

铝胁迫下磷对水稻苗期生长的影响及水稻耐铝性与磷效率的关系*

张启明^{1, 2, 3} 陈荣府¹ 赵学强¹ 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 江西省烟叶科学研究所, 南昌 330029)

摘要 选用两个耐铝性差异较大的水稻品种武运梗 7 号(耐铝品种)和扬稻 6 号(铝敏感品种)作为实验材料, 利用水培铝-磷交替处理试验研究了磷对水稻铝胁迫下苗期生长的影响及水稻耐铝性与磷效率之间的关系。结果表明, 从水稻铝-磷交替处理下的生物量和根系形态等指标来看, P 缓解了 Al 对两个水稻品种的毒害作用, 且对敏感品种扬稻 6 号的缓解作用更加明显。铝-磷交替处理下, 武运梗 7 号的体内磷含量显著高于扬稻 6 号的, 而根部铝含量显著低于扬稻 6 号, 因此武运梗 7 号体内的 P/Al 显著高于扬稻 6 号; 同时, 虽然两个品种间根表及根自由空间中 Al 浓度没有差别, 而武运梗 7 号根表及根自由空间中 P 浓度显著高于扬稻 6 号, 表现出耐铝品种更强的质外体解铝解毒能力, 这可能与武运梗 7 号较强的磷吸收效率有关。此外, 与耐铝品种武运梗 7 号相比, 铝敏感品种扬稻 6 号虽然磷吸收效率低, 但利用效率高, 即两个水稻品种的耐铝性与水稻的磷吸收效率和利用效率不一致, 这为酸性土壤水稻育种提供了理论基础, 即选育适应酸性土壤的水稻基因型不仅要关注其耐铝性还要关注其磷利用效率。

关键词 磷; 水稻; 铝胁迫; 苗期生长; 耐铝性; 磷效率

中图分类号 S511; Q945 **文献标识码** A

水稻是主要的粮食作物, 全球约 13% 的水稻产量来自酸性土壤^[1]。铝毒害是酸性旱地和酸性硫酸盐水田水稻产量的主要限制因子^[2-3]。近年来, 虽然水稻的耐铝机制研究有了很大的进展^[4-7], 但水稻耐铝的生理机制还不是很清楚, 需要用不同的品种和方法进行验证。

铝毒和磷缺乏共存于酸性土壤中, 是酸性土壤中植物生长的两个重要限制因子^[1]。前人对酸性土壤上铝毒和磷缺乏的问题做了大量的研究, 但是大多数的研究工作都是将铝毒害和磷缺乏的问题单独进行研究^[8-10]。磷肥的施用可以提高酸性土壤作物产量, 由此人们认为磷可以缓解酸性土壤植物铝毒害。关于磷缓解植物铝毒害的研究已有一些报道如高粱^[11-12]、玉米^[13]、大豆^[14]以及胡枝子^[15], 这些研究主要侧重于铝胁迫下磷对作物苗期生长及铝吸收的影响, 而对植物耐铝性与磷效率之间的关系研究较少。关于磷对水稻铝毒害作用的研究

也有一些报道^[16-19], 然而, 这些结果大多是在磷充足的条件下获得的。事实上, 植物生长在酸性土壤上不仅遭受铝毒害, 还遭受低磷胁迫。因此, 研究缺磷和磷充足条件下铝对水稻生长的不同影响以及水稻耐铝性与磷效率之间的关系不仅有助于揭示磷在水稻耐铝中的作用, 而且对于酸性土壤施肥也有重要的指导意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料及生长条件

本研究选用武运梗 7 号和扬稻 6 号两个水稻品种为实验材料。水稻种子用 10% 的双氧水消毒 30 min 后用蒸馏水清洗干净, 再用蒸馏水在 25℃ 下浸泡 24 h, 然后置于湿润的滤纸上 25℃ 避光催芽, 2 d 以后, 移于漂浮在 0.5 mmol L⁻¹ CaCl₂ (pH4.5) 溶液中的浮板上培养, 先避光培养 1 d, 然后见光培养 2

