

施用磷、钙对红壤上胡枝子生长和矿质元素含量的影响^①

孙清斌^{1,2,3}, 董晓英¹, 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; 3 环境科学与工程学院(黄石理工学院), 湖北黄石 435003)

摘要: 采用红壤土培试验, 研究了施用 P、Ca 对耐 Al 性不同的两个胡枝子品种的生长和矿质元素含量的影响。结果表明, 单独 +P 处理显著增加了耐 Al 品种根和地上部生物量, 而对 Al 敏感品种无影响; 单独 +Ca 处理显著促进了 Al 敏感品种根部的生长, 而对耐 Al 品种的生长无影响; +P+Ca 处理显著增加了两个品种根和地上部生物量。耐性品种地上部 Al 含量显著低于敏感品种, 而根部 Al 含量无显著差异。两个品种体内 P 含量在 +P 处理时耐性品种显著高于敏感品种, 其他处理品种间无显著差异。整体上, 胡枝子体内 Ca、K、Mn 和 Mg 含量耐性品种大于敏感品种, Fe 含量反之。结果表明, 低 P 胁迫是酸性土壤上耐 Al 胡枝子品种生长的主要限制因子, 增施 P 肥效果明显, 而对于 Al 敏感品种, Al 毒是其生长的首要限制因子, 只有施用石灰后对其加 P, 生物量才能提高。耐性品种根部有阻碍 Al 向地上部运输的机制, 而这种机制与体内 P 含量较高有着直接或间接的关系。另外, 推测耐 Al 胡枝子品种对其他养分的吸收利用能力也较强。

关键词: 胡枝子; 酸性土壤; 铝毒害; 磷/铝比

中图分类号: S541; Q945

土壤酸性是限制农业生产的一个重要因子。酸性土壤占全世界土地总面积的 30%, 50% 的潜在耕地为酸性土壤^[1]。我国南方也分布大面积酸性土壤, 约占国土面积的 22.7%^[2]。酸性土壤包括多个限制因子, 如 Al、Mn 和 Fe 的过量和 P、N、K、Ca、Mg 以及一些微量元素的不足^[3], 其中 Al 毒和 P 缺乏通常是共存于酸性土壤上的最主要限制因子^[4]。尽管施用石灰, 可以暂时改变土壤酸性, 但是此措施既不经济, 也不能从根本上减轻心土层的酸性问题。因此, 最好的办法之一就是挖掘植物潜力, 选育和种植耐性植物或品种^[5]。

胡枝子属植物的大多数种类均能忍耐贫瘠的酸性土壤^[6], 种植在 pH 4~6 的酸性土壤上仍可维持很高的产量^[7], 被誉为酸性土壤上的先锋作物。因此, 胡枝子是改良酸性土壤, 为其它作物创造立地条件的优选植物。但针对胡枝子的研究以往主要偏重于应用价值和栽培技术, 对于其为何适应酸性土壤生长的机理研究比较缺乏。另外, 研究 Al 毒害机理和 Al、P 间相互作用时, 为了避免其他因子(养分、环境因子等)的干扰, 通常采用水培的方法, 土培试验研究相对较少, 而真正评价作物是否适应酸性土壤, 最好的办法

植物实际上是耐质子毒害、Al 毒害和低 P 胁迫的综合反映。以往针对 P 肥施用可以缓解 Al 毒的报道很多, 也有不同品种中 P 高效品种即为耐 Al 品种的报道, 而对于 Al 胁迫下不同耐 Al 性品种对 P 的响应以及对 P 和其他元素吸收差异的研究未见报道。鉴于此, 我们采用土培试验来研究不同 P、Ca 处理对两个耐 Al 性存在显著差异的胡枝子品种生物量和矿质元素吸收的影响, 以期挖掘酸性土壤上植物的生产潜力提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤及试验设计

