和油葵的种植密度为 40cm×65cm(约 5 株/m²),玉米的种植密度为 40cm×50cm(约 9 株/m²)。整个过程进行常规的除草、防虫害等田间管理。收获的油菜分别对根、茎、叶、荚和菜籽进行分析,玉米分别对根、茎、叶、穗轴和玉米粒进行分析,油葵分别对根、茎、叶、花盘、果实进行分析。

1.3 样品的采集和分析方法

土壤样品:在种植作物的小区上按照梅花布点法,随机采取深度为 0–30 cm 的表层土壤,一共 10 个土壤样品。去掉石块、树枝等杂物,自然风干,分别过 10 目和 80 目尼龙筛,备用测试土壤重金属总量。

植物样品:收获后的植物样品,先用自来水将植株表面的泥土彻底清洗干净,把植株体的各个部位分离开,将水沥干后称其鲜重。然后再用去离子水将植物各部位清洗 3 遍,沥干水分后装入信封袋,放入烘箱内。先在 105℃ 杀青 2h,然后调至 60℃ 下烘 48h。烘好的植物品称其干重,计算其各部分的干物质总量。随后用粉碎机粉碎,装入自封袋内保持,待测重金属含量。

土壤中重金属 Cu、Zn、Pb、Cd 全量的测定:用 HCL-HNO₃-HF-HClO₄ 消解,用 ICP (ICPMA8300, Perkinelmer)测定;土壤中重金属 As、Hg:用王水水浴法消解,用原子荧光光谱仪(AFS-920,北京吉天仪器有限公司)测定。植物中重金属的测定:用 HNO₃-HClO₄ 消解,用 ICP (ICPMA8300, Perkinelmer)及原子吸收石墨炉(GTA120, Varian)测定 Cu、Zn、Pb、Cd 的含量,用原子荧光光谱仪(AFS-920,北京吉天仪器有限公司)测定 As、Hg 的含量;土壤的 pH 值用 pH 计进行测定。

土壤重金属的形态分级:采用欧盟的 BCR 三步提取法^[25],用 ICP (ICPMA8300, Perkinelmer)和原子荧光光谱仪(AFS-920,北京吉天仪器有限公司)测定。该方法测得的土壤重金属形态分为:可交换态及碳酸盐结合态(酸溶态)、Fe/Mn 氧化物结合态(可还原态)、有机物及硫化物结合态(可氧化态)以及残渣态,其中残渣态是由土壤重金属全量减去前面三种形态之和得到的。

1.4 修复潜力的计算

植物重金属的富集系数是判断其修复土壤重金属能力的一个重要因素^[26]。油菜、玉米、油葵中各组织部位对重金属的富集系数 BCF=植物各部位重金属的含量/土壤中重金属的含量。各种种植模式下对土壤重金属的修复潜力用植物对重金属的提取总量表示,详细计算如下:

a. 每年植物地上部分提取重金属总量(g hm⁻² a⁻¹)= 茎的生物量(kg hm⁻² a⁻¹)×茎中重金属浓度(mg/kg)+叶的生物量(kg hm⁻² a⁻¹)×叶中重金属浓度(mg/kg)+花的生物量(kg hm⁻² a⁻¹)×花中重金属浓度(mg/kg)+果实的生物量(kg hm⁻² a⁻¹)(包括果壳和籽实)×果实中重金属浓度(mg/kg);

b. 植物地下部分提取重金属总量(g hm⁻² a⁻¹)= 根的生物量(kg hm⁻² a⁻¹)×根中重金属的浓度(mg/kg);

c. 植物对重金属的提取总量 ($\text{g hm}^{-2} \text{a}^{-1}$) = 植物地上部分提取重金属总量 ($\text{g hm}^{-2} \text{a}^{-1}$) + 植物地下部分提取重金属总量 ($\text{g hm}^{-2} \text{a}^{-1}$)

在这里植物的生物量为干物质量,植物收获时,随机设置 5 个点,采取每个点所在的单位 m^2 的完整植株体,计算平均每株完整植物体的干物质量,根据种植密度最后得出植物的生物量。

