

许艳萍, 吕 品, 张庆滢, 等. 不同工业大麻品种对田间5种重金属吸收积累特性的比较[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(1): 106–114.

XU Yan-ping, LÜ Pin, ZHANG Qing-ying, et al. Comparison of the absorption and accumulation characteristics of five heavy metals among different industrial hemp varieties[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(1): 106–114.

不同工业大麻品种对田间5种重金属吸收积累特性的比较

许艳萍¹, 吕 品¹, 张庆滢¹, 郭 蓉¹, 邓 纲², 郭鸿彦¹, 杨 明^{1*}

(1. 云南省农业科学院经济作物研究所, 昆明 650205; 2. 云南大学农学院, 昆明 650500)

摘 要: 为了分析不同工业大麻品种对不同重金属富集与转移的差异, 以云南5个工业大麻主栽品种(y_{m1}~y_{m5})为试验材料, 修复云南矿区重金属污染严重的农田。结果表明: 5个工业大麻品种中, 成熟期的根系对Pb和Cd吸收量最大的为y_{m1}, 对As、Cu和Zn吸收量最大的为y_{m3}, 而y_{m5}对Pb、Cu、Cd和Zn吸收量皆最小; 茎叶对As、Cu和Cd吸收量最大的为y_{m3}, 对Pb和Zn吸收量最大的分别为y_{m1}和y_{m2}; 种子对Pb和Cd吸收量最大的为y_{m2}, 对As和Cu吸收量最大的为y_{m5}, 对Zn吸收量最大则为y_{m3}, y_{m1}种子对Pb、As和Cu吸收量皆最小, 对Cd、Zn吸收最小的品种分别为y_{m4}和y_{m2}; 5个品种表现为除Cu外, 茎叶富集系数皆大于根, 根系向茎叶的转运系数均大于1。研究表明, y_{m1}可作为Pb污染修复植物, y_{m3}可作为As、Zn、Cu和Cd污染修复的适推品种。

关键词: 工业大麻; 重金属; 积累特性; 生物修复

中图分类号: X53

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2020)01-0106-09

doi: 10.13254/j.jare.2019.0056

Comparison of the absorption and accumulation characteristics of five heavy metals among different industrial hemp varieties

XU Yan-ping¹, LÜ Pin¹, ZHANG Qing-ying¹, GUO Rong¹, DENG Gang², GUO Hong-yan¹, YANG Ming^{1*}

(1. Industrial Crop Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China; 2. School of Agriculture, Yunnan University, Kunming 650500, China)

Abstract: This study examined variations in the enrichment and transfer of heavy metals by different industrial hemp varieties. Five main varieties (y_{m1}~y_{m5}) of industrial hemp were used as experimental materials to repair farmland seriously polluted by heavy metals in mining areas of Yunnan Province. Among the five industrial hemp varieties, y_{m1} absorbed the most Pb and Cd, y_{m3} absorbed the most As, Cu, and Zn, while y_{m5} had the lowest absorption of Pb, Cu, Cd, and Zn in mature roots. The maximum absorption of As, Cu, and Cd by stems and leaves was observed in y_{m3}, and the maximum absorption of Pb and Zn occurred in y_{m1} and y_{m2}, respectively. The maximum absorption of Pb and Cd by seeds was seen in y_{m2}, of As and Cu was seen in y_{m5}, and of Zn was seen in y_{m3}. Seeds of y_{m1} showed the least absorption of Pb, As, and Cu, and the least absorption of Cd and Zn were seen in the seeds of y_{m4} and y_{m2}, respectively. The enrichment coefficients of stems and leaves in the five varieties were greater than that of roots, except Cu. The transport coefficients of roots to stems and leaves were all greater than 1. In summary, y_{m1} can be used for Pb repair, and y_{m3} is suitable for As, Zn, Cu, and Cd repair.

Keywords: industrial hemp; heavy metals; accumulation characteristics; bioremediation

收稿日期: 2019-01-26 录用日期: 2019-05-27

作者简介: 许艳萍(1980—), 女, 云南昭通人, 副研究员, 主要从事大麻育种及土壤重金属污染修复研究。E-mail: cyn080328@126.com

*通信作者: 杨 明 E-mail: ymhemp@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(31660351); 国家麻类产业技术体系建设项目(CARS-19-E05); 云南省自然科学基金项目(2016FB068)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (31660351); China Agricultural Research System for Bast and Leaf Fiber Crops (CARS-19-E05); The Natural Science Foundation of Yunnan Pvince, China(2016FB068)

近年来,金属采冶、农药化肥的施用、工业生产以及电子垃圾的拆解等活动造成十分严峻的土壤环境污染问题。尤其是矿区周边的农田,由于尾矿堆的废液、废渣等长期受风雨侵蚀和淋滤^[1],土壤积累大量的重金属^[2-3]。云南省矿产资源丰富,采矿业促进经济发展的同时,对环境造成了严重的污染,引起周边农田土壤中多种重金属超标,重金属被种植的植物吸收、富集,并通过食物链进入人体,最终严重危害人类健康^[4]。矿山开采过程中废弃物产生量大,加之开采过度 and 缺乏有效治理,导致生态破坏问题十分严峻,因此我国矿区重金属污染治理迫在眉睫。

植物修复法是目前治理土壤环境污染的一种绿色、经济、安全的方法^[5]。其利用植物吸收和累积大量重金属的能力降低土壤污染物的浓度,不会引起土壤发生相关化学反应而产生副作用^[6]。决定植物修复能力的关键因素是植物生物产量和吸收重金属能力^[7],目前发现的超积累植物大多数存在生物量小、生态适应性差、育苗难、富集能力单一、经济价值不高等缺点,达不到理想的修复效果^[8-9]。因此,亟需寻求一种生物量大、吸收重金属能力强的植物进行土壤重金属污染修复。

