

羽叶鬼针草对 Pb 的吸收特性及修复潜力

王红旗, 李华, 陆泗进*

(北京师范大学环境学院环境模拟与污染控制国家重点实验室, 北京 100875)

摘要: 羽叶鬼针草对土壤中 Pb 的吸收特性和修复潜力的研究表明: ① 鬼针草对 Pb 有很强的吸收能力, 在土壤 Pb 浓度为 $2\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 鬼针草地上部和根系中 Pb 含量达到最高, 分别为 $2\ 164.7\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1\ 509.3\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; ② 鬼针草植物对 Pb 的吸收有很强的分异特征, 植物吸收的 Pb 主要富集于地上部, Pb 在植物体内的分布规律是叶子 > 茎 > 根系 > 种子; ③ 不同生长期植物对 Pb 的吸收速度是不同的, 植物在开花期对 Pb 的吸收速度最大, 吸收量根系为 $15.81\ \text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$, 地上部是 $19.83\ \text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$. 羽叶鬼针草具备修复土壤 Pb 污染的潜力.

关键词: 植物修复; 羽叶鬼针草; 铅污染; 修复潜力

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2005)06-0143-05

Bidens maximowicziana's Adsorption Ability and Remediation Potential to Lead in Soils

WANG Hong-qi, LI Hua, LU Si-jin

(State Key Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Institute of Environmental, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: *Bidens maximowicziana's* adsorption ability and remediation potential to lead were studied. The results show: ① The *Bidens maximowicziana* has a strong adsorption to lead, the concentration of lead in plants increased linearly with the increase of lead concentration in soil. Then maximum concentration was $1\ 509.3\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ in roots and $2\ 164.7\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ in shoots when lead concentration in soil was $2\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; ② The lead concentration distribution order in the *Bidens maximowicziana* is: leaf > stem > root > seed, which indicate that *Bidens maximowicziana* has a strong ability to transfer lead; ③ Uptaking ability differs in different vegetal periods. Maximum lead uptaking rate occurred in the period of blooming for 40 ~ 60 days, in which daily uptake capacity was $15.81\ \text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ in roots and $19.83\ \text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ in shoots respectively. It can be concluded that *Bidens maximowicziana* appears to be a moderate Pb accumulator making it suitable for phytoremediation of Pb contaminated soil.

Key words: phytoremediation; *Bidens maximowicziana*; lead; soil contaminant; remediation potential

传统的土壤重金属污染治理采用物理与化学治理技术(如客土法、淋溶法、施用化学改良剂等), 这些方法不仅费用昂贵, 需要特殊的仪器设备和培训专门的技术人员, 而且大多只能暂时缓解重金属的危害, 还可能导致二次污染. 近年来, 植物修复技术的出现和快速发展提供了一条新的治理途径: 即利用植物对重金属污染物的吸收、富集和转化能力去除土壤中的重金属污染物. 相对于上述的常规方法, 植物修复技术具有经济、绿色、环保等优势, 已显示出良好的应用前景.

目前, 重金属植物修复主要是利用超积累植物吸收污染土壤中的重金属, 净化土壤. 王庆仁^[1]对锌尾矿生长的 30 多种植物进行试验研究, 发现羽叶鬼针草(*Bidens maximowicziana*) 能大量富集重金属 Pb, 体内 Pb 含量高达 $2\ 881.2\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 羽叶鬼针草作为一种铅的超积累植物, 不仅对 Pb 有很强的耐性和吸附能力, 而且生物量较大. 本文采用温室土培试验对鬼针草进行了 Pb 的富集实验: 通过不同

浓度 Pb 处理, 研究 Pb 对植物生长的影响、植物对重金属铅的吸收和分布情况、植物不同生长期对重金属铅的吸收速度等, 以探讨其应用于土壤 Pb 污染修复的可能性及潜力.

1 材料和方法

1.1 供试植物

羽叶鬼针草(*Bidens maximowicziana*) 种子采自北京清河路沟旁. 将采回的种子放在 $4\ ^\circ\text{C}$ 冰箱中, 低温催化, 放置 1 周后, 种子采用 $10\ \%$ H_2O_2 浸泡 10 min, 去离子水冲洗, 然后用水浸泡催芽. 苗床育苗, 待苗子长出 1 片真叶, 从苗床上挖取长势一致的幼苗, 用蒸馏水洗净根系泥土, 供栽培用.