* 国家自然科学基金项目(40921061, 40871144)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KSCX2-YW-N-002)资助

† 通讯作者, E-mail: rfshen@issas.ac.cn

作者简介: 张启明(1979—), 男, 河南西平人, 博士研究生, 主要从事植物营养研究。E-mail: qmzhang@issas.ac.cn

收稿日期: 2009-10-30; 收到修改稿日期: 2009-12-22

d, 培养过程中每天更换 CaCl_2 培养液。选择在 CaCl_2 中预培养 3 d 后生长一致的幼苗转移至修改过的全量木村营养液中, 该营养液含大量元素 (mmol L^{-1}): NH_4NO_3 (0.5), $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0.55), KCl (0.18), $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (0.36) 和 KH_2PO_4 (0.18); 微量元素 ($\mu\text{mol L}^{-1}$): $\text{Na}_2\text{EDTA-Fe(II)}$ (20), $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (9), H_3BO_3 (46), $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (9), $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0.7) 和 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (0.3)。所有试验均在光照培养室中进行, 温度为 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$, 相对湿度为 $65\% \pm 5\%$, 光强为 $\text{photon } 300 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 昼夜循环为光 14 h/黑暗 10 h。

1.2 试验处理

1.2.1 两个水稻品种耐铝性比较 在 CaCl_2 溶液中培养 3 d 的幼苗用含有不同浓度铝的 $0.5 \text{ mmol L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 溶液进行处理, 铝的处理浓度分别为 0、25、50、100、200 $\mu\text{mol L}^{-1}$, 铝以 AlCl_3 的形式供给, 各处理的 pH 均为 4.5, 处理 24 h。铝处理前后用直尺量根长, 并计算相对根伸长, 同时切取 10 个根尖, 测定根尖铝含量。

1.2.2 磷-铝交替处理 在营养液中预培养 4 d (期间每两天换一次营养液) 后进行磷铝交替处理。为了避免营养液中的磷与铝形成沉淀而降低铝的活度, 故实验采用磷-铝交替处理的方法。试验共设 4 个处理, 分别为持续缺磷 (-P)、缺磷与铝处理交替 (-P+Al)、持续正常磷 (+P)、正常磷与铝处理交替 (+P+Al)。具体处理方法如下: 先用不同磷浓度 (0 和 180 $\mu\text{mol L}^{-1} \text{ KH}_2\text{PO}_4$) 的营养液处理 1 d, 然后进行铝处理 ($0.5 \text{ mmol L}^{-1} \text{ CaCl}_2 + 100 \mu\text{mol L}^{-1} \text{ AlCl}_3$) 1 d, 依次循环。每个处理重复 3 次, 每盆 (8 株苗) 为一个重复。培养过程中各处理溶液的 pH 均调为 4.5, 在设置磷浓度时不足的钾以 KCl 补充, 交替培养 14 d 后收获。

1.3 测定项目和方法

1.3.1 相对根伸长 采用相对根伸长 (Relative Root Elongation, RRE) 来判断两个水稻品种的耐铝性, 计算公式为:

$$RRE = \frac{RL_{At} - RL_{A0}}{RL_{Ct} - RL_{C0}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, RL_{At} 为 Al 处理 t 时间后的根长; RL_{A0} 为 Al 处理前的根长; RL_{Ct} 为对照处理 t 时间后的根长; RL_{C0} 为对照处理前的根长。

1.3.2 根尖 Al 含量测定 Al 处理 24 h 后切取根尖 (0 ~ 1.0 cm) 10 条, 用 $0.5 \text{ mmol L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 溶液冲洗 3 次后, 放入装有 1.0 ml $2 \text{ mol L}^{-1} \text{ HCl}$ 的 1.5

ml 离心管中, 中间间断地摇动。放置至少 24 h 后用 ICP-AES (IRIS-Advantage, Thermo Elemental, MA, USA) 测定, 每个处理重复 3 次, 每个重复 10 个根尖。

