

基于重金属染污修复的菌草品种筛选与应用

粟文俊¹, 龚建华^{1*}, 林占熿², 漆本蛟¹, 杨永红¹, 康敏¹, 邓雅文¹

¹株洲市农业科学研究所, 湖南 株洲

²国家菌草工程技术研究中心, 福建 福州

Email: gjh1267@126.com

收稿日期: 2020年9月25日; 录用日期: 2020年10月2日; 发布日期: 2020年10月10日

摘要

植物修复是重金属污染土壤修复治理的重要方法。菌草生物产量高, 是土壤重金属植物修复研究与应用的重要对象之一。本试验引进菌草品种四个, 选用高Cd (2.16 mg/kg)背景土壤, 旨在研究不同品种对不同重金属的吸收积累特性, 以期筛选出针对不同重金属污染土壤的修复植物。结果表明: 1) 菌草品种地上部生物量, 巨菌草最高, 其次是巨菌草J1, 莱牧1号最低。地上部鲜重, 巨菌草和巨菌草J1极显著高于莱牧1号($P < 0.01$), 巨菌草显著高于紫菌草($P < 0.05$), 紫菌草显著高于莱牧1号。地上部干重, 巨菌草极显著高于莱牧1号、显著高于紫菌草, 巨菌草J1显著高于莱牧1号。2) 菌草品种茎的重金属含量与叶含量间差异显著, 其中: Cd含量茎显著高于叶, 而Pb、Cr、As、Hg含量叶极显著高于茎。巨菌草J1和巨菌草叶的Cd含量极显著高于莱牧1号; 茎Pb含量莱牧1号最高, 叶Pb含量巨菌草最高; 紫菌草叶的Cr含量极显著高于巨菌草, 显著高于巨菌草J1和莱牧1号; 莱牧1号茎的As含量最高, 紫菌草叶的As含量最高; Hg含量, 莱牧1号茎和叶均最高, 茎含量品种间差异很小, 而叶含量莱牧1号是其它品种的2倍左右, 但品种间差异未达显著水平。3) 平均单株地上部不同重金属积累量排序均表现为: 巨菌草 > 巨菌草J1 > 紫菌草 > 莱牧1号, 其中: 巨菌草Cd积累量极显著高于莱牧1号、显著高于紫菌草, 巨菌草J1的Cd积累量显著高于莱牧1号; Pb、Cr、As、Hg积累量品种间均无显著差异。可见, 巨菌草和巨菌草J1对Cd具有很强的富集能力, 而紫菌草对Cr污染治理、莱牧1号对Hg污染治理具有良好的应用潜力。

关键词

重金属染污, 植物修复, 菌草, 品种筛选

Selection and Application of JUNCAO Varieties Based on Heavy Metal Pollution Remediation

Wenjun Su¹, Jianhua Gong^{1*}, Zhanxi Lin², Benjiao Qi¹, Yonghong Yang¹, Min Kang¹, Yawen Deng¹

¹Zhuzhou Institute of Agricultural Sciences, Zhuzhou Hunan

*通讯作者。

文章引用: 粟文俊, 龚建华, 林占熿, 漆本蛟, 杨永红, 康敏, 邓雅文. 基于重金属染污修复的菌草品种筛选与应用[J]. 农业科学, 2020, 10(10): 771-780. DOI: [10.12677/hjas.2020.1010118](https://doi.org/10.12677/hjas.2020.1010118)

²National Research Center for Engineering Technology of JUNCAO, Fuzhou Fujian
Email: gjh1267@126.com