1.2 光照条件

收稿日期: 2004-12-25; 修订日期: 2005-02-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(40472129)

作者简介: 王红旗(1962-) 男, 教授, 博士生导师. 主要研究方向为污染土壤修复.

* 通讯联系人

采用 250 W 照明金属卤化物灯,光强为 $4\ 900\ \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$,光照长度为 $12\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$,昼/夜温度为 12h ($26\text{ }^\circ\text{C}$)/ 12h ($18\text{ }^\circ\text{C}$)。

1.3 试验方法

(1) 盆栽试验 采用温室土培试验进行鬼针草对重金属 Pb 的吸收研究.每盆装砂土 850g,从苗床上挖取长势一致的幼苗,用蒸馏水洗净根系泥土,移栽到土盆里,每盆定苗 3 株.营养液(按 Hoagland 配方配制)每 3d 施用 1 次,每次 50 mL.移植幼苗培养 20d 后,待鬼针草正常生长,对每盆鬼针草进行污染处理,污染物用硝酸铅处理液(以纯 Pb 计),处理液浓度梯度如表 1,每个浓度水平设 3 个重复,同时设空白试验.培养 60d 后,收获植株,测定鬼针草生物量及鬼针草根、茎、叶中的 Pb 含量。

(2) 吸收试验 用土培盆栽试验(土壤 Pb 浓度为 $1\ 000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),分别在鬼针草生长 20d、40d、60d 和 80d 取出,用氯化钙溶液冲洗根系 10 min,收获测定鬼针草地上部和根系中的 Pb 含量。

(3) 鬼针草干重的称量 鬼针草收获后,洗净砂土, $105\text{ }^\circ\text{C}$ 杀青 30 min,然后 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至恒重,磨碎,万分之一天平称量。

(4) 鬼针草体内 Pb 元素测定 收获的鬼针草样品,分别用自来水充分冲洗以去除粘附于鬼针草样品上的污物,再用去离子水冲洗,沥去水分后,在 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 下杀青 30 min,之后在烘箱中 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 下烘至恒重.烘干后的鬼针草样分为根部和地上部(茎、叶和种子) 2 部分,磨碎并充分混合均匀,分别称重 $0.100\ 0\text{g}$ 左右,加入 3 mL 浓 HNO_3 和 1 mL HClO_4 溶液放置过夜, $180\text{ }^\circ\text{C}$ 恒温 8h 高压闷罐提取,然后用 Z-6100 型火焰原子吸收仪测定重金属含量,各样品 3 次重复。

2 结果与讨论

2.1 鬼针草对土壤 Pb 的吸收特性

2.1.1 鬼针草的 Pb 的吸收特性

表 1 列出了在不同浓度 Pb 污染土壤中,鬼针草各部分 Pb 含量.可见,鬼针草体内各部位的 Pb 含量随土壤 Pb 浓度的增加都呈增加趋势.在土壤 Pb 浓度为 $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $800\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,鬼针草对 Pb 的吸收量发生突变,增幅最大,分别增加了 90.97% 和 79.68%.但从处理浓度为 $1\ 000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 开始鬼针草对 Pb 的吸收变慢,处理浓度为 $2\ 000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 只比 $1\ 500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加了 2.92%,说明在高处理浓度下,鬼针草对 Pb 吸收量会趋向饱和.这可能是由于随着 Pb 浓度的增加,Pb 对鬼针草的毒性也不断增加,削弱了其对 Pb 离子吸收和向地上部运输的能力.在 Pb 浓度为 $2\ 000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,鬼针草地上部和根系中 Pb 含量达到最高,分别为 $2\ 164.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1\ 509.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,是对照的 198.6 倍和 114.34 倍,可见鬼针草对 Pb 有很强的吸收能力。

