

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2020.04010

5个工业大麻品种对5种重金属污染土壤的修复潜力

许艳萍^{1,2} 杨明² 郭鸿彦² 杨清辉^{1,*}

¹ 云南农业大学农学与生物技术学院, 云南昆明 650201; ² 云南省农业科学院经济作物研究所, 云南昆明 650205

摘要: 为探究不同工业大麻品种在苗期与工艺成熟期对铅(Pb)、锌(Zn)、铜(Cu)、镉(Cd)与砷(As)的富集和转运能力。本研究以5个主栽工业大麻品种为试验材料, 开展云南矿区重金属污染农田修复试验。结果表明, 5个工业大麻品种积累5种重金属的能力均较强。根系对5种重金属的富集在工艺成熟期高于苗期; 茎叶对重金属Pb、As和Cd的富集在工艺成熟期高于苗期, 但对Cu、Zn的富集却表现为苗期高于工艺成熟期。转移系数表明, 在苗期, 茎叶对5种重金属的转运系数均>1, 说明其对5种重金属的转运能力均较强; 在工艺成熟期, 5个工业大麻品种的茎叶对Pb、As和Cd的转运能力较强, 对Cu、Zn的转运能力较弱。5个工业大麻品种在工艺成熟期对Pb、As、Cu、Cd和Zn的绝对富集量存在差异, 分别为431.65~644.29、365.14~624.25、180.65~194.06、15.13~24.40、540.07~684.27 g hm⁻², 云麻1号和云麻5号对Pb、As、Cd、Zn的绝对富集量最高, 显著高于其他品种。综上所述, 云麻1号和云麻5号富集转运系数和修复效率均高于云麻2号、云麻3号和云麻4号。因此云麻1号和云麻5号为5种重金属的富集能力最强潜力品种, 适宜在云南重金属污染地区推广种植, 为当地土壤重金属污染治理提供了理论参考和技术依据。

关键词: 工业大麻; 重金属; 修复潜力

Phytoremediation potential of five industrial hemp varieties on five heavy metal polluted soils

XU Yan-Ping^{1,2}, YANG Ming², GUO Hong-Yan², and YANG Qing-Hui^{1,*}

¹ College of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, Yunnan, China; ² Industrial Crop Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, Yunnan, China

Abstract: Uptake and translocation of lead (Pb), zinc (Zn), copper (Cu), cadmium (Cd), and arsenic (As) in industrial hemp genotypes were investigated at seedling and physiological maturity, in order to provide an insight for phytoremediation of mining soils in Yunnan. The experiment was conducted using five main varieties of industrial hemp viz., Yunma (ym)1, ym2, ym3, ym4, and ym5 under mining areas of Yunnan. Results showed that uptake and translocation of Pb, Zn, Cu, Cd, and As in all hemp genotypes were high at the seedling stage. Accumulation of Pb, Zn, Cu, Cd, and As contents in hemp roots were higher at physiological maturity as compared to seedling stage. However, comparing to seedling stage, Pb, As, and Cd contents in stems and leaves were higher at physiological maturity stage. Translocation factor coefficients of hemp stem and leaf to all heavy metals were more than 1.0 at seedling stage. At physiological maturity stage, translocation of Pb, As and Cd in stems and leaves of all hemp varieties were higher compared with Cu and Zn. The accumulated contents of Pb, As, Cu, Cd, and Zn in plants were 31.65–644.29, 365.14–624.25, 180.65–194.06, 15.13–24.40, and 540.07–684.27 g hm⁻², respectively. However, highest contents of Pb, As, Cd, and Zn were observed in hemp variety Yunma 1 and Yunma 5, which suggested that these two varieties had significantly higher metal accumulation and translocation compared to other varieties. In conclusion, the bioconcentration ratios, translocation factor and phytoremediation ability of hemp variety Yunma 1 and Yunma 5 were higher than those of Yunma 2, Yunma 3, and Yunma 4. These results showed that both Yunma 1 and Yunma 5 were potential candidates for remediation of heavy metal polluted areas in Yunnan.

本研究由国家自然科学基金项目(31660351)和国家现代农业产业技术体系(麻类作物)建设专项(CARS-19-E05)资助。

This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (31660351) and the China Agriculture Research System for Bast and Leaf Fiber Crops (CARS-19-E05).

* 通信作者(Corresponding author): 杨清辉, E-mail: yangqinghui@163.com

第一作者联系方式: E-mail: cyn080328@126.com

Received (收稿日期): 2020-01-13; Accepted (接受日期): 2020-08-19; Published online (网络出版日期): 2020-09-04.

URL: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.s.20200903.1450.002.html>

Keywords: industrial hemp; heavy metals; remediation potential

随着工农业的快速发展,环境问题日显突出。尤其在现代矿业发展过程中,矿区周边的农田被长期尾矿堆的废液、废渣侵蚀和淋滤导致严重的重金属面源污染^[1]。面源污染引起周边农田土壤中多种重金属严重超标,随着污染区种植的植物吸收、富集重金属作用,通过食物链而进入人体,最终严重危害人类健康^[2]。据统计,我国每年粮食因重金属污染造成的直接经济损失超过 200 亿元^[3-4]。重金属污染土壤治理已成为生态环境科学研究的重要课题之一。修复农田土壤重金属污染,保障作物的安全生产,成为土壤和环境领域研究的重中之重。

植物修复技术是目前治理土壤环境污染的绿色、经济、安全的一种新型土壤污染治理技术^[5]。通过一定方法使用植物将土壤中重金属移出土体(活化)^[6],其技术是利用植物自身的生理特性,以及其与根际微生物的联合作用,对土壤中的重金属进行吸收、富集,并通过代谢活动,达到降低土壤中重金属的目的^[7]。为有效达到该目的,利用重金属高富集植物,提高其植物生物产量和重金属富集、吸收能力为其达到重金属修复目的关键途径^[8],而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^[9-10]。因而,近年来一些重金属耐性强、生长快、生物量大、经济价值高并有一定的重金属富集能力的植物,被逐步应用到重金属修复当中,如油菜^[11]、玉米^[12],然而,现今使用的该类型植物,大多数属于食用作物,重金属会通过食物链而危害人类健康。因此,急需寻求一种生物量大、吸收重金属能力强、经济价值高且不进入食物链的植物进行土壤重金属污染修复。

