

郴州尾矿区不同油菜品种对重金属吸收积累特性的比较

杨 洋¹, 黎红亮², 陈志鹏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, 湖南 长沙 410128; 2.湖南农业大学资源与环境学院, 湖南 长沙 410128)

摘 要:油菜因具有生长快速、生物量较高、且对重金属有较强的耐性及吸收积累能力的特点, 常用来修复土壤重金属污染。本试验在湖南郴州某尾矿区受重金属复合污染的农田, 种植芥菜型油菜(BJ)、甘蓝型油菜(BL)、加拿大甘蓝型油菜(CBL)和本地油菜(LR) 4个品种, 对比不同品种油菜对重金属的吸收积累情况。结果表明: Pb 主要积累在油菜的根部, Cu、Zn、Cd 在油菜的根、叶中的积累浓度都很高, 而茎和果实中的重金属含量很低; 油菜叶对重金属的积累浓度表现为: Zn>Cu>Pb>Cd, 根对重金属的吸收积累量的顺序为: Pb>Zn>Cu>Cd; 重金属在不同品种油菜间的吸收积累及转运情况存在差异性显著, 地上部分(叶)的富集能力表现为: Cu: BJ>LR>BL>CBL, Zn: BL>CBL>BJ>LR, Pb: BJ≈LR>BL≈CBL, Cd: BL>CBL>BJ>LR; 重金属从茎秆转移到叶片转运系数(T_d)为: Cu: LR>BJ≈CBL>BL, Zn: BL>LR>BJ>CBL, Pb: BJ>CBL≈LR>BL, Cd: BJ>BL>CBL>LR。总的来说, 芥菜型油菜适合 Cu、Pb 污染的土壤; 甘蓝型油菜对 Zn、Cd 的吸收积累效果最好, 非常适合用来修复重金属复合污染的土壤。

关键词:尾矿区; 土壤; 重金属; 油菜

中图分类号: X173

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2015)04-0370-07

doi: 10.13254/j.jare.2014.0210

Comparison of the Uptake and Accumulation of Heavy Metals by Rape Species Grown in Contaminated Soil Surrounding Mining Tails in Chenzhou, China

YANG Yang¹, LI Hong-liang², CHEN Zhi-peng², LIAO Bo-han¹, ZENG Qing-ru^{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: The rape is usually used for phytoremediation of metal-contaminated soils, because it has the characteristics of rapid growth, large biomass, and high potential to tolerate and accumulate large quantities of heavy metals. In this work, accumulation and transformation of Cu, Zn, Pb, Cd in four rape species (*B. juncea* L. (BJ), *Brassica napus* L. (BL), *Canadian Brassica napus* L. (CBL), local rape (LR)) were investigated in soils surrounding mine area contaminated by lead-zinc ore tailings in Chenzhou, Hunan Province. The results showed a significantly high accumulation of Cu, Zn and Cd in leaves and roots of four rape species. However, the concentration of Pb in roots of all rape species was usually one or two orders of magnitude than other parts, and the concentration of heavy metals in stems and fruits was lower. The accumulation of heavy metals in leaves parts was in the order: Zn>Cu>Pb>Cd, and in roots was as: Pb>Zn>Cu>Cd; the order of bioconcentration factor (BCF) of heavy metals in above-ground parts(leaves) of rape species was: Cu: BJ>LR>BL>CBL, Zn: BL>CBL>BJ>LR, Pb: BJ≈LR>BL≈CBL, Cd: BL>CBL>BJ>LR; and the order of translocation factor(TF) from stems to leaves was: Cu: LR>BJ≈CBL>BL, Zn: BL>LR>BJ>CBL, Pb: BJ>CBL≈LR>BL, Cd: BJ>BL>CBL>LR. It indicated there were significant differences among the species. The results of the field experiment suggested that *B. juncea* L. was suitable for phytoextraction of Cu, Pb contaminated soil, *Brassica napus* L. could be used to remediate Zn, Cd or heavy metal combined polluted soils.

Keywords: ore tailings; soil; heavy metal; rape

收稿日期: 2014-08-21

基金项目: 环境保护部公益性行业科研专项“重金属污染耕地农业利用风险控制技术研究”(201009047)

