

营养元素N、P、K对Pb超富集植物吸收能力的影响

聂俊华¹, 刘秀梅¹, 王庆仁²

(1. 山东农业大学资源与环境学院, 泰安 271018; 2. 中国科学院生态研究中心, 北京 100085)

摘要: 为了探索提高Pb(铅)超富集植物吸收能力的方法, 该文通过温室土培方法, 研究了单一营养元素N、P、K对Pb超富集植物羽叶鬼针草(*Bidens maximowicziana*)、绿叶苋菜(*L. Amaranthus tricolor*)和紫穗槐(*Sophora japonica*)3种植物Pb吸收的影响。营养元素的设计水平为N 0, 0.06, 0.12, 0.18, 0.24, 0.30 g/kg, P₂O₅ 0, 0.06, 0.12, 0.18, 0.24, 0.30 g/kg, K₂O 0.08, 0.16, 0.24, 0.32, 0.40 g/kg, 其他2种元素恒定为0.12 g/kg, 土壤铅浓度为800 mg/kg土。结果表明土壤中施入不同水平的营养元素显著影响植物Pb迁移总量。18个处理中羽叶鬼针草、绿叶苋菜与紫穗槐Pb迁移总量最大值与最小值的比值分别为: 11.6, 10.6, 11.9。该试验表明通过调节土壤营养的方法可以提高植物的重金属的迁移总量, 利用Pb超富集植物修复Pb污染土壤。3种营养元素对植物的效应不一致, 少量的N和K可促进富集植物干质量的增加, 促进植物对Pb的吸收, 随着N和K水平的提高, 植物对Pb的吸收能力降低, 但K的抑制作用不如N的显著; 土壤供P会降低植物对Pb的吸收, 且下降极显著。

关键词: 植物修复; 超富集植物; 营养元素; 重金属迁移总量

中图分类号: X53; Q948

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)05-0262-04

0 引言

利用富集重金属或对重金属具有耐性的植物修复重金属污染土壤, 是在不破坏土壤物理化学性质的情况下治理土壤重金属污染的新途径。至今, 已有400种植物被证明对重金属具有吸收超富集作用, 但这类植物通常生物量低, 生长缓慢, 因此, 人们不断寻找其他植物以及能增加植物吸收重金属能力的方法。

铅(Pb)在土壤中的存在形态根据浸提剂的不同可以分为水溶态、交换态、酸溶态、碱溶态、不溶态等。各形态之间通过化学反应相互转化, 保持动态平衡。土壤Pb必须成为水溶态和交换态才可被植物吸收, 影响Pb存在形态的土壤理化因素有土壤水分、质地、pH值、交换性离子、土壤有机质等。有大量的研究报道了诸多土壤理化因素对Pb形态的影响^[1]。Yongming Luo等提出向土壤中加入螯合剂EDTA以降低重金属(Cu、Cd、Zn)在土壤中的稳定作用, 从而增强植物对重金属的吸收能力, 但EDTA的加入对土壤会造成潜在危害^[2]。曾清如等研究了5种氮肥对铅锌尾矿区污染土壤中Pb、Zn、Cd溶出的影响, NH₄NO₃对Pb的溶出性显著^[3]。但营养元素对植物吸收Pb的影响目前报道不多, 特别是大量营养元素N、P、K的研究鲜见报道。本试验自铅锌尾矿废弃地自然物种中选择了绿叶苋菜(*L. Amaranthus tricolor*)、紫穗槐(*Sophora japonica*)和羽叶鬼针草(*Bidens maximowicziana*)3种植物, 研究了单一营养元素N、P、K对3种植物富集Pb的影响, 试图通过施肥改善或提高富集植物富集Pb的能力, 为Pb超富集体的应用与研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤为砂质壤土, pH值6.0, 有机质含量1.03%, 土壤中全N 0.078%、全P₂O₅ 0.152%、全K₂O 1.75%。速效N、速效P、速效K含量比较低分别为36.07、11.16和78.61 mg/kg, 有效Pb为12.52 mg/kg, 不存在重金属Pb的污染, 符合本试验的要求。