1.5 数据分析

实验数据使用 Origin 8.0、Excel2007 软件分析,所以数据均用平均值加标准偏差表示。

2 结果分析

2.1 试验农田土壤重金属污染情况

通过随机采样检测得到的结果表明(表 1),试验农田土壤基本呈酸性,pH 值在 5.25 ± 0.54 范围内;根据《土壤环境质量标准》(GB15618-1995)可知,试验地区中的 Cu 的全量在国家二、三级标准之间,Zn、Hg 的全量在三级标准之内,而土壤中 Pb、Cd、As 的全量最高浓度分别是三级标准的 1.6 倍、10.79 倍、21 倍。说明该试验区土壤属于重金属复合污染,其中 Cu、Zn、Hg 为中度污染;Pb、Cd、As 浓度都相当高,属于严重污染;Cd 和 As 污染最为严重。土壤重金属的总量是衡量污染程度的一个指标,而重金属的生物毒性不完全由总量决定,更大程度上取决于化学形态的分布^[27]。通过 BCR 法提取得到土壤中不同形态的重金属(表 1),除 Hg 有 96.7% 属于残渣态,其他几种重金属 50% 以上都属于非残渣态;Cu、Zn、Pb、Cd 中 Fe/Mn 氧化物结合态(可还原态)的含量最高,As 是残渣态含量最高。重金属各形态的分布比例如下,Cu:Fe/Mn 氧化物结合态>残渣态>有机物及硫化物结合态>酸溶态,Zn:Fe/Mn 氧化物结合态>残渣态>酸溶态>有机物及硫化物结合态,Pb:Fe/Mn 氧化物结合态>残渣态>有机物及硫化物结合态>酸溶态,Cd:Fe/Mn 氧化物结合态>酸溶态>有机物及硫化物结合态>残渣态,As:残渣态>Fe/Mn 氧化物结合态>有机物及硫化物结合态>酸溶态,Hg:残渣态>酸溶态>Fe/Mn 氧化物结合态>有机物及硫化物结合态。研究表明,可交换态及碳酸盐结合态(酸溶态)最容易被植物吸收,Fe/Mn 氧化物结合态、有机结合态在一定条件下也能产生生物毒性,残渣态重金属几乎很难被植物吸收^[28]。

表 1 土壤中重金属的本底值
Table 1 Background values of heavy metals in soil (mg/kg)

重金属的形态 The partitioning of heavy metals	铜 Cu	锌 Zn	铅 Pb	镉 Cd	砷 As	汞 Hg	pH
重金属全量 The total metal concentration	90.68±12.2	439.41±62.85	699.23±124.15	10.32±0.47	528.53±99.91	1.32±0.44	5.25±0.54
酸溶态 Acid extractable fraction	3.42±1.46	77.63±4.21	7.95±1.68	2.06±0.47	8.73±1.96	0.0058±0.0004	
Fe/Mn 氧化物结合态 Fe/Mn oxide fractions	41.63±2.61	209.59±7.14	643.75±5.67	6.23±1.96	173.06±7.62	0.038±0.012	
有机物及硫化物结合态 Oxidisable fraction	8.18±1.85	26.06±1.56	23.36±2.75	1.75±0.25	100.74±10.47	0	
残渣态 Residual fraction	37.46±4.31	126.13±5.36	24.17±1.47	0.26±0.01	246±14.36	1.28±0.14	
二级标准* Secondary standards	≤100	≤250	≤300	≤0.3	≤25	≤0.5	
三级标准* Standard III	≤400	≤500	≤500	≤1.0	≤30	≤1.5	