作者简介: 杨 洋(1986—), 女, 湖南长沙人, 博士研究生, 主要从事土壤重金属污染修复的研究。E-mail: yyss0212@163.com

* 通信作者: 曾清如 E-mail: qzeng@163.com

近年来,我国由于重金属所造成的土壤环境污染问题十分严峻。自然的火山爆发、侵蚀等及人类活动是土壤中重金属的主要来源^[1]。其中,采矿是造成土壤重金属污染的重要因素之一,矿产开发过程中产生的大量废渣、废石堆放后形成尾矿堆(或坡),在风和雨水的侵蚀作用下,尾矿中的高浓度重金属很容易扩散到周边的土壤、水体等环境中,形成重金属面源污染^[2]。据 2014 年的最新报告显示,我国有色金属矿区周边土壤镉、砷、铅等污染较为严重,在调查的 70 个矿区的 1 672 个土壤点位中,超标点位占 33.4%,其中包括大面积的农田耕地^[3]。农田中的重金属又能被植物吸收积累通过食物链进入到人体中,危害人类的身体健康,由此产生的食品安全问题备受关注^[4]。尾矿区土壤重金属修复中所需修复的面积大,物理化学或工程修复技术往往存在费用高、规模大、可能会破坏土壤的物理化学及生物学特性等缺点在实际应用中并不可行^[5-6]。植物修复是一种新型的,具有成本低廉、操作简单、安全清洁等优点的环境友好型重金属修复技术^[7]。近年来,为了克服传统的超富集植物在修复过程中生长缓慢、对环境适应能力差、重金属修复比较单一等缺点^[8],植物修复技术的重点已经转向寻找生物量较大、生长适应能力强,对重金属有一定吸收积累特性的植物,如观赏型植物、非食用的经济能源作物等,大量研究也证明了这样的修复方式比利用超富集植物更加可靠有效^[9-11]。

油菜是一种十字花科芸薹属草本植物,而许多超富集植物也属于十字花科^[12-13],油菜对重金属的修复潜力因此受到广泛的关注。已有大量研究证明了不同基因型品种的油菜对重金属都有一定的吸收积累能力,是一种对重金属有修复潜力的非超累积植物^[14-17],且在不同污染环境下油菜中重金属的分布情况还是有差异的。本实验在湖南郴州市城郊的某尾矿区,以油菜为研究材料,将芥菜型油菜、甘蓝型油菜、加拿大甘蓝型油菜、郴州本地油菜(中油 12 号)种植在受重金属复合污染的废弃农田土壤中,研究不同品种油菜中重金属的分布、迁移及富集情况,筛选出适合应用于该尾矿区植物修复的油菜品种,同时为矿区污染农田调整农业布局,改善土壤环境以及废弃农田重金属植物修复技术提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验地点位于湖南郴州市城郊的某尾矿区,该区

由于常年的矿产开采,将大量的重金属带入了周边农田土壤,使得土壤重金属污染相当严重。其中,Cu、Zn 小于国家三级标准,Pb 和 Cd 则远远超过了国家三级标准。本实验大田种植土壤的重金属本底值见表 1。

表 1 土壤重金属本底值(mg·kg⁻¹)
Table 1 The background value of the heavy metal
in the soil (mg·kg⁻¹)

指标	试验土壤	二级标准	三级标准
Cu	132.93 ± 13.54	≤100	≤400
Zn	312.51 ± 34.52	≤250	≤500
Pb	1 061.78 ± 89.36	≤300	≤500
Cd	6.31 ± 1.41	≤0.3	≤1.0
pH 值	5.25 ± 0.54		

注:数值为 4 个小区土壤样品平均值±标准误差。

试验采用 4 个油菜品种进行大田种植试验,分别是芥菜型油菜、甘蓝型油菜、加拿大甘蓝型油菜和本地油菜(中油 12 号),实验室分别用编号BJ、BL、CBL、LR 表示。

1.2 试验方法

1.2.1 样品的采集和处理

在受重金属污染的试验地点划分 4 个 5 m×12 m 的小区,土壤样品采集于试验点的 30 cm 层农田土壤,每个小区采用五点法采集 5 个点土壤样品,每个样点 1 kg。将样品带回实验室,把土块压碎,除去残根、杂物,自然风干后,过 80 mm 尼龙筛,备用测土壤重金属本底值(表 1)。前一年的冬季分别在每个小区种上 4 个品种的油菜,期间进行施肥、除草、除虫等常规田间管理。第 2 年 5 月,在植物即将成熟且茎秆没有干枯前,从试验田随机采取不同品种的油菜整株样品(每个品种 9 株)。采回来的植物样品将其分为根、茎、叶、果(包括果荚和籽粒),洗净、干燥后用植物粉碎机研磨、过筛,装入封口袋中贴好标签保存,待测其重金属的含量。

1.2.2 样品的测定

土壤中重金属总量的测定:用 HCl-HNO₃-HF-HClO₄ 消解,用 ICP-OES 测定重金属含量;植物中重金属的测定:用 HNO₃-HClO₄ 消解,用 ICP-OES 及原子吸收石墨炉测定重金属的含量。

1.3 分析方法

植物富集系数(BCF)=地上部分重金属的含量/土壤中重金属的含量,包括根、茎秆、叶、果荚和籽粒 4 部分;转运系数(TF)=植物后一部位中重金属的含量/前一部位中重金属的含量,包括重金属从根到茎

(T_{rs})、茎到叶(T_{sl})、茎到果荚(T_{sp})、果荚到籽粒(T_{ps}) 4 个部分^[18]。

1.4 数据处理

实验数据用 DPS7.05 进行统计分析,多重比较采用 Duncan 多重极差检验法,用 Origin 8.0 作图,所有数据均用平均值 $\pm$ 标准差表示,其中土壤样品重复数为 4,植物样品重复数为 9。