Received: Sep. 25th, 2020; accepted: Oct. 2nd, 2020; published: Oct. 10th, 2020

Abstract

Phytoremediation is an important method for remediation of heavy metal contaminated soil. The biomass of JUNCAO is high, which is one of the important objects of phytoremediation of heavy metals in soil. Four kinds of JUNCAO were introduced in this experiment, and high CD (2.16 mg/kg) background soil was selected to study the absorption and accumulation characteristics of different varieties of heavy metals, so as to screen out remediation plants for different heavy metal contaminated soil. The results showed that: 1) The aboveground biomass of Giant JUNCAO was the highest, followed by Giant JUNCAO J1, and Laimu No. 1 was the lowest. The aboveground fresh weight of Giant JUNCAO and Giant JUNCAO J1 was significantly higher than that of Laimu No.1 ($P < 0.01$), and that of Giant JUNCAO was significantly higher than that of Zijuncao ($P < 0.05$). The aboveground dry weight of Giant JUNCAO was significantly higher than that of Laimu No. 1, significantly higher than that of Zijuncao, and Giant JUNCAO J1 was significantly higher than that of Laimu No.1. 2) The contents of Cd in stems were significantly higher than those in leaves, while Pb, Cr, As and Hg in leaves were significantly higher than those in stems. The results showed that Cd content in the leaves of Giant JUNCAO and Giant JUNCAO J1 was significantly higher than that in Laimu No. 1; the Pb content in stems and leaves of Laimu No.1 was the highest, while that in leaves of Zijuncao was significantly higher than that in Giant JUNCAO J1 and Laimu No. 1; as content in stems and leaves of Giant JUNCAO was the highest, and the contents of Hg in stems and leaves of Laimu No. 1 were the highest, and there were significant differences in stem contents among varieties, the leaf content of Laimu No.1 was about twice as much as that of other varieties, but the difference among varieties was not significant. 3) The results showed that the average accumulation of heavy metals in the aerial parts of a single plant was as follows: Giant JUNCAO > Giant JUNCAO J1 > Zijuncao > Laimu No. 1, among which, the Cd accumulation of Giant JUNCAO was significantly higher than that of Laimu No. 1 and was significantly higher than that of Zijuncao 1, and the Cd accumulation of Giant JUNCAO J1 was significantly higher than that of Laimu No. 1; there was no significant difference in Pb, Cr, As and Hg among varieties. It can be seen that Giant JUNCAO and Giant JUNCAO J1 have strong ability to enrich Cd, while Zijuncao and Laimu No.1 have good application potential for Cr pollution control and Hg pollution control.

Keywords

Heavy Metal Pollution, Phytoremediation, Giant JUNCAO, Variety Screening

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1983 年美国科学家 Chaney 首次提出了利用能够富集重金属的植物来清除土壤重金属污染的设想, 即植物修复技术[1]。植物修复技术的关键是修复植物的筛选, 是近年来的研究热点之一。这种特殊的植物被称为超积累植物或超富集植物(hyperaccumulator), 目前, 国际上报导的超积累植物已有 500 多种[2]。但由于大多数超富集植物植株矮小、生物量低、生长缓慢等特点, 给植物修复技术应用带来了很大的限

制,因此,人们将研究集中于一些生物量高且对重金属有吸收作用的作物上[3] [4] [5]。菌草生物产量高,有多种开发用途,目前主要推广的品种有巨菌草、绿州一号、紫菌草等。龚建华等[6]研究表明,巨菌草对重金属具有很强的富集能力,是一种高产型的 Cd 超富集植物。关于不同菌草品种吸收积累重金属能力的研究,目前尚未见相关报道。本研究从国家菌草工程技术研究中心引进 4 个主栽菌草品种,在 Cd 重度污染农田进行品比试验,旨在研究不同品种对不同重金属的吸收积累特性,以期筛选出针对不同重金属污染土壤的高效修复植物,为大面积植物修复工程化应用提供科学依据。

2. 材料与方法

2.1. 试验材料

供试品种:巨菌草、巨菌草 J1、莱牧 1 号、紫菌草,由国家菌草技术工程研究中心提供。分别编号为:GZ1、GZ2、GZ3、GZ4。巨菌草,在温度适宜地区为多年生植物,属典型的四碳植物,其植株高大,抗逆性强,产量高,在热带、亚热带、温带地区种植,一般每公顷年产鲜草可达 300 吨以上,在水、湿、肥等条件优越的情况下可达 450 吨/公顷以上。直立、丛生,根系发达;茎粗可达 3.5 厘米,节间长 9~15 厘米,15 个有效的分蘖,每节着生一个腋芽,并由叶片包裹,叶片互生,长 60~132 厘米,叶片宽 3.5~6 厘米,8 个月共生长 35 片叶。巨菌草 J1 是国家菌草技术工程研究中心选育的新品种,植株性状与巨菌草基本相同,但抗性有所提高。与巨菌草相比,莱牧 1 号株型较小,但分蘖强,适于多次收割,主要用作食用菌栽培料与生态养殖。紫菌草,生长势强,叶片为紫色,因花青素含量较高,适于生态养殖或深加工。

供试土壤:位于株洲市芦淞区燎原村,土壤为壤土,前作为菌草,试验面积 150 m²。

有机肥:由宁乡丰裕生物科技有限公司提供,其有机质、氮、磷、钾含量分别为 74.68%、4.24%、3.12%、4.10%,镉、汞、砷、铬、铅含量分别为 1.04、0.048、8.2、31、20 mg/kg。