1.1.1 供试材料 试验于 2007 年 8 月至 10 月在中科院南京土壤研究所温室内进行, 供试土壤为第四纪红黏土, 采自鹰潭红壤生态开放实验站。土壤取回后, 风干, 除去砾石和植物残根, 过 5 mm 筛备用。供试植物为二色胡枝子(耐 Al 性品种)和截叶胡枝子(Al 敏感性品种)。土壤主要理化性状是: 有机质 18.6 g/kg, 全 P 0.18 g/kg, 全 N 0.33 g/kg, 碱解 N 14.5 mg/kg, 速效 P (Bray 法提取) 0.40 mg/kg, pH 4.5。

①基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KSCX2-YW-N-002)和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: 孙清斌(1977—), 男, 河南新乡人, 博士研究生, 主要从事植物营养与逆境生理研究。E-mail: Samuel614@126.com

作者单位: 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 中国科学院研究生院, 北京 100049; 黄石理工学院, 湖北黄石 435003

将肥料与土壤充分混匀后,装入盆内(2.0 kg/盆)。二色胡枝子种子经浓硫酸处理约 10 min,用水冲洗去除种子表面附着的硫酸,然后放入蒸馏水中浸泡过夜。截叶胡枝子则直接用蒸馏水浸泡过夜。将吸涨后的种子放入衬有滤纸的培养皿中催芽 1 天后播种。齐苗后,二色胡枝子每盆定苗为 6 棵,截叶胡枝子每盆定苗为 12 棵。定期浇水,数量均一。生长 50 天后,分盆收获称重,进行下述项目的测定。

1.1.2 试验设计 共 4 个处理,重复 3 次。具体实施方案为:对照(CK)、加Ca(+Ca)、加P(+P)、加P加Ca(+P+Ca)。所有处理均施N 200 mg/kg土,施K 200 mg/kg土。+Ca处理施CaCO₃ 1.0 g/kg土,+P处理施P 80 mg/kg土,+P+Ca处理施CaCO₃ 1.0 g/kg土和P 80 mg/kg土。所有肥料全部作基肥一次性施入。N肥采用尿素;P肥用磷酸氢二钾;K肥除磷酸氢二钾之外用氯化钾调整比例。

1.2 测定项目和方法

测定项目包括生物鲜重与 Al、P、Ca、K、Mg、Mn 和 Fe 元素含量。

植株收获后,用蒸馏水冲洗干净,再用吸水纸擦干,称量鲜重。随后在烘箱内 105 ℃杀青 15 min,保持 75 ℃烘干至恒重,粉碎备用。植株体内养分元素测定方法参见文献[8]。植株样品经HNO₃(优级纯)消煮后,用超纯水(Human UP 900,韩国)定容,再用慢速定量滤纸过滤至塑料瓶中待测。Al、P、Ca、K、Mg、Mn 和 Fe 的含量用 ICP-AES (IRIS-Advantage, Thermo Elemental, USA) 检测。

2 结果与分析

2.1 不同处理对生物重的影响

比较两个胡枝子品种的地上部和根部生物量(以鲜重计),发现,+P 处理显著提高了耐性品种地上部和根部的生物量,而对敏感品种生物量无显著影响;+Ca 处理没有增加耐性品种的生物量,但显著地增加了敏感品种根部的生物量(图 1);既加 P 又加 Ca 处理(+P+Ca)的植株生物量最高,生长最好。说明在酸性土壤上 P 是耐性品种生长的主要限制因子,而对