2 结果与讨论

2.1 不同品种油菜对重金属 Cu、Zn、Pb、Cd 的积累分布情况

本实验在野外大田试验小区随机采取不同品种样品进行分析测量,重金属 Cu、Zn、Pb、Cd 在不同油菜各部位的含量如图 1 所示。由图 1 可知,重金属在不同油菜品种之间、植株地上和地下各部位中的含量都存在显著差异性($P \leq 0.05$)。重金属 Cu 和 Cd 的累积量最高的部位都是叶片,远大于其他部位的含量。

在 4 个品种叶中 Cu 的含量分别为:芥菜型油菜 $118.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、甘蓝型油菜 $105.51 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、加拿大甘蓝型油菜 $92.674 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、本地油菜 $114.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。甘蓝型油菜叶中 Cd 的含量最高为 $7.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,本地油菜叶中 Cd 含量最低为 $3.51 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;油菜根中 Cd 的含量也较高在 $2 \sim 5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。Zn 在根和叶中的含量比较高,明显高于茎、果荚和籽粒中的含量^[19];甘蓝型油菜和加拿大甘蓝型油菜叶中的 Zn 的含量要高于根部,分别为 268.61 、 $214.06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;而芥菜型油菜和本地油菜根中 Zn 的含量要稍高于叶,却又低于甘蓝型油菜和加拿大甘蓝型油菜根中含量;甘蓝型油菜和加拿大甘蓝型油菜对 Zn 的吸收能力较强。Zn 在 4 个品种籽粒中的含量都要高于果荚,其中本地油菜籽粒中的 Zn 含量最高,为 $78.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而籽粒中其他几种重金属的含量都低于果荚。十字花科植物的根系对 Pb 的积累能力很强^[20-21],4 个品种根中 Pb 的含量 $226.53 \sim 251.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,是茎、果实中含量的

