

5 种草本植物对土壤重金属铅的吸收、富集及转运

郭晓宏, 朱广龙, 魏学智

(山西师范大学 生命科学学院, 山西 临汾 041000)

摘要:以临汾西山煤矿周边的 5 种优势种植物苍耳(*Xanthium sibiricum*)、夏至草(*Lagopsis supina*)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、灰绿藜(*Chenopodium glaucum*)、早熟禾(*Poa annua*)为试验材料,研究植物修复土壤重金属铅的污染,分析比较其对铅的吸收、转运和富集的能力。结果表明:在铅处理下早熟禾的生物量最大;5 种植物地上部分对铅的吸收量在 10 000 mg 时均达到 1 000 mg/kg 以上,其中夏至草的吸收量最高,达 5 447.25 mg/kg;地下部分对铅的吸收量在 10 000 mg 时也达到 1 000 mg/kg 以上,以苍耳最高,达 13 448.5 mg/kg。夏至草的转运系数和富集系数最高,为铅超富集植物,其余 4 种植物对重金属铅也有很好的吸收富集作用。

关键词:铅污染;植物修复技术;生物量;生物富集系数;转运系数

中图分类号:X53; X173

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)01-0183-04

Characteristics of Uptake, Bioaccumulation and Translocation of Soil Lead (Pb) in Five Species of Herbaceous Plants

GUO Xiaohong, ZHU Guanglong, WEI Xuezhi

(School of Life Science, Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi 041000, China)

Abstract: Five species of herbaceous plants such as *Xanthium sibiricum*, *Lagopsis supina*, *Taraxacum mongolicum*, *Chenopodium glaucum* and *Poa annua* were used to study the uptake, bioaccumulation and translocation of soil heavy metal lead (Pb) and to explore the restoration capacity of plant to soil severely polluted by Pb near the western hills of Linfen City. The results showed that the biomass accumulation of *Poa annua* was the highest among the tested plants under Pb treatment; the contents of Pb in above-ground biomass of all plants were greater than 1 000 mg/kg in 10 000 mg treatment group, particularly in *Lagopsis supina*, it illustrated the highest content and reached to 5 447.25 mg/kg. In the under-ground biomass, the similar trend as the above-ground biomass was observed, and the contents also reached up to 1 000 mg/kg in 10 000 mg treatment group, the maximum content was 13 448.5 mg/kg in the *Xanthium sibiricum*. The biological concentration factor and translocation factor of *Lagopsis supina* were all the highest, therefore, the results suggested that the *Lagopsis supina* was the Pb hyperaccumulation plant, and the other four kinds of plants have strong ability of Pb uptake, and they all can be used to remedy soil polluted by heavy metal.

Keywords: lead pollution; phytoremediation; biomass; biological concentration factor; translocation factor

随着全球经济的发展,工业化和城市化进程加速,矿物开采与金属冶炼规模扩大,重金属污染物通过各种不同的途径进入土壤,使土壤重金属污染的程度愈发严重,对人类和其他生物的生存环境造成严重威胁。据研究测算,中国重金属污染耕地面积约占总耕地面积的 $1/6^{[1]}$ 。铅是重金属污染最严重的元素之一^[2],且被认为是可能的人类致癌物质之一^[3]。植物修复技术(phytoremediation)是利用植物对重金属化合物的吸收、富集和转化能力,把土壤、水体和大气

中残存的重金属污染物吸收、富集到植物体内,然后收获植物,通过焚烧等方法回收重金属,实现环境修复的目标。以其成本低、不破坏土壤生态环境,不造成二次污染、易被公众接受等优点而大受关注^[4-5]。

重金属耐性植物和超富集植物(hyperaccumulators)的筛选则是植物修复技术的基础和关键,而现今发现的超富集植物多为小生物量的草本植物^[6],污染地区的本土优势植物是试验的首选,可避免引入外来生物,破坏当地的生态平衡^[7]。

本研究通过野外调查,选出该矿区的 5 种优势种植物蒲公英、早熟禾、夏至草、苍耳和灰绿藜,苍耳是已发现的铅富集植物^[8],而已发现的超富集植物大部分属于禾本科、莎草科、菊科、唇形科、豆科、十字花科、蓼科和凤尾蕨科等的植物种类,较其他几个科多,本试验选择的 5 种植物都在这几科内,所以通过对这 5 种植物对重金属铅的吸收、富集和转运特性进行研究,为筛选修复西山煤矿矿区周边土壤中重金属铅的适种植物提供理论依据,也为土壤重金属污染的防治提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