1.3.3 植株干重 收获后, 植株分为根系和地上部两部分, 用蒸馏水洗干净后, 于 105°C 杀青 30 min, 然后保持 75°C 烘干至恒重后称重。

1.3.4 根系形态指标 交替试验收获后用根系扫描仪扫描各处理根系外部形态变化, 并用 WinRHIZO 图像分析系统分析根长、根表面积、根体积和根平均直径。

1.3.5 植株体内元素分析 植物体内铝和磷的测定方法参照文献 [20]。植物样品经浓硝酸 (优级纯) 消煮后, 用超纯水定容, 再用定量滤纸过滤后待测。铝和磷的含量用 ICP-AES (IRIS-Advantage, Thermo Elemental, MA, USA) 检测。

1.3.6 50 mmol L⁻¹ H₂SO₄ 提取的 Al 和 P 浓度

50 mmol L⁻¹ H₂SO₄ 提取的 Al 和 P 浓度的测定方法是根据 Tan 和 Keltjens^[12] 的方法测定的。植株收获后将根用蒸馏水洗干净, 然后浸入装有 40 ml 50 mmol L⁻¹ H₂SO₄ 溶液的离心管中, 浸泡 15 min, 然后测定洗脱液中的 Al、P 浓度。

1.3.7 磷吸收效率和磷利用效率 磷吸收效率 ($\text{P mg g}^{-1}\text{RDW}$) 按照 Elliott 和 Läuchli^[21] 的计算方法计算, 计算公式如下:

$$\text{磷吸收效率} = P_t / \text{RDW} \quad (2)$$

式中, P_t 代表整个植株磷含量 (mg), RDW 代表根干重 (g)。

磷利用效率 ($\text{SDW g}^2 \text{ mg}^{-1} \text{ P}$) 按照 Siddiqi 和 Glass^[22] 的计算方法计算, 计算公式如下:

$$\text{磷利用效率} = \text{SDW} / P_s \quad (3)$$

式中, P_s 代表地上部磷含量 (mg g^{-1}), SDW 代表地上部干重 (g)。

1.4 数据处理与统计分析

所有数据均经过 SPSS 15.0 统计分析, 方差分析采用 Duncan-test。

2 结果与分析

2.1 两个水稻品种的耐铝性比较

铝浓度试验表明, 25、50、100 和 200 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Al 处理 24 h 后, 武运粳 7 号的根系伸长分别为对照的 80%、70%、57% 和 44%, 而扬稻 6 号的根系伸长仅分别为对照的 61%、43%、32% 和 23%