2.2. 试验设计

试验以 4 个菌草品种为处理,随机区组设计,三次重复。小区面积为 9 m²,栽培密度 50 cm × 50 cm,每小区栽 30 株。小区间设置 70 cm 宽的采沟,周围设置保护行。采用迁插繁殖方式,于 2018 年 5 月 22 日迁插。基肥为商品有机肥,用量 1500 kg/亩,未施追肥。试验期间不割青,灌溉水为深井水。

菌草收割时,每小区随机取 10 株,测定茎叶鲜重、株高、叶数和枯叶节位等植物学性状。

2.3. 取样方法

土壤取样:整土后施肥前,对土壤进行 5 点取样,样品重 2 kg 左右。取样时间为 2018 年 5 月 20 号。

菌草取样:每小区随机取茎、叶样各 1 个。取茎样时,在茎中部位置和顶部位置各取茎段长 10 cm 左右,样品重 1 kg。取叶样时,每株取中部叶和顶部叶各 1 片,样品重 0.5 kg 左右。取样时间为 2018 年 11 月 29 号。

肥料取样:本试验基肥为有机肥,施肥前将有机肥混合均匀,随机取样 2 kg。

2.4. 检测指标

土壤检测指标:总 Cd、有效态 Cd、Hg、As、Pb、Cr、有机质、碱解氮、速效磷、速效钾、pH 值。

巨菌草检测指标: Cd、Hg、As、Pb、Cr, 样品处理时,记录鲜重和干重。

肥料检测指标: Cd、Hg、As、Pb、Cr、有机质、碱解氮、速效磷、速效钾、pH 值。

2.5. 检测方法

参照 GB 5009.268-2016 的方法,利用电感耦合等离子体质谱仪(7800/JLXT-001)测定菌草 Cd、As、

Pb、Cr 的含量；参照 GB 5009.17-2014 方法，利用原子荧光光度计(AFS-933)测定菌草 Hg 的含量。参照 HJ803-2016 的方法，利用电感耦合等离子体质谱仪测定土壤 Cd、Pb、Cr 的含量；参照 GB/T 22105.2-2008 的方法，利用原子荧光光度计测定土壤 Hg、As 的含量；参照 GB/T 23739-2009 的方法，利用原子吸收分光光度计(240FS)测定土壤有效态 Cd 含量；参照 NY/T 1121.6-2006 的方法，利用恒温升降水油浴锅(HH-S 4)检测土壤有机质含量；参照碱解扩散法《土壤分析技术规范》7.2 (第二版 2006 年)的方法，检测土壤碱解氮含量；参照 NY/T 1849-2010 的方法，利用紫外分光光度计(BlueStar B)检测土壤有效磷含量；参照 NY/T 8899-2004 的方法，利用原子吸收分光光度计(240FS)检测土壤速效钾含量。

2.6. 数据处理

试验数据采用 Excel 2003 进行数据整理和方差分析，采用 Excel 的 TDIST 函数进行随机区组试验的多重比较(LSD)，采用 T-test 进行菌草茎、叶重金属含量和积累量的显著性检验。

3. 结果与分析

3.1. 试验土壤重金属含量、pH 值及肥力水平

本试验土壤重金属背景值及 pH 值如表 1 所示。菌草品种比较试验土壤 pH 值为 5.19，属酸性土壤，土壤 Cd 浓度超过《土壤环境质量标准》(GB15618-1995)二级标准(土壤 pH < 6.5) 620%，而 Pb、Cr、As、Hg 均未超标，为 Cd 单一污染的酸性土壤。土壤有机质含量 42.2 g/kg，碱解氮 165 mg/kg，速效磷 12.16 mg/kg，速效钾 192 mg/kg，根据全国第二次土壤普查土壤养分含量分级标准，试验土壤有机质含量为 1 级(极丰富)，碱解氮为 1 级(极丰富)，速效钾为 2 级(丰富)，速效磷为 3 级(中上)，土壤肥力水平评价为上等，可适当补充磷元素。

Table 1. Soil pH and soil heavy metal background value

表 1. 土壤 pH 及土壤重金属背景值(mg/kg)

土壤样品	PH	总 Cd	有效态 Cd	Hg	As	Pb	Cr
株洲市芦淞区燎原村	5.19	2.16	1.70	0.299	20.2	137	102
《国家土壤环境质量标准》	<6.5	0.3		0.3	30	250	250