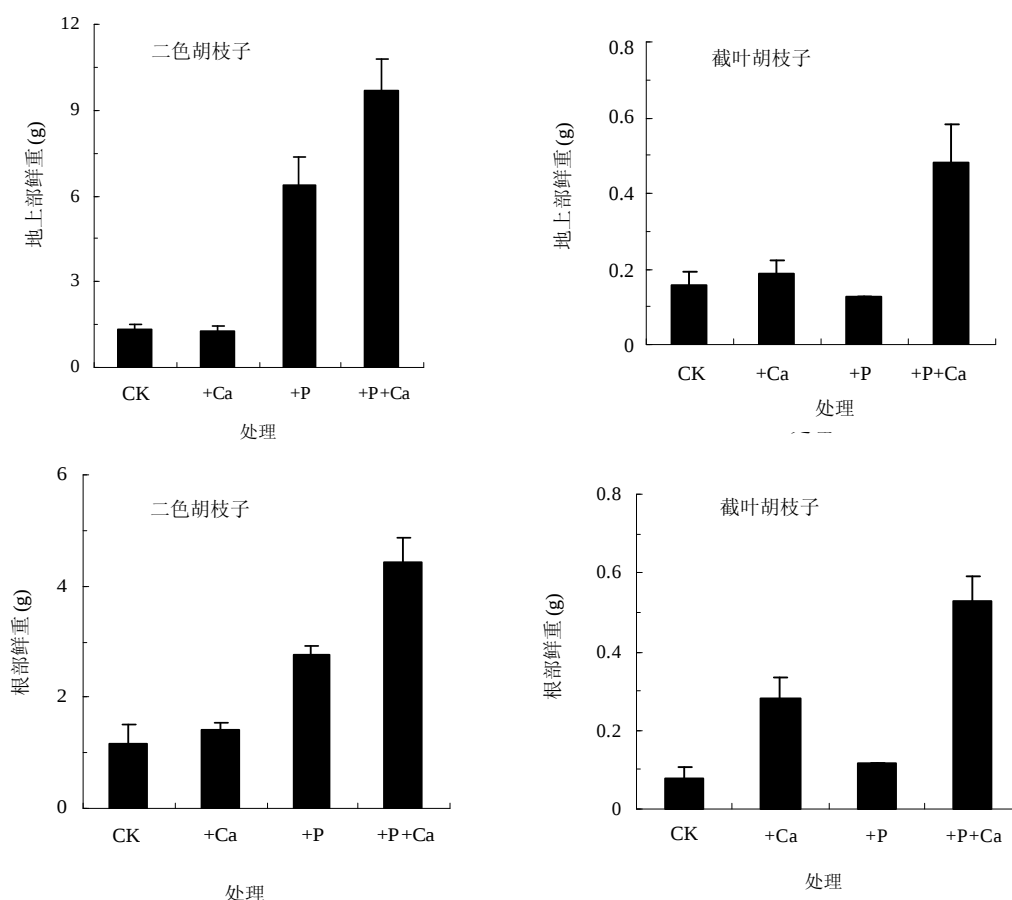


图 1 P、Ca 施用对两个胡枝子品种生物重的影响

Fig. 1 Effects of P and lime applications on the biomass of two lespedeza species

于敏感品种而言, P 不是首要限制因子, 酸性土壤的质子或 Al 毒害才是限制生长的主要因子。两个品种的 +P+Ca 处理都是生长最好的, 说明酸性土壤上质子毒害以及由此带来的 Al 毒害再加上低 P 胁迫是限制植物生长的主要限制因子, 同时也说明了敏感品种只有加 Ca 缓解了质子或 Al 毒害之后, 才能体现 P 的作用。

2.2 植株体内 Al、P 分布状况

图 2 是两个胡枝子品种体内 Al、P 含量。由图 2 可

知, 与对照处理相比, +P、+Ca、+P+Ca 处理, 植株体内 Al 含量都是降低的; 耐性品种地上部 Al 含量远小于敏感品种的 (图 2A), 根部 Al 含量 (图 2B) 除 +P + Ca 处理外差异不显著, 说明耐性品种存在阻碍 Al 向地上部运输的机制; +P 处理时植株体内 P 含量无论是地上部 (图 2C) 还是根部 (图 2D), 耐性品种都显著高于敏感品种, 其他处理两个品种的体内 P 含量差异不显著, 说明耐性品种对 P 的吸收能力高于敏感品种。