* 表示土壤环境质量标准(GB15618-1995),数值为 10 个土壤样品平均值±标准误差

2.2 两种种植模式下植物对重金属的富集特征

在石虎埔村试验农田,上半年种植油菜,同一试验区下半年分别种植玉米和油菜,对成熟期的农作物进行

随机采样分析,由表2、表3可知两种种植模式下的三种农作物不同组织器官对重金属Cu、Zn、Pb、Cd、As的富集浓度和富集系数,油菜、玉米、油葵的各个部分都能吸收积累一定浓度的重金属。油菜叶中Hg的含量相当高,为 (1.16 ± 0.05) mg/kg,远远高于其他部位及其在油葵和玉米中的含量,富集系数为0.84;而其他重金属在油菜中的含量都不高,富集系数都在0.5以下。Zn在玉米根、油葵根和叶中的含量较高,分别达 (311.8 ± 16.90) mg/kg、 (238.68 ± 12.72) mg/kg和 (214.07 ± 6.22) mg/kg,富集系数分别为0.71、0.54、0.49。Pb和As在三种作物中的积累含量都不高,其中Pb的最高浓度出现在玉米根中 (158.4 ± 59.61) mg/kg,As的最高浓度是油葵的根部 (84.27 ± 4.82) mg/kg,但都远远小于土壤的本底值。油葵对重金属Cu和Cd有很好的吸收富集能力,根和叶中的Cu含量都高于土壤本底值,富集系数分别为1.61、1.27;花盘和果实对Cu的富集系数也接近1.0。油葵地上和地下部分各组织器官对Cd的富集系数都大于1,且最高浓度出现在油葵叶中 (41.05 ± 8.56) mg/kg,富集系数为3.98大于地下部分的富集系数3.45,表现出对Cd的超富集能力。

表2 三种作物各组织中重金属的积累含量

Table 2 The concentration of heavy metals in tissues of three crops

Unit: mg/kg

植物 Plants	不同部位 Different parts	铜 Cu	锌 Zn	铅 Pb	镉 Cd	砷 As	汞 Hg
油菜 Rape	根	19.92±14.03	97.82±23.58	50.66±19.14	2.34±0.22	14.42±1.71	0.1±0.07
	茎	6.11±0.69	51.62±13.07	10.30±1.69	1.23±0.18	1.27±0.29	0.32±0.31
	叶	27.22±10.39	146.88±22	44.78±1.26	2.55±0.30	11.37±3.39	1.11±0.05
	荚	11.36±3.93	79.57±50.17	37.73±3.05	2.49±0.33	3.50±1.23	0.18±0.14
	籽粒	9.62±2.99	101.81±33.4	10.10±10.29	0.88±0.12	1.08±0.24	0.08±0.03
玉米 Corn	根	41.75±4.03	311.8±16.90	158.4±59.61	7.1±1.83	40.99±6.31	0.21±0.02
	茎	4.85±0.64	185.1±23.41	6.4±3.61	1.3±0.05	2.23±0.12	0.12±0.01
	叶	12.65±1.34	162.9±5.58	34.95±2.47	4.6±0.14	24.78±3.61	0.20±0.12
	穗轴	4.75±0.07	100.85±1.84	3.6±0.28	0.1±0.08	5.24±1.26	0.01±0.01
油葵 Sunflower	果实	8.8±0.42	58.4±2.05	—	0.25±0.07	0.27±0.06	0.06±0.01
	根	146.07±14.53	238.68±12.72	74.88±5.76	35.58±13.89	84.27±4.82	0.12±0.01
	茎	44.17±3.69	85.12±3.92	11.38±0.02	16.39±5.27	6.02±0.33	0.06±0.01
	叶	115.43±7.72	214.07±6.22	27.27±1.96	41.05±8.56	24.94±2.42	0.10±0.02
	花盘	84.61±1.63	183.22±9.57	8.49±0.63	22.53±8.17	9.11±0.50	0.07±0.00
	果实	78.68±1.89	8.45±5.30	6.03±1.03	12.53±0.88	7.27±0.60	0.05±0.01

数值为5植物样品平均值±标准误差

表3 两种种植模式下农作物对重金属的富集系数

Table 3 Bioconcentration Factors for different tissues of crops by two cropping patterns

植物 Plants	不同部位 Different parts	铜 Cu	锌 Zn	铅 Pb	镉 Cd	砷 As	汞 Hg
油菜 Rape	根	0.22	0.22	0.07	0.23	0.03	0.08
	茎	0.07	0.12	0.01	0.12	0.002	0.23
	叶	0.30	0.33	0.06	0.25	0.02	0.84
	荚	0.13	0.18	0.05	0.24	0.01	0.14
	籽粒	0.11	0.23	0.01	0.09	0.002	0.06
玉米 Corn	根	0.46	0.71	0.23	0.69	0.08	0.156
	茎	0.05	0.42	0.01	0.13	0.004	0.09
	叶	0.14	0.37	0.05	0.45	0.05	0.15
	穗轴	0.05	0.23	0.01	0.01	0.01	0.07
油葵 Sunflower	果实	0.10	0.13	0.00	0.02	0.001	0.04
	根	1.61	0.54	0.11	3.45	0.16	0.09
	茎	0.49	0.19	0.02	1.64	0.01	0.05
	叶	1.27	0.49	0.04	3.98	0.05	0.08
	花盘	0.93	0.42	0.01	2.18	0.02	0.06
	果实	0.87	0.45	0.01	1.21	0.01	0.04