注：《国家土壤环境质量标准》(GB15618-1995)二级标准(土壤 pH < 6.5)。

3.2. 菌草品种生物量比较

试验表明(表 2)，四个菌草品种地上部生物量排序是：巨菌草 > 巨菌草 J1 > 紫菌草 > 莱牧 1 号，地上部鲜重品种间差异极显著($P < 0.01$ ，下同)，地上部干重品种间差异显著($P < 0.05$ ，下同)。其中，地上部鲜重巨菌草和巨菌草 J1 极显著高于莱牧 1 号，巨菌草显著高于紫菌草，紫菌草显著高于莱牧 1 号(表 3)；地上部干重巨菌草极显著高于莱牧 1 号、显著高于紫菌草，巨菌草 J1 显著高于莱牧 1 号(表 4)。

Table 2. Comparison of shoot biomass of four JUNCAO varieties

表 2. 菌草品种生物量比较表

品种	GZ1	GZ2	GZ3	GZ4	平均
地上部鲜重(kg/株)	5.59 ± 0.97	4.75 ± 0.6	1.00 ± 0.20	3.20 ± 1.01	3.63**
地上部干重(kg/株)	1.35 ± 0.34	1.11 ± 0.12	0.26 ± 0.09	0.71 ± 0.28	0.86*

注：表中数据为三个重复的平均数 ± 标准差。**表示品种间差异极显著($P < 0.01$)，*表示品种间差异显著($P < 0.05$)，下同。

Table 3. Two-tailed probability of TDIST function of aboveground fresh weight and multiple comparison
表 3. 地上部鲜重 TDIST 函数两尾概率值与多重比较表(LSD 法)

品种	地上部鲜重 Ti.(mg/株)	GZ1	GZ2	GZ4	GZ3
		5.59	4.75	3.20	1.00
GZ3	1.00	0.002**	0.005**	0.045*	
GZ4	3.20	0.033*	0.125		
GZ2	4.75	0.371			
A1	5.59				

Table 4. Two-tailed probability of TDIST function of aboveground dry weight and multiple comparison
表 4. 地上部干重 TDIST 函数两尾概率值与多重比较表(LSD 法)

品种	地上部鲜重 Ti.(mg/株)	A1	A2	A4	A3
		1.35	1.11	0.71	0.26
GZ3	0.26	0.005**	0.015*	0.129	
GZ4	0.71	0.044*	0.163		
GZ2	1.11	0.377			
GZ1	1.35				

3.3. 菌草品种重金属含量比较

Cd 含量比较: 由表 5 可知, 四个菌草品种平均茎 Cd 含量为 3.53 mg/kg, 其中, 紫菌草含量最高, 莱牧 1 号最低, 但品种间无显著差异。四个菌草品种平均叶 Cd 含量为 2.4 mg/kg, 排序为: 巨菌草 J1 > 巨菌草 > 紫菌草 > 莱牧 1 号, 品种间差异达到显著水平, 多重比较表明, 巨菌草 J1 和巨菌草均极显著高于莱牧 1 号(表 6)。四个菌草品种地上部加权平均 Cd 含量排序和差异显著性与叶相同。*T*-test 检验表明, 四个菌草品种平均茎 Cd 含量显著高于叶($P < 0.05$, 下同)。

Pb 含量比较: 菌草品种平均茎 Pb 含量为 0.47 mg/kg, 其中, 莱牧 1 号含量最高; 菌草品种平均叶 Pb 含量为 7.82 mg/kg, 其中, 巨菌草含量最高。但茎、叶 Pb 含量品种间差异均不显著。*T*-test 检验表明, 菌草品种平均叶 Pb 含量极显著高于茎($P < 0.01$, 下同)。

Cr 含量比较: 菌草品种平均茎 Cr 含量为 2.00 mg/kg, 其中, 巨菌草含量最高, 莱牧 1 号最低, 但品种间无显著差异。菌草品种平均叶 Cr 含量为 4.37 mg/kg, 品种间差异显著, 其中: 紫菌草叶 Cr 含量极显著高于巨菌草、显著高于巨菌草 J1 和莱牧 1 号(表 7)。菌草品种地上部加权平均 Cr 含量排序与叶一致, 紫菌草显著高于其它品种(表 8)。*T*-test 检验表明, 菌草品种平均叶 Cr 含量极显著高于茎。

As 含量比较: 菌草品种平均茎 As 含量为 0.07 mg/kg, 其中, 莱牧 1 号含量最高; 菌草品种平均叶 As 含量为 1.137 mg/kg, 其中, 紫菌草含量最高, 莱牧 1 号最低。但茎、叶 As 含量品种间均无显著差异。*T*-test 检验表明, 菌草品种平均叶 As 含量极显著高于茎。