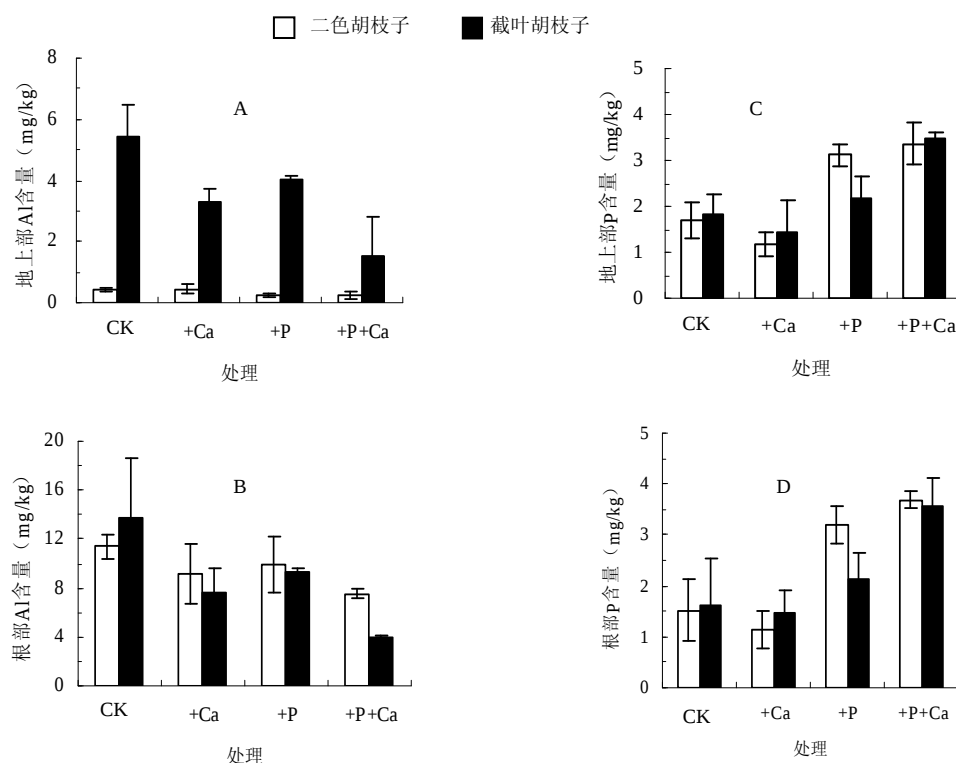


图 2 Ca、P 施用对两种胡枝子体内 Al (A, B)、P (C, D) 含量的影响

Fig. 2 Effects of P and lime applications on Al and P contents of two lespedeza species

我们进一步分析了两个品种根部和地上部的 P/Al 比 (图 3)。由图 3 可知, 耐性品种所有处理的根部 P/Al 比都显著地高于敏感品种所对应的处理, 品种间耐性差别可能与根部 P/Al 比差异有关。耐性品种 +P 处理的 P/Al 比远高于对照和 +Ca 处理的, 敏感品种无此现象, 这一结果表明耐性品种具有强吸收 P 和降低 Al 吸收的能力。+Ca+P 处理敏感品种的地上部 P/Al 比高于对应处理耐性品种的 P/Al 比 (图 3), 说明敏感品种 Al 毒得以缓解后, 对 P 的吸收能力才可能增强。

2.3 对其他养分元素的影响

通过 Tukey 检验发现, 除对照处理外, 耐性品种根部的 Ca、K、Mg、Mn 含量都显著地高于敏感品种的各相应处理, +P 处理显著地促进了耐性胡枝子品种地上部和根部对 K 的吸收 (表 1), 但是单施碳酸钙或 P 都没有显著增加两种胡枝子对 Mg、Mn、Fe 的吸收。+P+Ca 处理显著地增加了耐性胡枝子地上部和根部 Ca、K 的含量和根部 Mg、Mn 含量。+P+Ca 处理除显著增加敏感胡枝子地上部 Ca 含量外, 对其它元素的含量无影响。耐性品种的地上部和根部的 Mn 含量均显著地高于敏感品种。说明品种间耐 Al 差异可能与体内元素含量差异有关。Fe 元素含量则表现为敏感品种