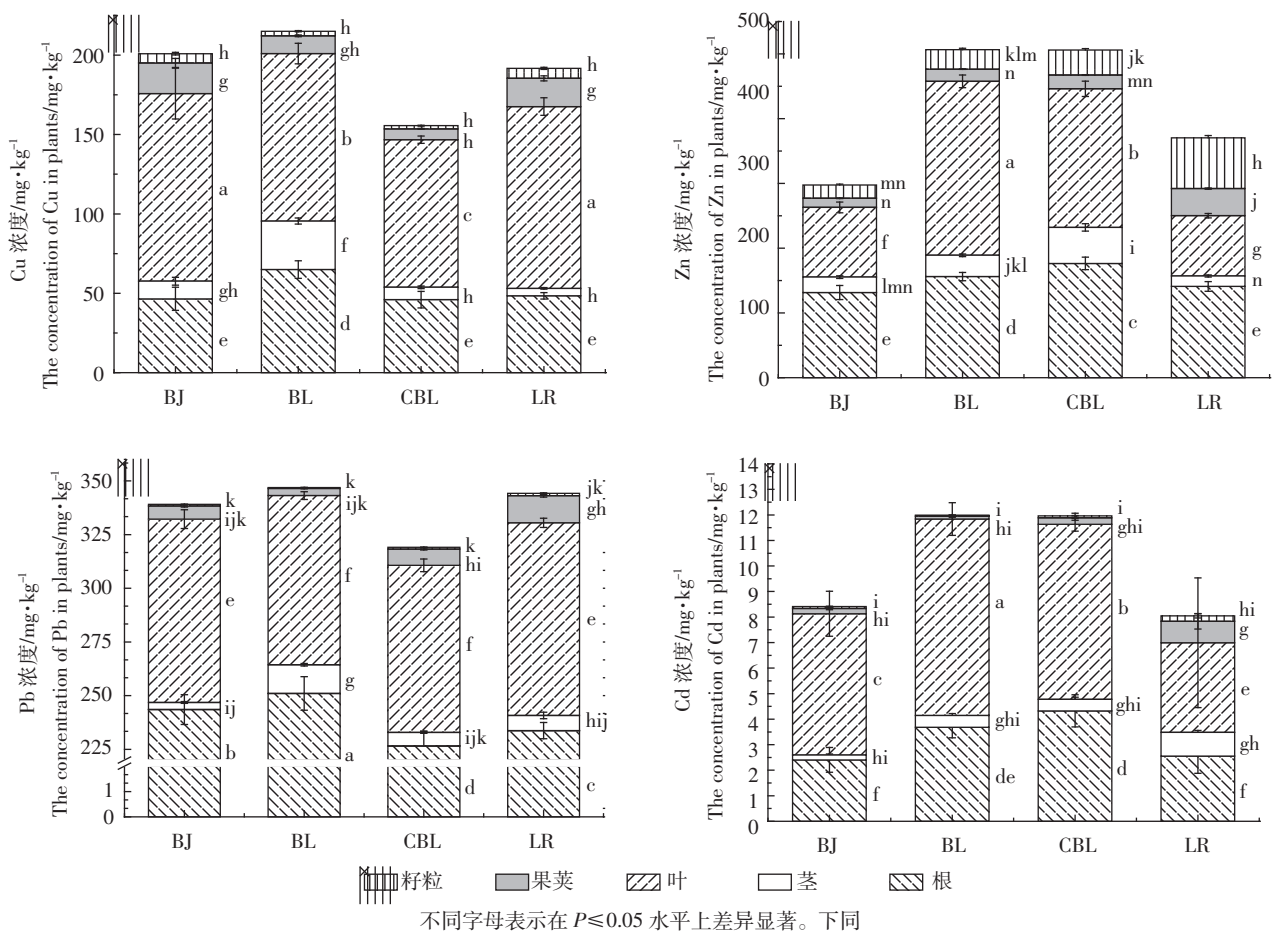


图 1 不同品种油菜中重金属的积累浓度

Figure 1 The concentration of heavy metals in plants

十几倍至 80 倍,是叶中的 3 倍多。总的来说,油菜地上部分对重金属的吸收积累浓度的顺序为: $Zn>Cu>Pb>Cd$,地下部分根对重金属的吸收积累浓度的顺序为: $Pb>Zn>Cu>Cd$,这与 Gennaro 等^[22]对甘蓝型油菜的试验结果一致。

2.2 不同油菜品种中重金属的迁移转运及富集情况

植物对重金属的富集系数(BCF)以及转运系数(TF)是判断该植物是否具有修复重金属潜力的 2 个重要指标^[23]。由图 2 可知,油菜中重金属 Cu、Zn、Pb、Cd 在油菜各部位的转运能力表现出显著差异性($P\leq 0.05$)。重金属由茎转向叶的系数 T_{sl} 显著高于其他部位的转运系数且都大于 1; 品种间的 T_{sl} 差异也十分显著,不同油菜品种将重金属从茎秆转移到叶片的能力分别为 Cu: $LR>BJ\approx CBL>BL$, Zn: $BL>LR>BJ>CBL$, Pb: $BJ>CBL\approx LR>BL$, Cd: $BJ>BL\approx CBL>LR$ 。重金属 Cu、Pb、Cd 从油菜根到茎的转运系数 T_{rs} 及果荚到籽粒的转运系数 T_{ps} 两者间以及不同油菜品种间差异不显著,且都小于 1; Zn 从根到茎的转运系数在品种间的差异不显著且小于 1, Zn 由果荚转向籽粒的转运系数 T_{ps} 品种间无差异,但明显高于 T_{rs} 。Cu、Zn 在本地油

菜 LR 中茎到果荚的转运系数 T_{sp} 显著高于其他 3 个品种; Pb、Cd 由茎转向果荚的系数 T_{sp} 是芥菜型油菜 BJ 和本地油菜 LR 明显高于其他 2 种油菜。总的来说,油菜对重金属的迁移转运率最强的是从茎秆到叶片,而植物地上部分生物量主要部分一般都是叶片,所以重金属从茎秆转向叶片的能力也是评价植物吸收积累重金属能力的一个重要参考指标。由此可以得出,芥菜型油菜 BJ 在对 Pb、Cd 的转运能力最强,本地油菜 LR 对 Cu 的转运能力最强,甘蓝型油菜 BL 对 Zn 的转运能力最强。Marchiol 等^[14]的盆栽实验中,芥菜型油菜在几个不同品种中对重金属的迁移转运效率都是最高,这与本文大田实验结果稍有不同。

不同油菜品种中重金属的富集系数由图 3 所示,不同重金属在油菜根和叶中的富集系数差异显著($P\leq 0.05$)。油菜中重金属根和叶中的富集系数明显高于茎、果荚和籽粒。Cd 在油菜叶中富集系数大于根部,其中甘蓝型油菜 BL 和加拿大甘蓝型 CBL 叶中 Cd 的富集系数大于 1,分别为 1.22、1.09。Pb 在油菜中各部位的富集系数都很小,地下部分根的富集系数均在 0.22 左右,显著高于其他各部位的富集系数; Pb