工业大麻被公认是一种高生物量、生长快、富集重金属能力强且极具经济利用价值的物种^[10-12]。其生长快速,3个月生长期即可快速达到很高的生物量,根系庞大,且可大量吸收多种重金属,对复合重金属污染的土壤具有很好的修复潜力^[7],满足目前植物修复技术重点转向的要求(寻找生物量较大、生长适应能力强、对重金属有较强吸收积累特性的非食用的经济能源作物等)。研究表明使用大麻类型的经济作物进行修复比利用一般超富集植物更经济、可靠、有效^[13-15]。因此工业大麻作为最适宜矿区重金属污染修复的理想候选作物之一,备受研究者关注。有研究表明,同一种作物不同品种、不同器官对重金属的吸收与富集存在一定差异,如苧麻、蓖麻、小麦、水稻、玉米等^[16-20],不同基因型的工业大麻品种对重金属的吸收也有一定差异。目前,关于不同工业大麻品种在大田条件下对土壤重金属的富集特征的研究较少。因

此,本研究以云南省农业科学院经济作物研究所选育的5个工业大麻品种为试验材料,种植于典型重金属污染矿区附近农田,研究不同工业大麻品种对重金属Pb、As、Cu、Cd和Zn的累积和转运差异,以期筛选具有高重金属积累潜力的工业大麻品种,为治理重金属污染农田提供可利用工业大麻种质资源,也为工业大麻修复重金属土壤提供相关数据支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地为云南某矿区,该矿区附近农田已遭受不同程度的重金属污染,在对矿区周边几个村的农田土壤重金属污染调查和风险评估的基础上,选取代表该区域重金属污染水平的农田(103°14'59.45"E, 23°24'8.66"N,海拔1321 m)开展试验,该农田为严重重金属污染地区,其土壤基本理化性质见表1。

1.2 试验设计

以云南省农业科学院经济作物研究所选育的工业大麻品种云麻1号、云麻2号、云麻3号、云麻4号、云麻5号为供试品种,分别编号为ym1、ym2、ym3、ym4、ym5,其中ym2为早熟型品种,ym3和ym4为中熟型品种,ym1和ym5为晚熟型品种。试验采用完全随机区组设计,分为3个区组,每个区组5个小区,小区面积为30 m²,各大麻品种完全随机排列,采用纤维型植物种植模式,行距为30 cm,小区之间留80 cm的道路。以复合肥600 kg·hm⁻²(N:P:K=15:15:15)作为基肥;在3~4对真叶期,以90 kg·hm⁻²尿素(含N 46%)为提苗肥。田间管理按常规管理方式进行。

1.3 样品采集和处理方法

采用5点取样法,采集土壤和工业大麻样品。土壤样品取自耕作层0~20 cm,将每个小区采集的5点的土样混合装入塑料袋,每个样点的土样为1 kg,每个小区土壤样品为1个。在工业大麻成熟期采集工业大麻样品,每个小区采样10株,晾干后分不同器官(根、茎、叶和籽粒)制备样品,105℃下杀青0.5 h,70℃烘箱烘干至恒质量,用电子天平称取各部分干质量,烘干样品粉碎后备测。用V_{HNO₃}:V_{HClO₄}=5:1的混

表1 农田土壤的基本理化性质

Table 1 Physical-chemical properties of field soil

pH值	有机质 Organic matter/g·kg ⁻¹	全氮 Total N/%	全磷 Total P/%	全钾 Total K/%	水解性氮 Hydrolysable N/ mg·kg ⁻¹	有效磷 Availabe P/ mg·kg ⁻¹	速效钾 Availabe K/ mg·kg ⁻¹	重金属含量 Heavy metal contents/mg·kg ⁻¹				
								Pb	As	Cu	Cd	Zn
5.23	28.5	0.146	0.076	3.48	112.8	73	175	265.5	93.9	56.1	2.35	118.7

合液进行微波消解、定容。样品中的重金属含量检测方法:Pb、Cd采用火焰原子吸收分光光度法(GB/T 17141—1997)测定;As采用原子荧光法(GB/T 22105.2—2008)测定;Cu、Zn含量采用火焰原子吸收分光光度法(GB/T 17138—1997)测定。

1.4 数据统计分析

各工业大麻品种重金属富集系数(BCF)和转运系数(TF)的计算公式如下:

$BCF = \text{工业大麻各部位重金属含量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) / \text{土壤中重金属含量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$

$TF = \text{工业大麻地上各部位重金属含量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) / \text{根部重金属含量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$

采用Excel 2007进行数据作图,SPSS 19.0对实验数据进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 工业大麻成熟期根系重金属含量差异

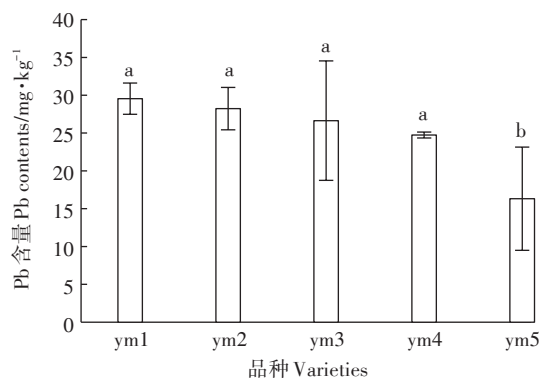
5个工业大麻品种在Pb、As、Cu、Cd、Zn复合污染下,整个生育期植株正常生长,未呈现任何中毒的症状,如植株矮小、叶片黄化卷曲或生育期推迟等现象,植株表现出很强的耐性和抗性,且生物量也未受影响。