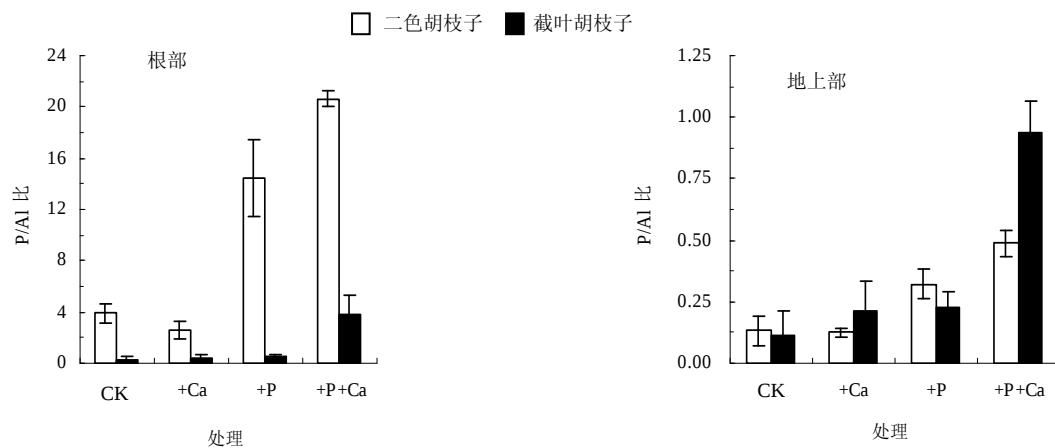


图 3 两种胡枝子体内 P/Al 比

Fig. 3 P/Al ratio in the roots and shoots of two lespedeza species

表 1 Ca、P 施用对其他养分元素含量的影响 (mg/kg, 以干重计)

Table 1 Effects of P and Ca applications on the contents of Ca, K, Mg, Mn and Fe in lespedezas

处理	部位	二色胡枝子				截叶胡枝子			
		CK	+Ca	+P	+P+Ca	CK	+Ca	+P	+P+Ca
Ca	地上部	4.57 b	9.87 a	4.37 b	10.5 a	3.59 b	9.11 a	5.42 b	9.33 a
	根部	1.78 bcd	2.35 ab	2.03 bc	2.86 a	1.61 cd	1.42 cd	1.17 d	1.58 cd
K	地上部	9.03 bc	7.00 cd	16.9 a	14.9 a	8.37 bc	6.05 d	9.35 bc	10.3 b
	根部	5.95 c	5.90 c	11.6 b	14.8 a	4.27 cd	3.07 d	4.23 cd	5.87 c
Mg	地上部	1.32 abc	1.01 c	1.27 bc	1.12 bc	1.30 bc	1.54 ab	1.75 a	1.56 ab
	根部	1.32 bc	1.23 bcd	1.47 ab	1.85 a	1.12 bcd	0.86 d	0.98 cd	1.20 bcd
Mn	地上部	463 ab	491 a	485 b	422 abc	183 d	222 cd	245 bcd	206 cd
	根部	115 b	116 b	202 a	219 a	78.4 cd	46.7 d	66.1 d	48.1 d
Fe	地上部	916 bc	511 c	202 c	678 c	4361 a	2636 abc	3473 ab	1877 abc
	根部	6578 ab	4679 abc	4564 abc	3907 bc	7867 a	4556 abc	5779 abc	3024 c

注：表中采用 Tukey 检验（横向），统计水平为 $p = 0.05$ 。

大于耐性品种，说明植株体内整体含量有可能超过正常需要。根系生长受到抑制，可能存在浓缩效应，关于酸性土壤上存在Fe毒观点，Foy等^[9]也提起过，耐性品种存在保持体内元素平衡的机制。