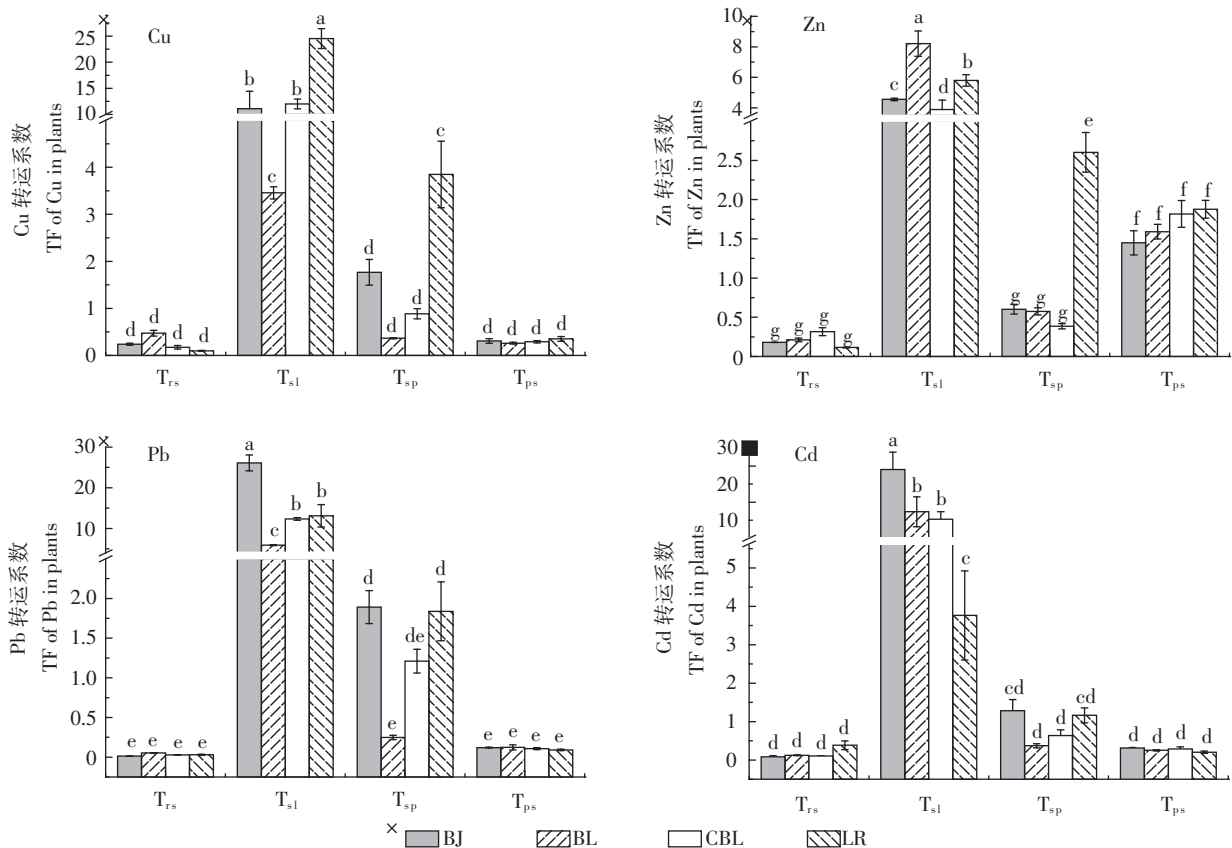


图 2 不同油菜品种中的重金属的迁移转运系数

Figure 2 Translocation factor of heavy metals in plants

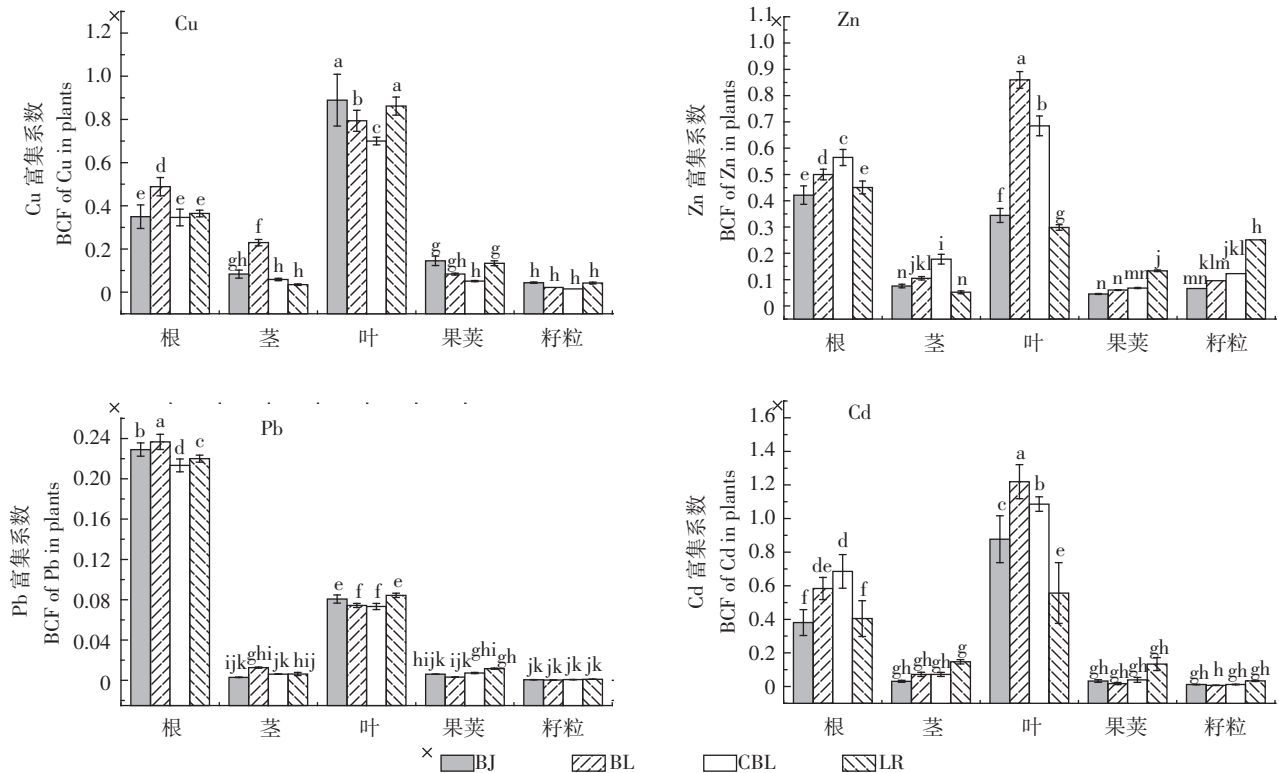


图 3 不同油菜品种中重金属的富集系数

Figure 3 Bioconcentration factor of heavy metals in plants

在叶中的富集系数高于地上部分的其他部位,其中芥菜型 BJ($BCF=0.081$)和本地油菜 LR($BCF=0.084$)的富集系数略高于其他 2 种油菜。Cu 在芥菜型 BJ($BCF=0.89$)和本地油菜 LR($BCF=0.86$)叶中的富集系数接近 1.0,而在地下部分根及地上其他部位的富集系数都小于 0.6;Zn 在油菜茎叶中的富集系数品种间差异很大,甘蓝型 BL 和加拿大甘蓝型 CBL 对 Zn 富集最高的是叶片(BL:0.86、CBL:0.68),显著高于根部(BL:0.5、CBL:0.56)和其他部位的富集系数;与之相反的是芥菜型 BJ 和本地油菜 LR 根中 Zn 的富集系数(BJ:0.42、LR:0.45)却要高于叶中的富集系数。Cu、Zn、Pb、Cd 在油菜茎、果荚和籽粒中的富集系数都比较小,均在 0.2 左右。一般富集系数 BCF 会随着土壤中重金属浓度的升高而降低^[24],通常种植在污染土壤中的植物对重金属的富集系数都小于 1^[25]。