(图 1A)。此结果表明武运粳 7 号的耐 Al 性强于扬稻 6 号。根尖 Al 含量结果表明,扬稻 6 号根

尖 Al 含量均高于对应 Al 处理的武运粳 7 号的根尖 Al 含量(图 1B)。

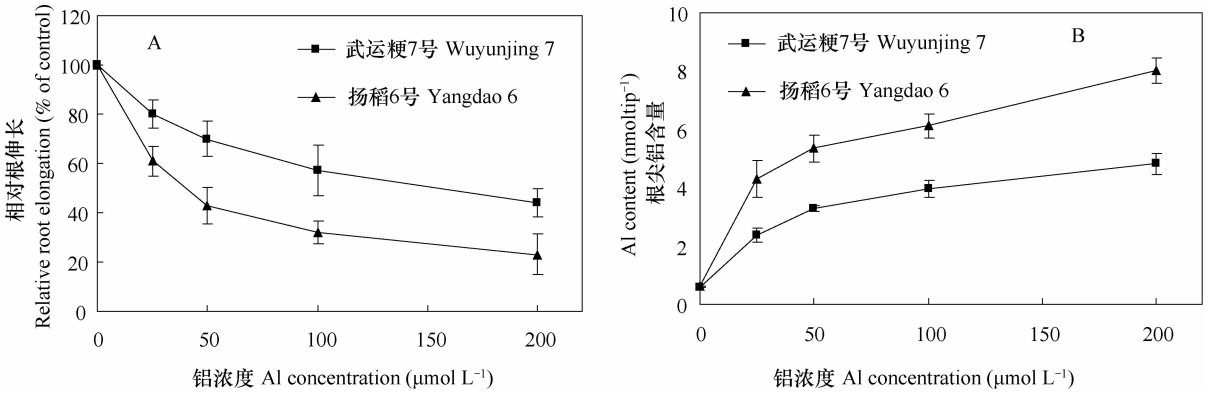


图 1 不同 Al 浓度下两个水稻品种根相对伸长和根尖 Al 含量比较

Fig. 1 Effects of Al concentration on root elongation and Al contents in root tips of the two rice cultivars (Vertical bars represent means ± SD, n = 3)

2.2 Al、P 交替处理对生物量的影响

不加磷条件下,铝处理降低了扬稻 6 号地上部和根部干重,而对武运粳 7 号的生物量没有显著影响;而在加磷条件下,铝处理未显著影响两个品种水稻的地上部和根部的生物量(图 2)。在无铝胁迫的情况下,加磷显著地增加了两种水稻地上部的生物量,而降低了根系的生物量;在铝胁迫下,加磷非常显著地增加了两个品种水稻地上部的生物量,但

未增加武运粳 7 号的根系生物量(图 2)。扬稻 6 号地上部和根部生物量的相对值(+Al/-Al × 100%)在不加磷时分别为 85% 和 72%,而武运粳 7 号地上部和根部生物量的相对值分别为 90% 和 97%;扬稻 6 号的相对值(+Al/-Al × 100%)在加磷处理时分别为 103% 和 107%,而武运粳 7 号的相对值分别为 108% 和 108%,因此,加磷减轻了铝的抑制效果。

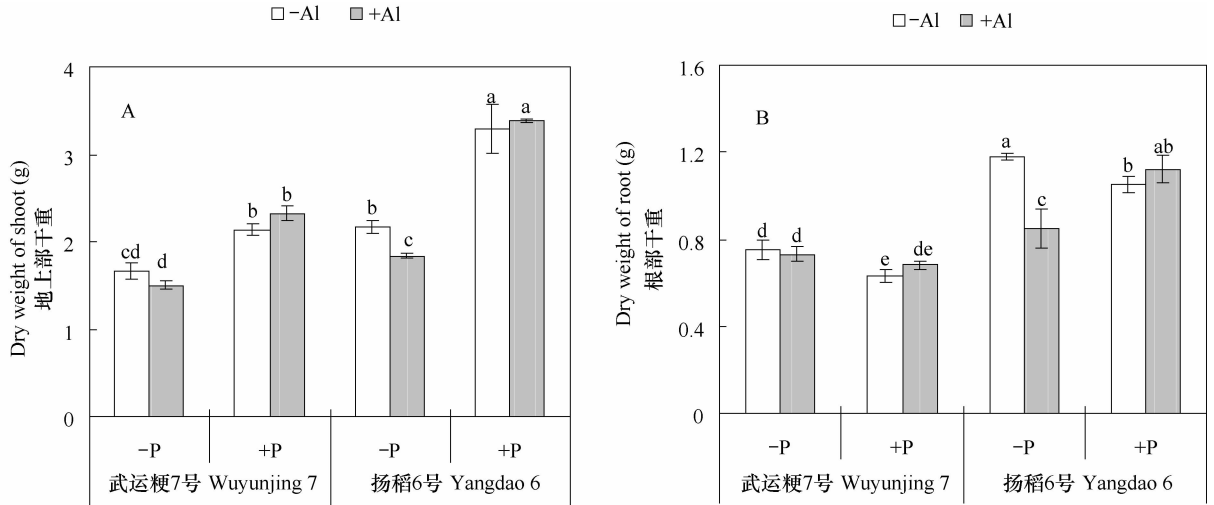


图 2 Al-P 交替处理对水稻生物量的影响

Fig. 2 Effects of alternation of Al and P treatments on biomass of the rice (Vertical bars represent means ± SD, n = 3. Significant differences between mean values are indicated by different letters at the p < 0.05 level. The same blow)