Hg 含量比较: 菌草品种平均茎 Hg 含量为 0.003 mg/kg, 其中, 莱牧 1 号含量最高, 但品种间差异很小。菌草品种平均叶 Hg 含量为 0.032 mg/kg, 其中, 莱牧 1 号含量是其它品种的 2 倍左右, 但品种间未达显著水平。*T*-test 检验表明, 菌草品种平均叶 Hg 含量极显著高于茎。

Table 5. Data and analysis table of cadmium content in stem and leaf of different strains of JUNCAO
表 5. 菌草品种地上部重金属含量表(mg/kg)

重金属	品种	茎含量	叶含量	地上部加权平均含量
Cd	GZ1	3.46 ± 1.02	2.88 ± 0.25	3.06 ± 0.54
	GZ2	3.82 ± 0.25	3.00 ± 0.35	3.38 ± 0.09
	GZ3	2.95 ± 1.98	1.53 ± 0.46	2.01 ± 0.99
	GZ4	3.88 ± 0.51	2.21 ± 0.09	2.82 ± 0.16
	平均	3.53(a)	2.40(b)	2.82
Pb	GZ1	0.46 ± 0.02	8.50 ± 0.73	5.57 ± 0.57
	GZ2	0.49 ± 0.02	8.47 ± 1.06	5.00 ± 0.91
	GZ3	0.52 ± 0.06	6.76 ± 1.14	4.74 ± 0.67
	GZ4	0.41 ± 0.07	7.54 ± 0.02	4.96 ± 0.12
	平均	0.47(B)	7.82(A)	5.07
Cr	GZ1	2.31 ± 0.13	3.52 ± 0.26	3.07 ± 0.09
	GZ2	1.95 ± 0.33	3.97 ± 0.47	3.06 ± 0.36
	GZ3	1.55 ± 0.11	4.12 ± 0.90	3.29 ± 0.57
	GZ4	2.18 ± 0.30	5.85 ± 0.54	4.53 ± 0.50
	平均	2.00(B)	4.37(A)	3.48
AS	GZ1	0.068 ± 0.004	1.194 ± 0.101	0.792 ± 0.136
	GZ2	0.068 ± 0.007	1.208 ± 0.299	0.723 ± 0.230
	GZ3	0.075 ± 0.004	0.926 ± 0.102	0.653 ± 0.068
	GZ4	0.071 ± 0.005	1.220 ± 0.253	0.802 ± 0.149
	平均	0.070(B)	1.137(A)	0.742
Hg	GZ1	0.003 ± 0.000	0.025 ± 0.002	0.017 ± 0.002
	GZ2	0.003 ± 0.000	0.023 ± 0.002	0.014 ± 0.002
	GZ3	0.004 ± 0.001	0.053 ± 0.041	0.037 ± 0.029
	GZ4	0.003 ± 0.000	0.027 ± 0.005	0.018 ± 0.003
	平均	0.003(B)	0.032(A)	0.022

注：同行括号内不同大写字母表示差异极显著($P < 0.01$)，不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。
 地上部加权平均含量 = (茎干重 × 茎含量 + 叶干重 × 叶含量)/(茎干重 + 叶干重)

Table 6. Two-tailed probability of TDIST function of leaf Cd content and multiple comparison table
表 6. 叶 Cd 含量 TDIST 函数两尾概率值与多重比较表(LSD 法)

品种	叶 Cd 含量 Ti.(mg/kg)	GZ2	GZ1	GZ4	GZ3
		3.00	2.88	2.21	1.53
GZ3	1.53	0.006**	0.009**	0.104	
GZ4	2.21	0.069	0.111		
GZ1	2.88	0.742			
GZ2	3.00				

Table 7. Two-tailed probability of TDIST function of leaf Cr content and multiple comparison table
表 7. 叶 Cr 含量 TDIST 函数两尾概率值与多重比较表(LSD 法)

品种	叶 Cr 含量 Ti.(mg/kg)	GZ4	GZ3	GZ2	GZ1
		5.85	4.12	3.97	3.52
GZ1	3.52	0.005**	0.307	0.437	
GZ2	3.97	0.012*	0.787		
GZ3	4.12	0.017*			
GZ4	5.85				

Table 8. Two-tailed probability of TDIST function of leaf Cr content and multiple comparison table
表 8. 地上部 Cr 含量 TDIST 函数两尾概率值与多重比较表(LSD 法)

品种	地上部 Cr 含量 Ti.(mg/kg)	GZ4	GZ3	GZ1	GZ2
		4.53	3.29	3.07	3.06
GZ2	3.06	0.016*	0.623	0.983	
GZ1	3.07	0.016*	0.638		
GZ3	3.29	0.030*			
GZ4	4.53				