重金属在油菜中各部位的富集能力表现为:Cu: 叶>根>茎≈果荚≈籽粒,Pb: 根>叶>茎≈果荚>籽粒,Zn: 根>叶>茎>籽粒>果荚,或者叶>根>茎>籽粒>果荚;Cd: 叶>根>茎≈果荚≈籽粒。根据地上部分的富集系数来判断不同品种油菜间对重金属的富集能力,Cu: BJ≥LR>BL>CBL,Zn: BL>CBL>BJ>LR,Pb: BJ≈LR>

BL≈CBL,Cd: BL>CBL>BJ>LR。

3 讨论

研究发现,许多超富集植物都属于十字花科芸薹属^[12-13],如印度芥菜被认为是其中最具有修复潜力的超富集植物,在大量的水培、盆栽及温室试验中都证明了印度芥菜对重金属 Cd、Cu、Ni、Zn、Pb、Se 有很强的耐性和吸收能力^[14,19],其地上部分干重 Cd 的浓度可高达 $400 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ^[26]。在众多大生物量、高积累的植物中,芸薹属的油菜是一种生长较快、耐旱的农作物,生物量是一些超富集植物的十倍^[25],因此而受到研究者的重视。许多研究表明,盆栽试验下油菜对 Cu、Zn、Pb、Cd 都有很强的耐受和积累能力,一般地上部分的积累浓度高于地下部分,表现出富集植物的特征^[22,27]。在实际大田中,受到土壤水分、pH 值、微生物等环境的影响,油菜不同部位中重金属含量与盆栽土培、沙培以及水培试验存在明显的差异性,往往达不到同样的吸收积累量^[14,17]。