2.3 Al、P 交替处理对根形态的影响

两个水稻品种 Al 和 P 交替处理 14 d 后扫描的根系形态参数变化见图 3。在不加磷条件下,铝处理使扬稻 6 号的根长、根表面积、根体积均显著下降,而根直径显著增加,武运粳 7 号的根长、根表面

积也显著下降,根直径显著增加,但程度不如扬稻 6 号明显。在铝胁迫下增加磷的供应减轻了铝对根系参数的影响,使根长和根表面积显著增加而根直径不受影响,且缓解效果在扬稻 6 号上表现得更加明显。

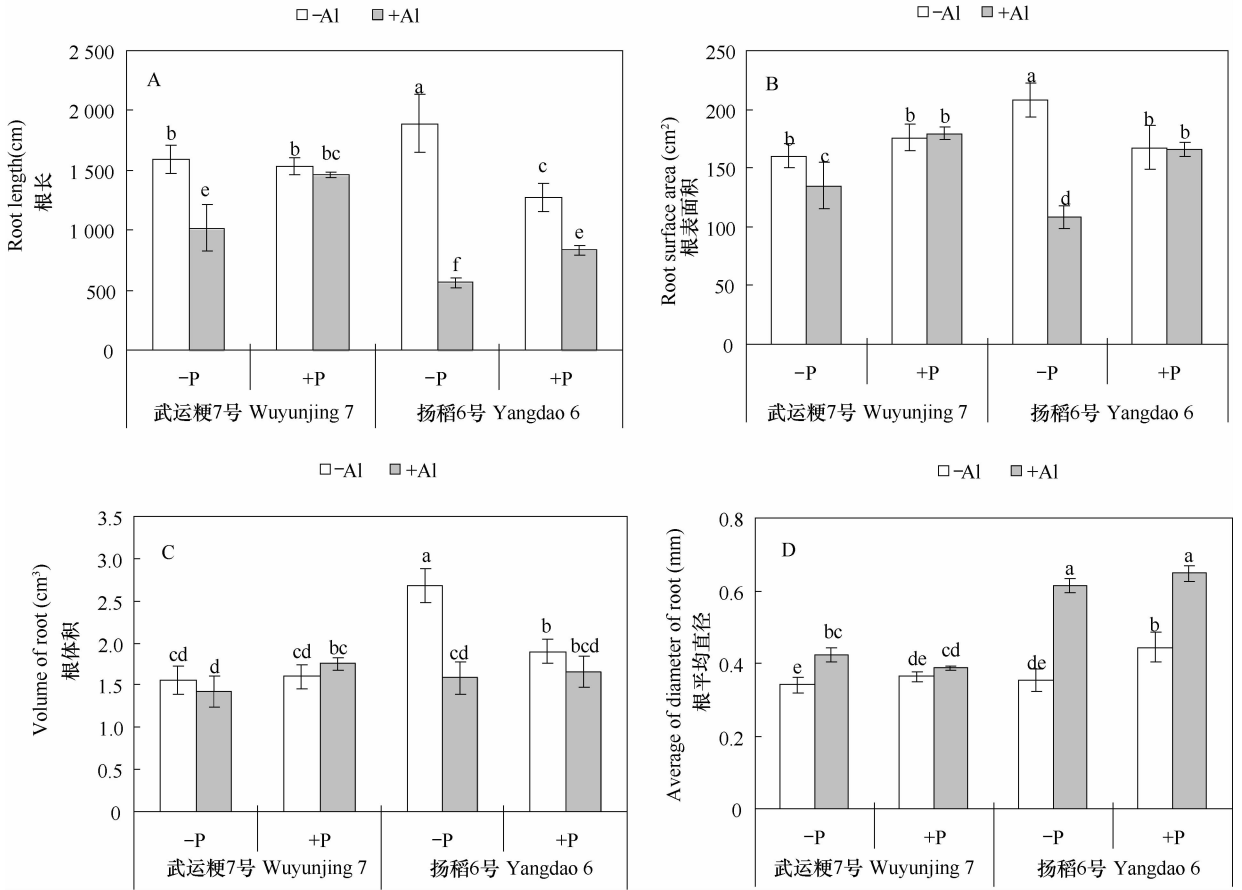


图3 Al-P交替处理对两个水稻品种根系扫描参数的影响

Fig. 3 Effects of alternation of Al and P treatments on root parameters of the rice