2.3 两种种植模式下作物的生物量及对重金属的提取总

油菜、玉米和向日葵在该重金属复合污染的土壤上基本能够正常生长,由图 1 可知,三种作物单位植株体的干物质总量以及作物各部位干物质质量的比例。油菜地下和地上部分的干物质质量基本各占一半,玉米地上部分的干物质质量比例高达 95%,向日葵地上部分的干物质质量为 68%。根据试验设计的种植密度,油菜和向日葵为 5 株/m²、玉米为 9 株/m²以及平均每株的干物质质量,可以得出表 4 中每公顷油菜、玉米和向日葵的生物量。三种作物的地上部分秸秆的生物量都达到了 6000kg hm⁻² a⁻¹,玉米的秸秆量高达 11682kg hm⁻² a⁻¹。尽管三种作物能够在污染土壤中正常生长并且没有发现毒害作用,其产量还是未能达到实验室优良条件下的高产水平,但是它们的生物量相对于那些野外的超富集生物来说是相当可观的。

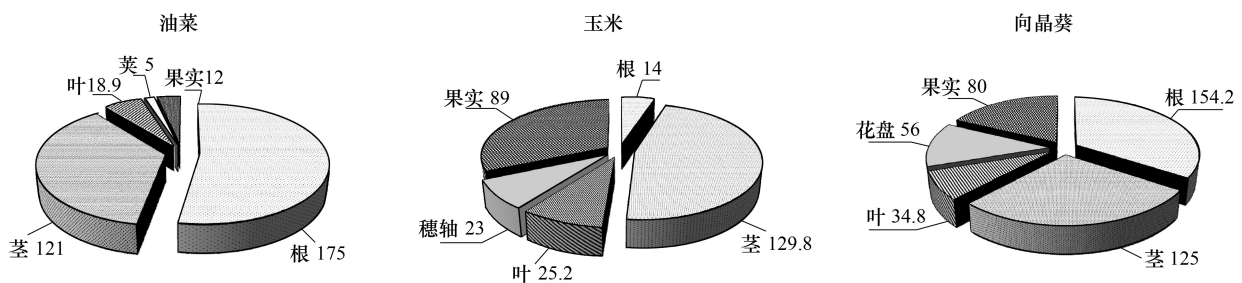


图 1 油菜、玉米、向日葵的干物质质量(g/株)

Fig. 1 The dry matter of rape, corn and sunflower

在油菜——玉米、油菜——油葵种植模式下的三种作物除了油葵对 Cd 的富集能力达到真正的超富集植物的定义,油菜、玉米以及油葵相对于其他重金属都不属于超富集植物,但是它们能够在污染严重的尾矿区土壤中正常的生长,且对重金属有一定的吸收积累能力,它们较高的生物量此时决定了其从土壤中提取重金属的能力。以往植物修复所采用的超富集植物虽然富集系数很高,但是生长缓慢,生物量很小,对土壤重金属的去除效率并不高^[14]。而往往像油菜、玉米和油葵这类的农作物和经济作物的生物量都远远超过了超富集植物,他们对于土壤中重金属的去除效果更好。经过野外大田试验的结果表明(表 5),油葵对重金属 Cu、Cd 和

表 4 三种作物的生物量

Table 4 The biomass of three crops Unit: kg hm⁻² a⁻¹

植物不同部位 Different parts of plant	油菜 Rape	玉米 Corn	向日葵 Sunflower
根 Roots	8750	1260	7710
茎 Stems	6050	11682	6250
叶 Leaves	945	2268	1740
荚/穗轴/花盘 Pods/Cobs/Heads	250	2070	2800
果实 Seeds	600	8010	4000
总量 Total	16595	25290	22500