刘秀梅^[2]通过温室沙培实验,在 Pb 处理浓度为 $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (以纯 Pb 计) 时羊草 (*Aneurolepidium chinense*) 地上部 Pb 含量是 $73.15\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,艾蒿 (*Gnaphalium polycaulon*) 是 $82.61\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,紫花苜蓿 (*L. Medicago sativa*) 为 $389.61\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.而在相同条件下,鬼针草地上部 Pb 含量是 $617.87\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,根系为 $381.65\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著高于上述植物.可见,鬼针草有很强的 Pb 富集能力,采用其进行鬼针草修复具有较大的可行性.为进一步研究鬼针草吸收 Pb 的吸收规律,进行了土壤 Pb 处理浓度和鬼针草各部位 Pb 含量的拟合(图 1 和图 2)。

表 1 不同 Pb 处理浓度下鬼针草体内 Pb 含量(干重,平均值±标准差)/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 1 Concentration of Pb in *Bidens maximowicziana*/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

部位	Pb 处理浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$						
	0	200	400	800	1 000	1 500	2 000
根	13.2 ± 5.32	217.35 ± 51.54	381.65 ± 42.97	748.59 ± 74.27	1 429.3 ± 61.75	1 465.3 ± 83.74	1 509.3 ± 98.15
茎	10.6 ± 2.56	310.24 ± 16.04	592.48 ± 13.45	1 064.6 ± 91.32	1 756.7 ± 80.28	2 016.8 ± 62.66	2 075.7 ± 94.7
叶	11.2 ± 8.15	336.83 ± 69.72	643.26 ± 97.02	1 155.8 ± 83.21	1 907.2 ± 103.55	2 189.7 ± 120.19	2 253.7 ± 100.53
地上部	10.9 ± 6.23	323.54 ± 42.35	617.87 ± 58.62	1 110.2 ± 83.25	1 831.9 ± 94.23	2 103.3 ± 87.54	2 164.7 ± 105.23
茎/根	0.826	1.49	1.62	1.48	1.28	1.44	1.43

由拟合曲线可知:鬼针草根系与地上部 Pb 含量虽然随土壤 Pb 含量的增加呈现递增趋势,但这种增加趋势不是无限的,当 Pb 浓度达到一定程度时,鬼针草体内的 Pb 含量将趋于定值.可见,鬼针

草对 Pb 吸收并不是无限的,存在一个极限浓度.这也与前面的结论相一致。

2.1.2 鬼针草的 Pb 分异特性

通常在普通植物中重金属在植物体内的分布规

律是根系最多,茎叶较少.然而,在本试验中,Pb在鬼针草体内的分布恰恰相反,其含量顺序是叶子>茎>根系>种子,如图3.鬼针草对Pb的吸收有很强的分异特征,其吸收的Pb主要富集于地上部,经计算70%以上的Pb分布在地上部,且在处理3中,鬼针草地上部Pb含量达到了76.86%.鬼针草体内可能存在更多的离子转运蛋白,能把暂时贮存的Pb装载到木质部导管,促进Pb向木质部装载,从而使Pb易向上运输和富集,这显示出鬼针草对Pb具有较强富集能力和独特的运转机制.

修复的潜力.

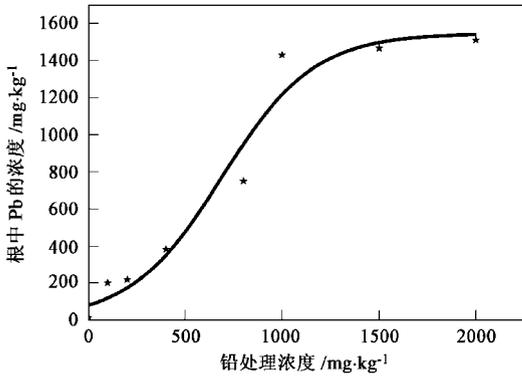


图1 土壤Pb处理浓度与鬼针草根系含Pb量的拟合曲线
Fig.1 Relation between Pb concentration in soil and Pb accumulation in roots of *Bidens maxi mowicziana*