西山煤矿位于山西省临汾市尧都区(36. 20N, 111. 33E),该区属温带大陆性气候,极端最高气温 42. 3℃,极端最低气温-25. 6℃,年平均温度为 12. 6℃,平均降水量 527. 4 mm,植被以草本和矮小灌木居多。本试验中选取的植物为该矿区的 5 种优势种草本植物:苍耳(*Xanthium sibiricum*)、夏至草(*Lagopsis supina*)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、灰绿藜(*Chenopodium glaucum*)、早熟禾(*Poa annua*)。于 2013 年 10 月采集苍耳、夏至草、蒲公英、灰绿藜、早熟禾的种子。土壤样品的采样深度为 0—20 cm。

1.2 试验方法

种子用 0. 1% 的 HgCl₂ 消毒 10 min,流水冲洗,200 mg/L 赤霉素浸泡 24 h,挑选籽粒饱满,大小均匀的种子放入直径 15 cm 的培养皿(铺有 3 层纱布),去离子水湿润,温度为(25±1)℃,光照时间为 12 h,定期补加去离子水,萌发^[9]。待幼苗长至 3 cm 左右进行分盆移栽,每盆栽种 1 株植物,培养方式为沙培,用 10% Hoagland 营养液培养^[10],植株长到 10~15 cm 开始铅处理,每组处理做 5 个重复。

Pb(NO₃)₂ 配制铅处理液,处理浓度分别为 0, 1 000, 5 000, 10 000, 15 000, 20 000 mg/L,每盆装沙 0. 5 kg, 4 d 处理 1 次,分 12 次完成铅处理,浇灌量依次为 20, 20, 20, 30, 30, 30, 50, 50, 50, 50, 75, 75 ml,每次处理间隔浇 1 次 10% 的 Hoagland 营养液,共 48 d 处理完成,施入的铅总量梯度为 0, 500, 2 500, 5 000, 7 500, 10 000 mg。待铅处理完成后采集植物(不包括已死亡的植株),去离子水冲洗干净,分为地上部分(包括茎、叶)和地下部分(根)。105℃杀青 5 min, 70℃烘干 24 h 至恒重,称量,研磨,100 目(孔径为 0. 143 mm)尼龙筛过筛。土壤样品经自然风干除杂后,磨碎,过 100 目尼龙筛,混匀。植物样品用硝酸—高氯酸法消解,土壤样品用王水—高氯酸法消解。同时做试样空白对照。

1.3 计算方法

以原子吸收分光光度法测定其重金属铅含量,并计算相应的富集系数和转运系数^[11]:

转运系数=植物地上部重金属含量/植物地下部同种重金属含量

富集系数=植物体某种重金属含量/土壤中同种重金属含量

1.4 统计分析

主要应用 Microsoft Excel 2003, SPSS 16. 0 和 Origin 9. 0 软件进行数据分析及图表处理。

2 结果与分析

2.1 土壤铅污染特征

采样点重金属铅的含量普遍较高,污染程度超过国家《土壤环境质量标准》(GB15618—1995)3 级标准^[12]。重金属铅超标倍数平均值为 18. 54,说明矿区周边土壤重金属铅污染严重(表 1)。

表 1 西山煤矿矿区土壤重金属铅污染情况

土样 编号	土壤 Pb 含量/ (mg · kg ⁻¹)	超标 倍数	土壤环境质量三级 标准/(mg · kg ⁻¹)
1	9675. 80±23. 78	19. 35	500
2	8770. 65±21. 57	17. 54	500
3	9372. 45±34. 98	18. 74	500

注:表中的铅含量数值为平均值±标准误差;超标倍数=(测定值-标准值)/标准值。

2.2 不同量 Pb 对 5 种植物的影响

由表 2 可知,植物在铅处理下长势很好,存活率很高,只有少数是 80%,处理组的生物量均高于对照组。在 10 000 mg 处理组中,植物的存活率除早熟禾外其余都为 80%,表明早熟禾对铅的耐性比其余 4 种植物强。由图 1 可知,在不同处理中,5 种植物的生物量差异性显著,早熟禾的总生物量最高,夏至草的最低。在 0~5 000 mg 处理梯度内,植物生物量随着铅处理浓度的增加而增加,说明低浓度重金属铅对植物的生长有一定的刺激作用,5 000 mg 时的植物生物量与对照处理组有明显差异($p<0. 05$)。当铅浓度继续增加,植物生物量开始下降,高浓度铅对植物的生长起到抑制作用。在每个处理组中,5 种植物的长势基本差异显著,只有蒲公英和苍耳在 500, 5 000, 7 500 mg 处理组中在差异不显著($p>0. 05$),说明同一处理浓度下,不同的植物体现出对铅不同的耐性。