3.4. 菌草品种重金属积累量比较

Cd 积累量比较: 由表 9 可知, 四个菌草品种平均单株茎 Cd 积累量为 1.1 mg/株, 排序为: 巨菌草 J1 > 巨菌草 > 紫菌草 > 莱牧 1 号, 品种间差异显著, 其中: 巨菌草 J1 和巨菌草均极显著高于莱牧 1 号, 巨菌草 J1 显著高于紫菌草, 其它品种间差异不显著(表 10)。四个菌草品种平均单株叶 Cd 积累量为 1.45 mg/株, 排序为: 巨菌草 > 巨菌草 J1 > 紫菌草 > 莱牧 1 号, 品种间差异未达显著水平。四个菌草品种平均单株地上部 Cd 积累量排序与叶相同, 品种间存在显著差异, 其中: 巨菌草极显著高于莱牧 1 号、显著高于紫菌草, 巨菌草 J1 显著高于莱牧 1 号, 其它品种间差异不显著(表 11)。T-test 检验表明, 四个菌草品种平均单株茎 Cd 积累量与叶 Cd 积累量之间没有统计学意义。

Pb 积累量比较: 四个菌草品种平均单株茎 Pb 积累量为 0.15 mg/株, 排序为: 巨菌草 > 巨菌草 J1 > 紫菌草 > 莱牧 1 号, 品种间差异极显著, 其中: 巨菌草 J1 和巨菌草均极显著高于莱牧 1 号, 紫菌草显著高于莱牧 1 号, 其它品种间差异不显著(表 12)。四个菌草品种平均单株叶 Pb 积累量和地上部 Pb 积累量分别为 4.37 mg/株、4.52 mg/株, 排序为: 巨菌草 > 巨菌草 J1 > 紫菌草 > 莱牧 1 号, 品种间差异未达显著水平。T-test 检验表明, 四个菌草品种平均单株叶 Pb 积累量显著高于茎。

Cr 积累量比较: 四个菌草品种平均单株茎 Cr 积累量为 0.68 mg/株, 排序为: 巨菌草 J1 > 巨菌草 > 紫菌草 > 莱牧 1 号, 品种间差异极显著, 其中: 巨菌草 J1 和巨菌草均极显著高于莱牧 1 号, 巨菌草 J1 显著高于紫菌草(表 13)。四个菌草品种平均单株叶 Cr 积累量和地上部 Cr 积累量分别为 2.26 mg/株、2.94 mg/株, 排序为: 巨菌草 > 巨菌草 J1 > 紫菌草 > 莱牧 1 号, 但品种间差异均未达显著水平。T-test 检验表明, 四个菌草品种平均单株叶 Cr 积累量显著高于茎。

As 积累量比较: 四个菌草品种平均单株茎 As 积累量为 0.022 mg/株, 排序为: 巨菌草 J1 > 巨菌草 > 紫菌草 > 莱牧 1 号, 品种间差异极显著, 其中: 巨菌草 J1 和巨菌草均极显著高于莱牧 1 号, 巨菌草 J1 显著高于紫菌草(表 14)。四个菌草品种平均单株叶 As 积累量和地上部 As 积累量分别为 0.650 mg/株、0.672

mg/株, 排序为: 巨菌草 > 巨菌草 J1 > 紫菌草 > 莱牧 1 号, 但品种间差异均未达显著水平。T-test 检验表明, 四个菌草品种平均单株叶 As 积累量显著高于茎。

Hg 积累量比较: 四个菌草品种平均单株茎 Hg 积累量为 0.001 mg/株, 排序为: 巨菌草 J1 > 巨菌草 > 紫菌草 > 莱牧 1 号, 品种间差异极显著, 其中: 巨菌草 J1 和巨菌草均极显著高于莱牧 1 号、显著高于紫菌草(表 15)。四个菌草品种平均单株叶和地上部 Hg 积累量分别为 0.650 mg/株、0.672 mg/株, 排序为: 巨菌草 > 巨菌草 J1 > 紫菌草 > 莱牧 1 号, 但品种间差异均未达显著水平。T-test 检验表明, 四个菌草品种平均单株叶 Hg 积累量极显著高于茎。

Table 9. Accumulation scale of heavy metals in stem and leaf of different strains of JUNCAO

表 9. 菌草品种地上部重金属积累量表(mg/株)

