

高铝低磷胁迫对胡枝子生长及矿质元素吸收的影响^①

董晓英^{1,2}, 沈仁芳^{1*}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 限制酸性土壤作物生长的最重要、最普遍的因子是 Al^{3+} 的毒害和 P 的缺乏。本文用溶液培养试验研究两种不同生态型的二色胡枝子在高Al低P胁迫下的矿质营养元素积累情况。试验表明, 江西胡枝子比河北胡枝子更耐低 P 低 pH 的生长环境, 但两者间耐Al性无显著差异; 100 $\mu\text{mol/L}$ Al 处理显著地抑制了两种胡枝子对 Ca 的吸收, 降低了根系 Mg 的积累量, 对植株的 K、P、Fe、Zn、Cu 含量没有显著影响; 低 P 处理没有显著降低两种胡枝子对 Ca、K、Fe、Zn、Cu 和江西胡枝子对 Mg 的吸收, 但是低 P 处理显著降低了河北胡枝子对 Mg 的吸收和转运。二色胡枝子植株吸收的 Al 主要积累在根部, 地上部分 Al含量仅是根系的 1% 左右。

关键词: 二色胡枝子; 铝胁迫; 低磷胁迫; 矿质元素吸收

中图分类号: Q145.12

全世界大约 40% 以上的耕地属酸性土壤, 而我国酸性土遍及 14 个省区, 面积达 218万 km^2 , 占全国土地面积的 22.7%^[1]。 Al^{3+} 的毒害和 P 的缺乏是限制酸性土壤作物生长的最重要、最普遍的因子^[2]。虽然已有一些改良酸性土壤的措施, 但是出于经济与环境的考虑, 生物措施将更有希望^[3]。二色胡枝子 (*Lespedeza bicolor* Turcz) 为豆科多年生小灌木, 比大多数植物种类更能忍受贫瘠的酸性土壤, 它能在土壤有机质含量低于 5 g/kg、水解 N 低于 50 mg/kg 的花岗岩流失区白沙层中生长, 也能在非常瘠薄的第四纪红黏土网纹层中生长^[4], 种植在 pH 4~6 的酸性土中仍可维持很高的产量。利用其优越的改土、保水特性, 被广泛应用在工矿废地、水土流失区、退化的牧场上, 作为先锋植物, 修复土壤、保持水土, 建立适合其他物种生长繁衍的立地条件。因此, 胡枝子作为灌木饲草 and 环境保护植物, 近年来受到格外重视。但国内外仅对其在酸性土壤上的生长状况做了一些报道, 对其对酸 Al 和低 P 的适应能力还没有详细研究, 本文就胡枝子在高 Al 低 P 低 pH 胁迫情况下其对矿质元素的吸收情况进行了初步研究。

1 材料与方法

1.1 试验材料和培养方法

选用 2 个生态型的二色胡枝子, 河北胡枝子与江

西胡枝子。河北胡枝子是河北赤城地区的本土植物, 经过栽培驯化而来; 江西胡枝子为江西地区红壤上生长的胡枝子, 生长环境为低 pH、瘠薄的林地。胡枝子催芽后悬浮在 pH 4.5 的 0.5 mmol/L CaCl_2 溶液培养 1 周后, 换用 1/4 Hoagland 营养液预培养 1 周。2 周大幼苗移栽到装有 1.4 L 营养液的陶盆中, 持续通气。河北与江西胡枝子各 9 盆, 试验处理如下: ①高Al低P低pH处理: 100 $\mu\text{mol/L}$ Al + 7 $\mu\text{mol/L}$ P, pH 4.3 (以下简写 100 $\mu\text{mol/L}$ Al); ②低P低pH处理: 7 $\mu\text{mol/L}$ P, pH 4.3 (以下简写低P); ③1/2 浓度的Hoagland营养液做对照, pH 5.2 (以下简写CK), 每处理 3 盆。基本营养液为 1/2 浓度的 Hoagland 营养液, P 营养由 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 提供, 处理 1、2 低 P 中不足的 N 用 NH_4Cl 补足, Al 由 AlCl_3 提供。1/2 浓度的 Hoagland 营养液组成为 KNO_3 (2.5 mmol/L), $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (2.5 mmol/L), MgSO_4 (1 mmol/L), $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (0.5 mmol/L), NaFeEDTA (20 $\mu\text{mol/L}$), HBO_3 (3 $\mu\text{mol/L}$), MnCl_2 (0.5 $\mu\text{mol/L}$), CuSO_4 (0.2 $\mu\text{mol/L}$), ZnSO_4 (0.4 $\mu\text{mol/L}$), $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$ (1 $\mu\text{mol/L}$)。试验在南京土壤研究所温室内进行。共处理 84 天, 每星期换 3 次营养液, 分别为周 1、3、5。84 天后分别收获胡枝子地上部和根, 蒸馏水冲洗, 烘干称重, 粉碎, HNO_3 消煮后 ICP 测定元素含量。