3 讨论与结论

植物为了能够更好地在酸性土壤上生长会有多种反应来适应土壤上的不利因素。胡枝子是酸性土壤上的先锋作物。以往研究表明，Al胁迫下耐性品种可以大量专性分泌柠檬酸和苹果酸，因此有机酸的分泌是其耐Al机制之一（另文发表）。近年来，P在缓解Al胁迫方面的作用是国内外研究的热点^[4,10]。Sivaguru和Paliwal^[11]认为，水稻耐Al品种之所以具有高的耐性是因为它可以有效地吸收、利用Ca和P元素，敏感品种无此现象。还有关于施用P肥可增加根系生长、促进养分

吸收，以缓解Al胁迫的报道^[12]。Pellet等^[13]提出小麦耐性品种在Al胁迫下根尖可以分泌P，并与Al形成沉淀，起到缓解Al毒的作用。这一结论与Gaume等^[14]认为耐性品种可以通过在根组织形成Al-P沉淀，降低Al胁迫所产生伤害的结果相一致。Zheng等^[10]指出耐Al性荞麦品种是通过根部分泌草酸和在根部组织内形成Al-P沉淀双重效应达到其强耐Al的目的。Liao等^[4]研究认为，大豆耐性品种不仅通过根部Al-P沉淀缓解Al毒，并且通过P的间接作用刺激有机酸的分泌进一步提升其耐Al性。我们通过对两个品种体内Al含量发现，根部Al含量无差异，地上部Al含量耐性品种远低于敏感品种，那么可以得出品种间对Al的耐性主要体现在根部，耐性品种存在阻碍Al向地上部运输机制的推论。进一步对比不同处理对两个品种体内P含量的影响发现，供应同样P水平，其他条件一致的情况下，耐性品种体内

(根部和地上部) P含量显著高于敏感品种体内的P含量。另外,分析根部P/Al比发现, +P处理时耐性品种显著高于敏感品种。由此可以初步推断出耐性品种之所以具有强耐Al性可能与对P具有高响应能力有关,而积聚大量的P或以Al-P无毒形式沉淀在根部;或通过间接作用影响有机酸分泌;当然也可能通过间接影响细胞壁组分和膜的通透性,最终达到减轻Al毒害的作用,这些方面仍需要进一步的研究。

本研究结果表明,耐Al胡枝子品种在 +P处理下较对照和 +Ca处理其生物量显著增加,敏感品种无此现象。说明P的缺乏是酸性土壤上限制耐性胡枝子品种生长的主要因子。对敏感品种的生物重和地上部P/Al比分析,发现 +Ca处理下,敏感品种显著增加根部生物重,地上部没有显著差异,而 +P处理对生物重没有影响(不同于耐性品种)。同时, +P +Ca处理地上部和根部生物量显著高于对照处理。由于耐性品种各处理体内P/Al比远高于敏感品种各处理的P/Al比,可以得出植物体内P/Al比较高的情况下,则受到Al毒害相对较轻的推论。结合敏感品种在 +P+Ca处理时体内P/Al比显著高于其他所有处理,可见针对敏感品种而言, Al毒或质子毒害才是首要的生长限制因子,只有缓解了Al毒或质子毒害之后,施用P肥才能显示出肥效。

土壤中Al的活性与土壤pH值有着密切关系,通常Al是以难溶性硅酸盐或氧化铝形式存在,对植物没有毒害,但当 $\text{pH} < 5$ 时,则主要以 Al^{3+} 的形式存在,对大多数植物都会产生毒害^[15],因此酸性土壤上Al毒的产生和pH值的降低是伴生的。Yang等^[16]通过水培试验研究不同pH对菠菜根伸长的影响,证明在低pH条件下根长也受到抑制,从而提出耐酸害是植物耐Al毒的前提的观点。以往也有质子毒害能抑制根系生长的报道^[17-18]。如果植物耐酸是耐Al的前提,施用石灰以提升土壤pH值应该更利于植物生长。我们的结果显示 +Ca处理后,耐性品种生物量不发生显著变化,敏感品种地上部变化无差异,而只有同时补充P元素之后两个品种的生物量才显著增加,可见酸性土壤限制作物生长的因素包括多个,单独去谈任何一个都是意义不大的。