重金属	品种	茎积累量	叶积累量	地上部积累量
Cd	GZ1	1.63 ± 0.53	2.59 ± 1.04	4.22 ± 1.45
	GZ2	1.81 ± 0.13	1.95 ± 0.63	3.76 ± 0.50
	GZ3	0.22 ± 0.10	0.25 ± 0.06	0.47 ± 0.14
	GZ4	0.94 ± 0.23	1.02 ± 0.46	1.96 ± 0.67
	平均	1.1(a)	1.45(a)	2.60
Pb	GZ1	0.21 ± 0.01	7.47 ± 2.49	7.68 ± 2.50
	GZ2	0.23 ± 0.02	5.43 ± 1.62	5.66 ± 1.63
	GZ3	0.04 ± 0.01	1.161 ± 0.34	1.20 ± 0.35
	GZ4	0.11 ± 0.04	3.43 ± 1.42	3.54 ± 1.46
	平均	0.15(b)	4.37(a)	4.52
Cr	GZ1	1.08 ± 0.10	3.05 ± 0.88	4.12 ± 0.90
	GZ2	0.93 ± 0.18	2.50 ± 0.58	3.43 ± 0.74
	GZ3	0.13 ± 0.03	0.75 ± 0.36	0.87 ± 0.39
	GZ4	0.58 ± 0.28	2.77 ± 1.42	3.34 ± 1.70
	平均	0.68(b)	2.26(a)	2.94
AS	GZ1	0.032 ± 0.003	1.084 ± 0.464	1.116 ± 0.466
	GZ2	0.032 ± 0.005	0.798 ± 0.348	0.830 ± 0.351
	GZ3	0.006 ± 0.002	0.159 ± 0.039	0.165 ± 0.041
	GZ4	0.018 ± 0.008	0.557 ± 0.251	0.575 ± 0.258
	平均	0.022(b)	0.650(a)	0.672
Hg	GZ1	0.0014 ± 0.0001	0.0221 ± 0.0086	0.0235 ± 0.0086
	GZ2	0.0014 ± 0.0001	0.0149 ± 0.0040	0.0163 ± 0.0040
	GZ3	0.0003 ± 0.0002	0.0118 ± 0.0122	0.0121 ± 0.0124
	GZ4	0.0008 ± 0.0003	0.0130 ± 0.0077	0.0137 ± 0.079
	平均	0.0010(B)	0.0154(A)	0.0164

注: 同行括号内不同大写字母表示差异极显著($P < 0.01$), 不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Table 10. Two-tailed probability of TDIST function of stem Cd accumulation and multiple comparison
表 10. 茎 Cd 积累量 TDIST 函数两尾概率值与多重比较表(LSD 法)

品种	茎 Cd 积累量(mg/株)	GZ2	GZ1	GZ4	GZ3
		1.81	1.63	0.94	0.21
GZ3	0.21	0.004	0.006	0.079	
GZ4	0.94	0.045	0.092		
GZ1	1.63	0.618			
GZ2	1.81				

Table 11. Two-tailed probability of TDIST function of aboveground Cd accumulation and multiple comparison
表 11. 地上部 Cd 积累量 TDIST 函数两尾概率值与多重比较表(LSD 法)

品种	地上部 Cd 积累量(mg/株)	GZ1	GZ2	GZ4	GZ3
		4.22	3.76	1.96	0.47
GZ3	0.47	0.006	0.011	0.154	
GZ4	1.96	0.049	0.097		
GZ2	3.76	0.635			
GZ1	4.22				

Table 12. Two-tailed probability of TDIST function of stem Pb accumulation and multiple comparison
表 12. 茎 Pb 积累量 TDIST 函数两尾概率值与多重比较表(LSD 法)

品种	茎 Pb 积累量(mg/株)	A2	A1	A4	A3
		0.23	0.21	0.10	0.04
A3	0.04	0.000	0.001	0.050	
A4	0.10	0.003	0.006		
A1	0.21	0.537			
A2	0.23				

Table 13. Two-tailed probability of TDIST function of stem Cr accumulation and multiple comparison
表 13. 茎 Cr 积累量 TDIST 函数两尾概率值与多重比较表(LSD 法)

品种	茎 Pr 积累量(mg/株)	A1	A2	A4	A3
		1.08	0.93	0.58	0.13
A3	0.13	0.002	0.006	0.056	
A4	0.58	0.039	0.113		
A2	0.93	0.465			
A1	1.08				

Table 14. Two-tailed probability of TDIST function of stem As accumulation and multiple comparison
表 14. 茎 As 积累量 TDIST 函数两尾概率值与多重比较表(LSD 法)

品种	茎 As 积累量(mg/株)	A2	A1	A4	A3
		0.032	0.032	0.018	0.006
A3	0.006	0.003	0.003	0.070	
A4	0.018	0.040	0.048		
A1	0.032	0.895			
A2	0.032				