胡枝子耐 Al 与低 P 低 pH 指数的计算公式(根

①基金项目: 国家自然科学基金项目(30571114)资助。

* 通讯作者 (rfshen@issas.ac.cn)

作者简介: 董晓英 (1972—), 女, 安徽人, 博士, 主要从事植物营养与逆境胁迫生理的研究。E-mail: xydong@issas.ac.cn

据 Ofei-Manu 等^[5]的方法)：

耐 Al 指数 = (Al 处理的生物量/低 P 低 pH 处理的生物量) × 100。

复合耐性指数 = (Al 处理的生物量/对照的生物量) × 100。

耐低 P 低 pH 指数 = (低 P 低 pH 处理的生物量/对照的生物量) × 100。

1.2 胡枝子种子根伸长试验

胡枝子催芽后悬浮在 pH 4.5 的 0.5 mmol/L CaCl₂ 溶液培养 5 天，然后用不同浓度的 Al 溶液处理 24 h，用尺子测定 Al 处理前后的种子根长，计算根的相对伸长率。3 个处理：对照 0 μmol/L AlCl₃，25 μmol/L AlCl₃，50 μmol/L AlCl₃，基本溶液均为 0.5 mmol/L CaCl₂ 溶液，pH 用 HCl 调到 4.5。每个处理 20 棵苗。

根的相对伸长率 (%) = (24 h 内 Al 处理根的伸长量/24 h 内对照根的伸长量) × 100。

2 结果与分析

根据 Ofei-Manu 等^[5]的方法计算胡枝子耐 Al 与低 P 低 pH 指标，发现江西胡枝子的地上部和根系耐低 P 低 pH 的指数显著高于河北胡枝子的，尤其是根系 差别更大。但是河北胡枝子的耐 Al 指数与江西胡枝子的无显著差异，江西胡枝子根系的复合耐性指标与河北胡枝子的也无显著差异 (图 1)。此结果说明，江西胡枝子更耐低 P 低 pH 的生长环境。胡枝子种子根伸长试验也表明，两种胡枝子的耐 Al 性无显著差异 (图 2)。

100 μmol/L Al 显著抑制了胡枝子植株根系和地上部分对 Ca 的吸收 (图 3a)，这与前人在其他植物上的研究结果一致^[6-8]，但低 P 低 pH 处理没有显著影响 2 个品种胡枝子对 Ca 的吸收 (图 3a)。与 CK 相比，Al 处理 (100 μmol/L Al + 低 P + 低 pH 4.3) 显著地降低了胡枝子对 Mg 的吸收 (图 3b)，也显著抑制胡枝子根系 K

的积累，但对胡枝子地上部分 K 的含量没有显著影响 (图 4a)；与低 P 低 pH 相比，Al 处理 (100 μmol/L Al + 低 P + 低 pH 4.3) 显著抑制了 2 种胡枝子根系 Mg 的积累，但没有影响 2 种胡枝子地上部分 Mg 的含量 (图 3b)；而低 P 低 pH 处理显著降低了河北胡枝子根系和地上部分对 Mg 的吸收与转运。

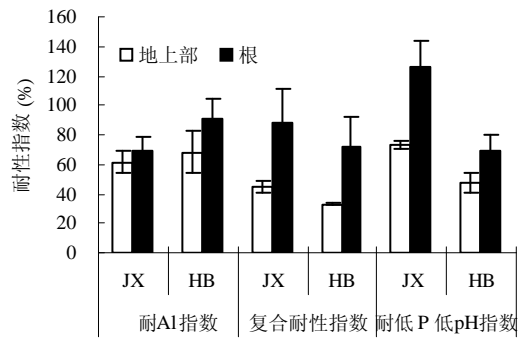


图 1 胡枝子植株对 Al、低 P、低 pH 的耐性指数 (JX、HB 分别代表江西胡枝子和河北胡枝子，下同)