As 的提取量明显高于玉米和油菜,单独一季地上部分加地部分下土壤中提取的重金属总量分别为:Cu 2.14 kg hm⁻² a⁻¹、Cd 0.592 kg hm⁻² a⁻¹、As 0.218 kg hm⁻² a⁻¹;玉米对 Zn 的提取效果最好,高达 3.6 kg hm⁻² a⁻¹;油菜一季对 Pb 的提取总量高达 1.26 kg hm⁻² a⁻¹。而将三种作物两两组合,分上、下半年进行种植,就使得一年中重金属的提取量进一步增加了,可以看出两种种植模式都能够有效的提取土壤中的重金属,油菜——玉米、油菜——油葵结合后对重金属的提取量都要比单独种植要好。其中 Cu、Pb、Cd 及 As 在油菜——油葵的模式下提取量最高,分别为 2.4、2.0、0.66、0.25 kg hm⁻² a⁻¹;油菜——玉米模式下的 Zn 和 Hg 提取量较高,分别为 4.99、0.0079 kg hm⁻² a⁻¹。结果表明,油菜——玉米、油菜——油葵的种植模式,能够对重金属进行有效的提取,其中油菜——油葵的种植模式对各重金属的提取效果都不错,十分有利于土壤重金属复合污染的修复。

3 油菜——玉米和油菜——油葵种植模式修复潜力的讨论

通常植物修复提取重金属的有效性由两个因素决定:植物对重金属的积累能力和植物的生物量^[29],而植物的生物量和生物富集系数(BCF)又是衡量一种植物是否具有修复潜力的关键要素^[30]。超富集植物的生物

富集系数(BCF)一般都非常高,但是它们生长缓慢、生物量都比较低,而一般的农作物生物量都要高于超富集植物^[31]。试验结果表明,在重金属复合污染的土壤中,油菜、玉米、油葵三种植物一季的生物量分别高达:16.6t/hm²、玉米 25.29t/hm²、油葵 22.5t/hm²。研究发现的一些超富集植物如遇兰菜在大田中种植一季的生物量却只有 0.38t/hm²^[21];东南景天的生物量为 0.85—1.5t/hm²^[32],高的时候也只有 5.5t/hm²^[17];宝山堇菜的生物量也只有 6.5t/hm²^[17]。玉米、向日葵等高生物量的农作物的地上部分却能高达 25—30t/hm²^[33],是超富集植物生物量的几倍甚至十几倍。由此可见,在植物修复重金属应用到实践时,生物富集系数仅仅只是一个参照指标,植物的生物量往往直接关系到土壤重金属的去除总量,在一定的条件下生物量较大的农作物对重金属的提取效果要高于超富集植物。

表 5 三种作物对重金属的提取总量

Table 5 The amount of heavy metals extracted by three crops

g hm⁻² a⁻¹

植物 Plant	重金属的提取量 The amount of heavy metals					
	作物地下部分提取的重金属总量					
	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Hg
油菜 Rape	175	856	440	50.5	12.6	0.09
玉米 Corn	52	393	198	8.1	5.13	0.027
油葵 Sunflower	1126	1840	578	274.5	64.95	0.1
	作物地上部分提取的重金属总量					
	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Hg
	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Hg
油菜 Rape	71	530	829	11	20	1.5
玉米 Corn	166	3208	162	27.9	95.4	6.3
油葵 Sunflower	1018	1454	180	317.5	154	1
	整个植物体提取的重金属总量					
	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Hg
	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Hg
油菜 Rape	246	1386	1269	66.5	32.6	1.59
玉米 Corn	218	3601	360	19.1	100.5	6.327
油葵 Sunflower	2144	3294	758	592	218	1.1
油菜—玉米 Rape—Corn	464	4987	1629	85.6	133.1	7.92
油菜—油葵 Rape—Sunflower	2408	4680	2027	658.5	250	2.69

随着人类需求的加大,石油、天然气等能源危机的到来不得不使人们开始发掘新的能源,其中生物能源材料在很大程度上能够取代石化能源^[34]。玉米是用来提取生物乙醇的原料^[5],油菜、油葵可以作为生物柴油的原料,由于它们有可再生、环境友好型、安全性等特点,很早就是国内外能源作物的研究热点,且发展规模和技术都很成熟^[35-36]。因此,使用油菜——玉米、油菜——油葵这三种农作物两两结合的轮作模式来修复重金属污染的矿区农田既可以有效的去除土壤中的重金属,不会对环境造成危害;同时这三种作物收获后都可以进行回收利用(如做能源植物),这样就不会通过食物链影响到人类的健康,又能带来一定的经济收益。这种植物提取的修复方式更侧重于如何对污染土地合理利用及降低风险,而不是提高金属提取效率等机理性的研究,更具有可行性。