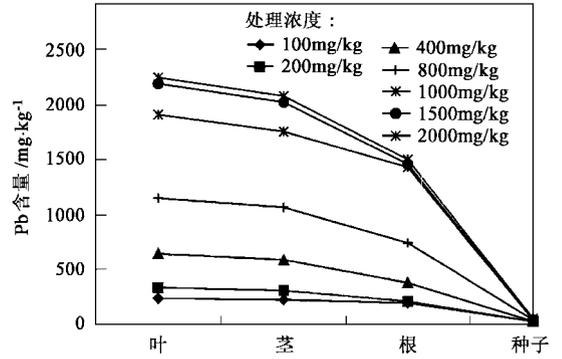


图3 鬼针草各部位Pb含量
Fig.3 Concentration of Pb in different parts of *Bidens maxi mowicziana*

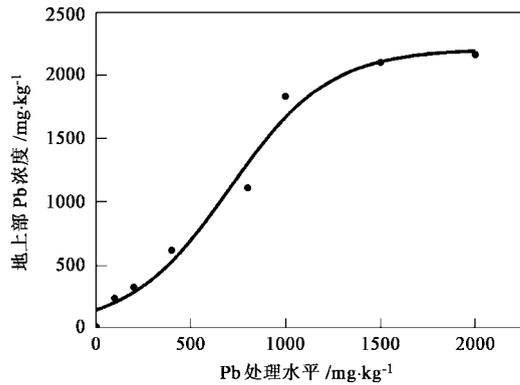


图2 Pb处理浓度与鬼针草地上部含Pb量的拟合曲线
Fig.2 Relation between Pb concentration in soil and Pb accumulation in shoots of *Bidens maxi mowicziana*

鬼针草地上部Pb含量与根系Pb含量比值也能反映出Pb在鬼针草体内的运输和分配情况^[2].实验结果表明(表1),各土壤Pb浓度下鬼针草地上部Pb含量与根系Pb含量比值均大于1,特别是在处理浓度为400mg/L中,鬼针草茎叶Pb含量与根系Pb含量比高达1.62,也说明其体内可能存在良好的Pb运输机制,能把吸收的Pb较多地运输到地上部.鬼针草生长快,生物量大,更重要的是其地上部能富集大量的Pb,因此其具有较大的土壤Pb污染

2.1.3 鬼针草不同生长期对Pb吸收特性

本实验将鬼针草的整个生长期分为幼苗期(0~20d)、营养生长期(20~40d)、开花期(40~60d)和成熟期(60~80d),以研究不同的生长期,鬼针草对土壤Pb富集能力的差异,得出其对Pb的最佳吸收期,为应用鬼针草进行Pb污染修复提供理论依据.

结果如图4所示,不同生长期鬼针草对Pb的吸收速度是不同的,鬼针草在开花期(40~60d)对Pb的吸收速度最大,吸收量根系为15.81 mg·(kg·d)⁻¹,地上部是19.83 mg·(kg·d)⁻¹,高于幼苗期(0~20d)和营养生长期(20~40d),但差距不大.因此,现场修复,可以直接移植鬼针草幼苗,鬼针草在成熟期对Pb的吸收速度迅速下降.因此,利用该鬼针草进行Pb污染修复时,可以在开花期过后收获鬼针草,此时鬼针草吸收总量最大.

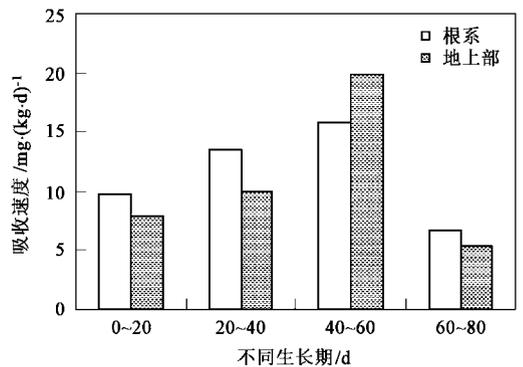


图4 不同生长期鬼针草对铅的吸收速度差异
Fig.4 *Bidens maxi mowicziana* uptaking Pb speed at the difference growth periods