供试植物品种: 选择铅锌尾矿废弃地上的绿叶苋菜(*L. Amaranthus tricolor*)、紫穗槐(*Sophora japonica*)和羽叶鬼针草(*Bidens maximowicziana*)3种植物, 采集种子, 苗床育苗, 待幼苗长出1片真叶, 挖取长势一致的幼苗, 用蒸馏水洗净根系泥土, 移植于盆中。

1.2 试验与分析方法

营养元素设18个处理, 3次重复。方案设计见表1。温室盆栽土培试验。铅以醋酸铅形式施入土壤, 浓度为800 mg/kg土(以纯Pb计), N、P、K肥分别是NH₄NO₃、Ca(H₂PO₄)₂、KCl, 肥底浓度均为0.12 g/kg。

表1 处理方案

Table 1 Design of nutrient element treatments

	g · kg ⁻¹					
处理编号	0	1	2	3	4	5
N处理浓度(N)	0	0.06	0.12	0.18	0.24	0.30
P处理浓度(P ₂ O ₅)	0	0.06	0.12	0.18	0.24	0.30
K处理浓度(K ₂ O)	0	0.08	0.16	0.24	0.32	0.40

参照土培试验采用温室砂培盆栽, 建筑用沙过2 mm筛, 用2% HNO₃溶液浸泡过夜, 然后用蒸馏水洗净, 每盆装500 g。按Hoagland配方浇营养液。5 d一次, 每次20 mL。幼苗正常培养20 d后浇醋酸铅处理液, 处理液浓度(以纯Pb计)为0, 100, 200, 400, 800, 1000, 1500 mg · L⁻¹, 每处理重复3次。

种植50 d后, 收获植株并进行分析。植物干质量测定: 植物收获后, 洗净尘沙, 105℃杀青30 min, 然后烘

收稿日期: 2003-11-14 修订日期: 2004-05-14

基金项目: 中国科学院知识创新工程资助项目(KZCX-401-1)

作者简介: 聂俊华(1951-), 女, 山东禹城人, 教授, 研究方向为土壤生态环境。山东泰安 山东农业大学资源与环境学院, 271018

干、磨碎。万分之一天平称量。

Pb 元素用高压闷罐法提取。准确称量 0.100 g 样品, 加入 3 mL 浓 HNO₃ 溶液放置过夜, 加入 1 mL HF, 1 mL HClO₄, 180 °C 恒温 8 h 高压闷罐提取, 然后用 Z-6100 型火焰原子吸收仪测定。

2 结果与分析

2.1 营养元素对植物干质量的影响

图 1 为被 Pb 污染的土壤不同营养处理的植物干质量值。结果表明: 3 种元素对植物干质量都有显著影响, 一般规律是在其他 2 种元素充足的情况下, 随着供试元素水平的提高, 植物干质量也上升。3 种营养元素对植物干质量的影响并不完全一致。由图 1 可以看出在所有 N 处理中, 紫穗槐和羽叶鬼针草干质量最低值出现于 N₂ 处理中, 绿叶苋菜的干质量最低值出现在 N₃ 处理中。在 N₁ 处理中, 三种植物干质量均比 N₀、N₂ 处理的大, 其数值仅次于 N₄ 和 N₅ 处理。紫穗槐和羽叶鬼针草自 N₂ 起, 绿叶苋菜自 N₃ 处理起至 N₅ 处理, 随着 N 处理水平的提高, 三种植物干质量呈上升趋势。