4 结论

两种种植模式的作物都能在矿区重金属复合的废弃农田上正常生长,且生物量较大,能有效地提取土壤中的重金属。其中,油菜——油葵种植模式虽然对 Zn 和 Hg 的提取量略低于油菜——玉米种植模式,对 Cu、Pb、Cd、As 的提取量都体现出明显的优势。油菜、玉米、油葵收获以后又可作作物生物柴油、生物乙醇的原料,而非进入食物链的食用原料。因此这样的种植模式是在合理利用废弃的污染农田和降低风险的基础上,逐步将重金属从土壤中提取出来。

参考文献 (References):

- [1] Natarajan K A, Subramanian S, Braun J J. Environmental impact of metal mining—biotechnological aspects of water pollution and remediation—an Indian experience. *Journal of Geochemical Exploration*, 2006, 88(1/3): 45-48.
- [2] Lim T T, Chui P C, Goh K H. Process evaluation for optimization of EDTA use and recovery for heavy metal removal from a contaminated soil. *Chemosphere*, 2005, 58(8): 1031-1040.
- [3] Tordoff G M, Baker A J M, Willis A J. Current approaches to the revegetation and reclamation of metalliferous mine wastes. *Chemosphere*, 2000, 41(1/2): 219-228.
- [4] 余平. 采矿环境地球化学研究. *矿产与地质*, 2002, 16(6): 360-363.
- [5] Meers E, Van Slycken S, Adriaensen K, Ruttens A, Vangronsveld J, Du Laing G, Witters N, Thewys T, Tack F M G. The use of bio-energy crops (*Zea mays*) for 'phytoattenuation' of heavy metals on moderately contaminated soils: A field experiment. *Chemosphere*, 2010, 78(1): 35-41.
- [6] 谢炳庚, 李晓青. 湖南有色金属矿产资源及其地域开发研究. *经济地理*, 1996, 16(4): 79-82.
- [7] 谢文安, 谢玲琳. 湖南省有色金属矿床概论. *地质与勘探*, 1991, 27(7): 1-6.
- [8] 郭朝辉, 朱永官. 典型矿冶周边地区土壤重金属污染及有效性含量. *生态环境*, 2004, 13(4): 553-555.
- [9] 曾清如, 杨仁斌, 铁柏清, 周细红, 廖铭长, 王小成. 郴县东西河流域重金属污染农田的防治技术和生态利用模式. *农业环境保护*, 2002, 21(5): 428-431.
- [10] 张慧智, 刘云国, 魏薇, 黄宝荣, 李欣. 湖南省矿山尾砂土壤污染现状分析. *矿冶工程*, 2004, 24(5): 27-30.
- [11] 余玮, 揭雨成, 邢虎成, 黄明, 康万利, 鲁雁伟, 王栋. 湖南冷水江锑矿区苎麻对重金属的吸收和富集特性. *农业环境科学学报*, 2010, 29(1): 91-96.
- [12] 曾敏, 廖柏寒, 曾清如, 张永, 骆其金, 欧阳彬. 湖南郴州、石门、冷水江 3 个矿区 As 污染状况的初步调查. *农业环境科学学报*, 2006, 25(2): 418-421.
- [13] Weber O, Scholz R W, Bühlmann R, Grasmück D. Risk perception of heavy metal soil contamination and attitudes toward decontamination strategies. *Risk Analysis*, 2011, 21(5): 967-977.
- [14] Wieshammer G, Unterbrunner R, García T B, Zivkovic M F, Puschenreiter M, Wenzel W W. Phytoextraction of Cd and Zn from agricultural soils by *Salix* ssp. And intercropping of *Salix caprea* and *Arabidopsis halleri*. *Plant and Soil*, 2007, 298(1/2): 255-264.
- [15] Hammer D, Kayser A, Keller C. Phytoextraction of Cd and Zn with *Salix viminalis* in field trial. *Soil Use and Management*, 2003, 19(3): 187-192.
- [16] Cherian S, Oliveira M M. Transgenic plants in phytoremediation: recent advances and new possibilities. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(24): 9377-9390.
- [17] Zhuang P, Yang Q W, Wang H B, Shu W S. Phytoextraction of heavy metals by eight plant species in the field. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2007, 184(1/4): 235-242.
- [18] Dickinson N M. Strategies for sustainable woodland on contaminated soils. *Chemosphere*, 2000, 41(1/2): 259-263.
- [19] 申时立, 黎华寿, 夏北成, 杨常亮. 大生物量植物治理重金属重度污染废弃地可行性的研究. *农业环境科学学报*, 2013, 32(3): 572-578.
- [20] Solhi M, Shareatmadari H, Hajabbasi M A. Lead and zinc extraction potential of two common crop plants, *Helianthus annuus* and *Brassica napus*. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2005, 167(1/4): 59-71.
- [21] Wenzel W W, Unterbrunner R, Sommer P, Sacco P. Chelate-assisted phytoextraction using canola (*Brassica napus* L.) in outdoors pot and lysimeter experiments. *Plant and Soil*, 2003, 249(1): 83-96.
- [22] McGrath S P, Lombi E, Gray C W, Caille N, Dunham S J, Zhao F J. Field evaluation of Cd and Zn phytoextraction potential by the hyperaccumulators *Thlaspi caerulescens* and *Arabidopsis halleri*. *Environmental Pollution*, 2006, 141(1): 115-125.
- [23] Meers E, Ruttens A, Hopgood M, Lesage E, Tack F M G. Potential of *Brassica rapa*, *Cannabis sativa*, *Helianthus annuus* and *Zea mays* for phytoextraction of heavy metals from calcareous dredged sediment derived soils. *Chemosphere*, 2005, 61(4): 561-572.
- [24] 雷梅, 岳庆玲, 陈同斌, 黄泽春, 廖晓勇, 刘颖茹, 郑国砥, 常庆瑞. 湖南柿竹园矿区土壤重金属含量及植物吸收特征. *生态学报*, 2005, 25(5): 1146-1151.
- [25] Quevauviller Ph, Rauret G, López-Sánchez J F, Rubio R, Ure A, Muntau H. Certification of trace metal extractable contents in a sediment reference material (CRM601) following a three-step sequential extraction procedure. *Science of the Total Environment*, 1997, 205(2/3): 223-234.
- [26] Mertens J, Luyssaert S, Verheyen K. Use and abuse of trace metal concentrations in plant tissue for biomonitoring and phytoextraction. *Environmental Pollution*, 2005, 138(1): 1-4.
- [27] 钱进, 王子健, 单孝全. 土壤中微量金属元素的植物可给性研究进展. *环境科学*, 1995, 16(6): 73-78.