重金属在各品种油菜中的主要积累部位是根和叶,根据油菜根和叶对重金属的富集转运情况可作为判断其修复能力的重要指标。本试验是在高浓度 Pb

($1\,061.78\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、Cd($6.31\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)及中低浓度 Cu、Zn 复合污染的大田条件下进行的,4 个油菜品种叶中 Cu、Cd 的浓度高于地下部位。只有甘蓝型和加拿大甘蓝型油菜叶中 Cd 的富集系数大于 1,且甘蓝型油菜对 Zn 富集转运能力也要明显高于其他品种,这有可能是甘蓝型油菜与 Zn、Cd 的超富集植物拟南芥和遏兰菜在基因上相似,对重金属的吸收积累的机制比较接近^[28-29],使得甘蓝型油菜对 Cd、Zn 表现出很好的吸收积累能力。Cu 在 4 个油菜品种叶中的含量比较高,富集系数都接近 1,本地油菜的富集和转运能力最好,要高于 Gennaro 等^[22]大田试验中甘蓝型油菜 Cu 的富集系数,主要是因为 Gennaro 等是在碱性污染土壤上进行研究,而本试验的土壤属于中偏酸性土。通过盆栽实验将土壤中 Pb 浓度增加到 $850\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,油菜地上部分的富集系数却大于 1^[27],说明油菜对 Pb 的富集能力很强。而本试验在大田环境下,油菜地上部分 Pb 的富集系数很小,对 Pb 的转运和富集能力稍强的芥菜型油菜地上部分富集系数也都小于 0.1,根中的浓度(根中 Pb 富集系数小于 0.25)远大于地上的其他部位,可能是因为盆栽试验添加的 Pb 都是可溶性的,比较利于植物的吸收积累,而实际土壤中的 Pb 稳定性比其他金属要好,能被植物吸收的部分很少^[30];其次是在高 Cd 的土壤环境下,Pb 可以夺取 Cd 在土壤中的位点,从而降低了 Pb 的稳定性和提高了 Cd 的活性^[27]。总的来说,芥菜型油菜和本地油菜对重金属 Cu、Pb 富集转运能力较好,比较适合 Cu、Pb 单一污染或 Cu-Pb 复合污染的土壤;而甘蓝型油菜对 Cd、Zn 的富集转运能力明显高于其他 3 种,对 Cu、Pb 的富集能力也与芥菜型和本地油菜差别不大。甘蓝型油菜在该试验中对 Cu、Zn、Pb、Cd 的吸收积累效果是最好的,Veerle 等^[31]也通过试验提出了甘蓝型油菜非常适合用来修复中度重金属污染的土壤。结合众多的研究结果,油菜在盆栽试验中可能是一种重金属的富集植物,而在实际大田环境中,油菜则是一种对高浓度重金属污染土壤有很好耐性的植物。如果要将油菜作为重金属土壤修复的植物,就必须根据土壤自身的环境,结合生物、化学等方法改变土壤中重金属的活性,来提高油菜对重金属的提取能力。

除此之外,油菜也是世界上最古老的一种油料作物,甘蓝型油菜在世界各地广泛种植,油菜籽除了作为生活必需的食用油,也逐渐发展成为生物燃料。将油菜应用到土壤重金属植物修复中来,一方面可以去除土壤中的重金属;另一方面可以与生物燃料生产相

结合,为不断增长的石油需求提供新的燃料,这样避免了重金属通过食物链危害人类,又能从中获取经济效益^[31]。

4 结论

在重金属中-重度复合污染的土壤中,不同品种油菜都能正常生长,表现出一定的耐性。重金属主要积累在油菜的根和叶中,Pb 在油菜根部的浓度远远高于其他部位,Cu、Zn、Cd 在不同品种油菜的根和叶中吸收积累情况不同,茎秆和果实中重金属的含量都相当低。对比重金属在不同品种油菜中的富集和迁移转运情况发现,芥菜型油菜适用于 Cu、Pb 污染的土壤,甘蓝型油菜对 Zn、Cd 的吸收积累效果最好。总的来说,甘蓝型油菜较其他品种更加适合修复该重金属复合污染的尾矿区土壤。

参考文献:

- [1] Quartacci M F, Argilla A, Baker A J M, et al. Phytoextraction of metals from a multiply contaminated soil by Indian mustard[J]. *Chemosphere*, 2006, 63: 918-925.
- [2] 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.
- [3] 环境保护部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm, 2014-04-17.
National Soil Pollution Survey Bulletin by Ministry of Environmental Protection and the Ministry of Land[EB/OL]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm, 2014-04-17. (in Chinese)
- [4] Zheng N, Wang Q, Zheng D. Health risk of Hg, Pb, Cd, Zn and Cu to the inhabitants around Huludao zinc plant in China via consumption of vegetables[J]. *The Science of the Total Environment*, 2007, 383: 81-89.
- [5] 王学刚,王光辉,刘金生.矿区重金属污染土壤的修复技术研究现状[J]. *工业安全与环保*, 2010, 36(4): 29-31.
WANG Xue-gang, WANG Guang-hui, LIU Jin-sheng. Study on mining area's heavy-metal soil pollution remediation technology[J]. *Industrial Safety and Environment Protection*, 2010, 36(4): 29-31. (in Chinese)
- [6] 滕冲,程峰,王杰光,等.植物修复在治理矿区重金属污染土壤中的应用[J]. *矿产与地址*, 2008, 22(2): 179-182.
TENG Chong, CHENG Feng, WANG Jie-guang, et al. Application of phytoremediation to treating contaminated soil by heavy metals in mined land[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2008, 22(2): 179-182. (in Chinese)
- [7] 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.