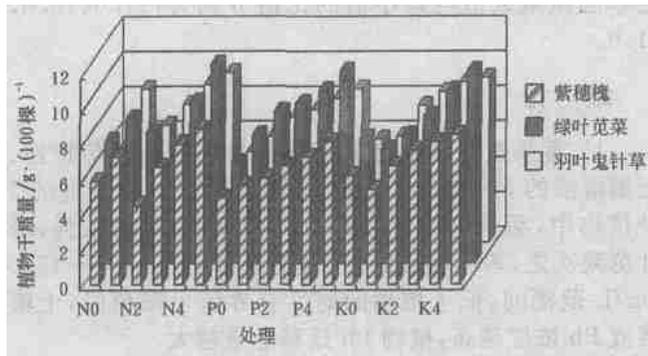


图 1 不同 N、P、K 水平下植物干质量

Fig 1 Plant dry weight under the different N, P, K levels

三种植物的干质量随着 P 处理浓度的增加而增加, 说明在 Pb 污染条件下, 施加 P 肥能促进植物生长, 增加植物干质量。在 P₅ 处理中, 三种富集植物的干质量均达最高值。

Pb 污染条件下低浓度的 K 肥(K₁)降低植物的干质量, 自 K₁ 处理起, 随着 K 肥浓度的增加, 植物干质量逐渐上升, 当 K₅ 处理时, 干质量达最高值。

2.2 营养元素对植株 Pb 含量的影响

图 2 表明, 在 Pb 污染条件下 N 素与 K 素对植株含 Pb 量的影响相同: 在其他 2 种元素充足的情况下, 随着施肥水平的提高, 植物含 Pb 量先升高后下降。在所有 N 处理中, 紫穗槐和羽叶鬼针草在 N₂ 处理时含 Pb 量达高峰, 绿叶苋菜在 N₃ 处理中 Pb 含量最高, 三者 N₅ 处理中含 Pb 量均降低到最低点。说明在 Pb 污染条件下施加少量的 N 肥(N₁ 处理和 N₂ 处理) 能促进富集植物对 Pb 的吸收。随着 N 肥浓度的增加, 三种富集植物的含 Pb 量急剧降低。在 K 处理中, 三种供试植物的 Pb 含量变化趋势相似, 在 K₁ 处理中, Pb 含量出现一个小波峰, 然后缓慢下降, 三者 N₅ 处理中含 Pb 量均降低到最低点。结果说明在其他 2 种元素充足的情况下,

低浓度的 N 或 K 能提高三种植物的 Pb 含量, 高浓度的 N 素与 K 素则不利于植物对 Pb 的吸收。

图 2 还表明: 随着 P 处理浓度的增加, 紫穗槐和绿叶苋菜的含 Pb 量呈下降趋势, 说明增加 P 肥的浓度不利于 2 种植物对 Pb 的吸收; 但羽叶鬼针草 Pb 含量在 P₁ 处理中有一个小波峰, 然后明显下降。P₅ 处理中, 三种富集植物的 Pb 含量降低到最小值, 说明营养元素 P 的浓度显著影响植物吸收 Pb 的能力, 在植物生长允许的范围, 土壤中 P 肥的浓度愈大, 植物对 Pb 的吸收能力愈弱。