大麻(*Cannabis sativa* L.)为大麻科(Cannabaceae)大麻属(*Cannabis*)一年生草本植物。工业大麻通过遗传改良、无毒品利用价值、可以合法化推广种植的大麻,被公认是一种高生物量、生长快、富集重金属能力强、不进入食物链且极具经济利用价值的物种^[13]。其具有生长快速、根系庞大、碳汇能力强且对复合重金属污染的土壤具有很好的修复潜力,同时具备生物量大、可大量吸收多种重金属的特点^[8],满足 Marchiol 等^[14]于 2004 年提出的理想土壤修复植物标准:一是能吸附和迁移土壤中的重金属;二是具有一定的重金属耐性;三是生长速度快

且生物量大;四是适应性强并易于收割。大量研究表明,利用大麻类型的经济作物进行修复比利用超富集植物更加经济、可靠、有效^[15-16]。因此使用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,且具有重要的实际意义。目前,植物修复的相关研究主要见于选择尾矿库建立能源植物生产基地并开展土壤污染特征分析^[17]、选择重金属污染矿区开展能源甘蔗规模化种植并开展耐重金属污染甘蔗优良品种的选育^[18]等,而关于不同工业大麻品种在大田条件下对土壤重金属修复潜力的研究报道较少,对该方面进行深入系统研究具有重要的实践和理论指导意义。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 个工业大麻品种为修复试验材料,将其种植于典型重金属污染矿区附近农田,分析比较不同工业大麻品种对重金属 Pb、As、Cu、Cd、Zn 的修复潜力,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提供相关参考信息数据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

云南某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开展试验(103°14'59.45"E, 23°24'8.66"N, 海拔 1321 m),该农田为严重重金属污染地区,土壤的 pH 5.21,含有机质 28.0 g kg⁻¹、全氮 0.136%、全磷 0.075%、全钾 3.47%、水解性氮 111.8 mg kg⁻¹、有效磷 72 mg kg⁻¹、速效钾 171 mg kg⁻¹、Pb 215.4 mg kg⁻¹、As 92.9 mg kg⁻¹、Cu 54.1 mg kg⁻¹、Cd 2.31 mg kg⁻¹、Zn 107.7 mg kg⁻¹。

1.2 供试品种

云麻1号、云麻2号、云麻3号、云麻4号、云麻5号为云南省农业科学院经济作物研究所选育的工业大麻品种,编号分别为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。

1.3 试验设计

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,共15个小区,每个小区面积为30 m²,

采用纤维型种植模式, 行距为30 cm, 小区之间留80 cm的道路, 密度为30,000株 hm⁻²。按常规田间管理种植。

1.4 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。采集耕作层0~20 cm土壤, 每个小区采集5点的土样混合装于塑料袋, 每个点的土样为1 kg; 在工业大麻苗期、工艺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)制备样品, 植物样品在105℃下杀青0.5 h, 70℃烘箱烘干至恒重, 用电子天平称取各部分干质量, 烘干样品粉碎后备测。用HNO₃ HClO₄= 5 1 (v:v)的混合液进行微波消解、定容。采用火焰原子吸收分光光度法(GB/T 17141-1997)测定Pb、Cd含量; 采用原子荧光法(GB/T 22105.2-2008)测定As含量; 采用火焰原子吸收分光光度法(GB/T 17138-1997)测定Cu、Zn含量。

1.5 数据统计分析

各工业大麻品种重金属富集系数(bioconcentration factor, BCF)和转运系数(translocation factor, TF), 计算公式如下:

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

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

1.6 数据处理

采用Microsoft Excel 2007分析数据; 使用SPSS 20.0对试验数据进行方差分析; 使用GraphPad Prism 8作图。

2 结果与分析

2.1 工业大麻地下部分 2 个生育时期重金属含量差异分析

5个工业大麻品种的根系不同时期对5种重金属的含量存在差异(图1)。2个时期云麻1号(yml)根系中Pb含量皆最大, 表现出较强Pb积累能力, 尤其是工艺成熟期其根的含量显著高于云麻2号(ym2)、云麻3号(ym3)和云麻5号(ym5) (图1-A)。As在各品种苗期根系含量皆较低, 工艺成熟期云麻4号(ym4)和ym2根系As含量最大, 显著高于ym1和ym5 (图1-B)。Cu在ym4根的含量在苗期和工艺成熟期表现为皆最大