2.3 不同 Pb 量下植物地上部分和地下部分对 Pb 的吸收量

由图 2 可知,不同植物的同一部位对铅的吸收能力是不同的,5 种植物茎和叶对铅的吸收量表现为夏

至草最大,每个处理组中其余 4 种植物对夏至草而言均差异显著($p<0.05$),但是 4 种植物间的差异性不显著。根对铅的吸收量在每个处理组间都是不同的,在对照组 2 500,5 000,10 000 mg 中苍耳的量最大,500 mg 中是夏至草,7 500 mg 则是蒲公英,但由于在 500,2 500,5 000,7 500 mg 处理组中植物间的差异性不是极显著,所以地下部分中认为苍耳对铅的吸收量最高。5 种植物对铅的吸收量在 10 000 mg 时均高于 1 000 mg/kg,对重金属铅具有较高的吸收能力。

表 2 不同铅量处理下 5 种植物的存活率 %

植物种类	总铅量/mg					
	0	500	2500	5000	7500	10000
蒲公英	100	100	100	100	100	80
早熟禾	100	100	100	100	100	100
夏至草	100	100	100	100	80	80
苍耳	100	100	100	100	100	80
灰绿藜	100	100	100	100	100	80

2.4 植物对铅的富集和转运特征

不同的植物对重金属的富集和转运能力也不尽相同(图 3),除 10 000 mg 以外的 4 个处理组中,5 种植物对铅的富集能力由强到弱多表现为夏至草>苍耳>蒲公英>早熟禾>灰绿藜。在每个处理组中夏