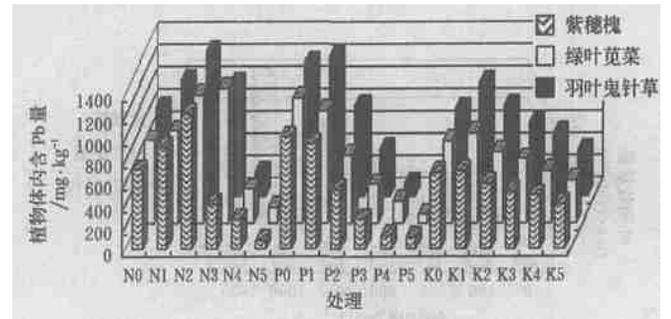


图 2 不同 N、P、K 水平下植物体内的 Pb 含量

Fig 2 Content of lead in plants under different N, P, K levels

2.3 营养元素对植物富集 Pb 能力的影响

植物干质量与含铅量的乘积为植株的 Pb 吸收总量, 是植物富集重金属 Pb 能力的重要指标, 代表了植物从土壤中迁移重金属的总量。图 3 为不同养分处理下 3 种植物的 Pb 迁移总量计算结果。从中可以看出, 所有施肥处理中紫穗槐与羽叶鬼针草的吸收总量以 N₂ 处理的最高, 而绿叶苋菜则在 N₃ 处理达最高, 其数值分别为 6.58 mg/100 棵植株, 9.04 mg/100 棵植株和 8.53 mg/100 棵植株。从影响趋势看, 土壤 Pb 污染情况下, 施加少量的 N 素与少量的 P 素均会促进富集植物 Pb 吸收总量的增加, 但是营养元素施入量过大时则随着土壤施入 N、P 量的增加 Pb 吸收总量不断下降。少量的 K 亦会促进羽叶鬼针草 Pb 吸收总量的增加。高浓度的 K 则抑制。从图 3 可以看出 K 的这种抑制作用不如 N 及 P 的显著。至于紫穗槐和绿叶苋菜则不宜施钾, 因为任何浓度的施入量都使得植株 Pb 吸收总量下降。

2.4 营养充足条件下植物富集 Pb 的能力

植物 Pb 吸收能力可依其体内的 Pb 浓度或植株的 Pb 吸收总量衡量, 后者更能全面地反映植物对 Pb 的吸收能力。温室砂培盆栽试验条件下, 浇 Hoagland 配方配制的营养液保证充分的营养, 同时对 3 种植物, 浇不同浓度的醋酸铅溶液, 获得各种植物的 Pb 吸收能力参照值(图 4)。结果表明: 随着 Pb 处理浓度的增高, 绿叶苋菜和羽叶鬼针草体内 Pb 基本呈增高趋势, 其中绿叶苋菜处理 6 达最高, 羽叶鬼针草处理 5 最高。在处理 4 中紫穗槐的 Pb 含量最高, 然后随着 Pb 浓度的增加逐渐下降。

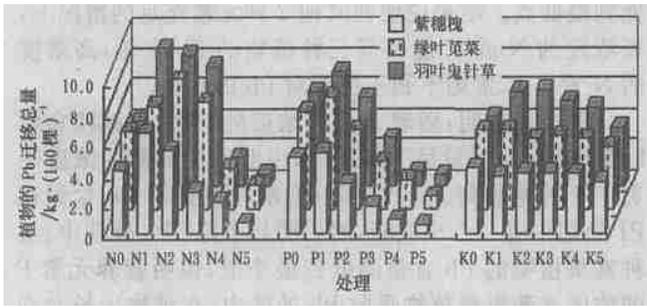


图3 不同N、P、K水平下Pb的迁移总量

Fig 3 Total translocation of lead in plants under different N, P, K levels

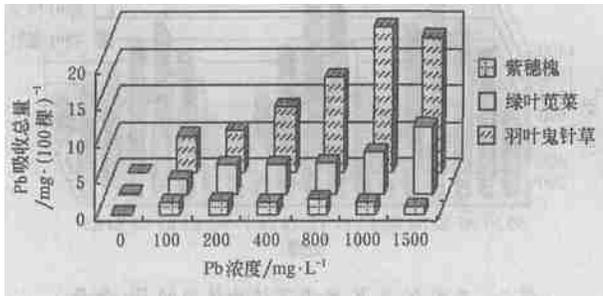


图4 3种植物的Pb吸收能力

Fig 4 Lead uptake ability of 3 varieties

3 讨论

Monni 于 2000 年提出以植物的重金属吸收总量作为土壤修复植物重金属 (Total heavy metal translocated) 的重金属迁移总量, 用作评价植物修复重金属污染潜力 (phytoremediation potential) 的指标。已发现的超富集植物一般生物量小, 生长缓慢, 重金属迁移总量相对不高, 影响了其利用^[7,8]。富集植物的重金属迁移总量除与遗传特性有关外, 还与土壤溶液中的 Pb 浓度及土壤营养状况有关。从图 2、图 3 与图 4 的结果可以看出, 所研究的 3 种植物中, 羽叶鬼针草对 Pb 的生理吸收能力最强, 绿叶苋菜次之, 紫穗槐最低。土壤溶液中的 Pb 浓度影响植物 Pb 迁移总量。刘秀梅等认为耐性临界值有高限和低限两个指标, 即在植物的根系耐性指数约等于 1 时该植物体内的重金属含量为临界值的低限; 在重金属污染条件下植物能够生长时其体内的重金属最高含量为临界值的高限。当土壤溶液 Pb 浓度在 0~1500 mg/L 范围内且低于植物的耐性临界值上限值时, Pb 浓度越高, 植物 Pb 迁移总量越大^[5]。