由图1~图5可以看出,5个工业大麻品种根系对5种重金属的吸收量不同,品种间呈现不同差异。从图1中可见,工业大麻根对Pb的吸收量为16.32~29.55 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,ym1对Pb吸收量最大,表现出较强Pb吸收特性。从图2可知,工业大麻根对As的吸收量为14.98~39.89 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,ym3吸收量最大,并显著高于其余4个品种,但ym1、ym2和ym5三个品种间差异不显著。从图3中可知,根对Cu的吸收量为15.70~27.29 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其吸收量差异与As类似,其中ym3吸收量最大。从图4中可知,种子成熟期工业大麻根对Cd的吸收量为1.01~1.45 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,成熟期吸收量最大的为ym1,品种间差异不显著。由图5可知,成熟期工业大麻根对Zn的吸收量为16.24~28.09 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其中ym3的吸收量最大,且显著高于其他4个品种;ym5吸收量最小,显著低于其他4个品种;ym1与ym4差异显著,但ym1与ym2、ym4与ym2之间的差异不显著。

综上所述,5个工业大麻品种中,成熟期的根系对Pb和Cd吸收量最大的为ym1,对As、Cu和Zn吸收量最大的均为ym3,而ym5对Pb、Cu、Cd和Zn皆表现为吸收量最小。

2.2 工业大麻成熟期茎叶重金属含量差异

由图6~图10可以看出,工业大麻茎叶对5种重



不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同
The different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same below

图1 不同大麻品种成熟期根系Pb含量

Figure 1 Pb contents in roots of different hemp varieties at mature stage

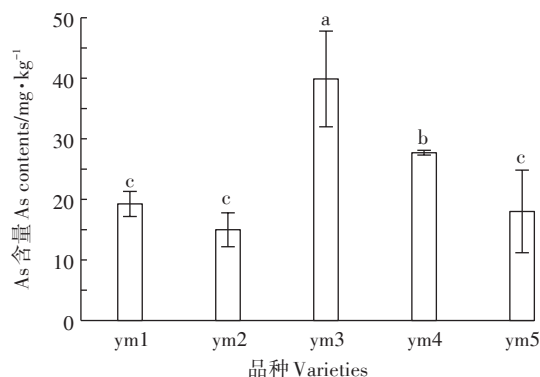


图2 不同大麻品种成熟期根系As含量

Figure 2 As contents in roots of different hemp varieties at mature stage

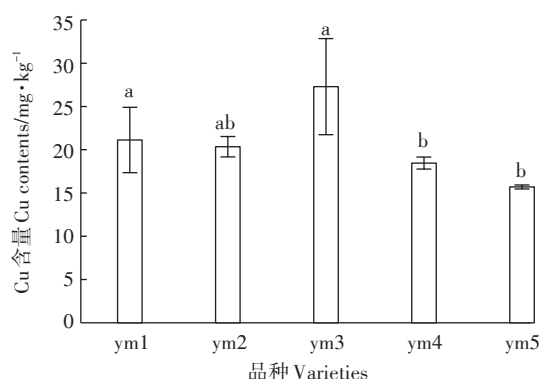


图3 不同大麻品种成熟期根系Cu含量

Figure 3 Cu contents in roots of different hemp varieties at mature stage

金属的吸收量不同,5个品种间有明显的差异,且茎叶的重金属含量普遍高于根系。从图6中可见,工业大麻茎叶对Pb的吸收量为38.60~48.82 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其中

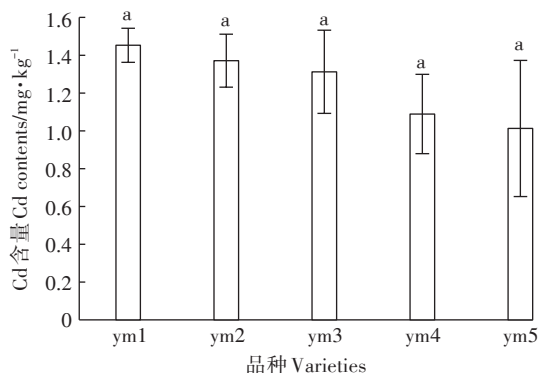


图4 不同大麻品种成熟期根系Cd含量

Figure 4 Cd contents in roots of different hemp varieties at mature stage

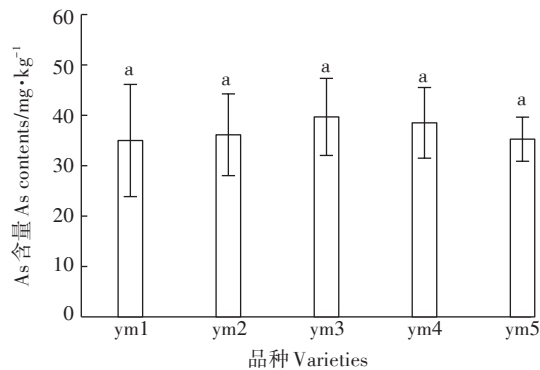


图7 不同大麻品种成熟期茎叶As含量

Figure 7 As contents in stem and leaf of different hemp varieties at mature stage