Fig. 1 Tolerance of Al, low P and low pH stress of *Lespedeza bicolor*

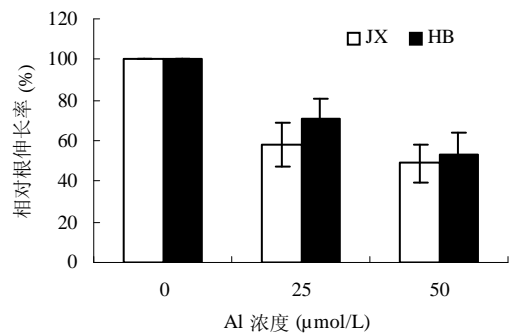


图 2 不同浓度 Al 对胡枝子种子根伸长的抑制

Fig. 2 Effect of Al on relative root elongation of *Lespedeza bicolor* seedlings

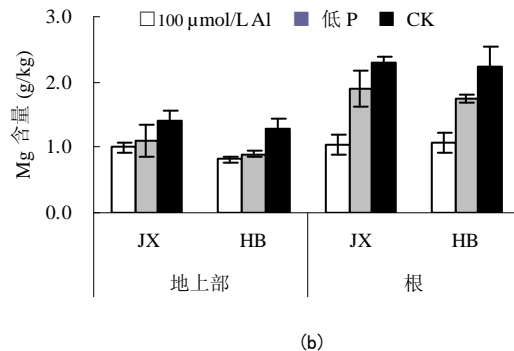
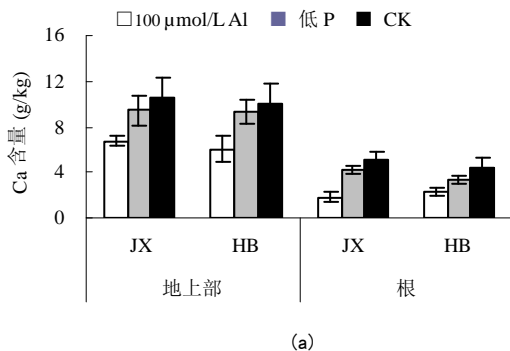


图 3 高 Al 低 P 处理对胡枝子植株 Ca (a)、Mg (b) 含量的影响

Fig. 3 Effects of high Al and low P stress on contents of Ca and Mg in *Lespedeza bicolor*

由于高 Al 和低 P 处理的 P 含量 ($7 \mu\text{mol/L}$) 远低于正常营养液的 P 含量 ($500 \mu\text{mol/L}$), 所以高 Al 和低 P 处理的 P 含量远低于 CK 正常营养液处理的胡枝子植株 P 含量 (图 4b), 与低 P 低 pH 处理相比, $100 \mu\text{mol/L}$ Al 处理没有显著降低胡枝子对 P 的吸收 (图 4b)。

Al 处理后, 胡枝子植株地上部分 Al 含量仅为 CK 的 2 倍, 而根系 Al 含量高达 CK 的 130 倍多 (表 1), 地上部分 Al 含量仅是根系的 1% 左右。而河北胡枝子和江西胡枝子之间 Al 含量无显著差异。Al 处理和低 P 处理都没有显著影响胡枝子对微量元素 Cu、Zn、Fe 的吸收。