2.2 鬼针草对土壤Pb的修复潜力

2.2.1 鬼针草对土壤Pb的耐性

土壤铅浓度为200mg·L⁻¹时,鬼针草生长较快,比其他浓度鬼针草高出3cm左右,高浓度下的

鬼针草生长缓慢,但没有出现被毒害的症状;当鬼针草生长 40d 后表现差异逐渐明显,主要表现在株高上.当土壤 Pb 浓度大于 $1\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,鬼针草部分叶片颜色发紫,叶缘有干卷现象;生长 60d 后,高浓度处理的鬼针草生长迟缓,植株矮小,瘦弱,部分叶片有紫色斑点和卷曲现象,但没有死亡.

不同土壤 Pb 浓度对鬼针草生长的影响如表 2. 从试验结果中可以看出,较低 Pb 浓度可以促进鬼针草的生长,其鲜重和干重均有所增加,但随着浓度的升高而逐渐下降.鬼针草在处理浓度为 $200\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时生物量最高,然后渐渐下降,在处理浓度为 $2\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 中,鬼针草生物量下降到最低点.经统计分析,Pb 浓度从 $1\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 开始鬼针草重量与对照相比差异显著 ($p < 0.05$).因此土壤中 Pb

表 2 不同 Pb 处理浓度对鬼针草生长的影响 (平均值 \pm 标准差)¹⁾

Table 2 Influence of different treatments of Pb on the growth of *Bidens maximowicziana*

鬼针草重	Pb 处理浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$						
	0	200	400	800	1 000	1 500	2 000
鲜重/ $\text{g}\cdot\text{棵}^{-1}$	1.156 ± 0.293	2.233 ± 0.234	1.962 ± 0.126	1.538 ± 0.163	1.331 ± 0.097	0.973 ± 0.075	0.863 ± 0.085
干重/ $\text{g}\cdot\text{棵}^{-1}$	0.337 ± 0.062	0.404 ± 0.046	0.352 ± 0.089	0.326 ± 0.064	0.253 ± 0.006	0.127 ± 0.023	0.112 ± 0.035
株高/cm	22.3 ± 1.41	24.4 ± 2.382	23.7 ± 2.314	20.8 ± 0.799	19.6 ± 1.045	17.4 ± 0.95	15.5 ± 1.023

1) 数据的统计采用 SPSS 统计软件(下同)

根系长度的比较(表 3)表明,随着 Pb 处理浓度的增加,根系长度的变化趋势先是小幅度上升然后又显著下降,鬼针草根系的生长对高浓度的 Pb 处理并不敏感.在处理浓度为 $200\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,其根系生长显著,随着 Pb 处理浓度的增加,其根系生长缓慢下降,直到处理浓度为 $1\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 其根系长度才和对照相当.

表 3 根系长度及根系耐性指数

Table 3 Root length and root tolerance index

Pb 处理浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	根系长度及根系耐性指数						
	0	200	400	800	1 000	1 500	2 000
根长/cm	8.7	12.05	10.22	7.94	6.13	5.05	4.15
根系耐性指数		1.385	1.175	1.102	0.704	0.58	0.477

根系耐性指数是各处理的根系长度与对照的根系长度的比值,可以很好的反映鬼针草对重金属的耐性情况.因为重金属与鬼针草作用时,根首先接触重金属,对重金属进行吸收或排斥,同时根细胞壁中存在大量交换位点,能将重金属离子交换吸收或固定,从而促进或阻止重金属离子进一步向地上部分运输.从表 3 可以看出,处理浓度在 $800\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以内时,鬼针草的根系耐性指数均大于 1,说明此浓度范围内的 Pb 处理对鬼针草根系的生长有促进作用;但随着 Pb 处理浓度的进一步增加,根系长度小于对照,根系耐性指数降低,生长受阻,重金属 Pb

对鬼针草生物量有一定抑制作用的浓度为 $1\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.从生长状况来看,随着处理浓度的增加,株高也先上升后下降,在处理浓度为 $200\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时最高,降低幅度在 $0.2 \sim 8.9\ \text{cm}$ 之间.就总体而言,鬼针草对 Pb 表现出很强的耐性,且低浓度的 Pb 能刺激鬼针草生长.