另外, Marschner^[19]提出一些体内P、Ca或Mg浓度较高的植物,通常表现出对酸性土壤有较强的适应能力。Ofei-Manu等^[20]研究表明,耐酸性土壤的植物与根部积累大量的Ca、Mg、K等元素有关。本研究结果显示,整体上,胡枝子体内Ca、K、Mn和Mg含量耐性品种大于敏感品种,与上面报道相吻合。这可能是耐性胡枝子对养分吸收能力较强,从而形成强耐Al的原因之一。另外, Fe元素含量则表现为敏感品种大于耐性

品种,说明植株体内整体含量有可能超过正常需要。通常认为植物体内Fe含量(以干重记)在 25 ~ 500 mg/kg之间,水稻叶片Fe毒的临界值(以干重记)是 500 mg/kg^[21]。本试验所测得植株体内Fe含量大多高于此临界值。因此,胡枝子体内如此高的Fe含量极有可能产生Fe毒。相对于敏感品种,耐性品种各处理含量都相对较小,可能是耐性品种存在维持体内元素平衡的机制,这也是有必要深入探讨的问题。

总之,耐性品种之所以对Al有较高的耐性是因为根部有阻碍Al向地上部运输的机制,而这种机制与体内P含量较高有着直接或间接的关系。同时,酸性土壤上P的不足是耐性品种生长的主要限制因子。对敏感品种而言,Al毒或质子的毒害是首要限制因素,只有在缓解Al胁迫或质子毒害之后施用P肥才能体现肥效。虽然Al毒、质子毒害和P缺乏是共存于酸性土壤上植物生长的3个主要限制因子,但是在挖掘植物生产潜力时,要根据不同品种的各自限制因子有所针对地进行土壤改良。

参考文献:

- [1] Von Uexkull HR, Mutert E. Global extent development and economic impact of acid soils. *Plant and Soil*, 1995, 171 (1): 1-15
- [2] 熊毅, 李庆逵. 中国土壤. 北京: 科学出版社, 1987
- [3] Kochian LV, Hoekenga OA, Piñeros MA. How do crop plants to tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency. *Annual Reviews of Plant Biology*, 2004, 55(1): 459-493
- [4] Liao H, Wan HY, Shaff J, Wang X, Yan X, Kochian LV. Phosphorus and aluminum interactions in soybean in relation to aluminum tolerance: Exudation of specific organic acids from different regions of the intact root system. *Plant Physiology*, 2006, 141(2): 674-684
- [5] Foy CD. Plant adaptation to acid, aluminum-toxic soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1988, 19(7-12): 959-987
- [6] Campbell TA, Nuernberg NJ, Foy CD. Differential responses of *Sericea lespedeza* to aluminum stress. *Journal of Plant Nutrition*, 1991, 14(10): 1057-1066
- [7] Cline GR, Silvernail AF. Effects of soil acidity on growth of *sericea lespedeza*. *Journal of Plant Nutrition*, 1997, 20(12): 1657-1666
- [8] Chen RF, Shen RF, Gu P, Dong, XY, Du CW, Ma JF. Response of Rice (*Oryza sativa*) with root surface iron plaque under aluminium stress. *Annals of Botany*, 2006, 98 (2): 389-395