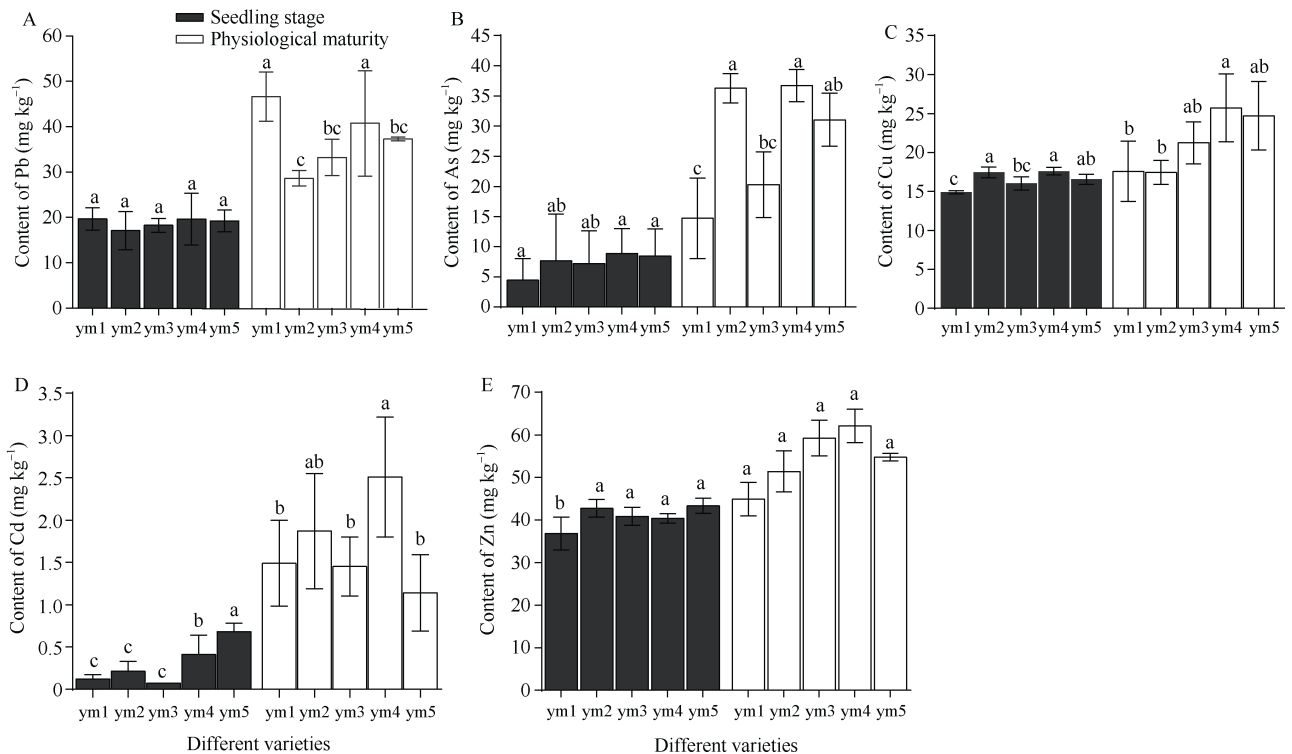


图 1 不同工业大麻品种不同时期根系重金属的含量

Fig. 1 Heavy metal contents in roots of different industrial hemp varieties at different stages

A: 根系 Pb 含量; B: 根系 As 含量; C: 根系 Cu 的含量; D: 根系 Cd 的含量; E: 根系 Zn 的含量。ym1: 云麻 1 号; ym2: 云麻 2 号; ym3: 云麻 3 号; ym4: 云麻 4 号; ym5: 云麻 5 号。图中不同字母表示在 0.05 水平上的差异显著。

A: content of Pb in roots; B: content of As in roots; C: content of Cu in roots; D: content of Cd in roots; E: content of Zn in roots. ym1: Yunma 1; ym2: Yunma 2; ym3: Yunma 3; ym4: Yunma 4; ym5: Yunma 5. Bars superscripted by different lowercase letters indicate significant differences among treatments at the 0.05 probability level.

(图1-C)。在苗期根Cd含量最大的为ym5, 且与其他4个品种间差异显著; 工艺成熟期含最大的为ym4, 显著高于ym1、ym3和ym5 (图1-D)。苗期根系As含量最大是ym5, 而工艺成熟期含量最大的是ym4, 且品种间差异不显著(图1-E)。

综上所述, 5 个工业大麻品种在 2 个时期根系对 5 种重金属的含量有差异。整体表现为 ym1 累积 Pb 的量最高, 且工艺成熟期的含量高于苗期; 而累积 As 和 Cd 的量, 苗期最低, 工艺成熟期高, 且 ym1 积累 As 的量最低, 5 个品种均富集重金属 Cd; 对 Cu 的富集则表现为 2 个时期均高; 从苗期到工艺成熟期对 Zn 的累积量逐渐升高, 且工艺成熟期 5 个品种对 Zn 含量差异不显著。

2.2 工业大麻地上部分 2 个生育时期不同重金属含量差异分析

从图2可知, 地上部分在2个时期对5种重金属的含量不同, 苗期地上部分重金属含量普遍高于地下部分, 且5个品种间有差异。苗期中Pb在ym1茎叶的含量最大; 工艺成熟期则以ym2含量最大, 且与ym1和ym4差异不显著(图2-A)。苗期茎叶吸收As量最大的为

ym5, 显著高于ym4; 工艺成熟期As含量最大的为 ym1, 且显著高于ym2、ym3、ym4 (图2-B)。苗期茎叶中Cu含量明显高于工艺成熟期, 且苗期中含量最大的为ym4, 品种间差异不显著; 工艺成熟期含量最大的为ym3, 显著高于ym1 (图2-C)。Cd在茎叶中的含量在2个时期中含量最大的皆为ym1, 工艺成熟期显著高于ym3, 与其他品种间差异不显著(图2-D)。苗期茎叶对Zn含量最大的为ym5, 品种间差异不显著; 工艺成熟期含量最大的为ym2, 显著高于其他品种(图2-E)。

综上所述, 5个工业大麻品种在2个生育时期地上部分对5种重金属的含量有差异。整体表现对Pb、As的含量皆高, Pb含量在38.00~60.00 mg kg⁻¹之间, As含量在25.00~40.00 mg kg⁻¹之间, 且ym1积累Pb的能力强于其他品种; 对Cu的含量则表现为苗期最高, 高达46.31 mg kg⁻¹, 到工艺成熟期急剧下降, 含量不超过20.00 mg kg⁻¹; 地上部分对Cd的含量均在1.00 mg kg⁻¹以上, 对重金属Cd有很强的富集性; 而对重金属Zn, 苗期地上部分的含量整体表现均较高, 最高含量高达82.95 mg kg⁻¹, 而除ym2外, 其他品种从苗期到工艺成熟期呈现急剧下降的趋势。