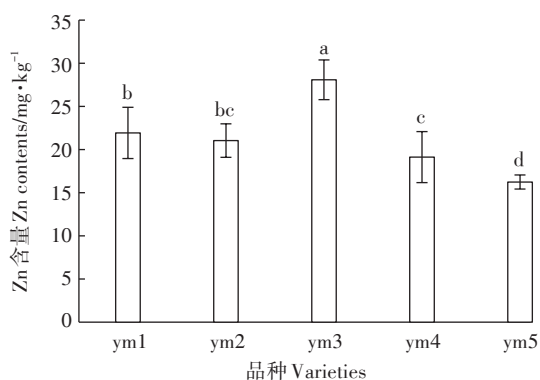


图5 不同大麻品种成熟期根系Zn含量

Figure 5 Zn contents in roots of different hemp varieties at mature stage

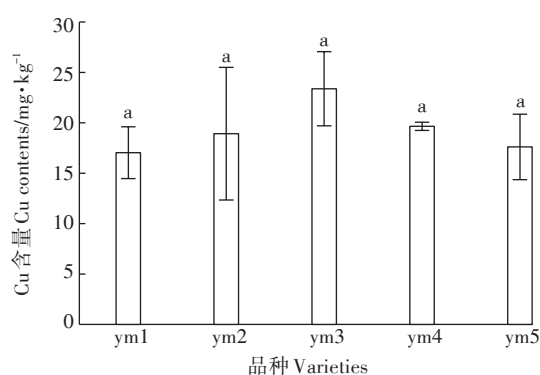


图8 不同大麻品种成熟期茎叶Cu含量

Figure 8 Cu contents in stem and leaf of different hemp varieties at mature stage

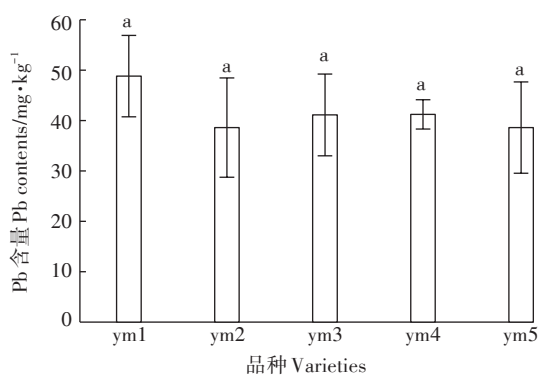


图6 不同大麻品种成熟期茎叶Pb含量

Figure 6 Pb contents in stem and leaf of different hemp varieties at mature stage

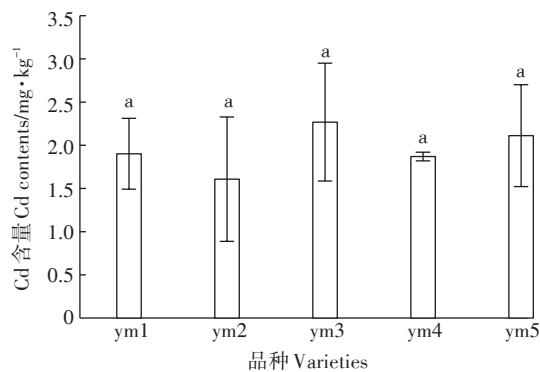


图9 不同大麻品种成熟期茎叶Cd含量

Figure 9 Cd contents in stem and leaf of different hemp varieties at mature stage

ym1吸收量最大,但品种间差异不显著。从图7~图9中可见,成熟期大麻茎叶对As、Cu和Cd的吸收量分别为35.00~39.68、17.04~23.38 mg·kg⁻¹和1.61~2.27 mg·kg⁻¹,吸收量最大的皆为ym3,但品种间差异不显著。从图10可见,成熟期大麻茎叶对Zn的吸收量为

32.48~52.96 mg·kg⁻¹,吸收量最大的品种是ym2,且显著高于ym4,其他品种间差异不显著。

综上所述,5个工业大麻品种中,在种子成熟期茎叶对As、Cu和Cd吸收量最大的为ym3,对Pb和Zn吸收量最大的分别为ym1和ym2。5个品种的茎叶对

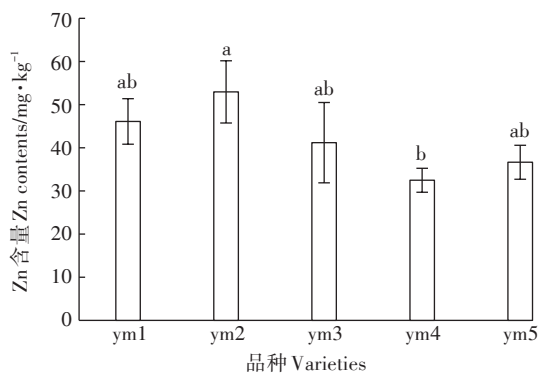


图10 不同大麻品种成熟期茎叶Zn含量

Figure 10 Zn contents in stem and leaf of different hemp varieties at mature stage