Table 15. Two-tailed probability of TDIST function of stem Hg accumulation and multiple comparison
表 15. 茎 Hg 积累量 TDIST 函数两尾概率值与多重比较表(LSD 法)

品种	茎 Hg 积累量(mg/株)	A2	A1	A4	A3
		0.0014	0.0014	0.0008	0.0003
A3	0.0003	0.001	0.001	0.069	
A4	0.0008	0.013	0.016		
A1	0.0014	0.878			
A2	0.0014				

3.5. 菌草 Cd 污染土壤修复应用

巨菌草为高产型的 Cd 超富集植物[6], 2018~2020 年在株洲市茶陵县 Cd 染污土壤结构调整中, 生产示范 1000 亩, 土壤 Cd 背景值为 0.6 mg/kg, 生产中以沼气液肥为主, 亩栽巨菌草 2000 株左右, 巨菌草产品主要用于生物发电, 亩生产效益 4000 元左右。2019 年 12 月 25 号, 进行了田间多点土壤取样, 检测结果表明, 采用 ICPMS 与石墨炉法的土壤 Cd 含量分别为 0.558 mg/kg、0.557 mg/kg, 较背景值降低 7.08%, 平均每年降低 3.54%, 降 Cd 效果明显, 实现了“零”成本治理, 具有广泛的应用前景。

4. 结论与讨论

1) 研究表明, 巨菌草和巨菌草 J1 对 Cd 具有很强的富集能力, 紫菌草 Cr 含量、莱牧 1 号 Hg 含量远高于其它参试品种, 在 Cr 和 Hg 污染土壤修复治理中应该具有很好的应用潜力。四个菌草品种地上部鲜重差异极显著、干重差异显著, 鲜重和干重均表现为: 巨菌草 > 巨菌草 J1 > 紫菌草 > 莱牧 1 号。四个菌草品种地上部 Cd 积累量, 巨菌草极显著高于莱牧 1 号、显著高于紫菌草, 巨菌草 J1 显著高于莱牧 1 号。Pb、Cr、As、Hg 积累量品种间均无显著差异, 这可能与试验土壤为 Cd 单一污染的酸性土壤, 而 Pb、Cr、As、Hg 的含量较低有关。因此, 不同菌草品种在 Pb、Cr、As、Hg 重度污染土壤情况下对 Pb 等重金属的富集能力, 有待进一步的研究。

2) 莱牧 1 号菌草品种于 2013 年从莱索托引进, 据福建农林大学生命科学学院研究报道, 该品种亩产量可达 16.8 吨, 与绿州一号相当。而在本试验中, 莱牧 1 号表现生长势较弱, 生物产量较低, 其原因有待进一步的试验。

3) 鉴于植物修复对重金属的富集量是由植物重金属含量和生物量两个因素共同作用的结果, 因此, 建议在 Cd、Pb、As 污染治理中以巨菌草为主, 对 Cr 污染治理而言应首选紫菌草, 对 Hg 污染治理而言可以优先选择莱牧 1 号和巨菌草, 重点是提高紫菌草和莱牧 1 号的生物产量, 以提高植物修复的效果。

参考文献

- [1] Meers, E., Ruttens, A., Hopgood, M., et al. (2005) Potential of *Brassic rapa*, *Cannabis sativa*, *Helianthus annuus* and *Zea mays* for Phytoextraction of Heavy Metals from Calcareous Dredged Sediment Derived Soils. *Chemosphere*, **61**, 561-572. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.02.026>
- [2] 薛生国, 陈英旭, 林琦. 中国首次发现的锰超积累植物——商路[J]. 生态学报, 2003, 23(5): 935-937.
- [3] 常青山, 马祥庆. 重金属超富集植物筛选研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(z1): 330-335.
- [4] Mani, D., Sharma, B. and Bull, C.K. (2007) Phytoaccumulation, Interaction Toxicity and Remediation of Cadmium from *Helianthus annuus* L.(Sunflower). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, **79**, 71-79. <https://doi.org/10.1007/s00128-007-9153-3>
- [5] Zhuang, P., Yang, Q.W., Wang, H.B., et al. (2007) Phytoextraction of Heavy Metal by Eight Plant Species in the Field. *Water and Soil Pollutants*, **184**, 235-242. <https://doi.org/10.1007/s11270-007-9412-2>
- [6] 龚建华, 薛合伦, 康敏, 毛莎莎, 邓雅文. 巨菌草的重金属富集特性及土壤修复效果[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2019, 45(2): 154-161.