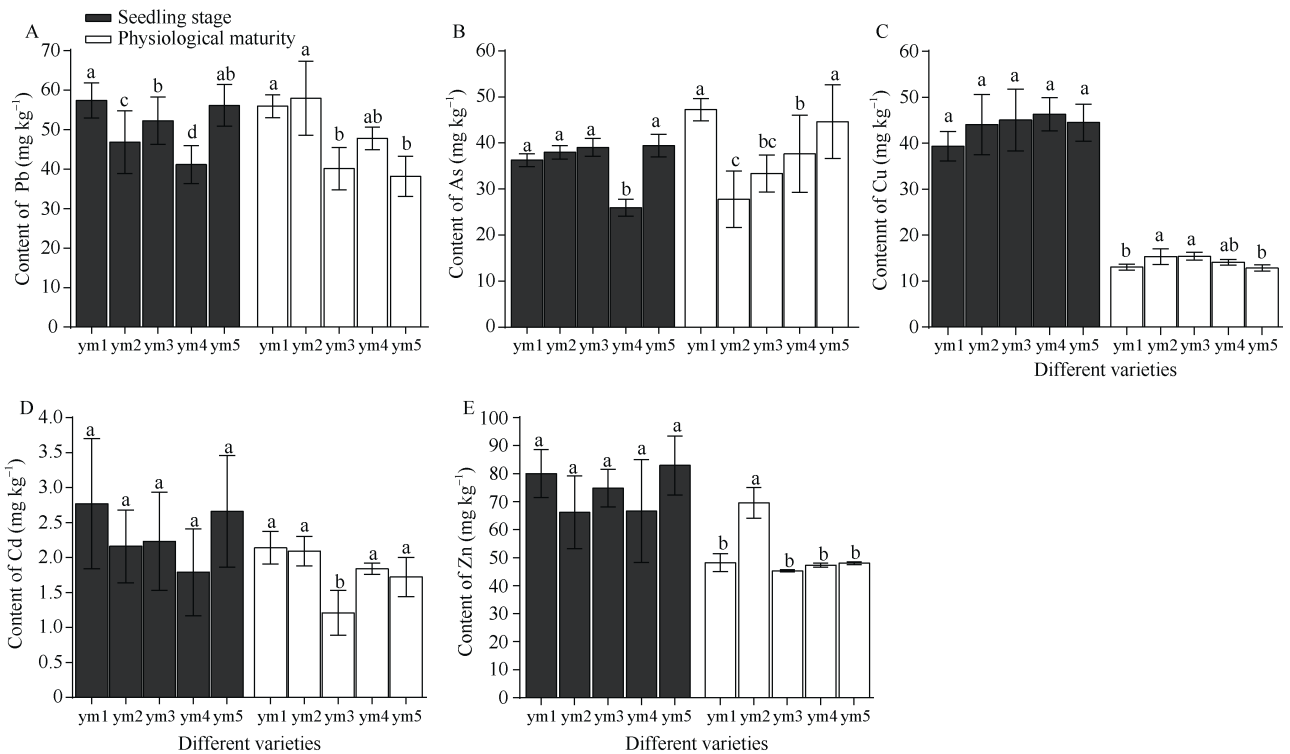


图 2 不同工业大麻品种不同时期茎叶重金属的含量

Fig. 2 Heavy metal contents in stem and leaf of different industrial hemp varieties at different stage

A: 茎叶 Pb 含量; B: 茎叶 As 含量; C: 茎叶 Cu 的含量; D: 茎叶 Cd 的含量; E: 茎叶 Zn 的含量。ym1: 云麻 1 号; ym2: 云麻 2 号; ym3: 云麻 3 号; ym4: 云麻 4 号; ym5: 云麻 5 号。图中不同字母表示在 0.05 水平上的差异显著。

A: content of Pb in stems and leaves; B: content of As in stems and leaves; C: content of Cu in stems and leaves; D: content of Cd in stems and leaves; E: content of Zn in stems and leaves. ym1: Yunma 1; ym2: Yunma 2; ym3: Yunma 3; ym4: Yunma 4; ym5: Yunma 5. Bars super-scripted by different lowercase letters indicate significant differences among treatments at the 0.05 probability level.

2.3 工业大麻2个生育时期中不同重金属富集、转运的品种差异分析

2.3.1 工业大麻苗期不同重金属富集、转运的品种差异分析 土壤重金属污染相关的研究中一般采用富集系数作为品种筛选的依据。由表1可知,在苗期,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,除了ym1和ym5的地上部分对重金属Cd的富集系数>1,其余的富集系数都<1,对Pb吸收最强的是ym1,对As吸收最强的是ym3及ym5,对Cu吸收最强的是ym4,对Cd吸收最强的是ym1,对Zn吸收最强的是ym5。

大麻茎叶中不同重金属含量的变化与大麻重金属从根部向茎叶中转运的程度有关,数值越大,表明重金属越容易转运,数值越小表示转运越困难。从表2可看出,在苗期,5个工业大麻品种茎叶对5种重金属的转运系数均>1,说明其对5种重金属由根向茎叶的转运能力均较强,依次为Cd>As>Pb>

Cu>Zn,尤其Cd的转运能力强,ym1从地下部分向地上部分转运系数超过24。

2.3.2 工业大麻工艺成熟期不同重金属富集、转运的品种差异分析 由表3可知,在工艺成熟期,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,除ym4的根系对Cd的富集系数>1,其余的富集系数都<1,对Pb吸收最强的是ym1,对As和Cu吸收最强的是ym4、ym5,对Cd吸收最强的是ym2、ym4,对Zn吸收最强的是ym2、ym4。

由表4可知,在工艺成熟期,从转运系数看,5个工业大麻品种茎叶对Pb的转运系数都>1,说明其对Pb转运能力均较强;除ym2叶对As的转运系数<1,其余4个工业大麻品种对As的转运系数>1,说明ym2对As的转运能力相对较弱;5个工业大麻品种茎叶对Cu的转运系数都<1,说明其对Cu的转运能力均较弱;ym1、ym2、ym5的茎叶对Cd的转运系数>1,ym3、ym4<1;ym1、ym2的茎叶对Zn的转运系数>1,ym3、ym4、ym5<1。

表1 苗期重金属在不同器官的富集系数(BCF)

Table 1 Bioconcentration factors (BCF) of heavy metals in different hemp organs at seedling stage