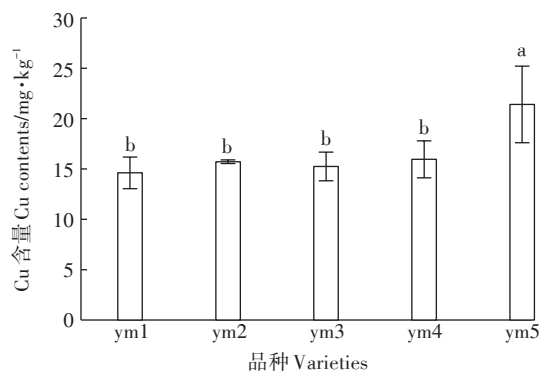


图13 不同大麻品种籽粒中Cu含量

Figure 13 Cu contents in seeds of different hemp varieties

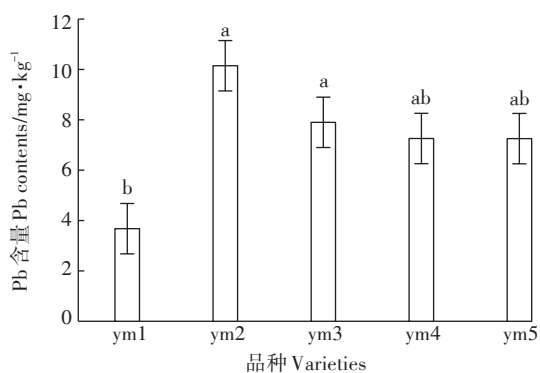


图11 不同大麻品种籽粒中Pb含量

Figure 11 Pb contents in seeds of different hemp varieties

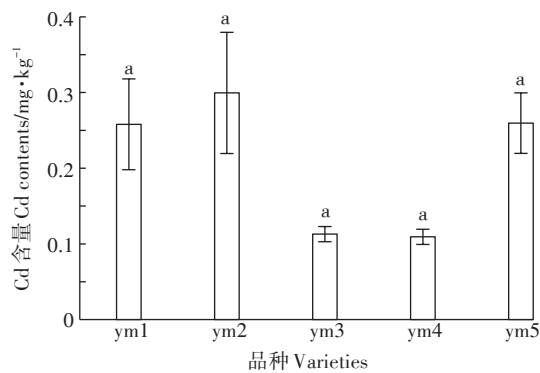


图14 不同大麻品种籽粒中Cd含量

Figure 14 Cd contents in seeds of different hemp varieties

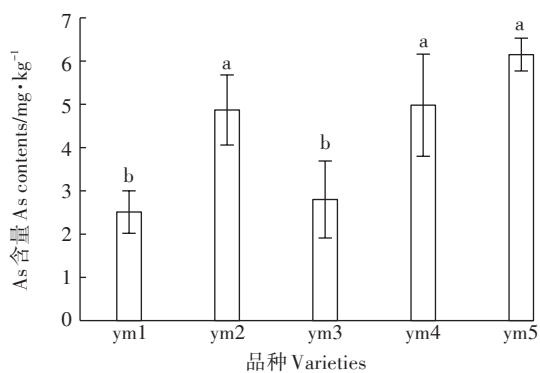


图12 不同大麻品种籽粒中As含量

Figure 12 As contents in seeds of different hemp varieties

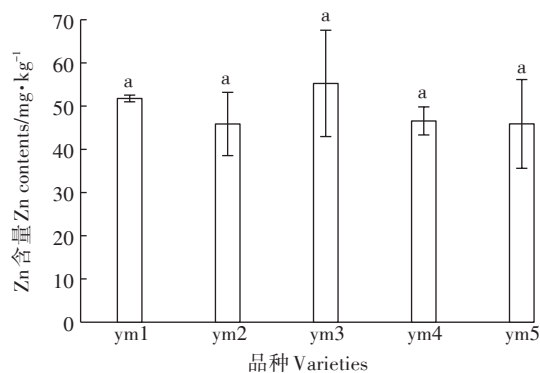


图15 不同大麻品种籽粒中Zn含量

Figure 15 Zn contents in seeds of different hemp varieties

Pb、As、Cu、Cd的吸收表现为品种间差异不显著,仅Zn表现为差异显著,且ym4显著低于ym2。

2.3 工业大麻籽粒中重金属含量差异

从图11~图15可以看出,不同品种籽粒对5种重金属的吸收量不同,5个品种间存在一定的差异。从图11中可见,工业大麻籽粒对Pb的吸收量为3.68~10.15 mg·kg⁻¹,吸收量最大的是ym2,最小的是ym1,

且显著低于ym2和ym3。从图12可知,籽粒对As的吸收量为2.51~6.15 mg·kg⁻¹,吸收量最大的是ym5,最小的是ym1,且显著低于ym2、ym4和ym5。从图13中可见,籽粒对Cu的吸收量为14.62~21.41 mg·kg⁻¹,吸收量最大的是ym5,最小的是ym1,其中ym5显著高于其他4个品种。从图14中可见,大麻籽粒对Cd的吸收量为0.11~0.30 mg·kg⁻¹,吸收量最大的是ym2,

最小的是ym4,但品种间差异不显著。从图15中可见,大麻籽粒对Zn的吸收量为45.86~55.26 mg·kg⁻¹,吸收量最大的是ym3,最小的是ym2,品种间差异不显著。

综上所述,籽粒对Pb和Cd吸收量最大的为ym2,对As和Cu吸收量最大的为ym5,对Zn则为ym3。同时籽粒对Pb、As和Cu皆表现为ym1吸收量最小,对Cd、Zn吸收量最小品种分别为ym4和ym2。

2.4 工业大麻对不同重金属富集、转运的品种差异

2.4.1 工业大麻成熟期重金属富集的品种差异

由表2可知,在成熟期,5个工业大麻品种对土壤中5种重金属的吸收能力存在差异。其中ym1根对Pb富集能力最强,ym5最低,显著低于ym1,其他品种间皆差异不显著;ym1茎叶对Pb富集能力最强,5个品种间差异不显著;ym1籽粒富集Pb能力最弱,与ym4、ym5差异不显著,但显著低于ym2、ym3。ym3根系对As的富集能力最强,显著高于其他4个品种,ym2和ym5根系富集能力最差;但各品种茎叶对As的富集系数差异不显著;籽粒对As富集能力最弱的为ym1和ym3,显著低于其他三个品种。ym3根系对Cu

富集能力最强,显著高于ym4和ym5;不同品种茎叶富集Cu能力差异不显著;籽粒对Cu富集能力最低的为ym1,最高的是ym5,显著高于其他4个品种,其他4个品种间差异不显著。5个品种的不同器官对Cd富集能力差异均不显著,根系和茎叶对Cd富集系数最大的品种分别是ym1和ym3,而ym3和ym4籽粒的Cd富集能力低于其他品种。ym3根系对Zn富集能力最强,显著高于其他4个品种,其中ym5富集能力最低,且显著低于其他4个品种;ym2茎叶对Zn富集能力最强,显著高于ym4和ym5,其中ym4富集能力最低。不同品种籽粒对Zn富集能力差异不显著。