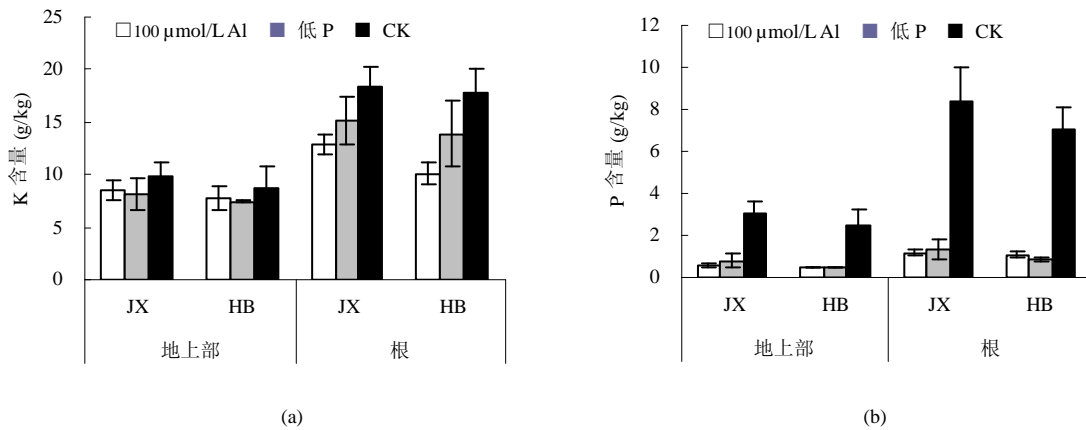


图 4 高 Al 低 P 处理对胡枝子 K (a)、P (b) 含量的影响

Fig. 4 Effects of high Al and low P stress on contents of K and P in *Lespedeza bicolor*

表 1 高 Al 低 P 处理对胡枝子 Al、Fe、Zn、Cu 吸收的影响

Table 1 Effects of high Al and low P stress on contents of Al, Fe, Zn and Cu in *Lespedeza bicolor*

项目	江西胡枝子			河北胡枝子			
	100 μmol/L Al	低 P	CK	100 μmol/L Al	低 P	CK	
地上部	Al	63.1 ± 12.4	30.6 ± 1.0	30.9 ± 4.2	54.8 ± 10.4	26.6 ± 2.4	30.9 ± 2.9
	Fe	107.3 ± 22.8	84.4 ± 18.6	90.3 ± 23.1	84.2 ± 16.6	89.7 ± 15.6	85.5 ± 22.3
	Zn	18.6 ± 1.9	15.3 ± 0.9	17.6 ± 5.8	19.5 ± 3.4	20.7 ± 7.0	18.2 ± 5.4
	Cu	1.85 ± 0.25	2.49 ± 0.51	3.17 ± 1.34	1.50 ± 0.42	3.01 ± 0.95	2.89 ± 1.60
根	Al	4228.7 ± 758.7	40.1 ± 5.41	35.1 ± 7.8	4148.5 ± 1142.6	56.0 ± 12.5	30.3 ± 7.0
	Fe	436.5 ± 58.8	370.3 ± 43.3	449.8 ± 31.8	426.1 ± 97.6	478.9 ± 149.0	393.8 ± 86.3
	Zn	19.1 ± 4.2	19.4 ± 2.3	16.3 ± 1.1	21.8 ± 7.3	25.8 ± 3.4	22.6 ± 4.3
	Cu	8.5 ± 1.7	15.5 ± 8.1	10.5 ± 0.8	8.6 ± 2.8	14.4 ± 4.9	12.0 ± 1.0

注: 表中数值为平均值 ± SD, $n = 3$ 。含量单位: mg/kg。

3 讨论

Al^{3+} 的毒害和 P 的缺乏是限制酸性土壤作物生长的最重要、最普遍的因子^[2]。长期以来, 国内学者对缓解与克服植物 Al 毒害作了许多的研究与尝试, 结果表明, 最佳方式之一是选择和培育耐 Al 性较强的植物基因型^[9]。杨建立等^[10]研究发现, 起源于茶园土壤的蔘草比生长于中性土壤上的抗 Al 性强, 而种植于我国南方酸性土壤上的荞麦品种较在北方石灰性

或碱性土壤地区种植的品种具有更强的耐 Al 性。

我国的胡枝子品种均为从野生种中选择而进行栽培的, 所以都保留原野生种的习性。本试验选用的两种生态型胡枝子均是当地品种。本试验表明, 两种来源于不同地区的二色胡枝子耐 Al 性差异不大, 其体内 Al 含量也无显著差异, 这是否表明此种植物耐 Al 的基因是其种类特征, 并不因生存的生态环境而改变? 但是, 来源于江西红壤地区的江西胡枝子耐低 P

低 pH 的能力远高于河北胡枝子, 可以肯定的是在长期的适应过程中, 江西胡枝子发展了一些耐酸耐低 P 胁迫的能力, 其基因资源更有利于用来培育适应酸性土壤的植物品种。由此也可以预见, 有些植物种类的耐 Al 特性并不因生存环境而有不同。