总之,供试鬼针草对土壤中的 Pb 污染,表现出很强的耐性,低浓度的 Pb 能刺激鬼针草的生长,鬼针草生物量、株高增加,Pb 处理浓度 $200\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时达到最高水平,但耐性也是一定的,当土壤中 Pb 浓度为 $1\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,就会对鬼针草生长有抑制作用.因此,鬼针草对中度土壤 Pb 污染进行修复更具潜力.

2.2.2 根系对 Pb 耐性

开始鬼针草体内正常生理生化活动.这种现象在浓度为 $1\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时才有表现,可见鬼针草表现出很强的耐性.从其生长状态看,在此处理浓度下,其植株矮小,老叶边缘卷曲,有轻微的失绿症状,根系根毛稀疏,并呈褐色,也说明此时 Pb 干扰了鬼针草的正常生长.这也与前面结论相一致.

2.2.3 鬼针草地上部的 Pb 累积总量

鬼针草地上部的累积总量是用以评价鬼针草修复重金属污染土壤潜力的指标^[3],本实验结果表明(表 4),在土壤 Pb 浓度为 $1\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,鬼针草地上部的 Pb 累积总量最高,为 $0.326\ 2\ \text{mg}\cdot\text{棵}^{-1}$,显著高于对照.

鬼针草地上部 Pb 累积总量与土壤 Pb 浓度符合二项式拟合曲线, $y = -0.033 + 0.000\ 54x - 2.08x^2$,相关系数 $R^2 = 0.967\ 7$.式中, y 为地上部鬼针草的 Pb 累积总量 (mg); x 为土壤 Pb 浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$).由图 5 可以看出,并非随着土壤 Pb 浓度的增加,地上部 Pb 累积总量也随之增加,而是先上升后下降,在土壤 Pb 浓度为 $1\ 300\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,鬼针草地上部 Pb 累积总量达到最高,这与前面的分析结果 $1\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 差异不大.可见当土壤 Pb 浓度在 $1\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右时,鬼针草具有最佳的修复潜力.

表 4 鬼针草地上部 Pb 累积总量¹⁾Table 4 Total Pb contents accumulated in shoots of *Bidens maximo-wicziana*

Pb 处理浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	200	400	800	1 000	1 500	2 000
地上部干重/ g	0.195	0.182	0.257	0.178	0.144	0.105
地上部 Pb 含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	323.536	617.872	1 110.18	1 831.94	2 103.28	2 164.7
地上部迁移总量/ $\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$	0.063 1	0.112 8	0.285 3	0.326 2	0.303 1	0.227 2

1) Pb 地上部累积总量 = 植株地上部 Pb 含量 \times 该植株地上部生物量

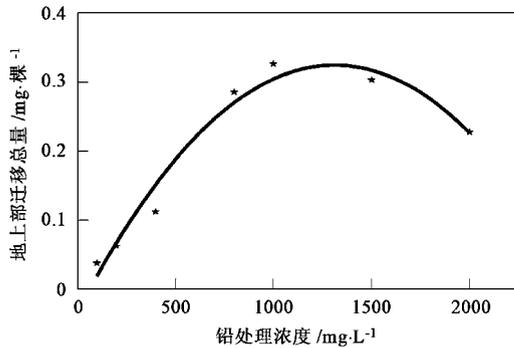


图 5 鬼针草地上部 Pb 累积总量随浓度变化的关系曲线

Fig. 5 Total Pb contents accumulated in shoots of *Bidens maximo-wicziana* versus treatment concentrations of Pb

总之,由于地上部重金属浓度高的鬼针草,其生物量有可能较小,因此鬼针草地上部对重金属元素的累积总量是评价鬼针草修复潜力的重要的指标之一。鬼针草地上部的 Pb 累积总量高,具备修复 Pb 污染土壤潜力。

3 结论

(1) 鬼针草对 Pb 吸收随土壤中 Pb 含量的增加呈现递增趋势,但这种增加趋势不是无限的,当 Pb 浓度达到一定程度时,鬼针草对 Pb 吸收将趋于稳定。鬼针草对 Pb 有很强的吸收能力。在土壤 Pb 浓度为 $2\ 000\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,鬼针草地上部和根系中 Pb 含量达到最高,分别为 $2\ 164.7\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1\ 509.3\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 是对照的 198.6 倍和 114.34 倍。