2.4.2 工业大麻成熟期重金属转运的品种差异

从转运系数(表3)看,5个工业大麻品种Pb的茎叶转运系数都大于1,籽粒转运系数均小于1,说明这5个品种Pb由根向茎叶的转运能力较强,根向籽粒的转运能力较弱。其中ym5由根向茎叶转运Pb的能力最强,显著高于其他品种;根向籽粒的转运能力以ym5为最高,显著高于ym1和ym3,ym1最低。5个工业大麻品种中As在茎叶转运系数都大于1,籽粒转运系数均小于1,说明这5个品种由根向茎叶转运As的

表2 成熟期重金属在不同器官的富集系数(BCF)

Table 2 Bio concentration factors(BCF) of heavy metals in different hemp organs at mature stage

品种 Variety	Pb			As			Cu			Cd			Zn		
	根 Root	茎叶 Stem and leaf	籽粒 Seed	根 Root	茎叶 Stem and leaf	籽粒 Seed	根 Root	茎叶 Stem and leaf	籽粒 Seed	根 Root	茎叶 Stem and leaf	籽粒 Seed	根 Root	茎叶 Stem and leaf	籽粒 Seed
ym1	0.17a	0.23a	0.02b	0.21c	0.38a	0.03b	0.39ab	0.31a	0.27b	0.63a	0.82a	0.11a	0.20b	0.43ab	0.48a
ym2	0.13ab	0.18a	0.05a	0.16c	0.39a	0.05a	0.38ab	0.35a	0.29b	0.59a	0.70a	0.13a	0.20bc	0.46a	0.43a
ym3	0.12ab	0.19a	0.04a	0.43a	0.43a	0.03b	0.50a	0.43a	0.28b	0.57a	0.98a	0.05a	0.26a	0.38abc	0.51a
ym4	0.11ab	0.19a	0.03ab	0.30b	0.41a	0.05a	0.34b	0.36a	0.30b	0.47a	0.81a	0.05a	0.18c	0.30c	0.43a
ym5	0.08b	0.18a	0.03ab	0.19c	0.38a	0.07a	0.29b	0.33a	0.40a	0.44a	0.91a	0.11a	0.15d	0.34bc	0.43a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Notes: The different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

表3 成熟期重金属在不同器官的转运系数(TF)

Table 3 Transfer factors(TF) of heavy mentals in different hemp organs at mature stage

品种 Variety	Pb		As		Cu		Cd		Zn	
	茎叶/根 Stem and leaf/Root	籽粒/根 Seed/Root	茎叶/根 Stem and leaf/Root	籽粒/根 Seed/Root	茎叶/根 Stem and leaf/Root	籽粒/根 Seed/Root	茎叶/根 Stem and leaf/Root	籽粒/根 Seed/Root	茎叶/根 Stem and leaf/Root	籽粒/根 Seed/Root
ym1	1.65b	0.14c	1.81bc	0.14bc	0.84a	0.72bc	1.30b	0.18ab	2.15ab	2.39a
ym2	1.33b	0.37ab	2.48a	0.34a	0.91a	0.77bc	1.23b	0.21ab	2.38a	2.19a
ym3	1.18b	0.23bc	1.00d	0.07c	0.87a	0.58c	1.71ab	0.10b	1.48c	1.99a
ym4	1.54b	0.29abc	1.38cd	0.18b	1.07a	0.86b	1.76ab	0.10b	1.71bc	2.48a
ym5	2.42a	0.50a	1.97ab	0.35a	1.12a	1.37a	2.24a	0.28a	2.25ab	2.82a

能力较强,根向籽粒的转运能力较弱。其中ym2由根向茎叶转运As的能力最强,显著高于ym1、ym3和ym4,ym3最低;根向籽粒转运As的能力则以ym5为最高,显著高于ym1、ym3和ym4,ym3最低。ym4、ym5中Cu的茎叶转运系数大于1,说明其从根向茎叶转运Cu的能力较强,ym5籽粒的转运系数大于1,表明其从根向籽粒转运Cu的能力较强,但与其他品种间差异不显著。根向籽粒转运Cu的能力以ym5为最高,显著高于其他4个品种,ym3则最低。5个工业大麻品种中Cd的茎叶转运系数都大于1,籽粒转运系数均小于1,说明这5个品种由根向茎叶转运Cd的能力较强,根向籽粒转运Cd的能力较弱。其中ym5由根向茎叶转运Cd的能力最强,显著高于ym1和ym2;根向籽粒转运Cd的能力以ym5为最高,显著高于ym3和ym4。5个工业大麻品种中Zn在茎叶和籽粒中的转运系数都大于1,说明5个品种由根向茎叶转运Zn的能力较强,且籽粒转运系数大于1。其中ym2由根向茎叶转运Zn的能力最强,显著高于ym3和ym4;根向籽粒的转运能力在各品种间差异不显著。

3 讨论

3.1 不同工业大麻品种对土壤中重金属积累差异分析

近年来,由于工业污染加剧、灌溉用水质量下降和化肥使用不当等,土壤重金属污染严重,给有限的耕地资源造成严重的损失^[21],如何选择适合重金属污染土壤的经济、安全的绿色修复植物是当今研究的热点。本研究发现工业大麻品种ym1根茎叶对Pb吸收量最大;ym3根茎叶对As、Zn、Cu和Cd吸收量最大;工业大麻籽粒作为食品开发主要器官,其重金属含量直接影响食品开发,本研究发现ym1的成熟籽粒对Pb、As和Cu的吸收量最小,ym4对Cd的吸收量最小,ym2对Zn的吸收量最小,由此可知ym1最适合作为Pb的修复品种,ym3最适宜作为As、Zn、Cu和Cd的修复植物(籽粒重金属含量与含量最小品种均差异不显著)。5个品种不同器官对不同重金属的富集系数也表明,在根系中,ym1对Pb富集能力最强,ym3对As、Cu和Zn的富集能力最强;而5个品种不同器官对Cd富集能力差异不显著,且除Cu外,5个品种茎叶富集系数皆大于根,即地上部分富集重金属能力较强。由以上结果可以看出不同品种对不同重金属的积累方式不同,这与玉米、蔬菜等作物相似^[22-24]。除Cu外,其余4种重金属在5个品种中的根系向茎叶的转运系数均大于1。