由于高 Al 和低 P 处理的 P 含量 (7 $\mu\text{mol/L}$) 远低于正常营养液的 P 含量 (500 $\mu\text{mol/L}$), 所以高 Al 和低 P 处理的 P 含量远低于对照正常营养液处理的胡枝子植株 P 含量(图 4b), 但是如此低的 P 含量(或者说处理间植株的 P 含量相差如此之大)却没有显著影响胡枝子植株对 Ca、Mg、K (图 3、图 4b) 及微量元素 Fe、Mn、Cu、Zn 的吸收(表 1), 是否此结果暗示着二色胡枝子耐低 P 的能力是很强的, 其植株各部位对 P 的利用效率是很高的? 这仍需要进一步的试验来验证。

二色胡枝子的根部积累大量的 Al, Al 向地上部分的运输很少, 地上部分 Al 积累少, 即使在 100 $\mu\text{mol/L}$ Al 浓度下处理近 3 个月, 地上部分也仅积累 63.1 \pm 12.4 mg/kg (表 1), 远低于茶树、荞麦、绣球花等高积累 Al 的植物, 因此其对 Al 的耐性主要是通过对外排斥 Al 来实现的。研究其耐 Al 的机制应该从其排斥 Al 的机理入手。

参考文献:

[1] 赵其国. 红壤物质循环及其调控. 北京: 科学出版社, 2002

- [2] Kochian LV, Hoekenga OA, Pineros MA. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency. *Annual Review of Plant Biology*, 2004, 55: 459–493
- [3] 魏世清, 张磊, 李艳宾, 张琴, 张超. 生物措施缓解酸性土壤铝毒害研究进展. *土壤*, 2007, 39(4): 536–540
- [4] 杨艳生, 刘柏根, 沙寄石. 水土资源恢复中的先锋豆科灌木—胡枝子 (*Lespedeza bicolor*) 的栽植研究. *长江流域资源与环境*, 1994, 3(4): 330–336
- [5] Ofei-Manu P, Wagatsuma T, Ishikawa S, Tawarayama K. The plasma membrane strength of the root-tip cells and root phenolic compounds are correlated with Al tolerance in several common woody plants. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2001, 47(2): 375–395
- [6] Rengel Z. Role of calcium in aluminum toxicity. *New Phytol.*, 1992, 121: 499–513
- [7] Piñeros M, Tester M. Plasma-membrane Ca^{2+} channels in roots of higher plants and their role in aluminum toxicity. *Plant Soil*, 1993, 155: 119–122
- [8] Rengel Z, Zhang WH. Role of dynamics of intracellular calcium in aluminium-toxicity syndrome. *New Phytol.*, 2003, 159: 295–314
- [9] 陈荣府, 沈仁芳. 水稻 (*Oryza sativa* L.) 铝毒害与耐性机制及铝毒害的缓解作用. *土壤*, 2004, 36(5): 481–491
- [10] 杨建立, 何云峰, 郑绍建. 植物耐铝机理研究进展. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(6): 836–845

Mineral Nutrition and Growth of *Lespedeza bicolor* under High Al and Low Phosphorus Stress

DONG Xiao-ying^{1,2}, SHEN Ren-fang¹

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China;

2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Aluminum toxicity and phosphorus deficiency are the most important limit factors for crop growth in acid soils in many regions of the world, the problem is particularly severe when pH is below 5.0. *Lespedeza bicolor* is a forage legume, well adapted to acid infertile soils. This paper investigated mineral nutrition of *Lespedeza bicolor* under high Al and low phosphorus stress. The results showed that Al stress significantly reduced Ca content in the shoots and roots and Mg accumulation in the roots; but had no effect on the contents of K, P, Fe, Zn and Cu of two *Lespedeza* cultivars. Low phosphorus treatment significantly reduced the absorption and transport of Mg in the roots of Hebei *Lespedeza* cultivars, but had no effect on the contents of K, P, Fe, Zn and Cu of two *Lespedeza* cultivars. Al accumulated mainly in the roots of *Lespedeza bicolor*, which indicated Al tolerance of *Lespedeza bicolor* was achieved by restricting Al absorption from the soils and Al upward transportation of in the plants.

Key words: *Lespedeza bicolor*, Al stress, Low phosphorus stress, Mineral nutrition