2.4 Al、P交替处理对植物体内P、Al浓度的影响

加磷后显著提高了两个水稻品种地上部和根部中P浓度,且武运梗7号P浓度要显著高于扬稻6号(图4A,图4B)。加磷条件下,Al胁迫显著降低了武运梗7号地上部和根部P浓度,而扬稻6号地上部和根部P浓度变化不明显。

加磷后两个品种根部Al含量均显著增加,但无论是缺磷还是加磷条件下,武运梗7号根部Al浓度均要显著低于扬稻6号(图4D)。

2.5 Al、P交替处理对50 mmol L⁻¹ H₂SO₄提取的Al和P浓度的影响

铝胁迫下,加磷处理显著地增加了50 mmol L⁻¹ H₂SO₄提取的Al和P浓度。两个品种间50 mmol L⁻¹ H₂SO₄提取的Al浓度没有差别,而武运梗7号50 mmol L⁻¹ H₂SO₄提取的P浓度在加磷条件下显

著高于扬稻6号(图5)。在同等加磷处理中,铝胁迫不会影响50 mmol L⁻¹ H₂SO₄提取的P浓度。

2.6 植物体内P/Al分析

与缺磷处理相比,加磷条件下武运梗7号地上部和根部P/Al比分别增加了7.3倍和4.2倍,而扬稻6号地上部和根部P/Al比分别增加了4.2倍和3.9倍。因此,加磷显著提高了两个品种地上部和根部P/Al比(图6)。

2.7 磷吸收效率和磷利用效率分析

加磷条件下,耐铝品种武运梗7号的磷吸收效率要显著高于铝敏感品种扬稻6号(表1)。然而,无论在何种条件下,扬稻6号的磷利用效率要显著高于武运梗7号。而且,缺磷条件下两个品种的磷利用效率均要高于加磷条件的磷利用效率。