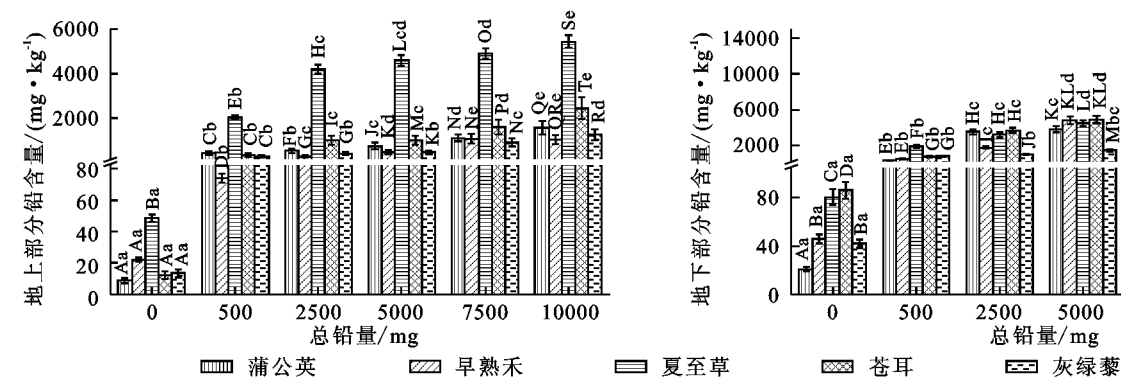


图 2 不同植物地上部分和地下部分铅含量

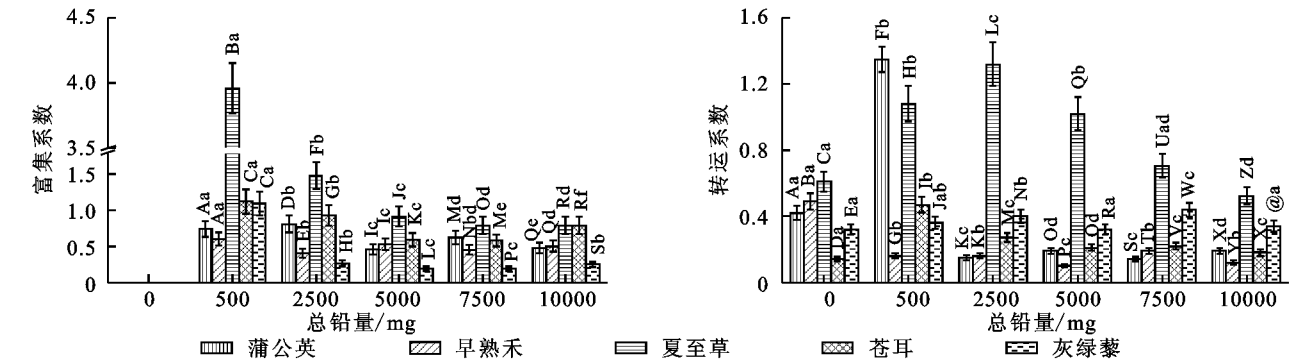
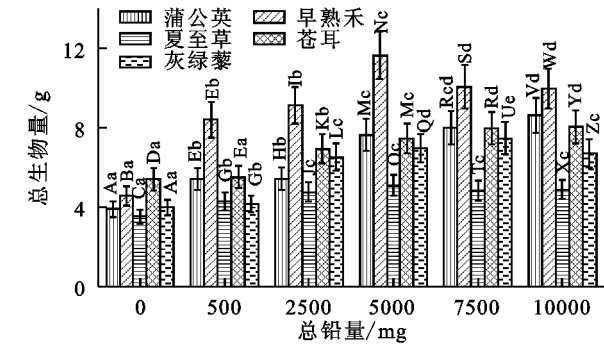


图 3 5 种植物的富集和转运特征

3 讨论与结论

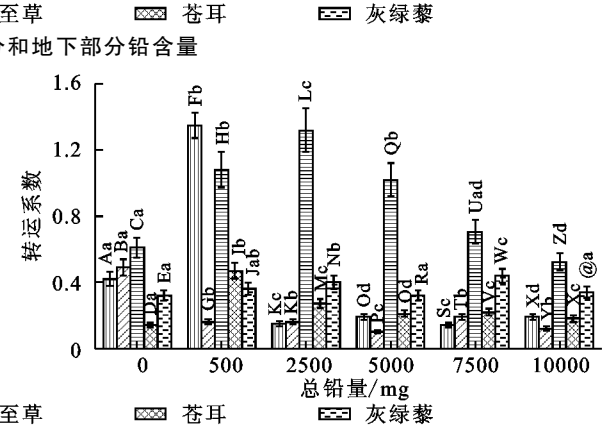
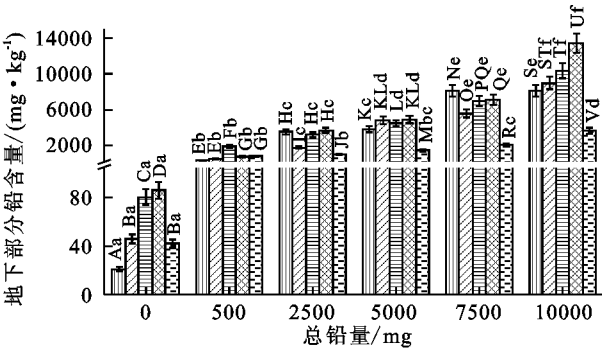
5 种植物在铅处理下长势良好,存活率高,表明这 5 种植物对铅的耐性极强,能适应铅污染介质。5 种植物在不同浓度下的生物量均不同,证明不同植物对铅

至草的富集系数均最高,苍耳次之。随着处理浓度的增加,5 种植物的富集系数基本呈降低趋势,最后趋于平稳,表明随着处理浓度的增加,植物对铅的富集能力在减弱,植物受到的毒害作用增大。5 种植物中对铅的转运能力除 500 mg 处理组中蒲公英的转运能力最强外,其余组中最强的是夏至草,次之灰绿藜,其余 3 种转运系数较低,综合比较 5 种植物还是夏至草的转运能力强。



注:不同小写字母表示同种植物在不同处理下差异性显著($p<0.05$),相同字母则表示差异性不显($p>0.05$),不同大写字母表示同一处理组内不同植物间的差异性显著($p>0.05$),相同字母则表示差异性不显($p>0.05$),下图同。

图 1 不同植物在铅处理下的生物量



的耐性存在一定差异,同一植物对不同浓度的铅处理也表现出一定的差异,高红真等^[13]的研究也证实了这一结论。低浓度处理下,植物生物量呈上升趋势,起促进生长的作用;高浓度处理下植物生物量开始下降最后趋于平稳,表现出抑制作用。张晓薇等^[14]的研