将图 3 与图 4 对比, 可以看出图 3 中羽叶鬼针草的吸收总量都低于图 4 中该植物前 3 位的吸收数值。而图 3 中紫穗槐的吸收总量除 N4、N5、P3、P4、P5 等 5 个处理外, 都高于图 4 中该植物的最高值: 2.05 mg/100 棵植株。绿叶苋菜的吸收总量都低于图 4 中该植物的最高值, 但除 N4、N5、P3、P4、P5、K5 等 6 个处理外都高于图 4 中该植物的次高值。说明土壤 Pb 含量在 800 mg/kg 时, 土壤中施入不同水平的营养元素显著影响植物 Pb 迁移总量。N 素对 3 种植物 Pb 迁移总量影响差

别很大。在其他 2 种元素适量且恒定的条件下, N 水平在 0~0.30 mg/g 范围内浮动, 羽叶鬼针草 Pb 迁移总量最大值是最小值的 11.16 倍, 绿叶苋菜的最大值是最小值的 5.4 倍, 紫穗槐是 9.6 倍。3 种植物对 P 素反应比较一致, 在其他 2 种元素适量并且恒定的条件下, 施 P 水平在 0~0.30 mg/g 范围内浮动, 羽叶鬼针草、绿叶苋菜与紫穗槐 Pb 迁移总量最大值与最小值的比值分别是 9.69、2 和 9.7 倍。3 种植物对 K 素反应弱, 在其他 2 种元素适量并且恒定的条件下, 施 K 水平在 0~0.40 mg/g 范围内浮动, 羽叶鬼针草、绿叶苋菜与紫穗槐 Pb 迁移总量最大值与最小值的比值分别是 1.2、1.3 和 1.6 倍。根据本研究结果, 在土壤 Pb 污染程度一定的情况下, 通过调节土壤营养水平的方法可以提高植物的重金属的迁移总量。所有处理中 Pb 迁移总量的最高值无一例出现在营养最高水平处理上, 最低值无一例出现在营养 0 水平处理上, 但有不少最低值出现在营养最高水平处理上。这一方面说明 Pb 富集植物对 N、P、K 极为敏感, 另一方面也说明 N、P、K 与 Pb 的生理作用复杂。18 个处理中, 羽叶鬼针草、绿叶苋菜与紫穗槐 Pb 迁移总量最大值与最小值的比值分别为: 11.6、10.6、11.9。

4 结论

1) 富集植物的重金属迁移总量与植物遗传特性、土壤溶液的 Pb 浓度及土壤营养状况有关。所研究的 3 种植物中, 羽叶鬼针草对 Pb 的生理吸收能力最强, 绿叶苋菜次之, 紫穗槐最低。土壤溶液 Pb 浓度在 0~1500 mg/L 范围间, 低于植物的耐性临界值上限值时, 土壤溶液 Pb 浓度越高, 植物 Pb 迁移总量越大。

2) 土壤中施入不同水平的 N、P、K 元素显著影响植物 Pb 迁移总量。在其他 2 种元素适量并且恒定时, 其中一种营养元素水平变化, 羽叶鬼针草、绿叶苋菜与紫穗槐对土壤中 Pb 吸收总量最大值与最小值的比值分别为: 11.6、10.6、11.9。结果表明, 在土壤 Pb 污染程度一定的情况下, 通过调节土壤营养的方法可以提高植物的重金属的迁移总量。