(2) 鬼针草对 Pb 的吸收有很强的分异特征,其吸收的 Pb 主要富集于地上部分,经计算 70% 以上的 Pb 分布在地上部分,且在处理 3 中,鬼针草地上部分 Pb 含量达到了 76.86%。鬼针草体内 Pb 含量顺序是叶子 > 茎 > 根系 > 种子。

(3) 不同生长期鬼针草对 Pb 的吸收速度是不同的,鬼针草在开花期对 Pb 的吸收速度最大,吸收量根系为 $15.81\ \text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$,地上部是 $19.83\ \text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$,高于幼苗期、营养生长期和成熟期。

(4) 鬼针草对土壤中的 Pb 污染,表现出很强的耐性,低浓度的 Pb 能刺激其的生长,其生物量、株

高增加。在 Pb 处理浓度为 $200\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时达到最高水平,但耐性也是有限的,当土壤中 Pb 浓度为 $1\ 000\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,就会对鬼针草生长有抑制作用。

(5) 鬼针草生物量大,生长快,不仅能吸收大量的 Pb,而且鬼针草地上部 Pb 累积总量高,因此其具有修复 Pb 污染土壤的巨大潜力。但还需要田间试验的进一步证明。

参考文献:

- [1] 王庆仁,崔岩山,董艺婷. 植物修复重金属污染土壤整治有效途径[J]. 生态学报, 2001, 21(2): 326 ~ 331.
- [2] 刘秀梅. 重金属 Pb 污染土壤的鬼针草修复研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2002.
- [3] Reeves R D. The hyperaccumulation of nickel by serpentine plants[A]. In: Intercept L. Baker Vegetation of Ultramatic (serpentine) Soil[C]. Andover UK: Hampshire, 1992. 253 ~ 277.
- [4] Monni S, Salemaa M. Copper resistance of *Calluna vulgaris* originating from the pollution gradient of a Cu-Ni smelter in southwest Finland[J]. Environmental pollution, 2000, 109: 211 ~ 221.
- [5] 匡少平,张书圣. 作物对土壤中环境激素铅的吸收效应及污染防治[J]. 农业环境保护, 2002, 21(6): 481 ~ 484.
- [6] 李峰民,熊治延,郑振华. 7 种高等鬼针草对 Pb 的耐性及其生物蓄积研究[J]. 农业环境保护, 1999, 18(6): 246 ~ 250.
- [7] 夏汉平,孔国辉. 4 种草本鬼针草对油页岩矿渣土中 Pb 镉的吸收特性比较试验研究[J]. 农村生态环境, 2000, 16(4): 28 ~ 32.
- [8] 刘登义. 铜尾矿对小麦生长发育和生理功能的影响[J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 121 ~ 122.
- [9] Kumar P B A N, Dushenkov V, Motto H, Raskin I. Phytoextraction: the use of plants to remove the heavy metals from soil[J]. Environ. Sci. Technol., 1995, 29(6): 1232 ~ 1238.
- [10] 万云兵,仇荣亮,陈志良,等. 重金属污染土壤中提高植物提取修复功效的探讨[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3(4): 56 ~ 59.
- [11] 罗春玲,沈振国. 植物对重金属的吸收和分布[J]. 植物学通报, 2003, 20(1): 59 ~ 66.
- [12] 王剑虹,麻密. 植物修复的生物学机制[J]. 植物学通报, 2000, 17(6): 504 ~ 510.
- [13] 孙波,骆永明. 超积累植物吸收重金属机理的研究进展[J]. 土壤, 1999, 3: 113 ~ 118.
- [14] 陈同斌,韦朝阳,黄泽春,等. 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征[J]. 科学通报, 2002, 47(3): 207 ~ 210.
- [15] 周国华,黄怀曾,何红蓼. 重金属污染土壤植物修复及进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3(6): 33 ~ 38.