- [9] Foy CD, Chaney RL, White MC. The physiology of metal toxicity in plants. *Annual Review of Plant Physiology*, 1978, 29(1): 511–566
- [10] Zheng SJ, Yang JL, He YF, Yu XH, Zhang L, You JF, Shen RF, Matsumoto H. Immobilization of aluminum with phosphorus in roots is associated with high aluminum resistance in buckwheat. *Plant Physiology*, 2005, 138(1): 297–303
- [11] Sivaguru M, Paliwal K. Differential aluminium tolerance in some tropical rice cultivars. II. Mechanism of aluminium tolerance. *Journal of Plant Nutrition*, 1993, 16(9): 1717–1732
- [12] Tan K, Keltjens WG. Interaction between aluminium and phosphorus in sorghum plants. I. Studies with the aluminium sensitive sorghum genotype TAM428. *Plant and Soil*, 1990(1), 124: 15–23
- [13] Pellet DM, Papernik LA, Jones DL, Darrah PR, Grunes DL, Kochian LV. Involvement of multiple aluminium exclusion mechanisms in aluminium tolerance in wheat. *Plant and Soil*. 1997, 192(1): 63–68
- [14] Gaume A, Mächler F, Frossard E. Aluminum resistance in two cultivars of *Zea mays* L: Root exudation of organic acid and influence of phosphorus nutrition. *Plant and Soil*, 2001, 234(1): 73–81
- [15] Kochian LV, Piñeros MA, Hoekenga OA. The physiology, genetics and molecular biology of plant aluminum resistance and toxicity. *Plant and Soil*, 2005, 274(1/2): 175–195
- [16] Yang JL, Zheng SJ, He YF, Matsumoto H. Aluminum resistance requires resistance to acid stress: A case study with spinach that exudes oxalate rapidly under Al stress. *Journal of Experimental Botany*, 2005, 56(414): 1197–1203
- [17] Kinraide TB, Parker DR. Cation amelioration of aluminum toxicity in wheat. *Plant Physiology*, 1987, 83(3): 546–551
- [18] Koyama H, Toda T, Yokota S, Dawair Z, Hara T. Effects of aluminum and pH on root growth and cell viability in *Arabidopsis thaliana* strain Landsberg in hydroponic culture. *Plant Cell Physiology*, 1995, 36(1): 201–205
- [19] Marschner H. Mechanisms of adaptation of plants to acid soils. *Plant and Soil*, 1991, 134(1): 1–20
- [20] Ofei-Manu P, Wagatsuma T, Ishikawa S, Tawaraya 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): 359–375
- [21] 廖红, 严小龙. 高级植物营养学. 北京: 科学出版社, 2003

Effects of Phosphorus or Lime Applications on Growth and Mineral Compositions of Two Lespedeza Species

SUN Qing-bin^{1,2,3}, DONG Xiao-ying¹, 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;

3 College of Environmental Science and Engineering, Huangshi Institute of Technology, Huangshi, Hubei 435003, China)

Abstract: Soil culture experiment was employed to explore the effects of phosphorus or lime applications on biomass and mineral compositions in two lespedeza species different in Al sensitivity. The results showed that +P treatment could increase the biomass of Al-tolerant species, but not for that of Al-sensitive species. +Ca treatment could augment the root biomass of Al-sensitive species, but not for that of Al-tolerant species. Biomass were enhanced by +P+Ca treatment in both species. Al content in shoots of Al-tolerant species was much lower than that of Al-sensitive species, and no difference in Al content of roots was found. P content in shoots of Al-tolerant species was higher than that in Al-sensitive species only with +P treatment. Contents of Ca, K, Mn and Mg in Al-tolerant species were higher than those in Al-sensitive species, Fe content was contrary. The results suggested that the main limit factor for Al-tolerant species was P deficiency in acid soil. However, Al toxicity was the primary limit factor for Al-sensitive species. Al-tolerant species had some mechanisms to prevent Al transport from roots to shoots, and such tolerant mechanisms could be related with the higher content of P in plants. In addition, Al-tolerant species had the stronger ability to uptake Ca, K, Mg, Mn than Al-sensitive species.

Key words: Lespedeza, Acid soil, Al toxicity, P/Al ratio