3) N、P、K 3 种元素对植物 Pb 迁移总量的影响表现不一致。从影响趋势看, 在土壤 Pb 污染情况下, 施加少量的 N 素与少量的 P 素均会促进富集植物 Pb 吸收总量的增加, 营养元素施入量过大时则随着土壤施入量的增加吸收总量不断下降。少量的 K 促进羽叶鬼针草 Pb 吸收总量的增加, 高浓度的 K 则抑制。紫穗槐和绿叶苋菜施钾会使植株 Pb 吸收总量下降。

4) 植株的干质量与植株含 Pb 量直接影响富集植物的 Pb 迁移总量^[5]。少量的 N 和 K 会促进富集植物干重的增加, 促进植物对 Pb 的吸收, 随着 N 和 K 水平的增加, 植物对 Pb 的吸收能力降低, 干质量一直在增加。K 的抑制作用不如 N 的显著。土壤供 P 会降低植物对 Pb 的吸收。

[参 考 文 献]

- [1] 骆永明, 蒋先军, 赵其国. 重金属污染土壤的植物修复研究[J]. 土壤, 2000, (2) 全本
- [2] 骆永明. 强化植物修复的螯合诱导技术及其环境风险[J]. 土壤, 2000, 2: 57- 63
- [3] 曾清如, 周润红, 毛小云. 不同 N 肥对铅锌尾矿污染土壤中重金属的溶出及水稻苗吸收的影响[J]. 土壤肥料, 1997, 3: 7- 11.
- [4] 汤章城. 中国科学院上海植物生理研究所, 上海市植物生理学会主编. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京: 科学出版社, 1999
- [5] 刘秀梅, 聂俊华, 王庆仁. 6 种植物对 Pb 的吸收与耐性研究[J]. 植物生态学报, 2002, 26(5) 533- 537.
- [6] 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- 219.
- [7] Wang Q R, Liu X M, Cui Y S, et al. Concept and advances of applied bioremediation for organic pollutants in soil and water [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(1): 159- 163 (in Chinese).
- [8] Wang Q R, Cui Y S, Dong Y T. Phytoremediation—An effective approach of heavy metal clean up from contaminated soil [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(2): 326- 331 (in Chinese).

Influence of N, P, K nutrient levels on Pb uptake ability of hyperaccumulators

Nie Junhua¹, Liu Xiumei¹, Wang Qingren²

(1. Resource and Environmental College, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China;

2 Research Center for Eco-Environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract In the greenhouse experiment, 3 varieties of hypertolerant plants: *L. Amaranthus tricolor*, *Sophora japonica* and *Bidens maxima* were grown at different levels of nitrogen (0, 0.06, 0.12, 0.18, 0.24, 0.30 g/kg), phosphorous (0, 0.06, 0.12, 0.18, 0.24, 0.30 g/kg), and potassium (0, 0.08, 0.16, 0.24, 0.32, 0.40 g/kg) to study their performance with regard to lead uptake ability, while the other two element levels were 0.12 g/kg and soil lead was 800 mg/kg. The results show that N, P, K level had significant effect on plant total lead translocation. The ratio of maximum to minimum value for *Bidens maxima*, *L. Amaranthus tricolor* and *Sophora japonica* were 11.6, 10.6, 11.9, respectively. But the influence of three elements were not uniform. A little amount of nitrogen and potassium can increase the dry weights of plant, advance the lead uptake of hyperaccumulators, but with the increasing of nitrogen and potassium concentration, the lead uptake of the plants dropped, and dry weights decrease constantly. The little different effect between nitrogen and potassium on lead uptake was that the restraint of the former was more significant than the latter. Additionally, the phosphorus applied to the soil can decrease the lead uptake of the hyperaccumulators dramatically. The conclusion of the research was that if using the plants on the purpose of phytoremediating the lead polluted soil, the total lead translocation can be increased by regulating the soil N, P, K level.

Key words: phytoremediation; hypertolerant plants; nutrient elements; total heavy metal translocation