品种 Variety	Pb		As		Cu		Cd		Zn	
	根 Root	茎叶 Stem and leaf	根 Root	茎叶 Stem and leaf	根 Root	茎叶 Stem and leaf	根 Root	茎叶 Stem and leaf	根 Root	茎叶 Stem and leaf
ym1	0.09 a	0.27 a	0.05 b	0.39 a	0.28 c	0.73 a	0.05 c	1.20 a	0.34 b	0.74 a
ym2	0.08 a	0.22 c	0.08 ab	0.41 a	0.32 a	0.81 a	0.09 c	0.93 a	0.40 a	0.61 a
ym3	0.08 a	0.24 b	0.08 ab	0.42 a	0.30 bc	0.83 a	0.03 c	0.96 a	0.38 a	0.69 a
ym4	0.09 a	0.19 d	0.10 a	0.28 b	0.33 a	0.86 a	0.18 b	0.78 a	0.37 a	0.62 a
ym5	0.09 a	0.26 ab	0.09 a	0.42 a	0.31 ab	0.82 a	0.30 a	1.15 a	0.40 a	0.77 a

同列不同小写字母表示处理间在0.05水平上差异显著($P < 0.05$)。ym1: 云麻1号; ym2: 云麻2号; ym3: 云麻3号; ym4: 云麻4号; ym5: 云麻5号。

Values followed by different lowercase letters in a column indicate significant difference among treatments at the 0.05 probability level. ym1: Yunma 1; ym2: Yunma 2; ym3: Yunma 3; ym4: Yunma 4; ym5: Yunma 5.

表2 苗期重金属在不同器官的转运系数(TF)

Table 2 Translocation factor (TF) of heavy metals in different organs at hemp seedling stage

品种 Variety	Pb 茎叶/根	As 茎叶/根	Cu 茎叶/根	Cd 茎叶/根	Zn 茎叶/根
	Pb TF in stem and leaf/root	As TF in stem and leaf/root	Cu TF in stem and leaf/root	Cd TF in stem and leaf/root	Zn TF in stem and leaf/root
ym1	2.93 a	8.68 a	2.65 a	24.88 ab	2.19 a
ym2	2.78 a	5.22 bc	2.53 a	13.81 bc	1.55 b
ym3	2.86 a	5.83 b	2.81 a	32.53 a	1.83 ab
ym4	2.18 b	2.94 c	2.64 a	5.48 c	1.66 ab
ym5	2.93 a	4.96 bc	2.69 a	3.84 c	1.92 ab

同列不同小写字母表示处理间在0.05水平上差异显著($P < 0.05$)。ym1: 云麻1号; ym2: 云麻2号; ym3: 云麻3号; ym4: 云麻4号; ym5: 云麻5号。

Values followed by different lowercase letters in a column indicate significant difference among treatments at the 0.05 probability level. ym1: Yunma 1; ym2: Yunma 2; ym3: Yunma 3; ym4: Yunma 4; ym5: Yunma 5.

表 3 工艺成熟期重金属在不同器官的富集系数(BCF)

Table 3 Bioconcentration factors (BCF) of heavy metals in different organs at hemp process maturity stage

品种 Variety	Pb		As		Cu		Cd		Zn	
	根 Root	茎叶 Stem and leaf	根 Root	茎叶 Stem and leaf	根 Root	茎叶 Stem and leaf	根 Root	茎叶 Stem and leaf	根 Root	茎叶 Stem and leaf
ym1	0.22 a	0.26 a	0.15 c	0.51 a	0.32 b	0.24 b	0.65 b	0.92 a	0.42 c	0.45 b
ym2	0.13 c	0.27 a	0.37 a	0.30 c	0.32 b	0.28 a	0.81 ab	0.90 a	0.48 bc	0.65 a
ym3	0.15 bc	0.19 ab	0.23 b	0.36 bc	0.39 ab	0.29 a	0.63 b	0.52 b	0.55 ab	0.42 b
ym4	0.19 ab	0.22 ab	0.36 a	0.41 b	0.48 a	0.26 ab	1.09 a	0.80 a	0.58 ab	0.44 b
ym5	0.17 bc	0.18 b	0.31 a	0.48 a	0.46 ab	0.24 b	0.49 b	0.74 a	0.51 a	0.45 b

同列不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著($P < 0.05$)。ym1: 云麻 1 号; ym2: 云麻 2 号; ym3: 云麻 3 号; ym4: 云麻 4 号; ym5: 云麻 5 号。

Values followed by different lowercase letters in a column indicate significant difference among treatments at the 0.05 probability level. ym1: Yunma 1; ym2: Yunma 2; ym3: Yunma 3; ym4: Yunma 4; ym5: Yunma 5.

表 4 工艺成熟期重金属在不同器官的转运系数(TF)

Table 4 Translocation factor (TF) of heavy metals in different organs at hemp process maturity stage

品种 Variety	Pb 茎叶/根	As 茎叶/根	Cu 茎叶/根	Cd 茎叶/根	Zn 茎叶/根
	Pb TF of stem and leaf/root	As TF of stem and leaf/root	Cu TF of stem and leaf/root	Cd TF of stem and leaf/root	Zn TF of stem and leaf/root
ym1	1.21 b	3.30 a	0.76 ab	1.52 ab	1.08 b
ym2	2.02 a	0.77 b	0.89 a	1.20 ab	1.36 a
ym3	1.23 b	1.74 b	0.74 ab	0.91 ab	0.77 d
ym4	1.23 b	1.05 b	0.56 b	0.77 b	0.76 d
ym5	1.03 b	1.48 b	0.54 b	1.77 a	0.88 c

同列不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著($P < 0.05$)。ym1: 云麻 1 号; ym2: 云麻 2 号; ym3: 云麻 3 号; ym4: 云麻 4 号; ym5: 云麻 5 号。

Values followed by different lowercase letters in a column indicate significant difference among treatments at the 0.05 probability level. ym1: Yunma 1; ym2: Yunma 2; ym3: Yunma 3; ym4: Yunma 4; ym5: Yunma 5.