- [28] 周启星, 黄国宏. 环境生物地球化学及全球环境变化. 北京: 科学出版社, 2000: 96-105.
- [29] McGrath S P, Zhao FJ. Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils. *Current Opinion in Biotechnology*, 2003, 14(3): 277-282.
- [30] Zhao FJ, Lombi E, McGrath S P. Assessing the potential for zinc and cadmium phytoextraction with the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Plant and Soil*, 2003, 249(1): 37-43.
- [31] David W Ow. Heavy metal tolerance genes: prospective tools for bioremediation. *Resources Conservation and Recycling*, 1996, 18(1/4): 135-149.
- [32] Hammer D, Keller C. Phytoextraction of Cd and Zn with *Thlaspi caerulescens* in field trials. *Soil Use and Management*, 2003, 19(2): 144-149.
- [33] Kayser A, Wenger K, Keller A, Attinger W, Felix H R, Gupta S K, Schulz R. Enhancement of phytoextraction of Zn, Cd and Cu from calcareous soil: the use of NTA and sulfur amendments. *Environment Science and Technology*, 2000, 34(9): 1778-1783.
- [34] Silalertruksa T, Gheewala S H. Security of feedstocks supply for future bio-ethanol production in Thailand. *Energy Policy*, 2010, 38(11): 7476-7486.
- [35] 王汉中. 发展油菜生物柴油的潜力、问题与对策. *中国油料作物学报*, 2005, 27(2): 74-76.
- [36] 刘公社, 陈中岳. 向日葵生物柴油的开发前景. *中国油料作物学报*, 2006, 28(2): 224-227.