究同样表明随着植物的生长,铅浓度的增加,植物抵御铅胁迫和毒害作用的能力在减小,甚至有可能受毒害致死,铅对植物的生长抑制作用在增加。

不同植物的不同部位对铅的吸收能力也是不同的,地上部分是夏至草对铅的吸收量最高,地下部分则是苍耳。由于夏至草的富集能力和转运能力均最强,只有7 500,10 000 mg处理组小于1,但是分别大于0.7,0.6,很大程度上满足了超富集植物的标准^[15],筛选出夏至草为铅超富集植物。其余4种植物中,苍耳对铅的吸收能力很强,但是转运系数均低于0.5,大部分铅被吸收后累积在根部,由于地下部分收割难度较大,比较容易造成对土壤的二度污染^[16]。蒲公英、早熟禾和灰绿藜对铅的吸收能力都较强,无论地上部分还是地下部分在铅处理时对铅的吸收量均能接近或达到1 000 mg/kg,但是它们的富集能力和转运能力均较低,故这4种植物不作为修复污染土壤的首选植物。由于这4种植物在铅处理下,长势良好,生物量较大,在没有更好的本土修复植物的前提下,也可作为修复植物,但是后期的处理将会比较困难,目前对于吸收能力较好但是转运能力较低的重金属富集植物的后期处理还没有很好的解决办法。综上所述,夏至草是一种理想的铅超富集植物,可将其作为土壤铅污染修复的先锋植物。

在实际治理中,必须根据当地的植物生长情况因地制宜,最好是采用当地的优势种植物来完成对污染土壤的修复,避免因为外来生物的引进而破坏当地的生态平衡,维持环境的稳态,减少不必要的影响,才能更好地修复污染土壤。

参考文献:

- [1] 宋伟,陈百明,刘琳.中国耕地土壤重金属污染概况[J].水土保持研究,2013,20(2):293-298.
- [2] 程新伟.土壤铅污染研究进展[J].地下水,2011,33(1):65-68.
- [3] 张正洁,李东红,许增贵.我国铅污染现状、原因及对策[J].环境保护科学,2005,31(130):41-47.
- [4] 李惠英,户正荣,傅金民.不同基因型高羊茅的耐铅与铅富集特性[J].草业科学,2014,31(7):1269-1274.
- [5] 韦朝阳,陈同斌.重金属超富集植物及植物修复技术研究进展[J].生态学报,2001,21(7):1196-1203.
- [6] Chehregani A, Noori M, Yazdi H L. Phytoremediation of heavy-metal-polluted soils: screening for new accumulator plants in Angouran mine (Iran) and evaluation of removal ability[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2009, 72(5):1349-1353.
- [7] 雷梅,岳庆玲,陈同斌,等.湖南柿竹园矿区土壤重金属含量及植物吸收特征[J].生态学报,2005,25(5):1146-1151.
- [8] 聂俊华,刘秀梅,王庆仁. Pb(铅)富集植物品种的筛选[J].农业工程学报,2004,20(4):255-258.
- [9] 杨颖丽,王文瑞,尤佳,等. Cd²⁺胁迫对小麦种子萌发、幼苗生长及生理生化特性的影响[J]. 西北师范大学学报:自然科学版,2012,48(3):88-94.
- [10] Aldrich M V, Gardea-Torresdey J L, Peralta-Videa J R, et al. Uptake and reduction of Cr (VI) to Cr (III) by mesquite (*Prosopis* spp.): Chromate-plant interaction in hydroponics and solid media studied using XAS [J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(9):1859-1864.
- [11] 张丽,彭重华,王莹雪,等. 14种植物对土壤重金属的分布、富集及转运特性[J]. 草业科学,2014,31(5):833-838.
- [12] 国家环境保护局,国家技术监督局. 土壤环境质量标准 GB15618-1995[S]. 北京:中国标准出版社,1995.
- [13] 高红真,郭伟珍,毕君. 20种植物对铅的耐性和富集能力研究[J]. 中国农学通报,2014,30(19):19-24.
- [14] 张晓薇,李娇. 铅对农作物生长的影响[J]. 环境科技, 2010,23(1):68-71.
- [15] Baker A J M, Brooks R R, Pease A J, et al. Studies on copper and cobalt tolerance in three closely related taxa within the genus *Silene* L. (Caryophyllaceae) from Zaïre[J]. Plant and Soil, 1983, 73(3):377-385.
- [16] 李庚飞. 4种草类植物对矿区土壤重金属的富集特征[J]. 草业科学,2013,30(2):185-189.