2.4 工业大麻对重金属污染土壤的修复潜力

植物对重金属污染土壤的修复潜力主要取决于重金属绝对富集量, 5 个工业大麻品种 2 个生育时期对 5 种重金属都具有很强的富集能力, 苗期生物量低, 所以相对工艺成熟期重金属的绝对富集量小, 不同品种对同一种重金属的绝对富集量差异显著($P < 0.05$)。2 个生育时期 5 个品种对 5 种重金属的绝对富集量如表 5。在苗期, 5 个品种中, 对 Pb、As、Cu、Cd 和 Zn 富集能力和修复潜力最强的是 ym1 和 ym5, 每公顷地块可以吸附超过 40 g Pb、近 30 g As、35 g Cu、2 g Cd 和 95 g Zn。在工艺成熟期, 5 个工业大麻品种的生物量和重金属的富集量基本达最大或稳定。以 ym1 对 Pb、As 的绝对富集量最高, 分别为 644.29 g hm^{-2} 和 624.25 g hm^{-2} , 且显著高于 ym5, ym2、ym4 和 ym3 依次含量下降, 且 ym2 和 ym4 差异不显著; 对于 Cu, 品种间差异不显著; 对重金属 Cd, 以 ym1 和 ym5 的绝对富集量最高, 超过 20.00 g hm^{-2} ,

与其他品种间差异达显著, ym2、ym3 和 ym4 富集量较低, 三者之间差异不显著; 对于 Zn, 则以 ym1、ym5 的绝对富集量最高, 分别为 669.15 g hm^{-2} 、684.27 g hm^{-2} , 与其他 3 个品种差异显著, 且 ym4 最低。

3 讨论

3.1 工业大麻不同部位在 2 个生育时期对不同重金属具有不同的富集能力

土壤重金属污染是世界上严重的环境污染问题之一, 据《全国土壤污染状况调查公报》发布, 我国土壤重金属的超标约占 16.1%^[19], 受重金属污染的耕地总面积接近 0.1 亿公顷, 不仅导致每年粮食减产超过 1000 万吨^[20], 且通过食物链严重危害人体健康。如何选择适合重金属污染的备选经济、安全的绿色修复植物是当今研究的热点, 工业大麻被公认为是绿色生物修复理想植物。一般不同品种或同

表 5 工业大麻对重金属的绝对富集量

Table 5 Absolution accumulation quantity of heavy metals in industrial hemp (g hm^{-2})

时期 Stage	品种 Variety	Pb	As	Cu	Cd	Zn
苗期 Seeding stage	ym1	43.59 a	27.83 a	31.61 b	2.13 a	96.20 a
	ym2	29.10 c	23.51 b	26.56 c	1.32 b	63.61 e
	ym3	32.18 b	22.79 b	26.93 c	1.38 b	71.32 d
	ym4	21.98 d	16.55 c	13.63 d	1.35 b	22.71 c
	ym5	42.84 a	29.88 a	34.41 a	2.05 a	92.87 b
工艺成熟期 Physiological maturity stage	ym1	644.29 a	624.25 a	194.06 a	24.40 a	669.15 a
	ym2	431.65 d	365.14 c	179.67 a	16.64 b	560.11 b
	ym3	477.83 c	393.77 c	197.21 a	15.13 b	577.06 b
	ym4	440.33 d	371.86 c	180.65 a	16.35 b	540.07 b
	ym5	535.77 b	550.76 b	180.94 a	22.60 a	684.27 a

同列不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著 ($P < 0.05$)。ym1: 云麻 1 号; ym2: 云麻 2 号; ym3: 云麻 3 号; ym4: 云麻 4 号; ym5: 云麻 5 号。

Values followed by different lowercase letters in a column indicate significant difference among treatments at the 0.05 probability level. ym1: Yunma 1; ym2: Yunma 2; ym3: Yunma 3; ym4: Yunma 4; ym5: Yunma 5.

一品种对重金属积累方式、积累量不同^[21-23], 本研究在各种重金属复合污染的农田中 5 个工业大麻品种 2 个时期的根、茎叶对 5 种重金属吸收差异的分析发现, 品种间 2 个时期根系和地上部分对 5 种重金属的吸收差异明显, 工艺成熟期根系吸收量大于苗期, 尤其是 Pb、As、Cd, 但 Cu、Zn 则差异不大, 地上部分则与之相反, Pb、As、Cd 成熟期与苗期差异不大, 而 Cu、Zn 则表现为成熟期吸收小于苗期, 说明工业大麻对 Pb、As、Cd 的吸收随着生长而不断加强, 而地上部分对 Cu、Zn 吸收能力不断减弱。通过品种间比较, 种植工业大麻皆能有效吸收 5 种重金属, 其中 ym1 对 Pb 吸收量最高, 积累 As 的量最低; 5 个品种均富集重金属 Cd, 成熟期更是能达 1.00 mg kg^{-1} 以上; 对 Cu、Zn 苗期主要表现为地下部分吸收, 而成熟期则为地上部分大量吸收。

3.2 工业大麻对重金属富集特征

本试验中, 将不同工业大麻种植于重金属复合污染土壤上, 5 个品种对 5 种重金属都具有很强的富集能力, 尤其 Cd 富集系数和转移系数最高, 这可能与重金属 Cd 的理化性质以及在土壤中活性较高, 以及重金属 Zn 与 Cd 的协同作用有关^[24]。本文发现, 工业大麻除 ym1 和 ym5 苗期茎叶对 Cd 富集系数大于 1 外, 其他皆小于 1, 说明工业大麻对 5 种重金属富集能力不是太强, 但分析发现, 苗期茎叶对 5 种重金属转运系数皆大于 1, 甚至达到 24, 说明工业大麻苗期对重金属由根部向地上部分转运能力很强, 尤其是 Cd。

但至工艺成熟期发现, 5 个工业大麻品种茎叶对 5 种重金属转运能力差异明显, 整体表现对 Pb、As 和 Cd 转运效果强, 对 Cu 转运效果相对较弱。本研究还表明, 同品种大麻对不同重金属的富集能力不同, 不同品种大麻对同种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、生长环境以及各重金属在土壤-大麻中的迁移方式共同决定的。