- [8] Cherian S, Oliveira M M. Transgenic plant in phytoremediation: recent advance and new possibilities[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(24): 9377–9390.
- [9] 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.
- [10] Petr Soudek, Šarka Petrová, Radomíra Vančková, et al. Accumulation of heavy metals using *Sorghum* sp.[J]. *Chemosphere*, 2014, 104: 15–24.
- [11] Ghavri S V, Singh R P. Growth, biomass production and remediation of copper contamination by *Jatropha curcas* plant in industrial wasteland soil[J]. *Environment Biology*, 2012, 33: 207–214.
- [12] Baker A J M, Reeves R D, Hajar A S M. Heavy metal accumulation and tolerance in British populations of the metallophyte *Thlaspi caerulescens* J. & C. Presl (*Brassicaceae*)[J]. *New Phytologist*, 1994, 127(1): 61–68.
- [13] Prasad M N V, Freitas H. Metal hyperaccumulation in plants–biodiversity prospecting for phytoremediation technology[J]. *Electronic Journal of Biotechnology*, 2003(6): 285–321.
- [14] Marchiol L, Sacco P, Assolari S, et al. Reclamation of polluted soil: phytoremediation potential of crop-related *Brassica* species[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2004, 158: 345–356.
- [15] Meers E, Ruttens A, Hopgood M, et al. Potential of *Brassica rapa*, *Cannabis sativa*, *Helianthus annuus* and *Zea mays* for phytoextraction of heavy metals from calcareous dredged sediment derived soils[J]. *Chemosphere*, 2005, 61: 561–572.
- [16] Fernando F, Rosana G-de-la-F, Rosa M B, et al. ‘Alperujo’ compost amendment of contaminated calcareous and acidic soils: Effects on growth and trace element uptake by five *Brassica* species[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100: 3982–3990.
- [17] Kuldeep B, Rana P S. Growth, tolerance efficiency and phytoremediation potential of *Ricinus communis* (L.) and *Brassica juncea* (L.) in salinity and drought affected cadmium contaminated soil[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, 85: 13–22.
- [18] Brooks R R. Plants that hyperaccumulate heavy metals[D]. Wallingford, UK, CAB International, 1998.
- [19] Carmina G, Rafael C, Juan N A, et al. Tolerance and accumulation of heavy metals by *Brassicaceae* species grown in contaminated soils from Mediterranean regions of Spain[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2006, 56: 19–27.
- [20] Kumar P B A N, Dushenkov V, Motto H, et al. Phytoextraction: the use of plants to remove heavy metals from soils[J]. *Environmental Science and Technology*, 1995, 29: 1232–1238.
- [21] Donald E R M, Graeme J A, Richard I W, et al. Uptake and localization of lead in the root system of *Brassica juncea*[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 153: 323–332.
- [22] Gennaro B, Karam F, Pedro S R, et al. Greenhouse and field studies on Cr, Cu, Pb and Zn phytoextraction by *Brassica napus* from contaminated soils in the Apulia region, southern Italy[J]. *Geoderma*, 2011, 160: 517–523.
- [23] Bose S, Bhattacharyya A K. Heavy metal accumulation in wheat plant grown in soil amended with industrial sludge[J]. *Chemosphere*, 2008, 70: 1264–1272.
- [24] Zhao F J, Lombi E, McGrath S P. Assessing the potential for zinc and cadmium phytoremediation with the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*[J]. *Plant Soil*, 2003, 249: 37–43.
- [25] Zhu Y L, Pilon-Smits E A H, Tarun A S, et al. Cadmium tolerance and accumulation in Indian mustard is enhanced by overexpressing r-glutamylcysteine synthetase[J]. *Plant Physiology*, 1999, 121: 1169–1177.
- [26] Lang M L, Zhang Y X, Chai T Y. Identification of genes up-regulated in response to Cd exposure in *Brassica juncea* L.[J]. *Gene*, 2005, 363: 151–158.
- [27] 林 昕, 高建培. 油菜对镉、铅复合污染土壤修复潜力的研究[J]. 大理学院学报, 2010, 9(4): 76–80.
LIN Xin, GAO Jian-pei. Study on the potential remediation of rape to soils contaminated by cadmium and lead[J]. *Journal of Dali University*, 2010, 9(4): 76–80. (in Chinese)
- [28] Paterson A H, Lan T, Amasino R, et al. *Brassica* genomics: a complement to, and early beneficiary of, the *Arabidopsis* sequence[J]. *Genome Biology*, 2001, 2(3): 1011.1–1011.4.
- [29] Assuncao Ten A G L, Bookum W M, Nelissen H J M, et al. Differential metal-specific tolerance and accumulation patterns among *Thlaspi caerulescens* populations originating from different soil types[J]. *New Phytologist*, 2003, 159: 411–419.
- [30] Huang J W, Cunningham S D. Lead phytoextraction: species variation in lead uptake and translocation[J]. *New Phytol*, 1995, 134: 75–84.
- [31] Veerle M J, Gispens Hans J M, Jos AC Verkleij. Phytoextraction with *Brassica napus* L.: a tool for sustainable management of heavy metal contaminated soils[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 144: 77–83.