3.2 不同工业大麻品种对重金属富集系数和转移系数差异分析

除Cu外5个品种茎叶对5种重金属的富集系数均大于根;5个工业大麻品种的籽粒对Pb富集系数均小于0.05,对As的富集系数小于0.1,但对Cu、Cd、Zn的富集系数都较大,这说明大麻吸收的Pb、As在可食部位籽粒的富集量少,从而可以降低进入食物链比例。这说明大麻可以通过抑制秸秆中Pb、As向籽粒转运来降低籽粒中Pb、As含量,但对Cu、Cd、Zn的抑制作用不明显,这与前人的研究结果相似^[25-28]。同时本研究发现除Cu外大麻由根向茎叶转运系数皆大于1,表明工业大麻茎叶可以实现重金属由根部向茎叶大量转运,从而实现生物修复的目的。研究发现根系和茎叶重金属富集能力最强的为ym3,富集能力最小的皆为ym5,然而转运能力则表现相反,表现为ym5转运能力较强,而ym3转运能力较差。

3.3 不同工业大麻品种对重金属污染土壤的修复分析

研究表明同种大麻对不同重金属的富集能力不同,不同大麻品种对同一重金属的富集能力也不同,推测这可能是由大麻本身的生理特性、生长环境以及重金属在土壤-大麻中的迁移方式共同决定的。目前,筛选重金属生物修复的最适宜植物尚无明确的标准,本研究认为筛选重金属超富集大麻的标准是:根茎叶重金属含量高,纤维及籽粒重金属含量较低,且生物量大($>1.2 \text{ t} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$)。本研究结果表明:大麻对5种重金属的吸附能力均较强,但由于大麻籽粒中Cu、Cd、Zn含量较高,远远超出了食品中重金属限量标准(GB 2762—2017),而大麻籽粒中Pb、As含量较低,基本符合使用标准,其中ym1对Pb的富集能力最强,ym3最适宜作为As、Zn、Cu和Cd重金属修复植物,ym1和ym3在云南矿区具有Pb、As高积累潜力,适宜在云南Pb、As污染的地区推广种植。

4 结论

(1)对5个工业大麻品种吸收重金属的差异研究发现,重金属在工业大麻不同器官的含量分布表现为:Pb、As、Cd为茎叶>根>籽粒,Zn为籽粒>茎叶>根,Cu为根>茎叶>籽粒。且Pb、As在籽粒中的含量相当低,而在根和茎叶中的含量比较高;Cu、Zn在籽粒中的含量较高,其中Cu大量分布在工业大麻植株的根、茎叶和籽粒中,Zn在籽粒中的含量明显高于其他器官。

(2)5个工业大麻品种中,在成熟期的根系中,

ym1对Pb和Cd吸收量最大,ym3对As、Cu和Zn吸收量最大;在茎叶中,ym3对As、Cu和Cd吸收量最大,ym1和ym2对Pb、Zn吸收量最大;籽粒中,ym2对Pb和Cd吸收量最大,ym5对As和Cu吸收量最大,ym3对Zn吸收量最大,同时籽粒对Pb、As和Cu皆表现为ym1吸收量最小。

(3)ym1对Pb的富集能力最强,ym3最适宜作为As、Zn、Cu和Cd重金属修复植物,ym1和ym3在云南矿区具有Pb、As高积累潜力,适宜在云南Pb、As污染的地区推广种植。

参考文献:

- [1] 刘月莉,伍钧,唐亚,等.四川甘洛铅锌矿区优势植物的重金属含量[J].生态学报,2009,29(4):2020-2026.
LIU Yue-li, WU Jun, TANG Ya, et al. An investigation of heavy-metal concentration in dominant plant species in a zinc lead mining area in Ganluo County of Sichuan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4):2020-2026.
- [2] 秦丽,祖艳群,李元,等.会泽铅锌矿渣堆周边7种野生植物重金属含量及累积特征研究[J].农业环境科学学报,2013,32(8):1558-1563.
QIN Li, ZU Yan-qun, LI Yuan, et al. Heavy metal contents and accumulation characteristic of seven wild plants from the slagheap surrounding of Huize lead-zinc tailings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(8):1558-1563.
- [3] Henriques F S, Fernandes J C. Metal uptake and distribution in rush (*Juncus conglomeratus* L.) plants growing in pyrites mine tailings at Lousal, Portugal[J]. *The Science of the Total Environment*, 1991, 102:253-260.
- [4] 程先锋,宋婷婷,陈玉,等.滇西兰坪铅锌矿区土壤重金属含量的高光谱反演分析[J].岩石矿物学杂志,2017,36(1):60-69.
CHENG Xian-feng, SONG Ting-ting, CHEN Yu, et al. Retrieval and analysis of heavy metal content in soil based on measured spectra in the Lanping Zn-Pb mining area, western Yunnan Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2017, 36(1):60-69.
- [5] Sekhar K C, Kamala C T, Chary N S, et al. Potential of *Hemidesmus indicus* for phytoextraction of lead from industrially contaminated soils[J]. *Chemosphere*, 2005, 58:507-514.
- [6] Piotrowska-Cyplik A, Czarnecki Z. Phytoextraction of heavy metals by hemp during anaerobic sewage sludge management in the non-industrial sites[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2003, 12(6):779-784.
- [7] Huang J W, Chen J, Breti W R, et al. Phytoremediation of lead-contaminated soils: Role of synthetic chelates in lead phytoextraction[J]. *Environ Sci Technol*, 1997, 31(3):800-805.
- [8] 刘威,束文圣,蓝崇钰.宝山堇菜(*Viola baoshanensis*)——一种新的镉超富集植物[J].科学通报,2003,48(19):2046-2049.
LIU Wei, SHU Wen-sheng, LAN Chong-yu. *Viola baoshanensis*: A new super-enrichment plant[J]. *Chinese Scientific Bulletin*, 2003, 48(19):2046-2049.
- [9] Salt D E, Prince R C, Pickering I J, et al. Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian mustards[J]. *Plant Physiology*, 1995, 10(9):1427-1433.
- [10] Linger P, Mussig J, Fischer H, et al. Industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) growing on heavy metal contaminated soil: Fibre quality and phytoremediation potential[J]. *Industrial Crops and Products*, 2002, 16(1):33-42.
- [11] Bona E, Marsano F, Cavaletto M, et al. Proteomic characterization of copper stress response in *Cannabis sativa* roots[J]. *Proteomics*, 2007, 7(7):112-1130.
- [12] Arru L, Rognoni S, Baroncini M. Copper localization in *Cannabis sativa* L. grown in a copper-rich solution[J]. *Euphytica*, 2004, 140(1/2):33-38.
- [13] Meers E, Van S 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, 78:35-41.
- [14] Soudek P, Petrová S, Vanková R, et al. Accumulation of heavy metals using *Sorghum* sp.[J]. *Chemosphere*, 2014, 104:15-24.
- [15] Ghavri S V, Singh R P. Growth, biomass production and remediation of copper contamination by *Jatropha curcas* plant in industrial waste-land soil[J]. *Environment Biology*, 2012, 33:207-214.
- [16] 余玮,揭雨成,邢虎成,等.苧麻耐镉品种差异及其筛选指标分析[J].作物学报,2011,37(2):348-354.
SHE Wei, JIE Yu-cheng, XING Hu-cheng, et al. Comparison and screening indicators for ramie (*Boehmeria nivea*) genotypes tolerant to cadmium[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(2):348-354.
- [17] 张哈芝,郭庆军,杨俊兴,等.镉胁迫下蓖麻对镉及矿质元素的富集特征[J].生态环境学报,2015,24(2):323-328.
ZHANG Han-zhi, GUO Qing-jun, YANG Jun-xing, et al. Cadmium and mineral nutrients accumulation in various genotypes of castor under cadmium stress[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(2):323-328.
- [18] 邵云,姜丽娜,李向力,等.五种重金属在小麦植株不同器官中的分布特征[J].生态环境,2005,14(2):204-207.
SHAO Yun, JIANG Li-na, LI Xiang-li, et al. Distribution characteristics of five heavy metals in different organs of wheat plants[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(2):204-207.
- [19] 刘光荣,魏林根,周荣娇,等.水稻品种间对铜的富集和分布差异性特征初探[J].江西农业大学学报,2006,28(1):12-15.
LIU Guang-rong, WEI Lin-gen, ZHOU Rong-jiao, et al. Distribution and enrichment of Cu in rice variety[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2006, 28(1):12-15.
- [20] 郭晓方,卫泽斌,丘锦荣,等.玉米对重金属累积与转运的品种间差异[J].生态与农村环境学报,2010,26(4):367-371.
GUO Xiao-fang, WEI Ze-bin, QIU Jin-rong, et al. Differences between corn cultivars in accumulation and translocation of heavy metals[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(4):367-371.
- [21] 李文誉,李德明.盐碱及重金属对植物生长发育的影响[J].北方园艺,2010(8):221-224.

- LI Wen-yu, LI De-ming. Research progress of fungal disease of garden plant[J]. *Northern Horticulture*, 2010(8): 221-224.
- [22] 代全林, 袁剑刚, 方 炜, 等. 玉米各器官积累 Pb 能力的品种间差异[J]. 植物生态学报, 2005, 29(6):992-999.
- DAI Quan-lin, YUAN Jian-gang, FANG Wei, et al. Differences of Pb accumulation among plant tissues of *Zea mays* varieties[J]. *Acta Phytocologica Sinica*. 2005, 29(6):992-999.
- [23] 张丽红, 徐慧珍, 于青春, 等. 河北清苑县及周边农田土壤及农作物中重金属污染状况与分析评价[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(11):2139-2146.
- ZHANG Li-hong, XU Hui-zhen, YU Qing-chun, et al. The investigation and evaluation of the heavy metal pollution in farmland soil and crop in the Qingyuan of Hebei, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(11):2139-2146.
- [24] 邹素敏, 杜瑞英, 文 典, 等. 不同品种蔬菜重金属污染评价和富集特征研究[J]. 生态环境学报, 2017, 26(4):714-720.
- ZOU Su-min, DU Rui-ying, WEN Dian, et al. Enrichment characteristics analysis and assessment on heavy metal contamination of different vegetables[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(4): 714-720.
- [25] Angelova V, Ivanova R, Delibaltova V, et al. Bio-accumulation and distribution of heavy metals in fibre crops (flax, cotton and hemp)[J]. *Industrial Crops and Products*, 2004, 19:197-205.
- [26] Linger P, Ostwald A, Haensler J. *Cannabis sativa* L. growing on heavy metal contaminated soil: Growth, cadmium uptake and photosynthesis [J]. *Biologia plantarum*, 2005, 49(4):567-576.
- [27] Baraniecki P, Grabowska L, Mankowski J. Flax and hemp in areas made derelict by the copper industry[J]. *Natural Fibres*, 1995, 39:79-85.
- [28] Loser C, Zehnsdorf A, Fussy M, et al. Conditioning of heavy metal-polluted river sediment by *Cannabis sativa* L[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2002, 4(1):27-45.