3.3 工业大麻对土壤重金属污染修复潜力

本试验中, 将不同工业大麻品种种植于重金属中、重度复合污染土壤上, 5 个品种对 5 种重金属都具有很强的富集能力, 但因生物量不同富集重金属的量差异也各异。植物修复重金属潜能主要取决于植物的生物量及其对重金属的富集能力^[25], 总体来说苗期生物量低, 相对工艺成熟期重金属的绝对富集量小。在苗期, 重金属主要富集在地上部分, 5 个工业大麻品种对 Pb、As、Cu、Cd 和 Zn 富集能力和修复潜力最强的是 ym1 和 ym5, 每公顷地块可以吸附将近 50 g Pb 、 30 g As 、 35 g Cu 、 2 g Cd 和 94 g Zn 。在工艺成熟期, 5 个工业大麻品种的生物量和重金属的富集量基本达最大, 以 ym1 对于 Pb 和 As 的绝对富集量最高, 分别为 649.35 g hm^{-2} 和 614.55 g hm^{-2} , 与 ym5 差异不显著, ym2、ym3 和 ym4 次之, 且三者之间差异不显著; 对于 Zn, 则以 ym1、ym5 的绝对富集量最高, 分别为 667.05 g hm^{-2} 、 669.00 g hm^{-2} 。工业大麻不仅富集多种重金属, 且生物量远远高于一些常规报道的高富集作物^[25-26]。在本研究中,

晚熟品种 ym1 和 ym5、早熟品种 ym2、早中熟型品种 ym3 和 ym4 的平均干生物量分别为 22 t hm^{-2} 、 18 t hm^{-2} 和 19 t hm^{-2} , 远远超过遏兰菜(0.38 t hm^{-2})、东南景天($0.85\sim 1.50 \text{ t hm}^{-2}$) 的生物量^[25]。本试验结果表明, 在轻度污染种植一季的工业大麻从土壤中可转移的重金属远远超过一些生物量大的作物, 如红麻种植一季最高能转移重金属 Cu 约 185.3 g hm^{-2} 、Cd 25.7 g hm^{-2} ^[26]; 而对 As、Cu 等重金属与一些超富集植物相当或低于超富集植物, 如大田条件种植的东南景天每年可提取 Cd 184 g hm^{-2} 、Zn 7800 g hm^{-2} 、Cu 29 g hm^{-2} ^[27], 但工业大麻弥补了超富集植物不能同时富集多种重金属、适应性差、育苗难等缺点。

4 结论

5 个工业大麻品种在苗期对 5 种重金属均有较强的富集能力, 吸收的 Cu 和 Zn 主要分布在根系, 而重金属 Cd、As、Pb 则主要富集在地上部位。工艺成熟期, 根系对 5 种重金属均有较强的吸收能力, 但向地上部转运 Cu 的能力低于 Cd、As、Pb 和 Zn。5 个工业大麻品种在工艺成熟期对 5 种重金属的绝对富集量远高于苗期, 重金属富集量最大的工业大麻品种为云麻 1 号和云麻 5 号, 可在重金属污染地进行修复种植。

References

- [1] 刘月莉, 伍钧, 唐亚, 杨刚, 祝亮. 四川甘洛铅锌矿区优势植物的重金属含量. 生态学报, 2009, 29: 2020–2026.
Liu Y L, Wu J, Tang Y, Yang G, Zhu L. An investigation of heavy-metal concentration in dominant plant species in a zinc lead mining area in Ganluo County of Sichuan province. *Acta Ecol Sin*, 2009, 29: 2020–2026 (in Chinese with English abstract).
- [2] 程先锋, 宋婷婷, 陈玉, 魏永明, 沈金祥, 齐武福. 滇西兰坪铅锌矿区土壤重金属含量的高光谱反演分析. 岩石矿物学杂志, 2017, 36(1): 60–69.
Cheng X F, Song T T, Chen Y, Wei Y M, Shen J X, Qi W F. Retrieval and analysis of heavy metal content in soil based on measured spectra in the Lanping Zn-Pb mining area, western Yunnan Province. *Acta Petrol Mineral*, 2017, 36(1): 60–69 (in Chinese with English abstract).
- [3] 戴睿, 李燕燕, 杨少辉. 土壤重金属治理方案浅析. 技术与市场, 2010, 17(7): 18.
Dai R, Li Y Y, Yang S H. Analysis of soil heavy metal control scheme. *Technol Markets*, 2010, 17(7): 18 (in Chinese).
- [4] 冯凤玲, 成杰民, 王德霞. 蚯蚓在植物修复重金属污染土壤中的应用前景. 土壤通报, 2006, 37: 809–814.
Feng F L, Cheng J M, Wang D X. Application of earthworm in remediation of heavy metal contaminated soil. *Chin J Soil Sci*, 2006, 37: 809–814 (in Chinese with English abstract).
- [5] Bona E, Marsano F, Cavaletto M. Proteomic characterization of copper stress response in *Cannabis sativa* roots. *Proteomics*, 2007, 7: 1121–1130.
- [6] 串丽敏, 赵同科, 郑怀国, 赵静娟, 张晓静. 土壤重金属污染修复技术研究进展. 环境科学与技术, 2014, 37(增刊 2): 213–222.
Chuan L M, Zhao T K, Zheng H G, Zhao J J, Zhang X J. Research advances in remediation of heavy metal contaminated soils. *Environ Sci Technol*, 2014, 37(S2): 213–222 (in Chinese with English abstract).
- [7] Macek T, Mackova M, Kas J. Exploitation of plants for the removal of organics in environmental remediation. *Biotechnol Adv*, 2000, 18: 23–34.
- [8] Huang J W, Chen J J, Breti W R, Cunningham S D. Phytoremediation of lead-contaminated soils: role of synthetic chelate in lead phytoextraction. *Environ Sci Technol*, 1997, 31: 800–805.
- [9] 刘威, 束文圣, 蓝崇钰. 宝山堇菜(*Viola baoshanensis*): 一种新的镉超富集植物. 科学通报, 2003, 48: 2046–2049.
Liu W, Shu W S, Lan C Y. *Viola baoshanensis*: a new hyperaccumulator of cadmium. *Chin Sci Bull*, 2003, 48: 2046–2049 (in Chinese).
- [10] Salt D E, Prince R C, Pickering I J, Raskin I. Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian Mustards. *Plant Physiol*, 1995, 10: 1427–1433.
- [11] 王激清, 张宝悦, 苏德纯. 修复镉污染土壤的油菜品种的筛选及吸收累积特征研究: 高积累镉油菜品种的筛选(I). 河北北方学院学报: 自然科学版, 2005, 21(1): 58–61.
Wang J Q, Zhang B Y, Su D C. The study on selection of rape spices in phytoremediated cadmium contaminated soil and their cadmium absorbing characters: Selection of oilseed species with higher cadmium accumulation (I). *J Hebei North Univ (Nat Sci Edn)*, 2005, 21(1): 58–61 (in Chinese with English abstract).
- [12] 辛艳卫, 梁成华, 杜立宇, 吴岩, 张亚男. 不同玉米品种对镉的富集和转运特性. 农业环境科学学报, 2017, 36: 839–846.
Xin Y W, Liang C H, Du L Y, Wu Y, Zhang Y N. Accumulation and translocation of cadmium in different maize cultivars. *J Agro-Environ Sci*, 2017, 36: 839–846 (in Chinese with English abstract).
- [13] Linger P, Mussig J, Fischer H, Kobert J. Industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) growing on heavy metal contaminated soil: fibre quality and phytoremediation potential. *Ind Crops Prod*, 2002, 16: 33–42.
- [14] Marchiol L, Assolari S, Sacco P, Zerbi S. Phytoextraction of heavy metals by canola (*Brassica napus*) and radish (*Raphanus sativus*) grown on multicontaminated soil. *Environm Poll*, 2004, 132: 21–27.
- [15] Petr S, Sarka P, Radomira V, Jing S, Tomas V. Accumulation of heavy metals using *Sorghum* sp. *Chemosphere*, 2014, 104: 15–24.
- [16] Ghavri S V, Singh R P. Growth, biomass production and remediation of copper contamination by *Jatropha curcas* plant in industrial wasteland soil. *Environ Biol*, 2012, 33: 207–214.
- [17] 黄树焘, 宋静, 骆永明, 余海波, 杨剑虹. 铜陵杨山冲尾矿库能源植物生产示范基地的特征化. 广西农业科学, 2009, 40: 691–695.
Huang S T, Song J, Luo Y M, Yu H B, Yang J H. Characterization of production demonstration base for energy plants in Yangshan Chong copper mine tailing reservoir of Tongling. *Guangxi Agric*

- Sci*, 2009, 40: 691–695 (in Chinese with English abstract).
- [18] 朱国辉, 罗思施, 李守思, 梁计南, 谢君. 重金属污染土壤能源甘蔗品种筛选及蔗汁发酵的研究. *可再生能源*, 2008, 26(2): 60–63.
Zhu G H, Luo S S, Li S S, Liang J N, Xie J. Varieties screening of energy sugarcane in heavy metal polluted soils and the study on ethanol fermentation. *Renew Energy Resour*, 2008, 26(2): 60–63 (in Chinese with English abstract).
- [19] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报. *中国环保产业*, 2014, 36: 1689–1692.
Environmental Protection Department, Ministry of Land and Resources. Bulletin of the national survey on soil pollution. *China Environ Prot Ind*, 2014, 36: 1689–1692 (in Chinese).
- [20] 陈丽莉, 俄胜哲. 中国土壤重金属污染现状及生物修复技术研究进展. *现代农业科学*, 2009, 16(3): 139–140.
Chen L L, E S Z. Current situation of soil contamination by heavy metals and research advances on the bioremediation techniques in China. *Modern Agric Sci*, 2009, 16(3): 139–140 (in Chinese with English abstract).
- [21] 代全林, 袁剑刚, 方炜, 杨中艺. 玉米各器官积累 Pb 能力的品种间差异. *植物生态学报*, 2005, 29: 992–999.
Dai Q L, Yuan J G, Fang W, Yang Z Y. Differences of Pb accumulation among plant tissues of *Zea mays* varieties. *Acta Phytocol Sin*, 2005, 29: 992–999 (in Chinese with English abstract).
- [22] 张丽红, 徐慧珍, 于青春, 李瑞敏, 马忠社. 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. *农业环境科学学报*, 2010, 29: 2139–2146.
Zhang L H, Xu H Z, Yu Q C, Li R M, Ma Z S. The investigation and evaluation of the heavy metal pollution in farmland soil and crop in the Qingyuan of Hebei, China. *J Agro-Environ Sci*, 2010, 29: 2139–2146 (in Chinese with English abstract).
- [23] 邹素敏, 杜瑞英, 文典, 王富华, 张卫杰. 不同品种蔬菜重金属污染评价和富集特征研究. *生态环境学报*, 2017, 26: 714–720.
Zou S M, Du R Y, Wen D, Wang F H, Zhang W J. Enrichment characteristics analysis and assessment on heavy metal contamination of different vegetables. *Ecol Environ Sci*, 2017, 26: 714–720 (in Chinese with English abstract).
- [24] 顾继光. 不同作物品种对重金属的积累特性及农产品品质安全. 中国科学院研究生院(沈阳应用生态研究所)博士学位论文, 辽宁沈阳, 2003.
Gu J G. Accumulative Characteristics of Heavy Metals by Crops and Quality Safety of Agricultural Products. PhD Dissertation of Institute of Applied Ecology Chinese Academy of Sciences (Shenyang Institute of Applied Ecology), Shenyang, Liaoning, China, 2003 (in Chinese with English abstract).
- [25] 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: 688–695.
Yang Y, Chen Z P, Li H L, Liao B H, Zeng Q R. The potential two agricultural cropping patterns for heavy metals from soils. *Acta Ecol Sin*, 2016, 36: 688–695 (in Chinese with English abstract).
- [26] 鲍桐, 廉梅花, 孙丽娜, 孙铁珩, 苏磊, 雷刚. 重金属污染土壤植物修复研究进展. *生态环境*, 2008, 17: 858–865.
Bao T, Lian M H, Sun L N, Sun T Y, Su L, Lei G. Research progress on phytoremediation of soils contaminated by heavy metals. *Ecol Environ*, 2008, 17: 858–865 (in Chinese with English abstract).
- [27] Hammer D, Keller C. Phytoextraction of Cd and Zn with *Thlaspi caerulescens* in field trials. *Soil Use Manage*, 2003, 19: 144–149.