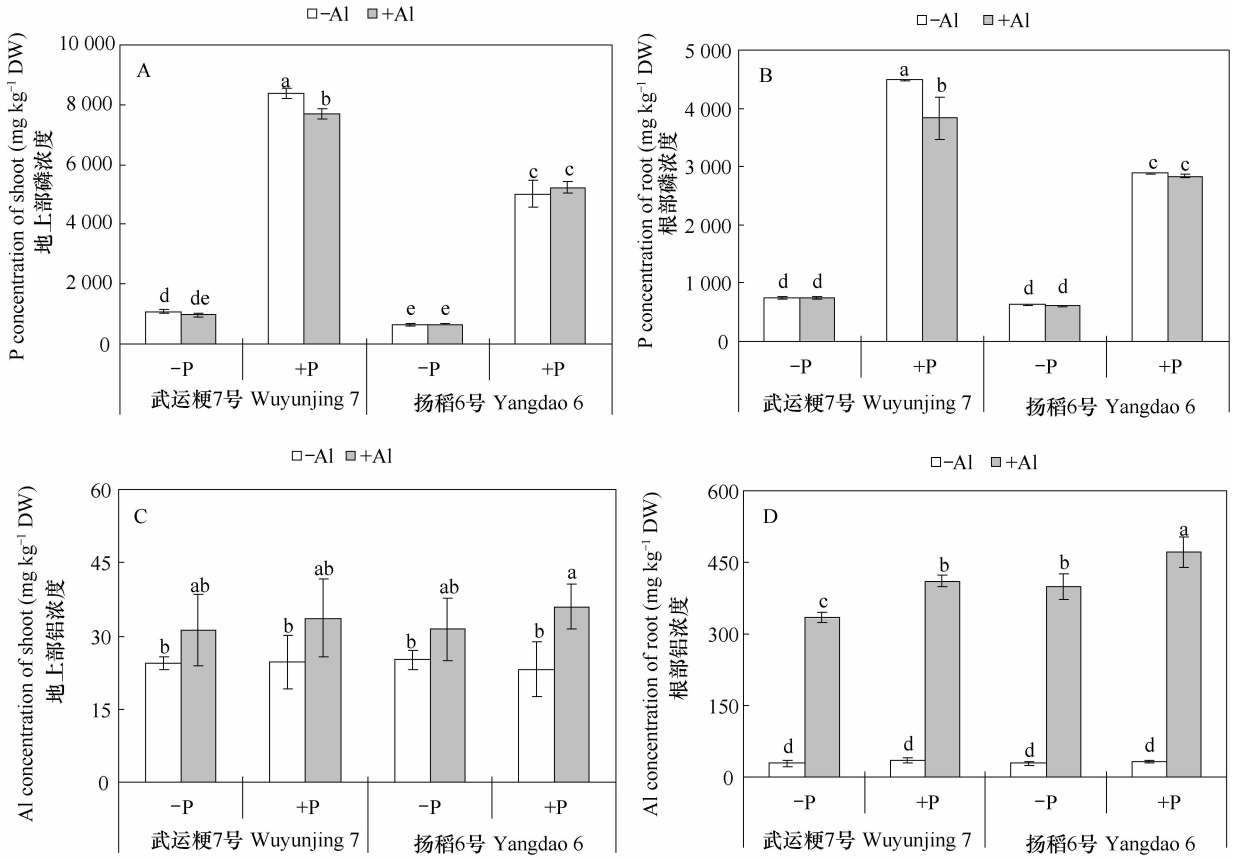
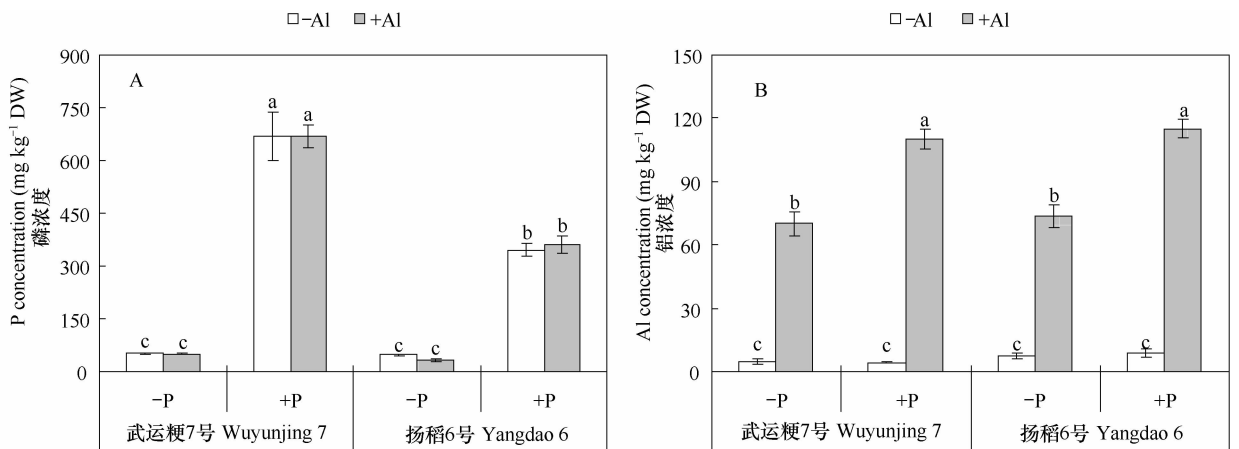


图 4 Al-P 交替处理对两个水稻品种体内 P、Al 浓度的影响

Fig. 4 Effects of alternation of Al and P treatments on P and Al concentrations in the two cultivars of rice

图 5 Al-P 交替处理对两个水稻品种 50 mmol L⁻¹ H₂SO₄ 提取的 Al、P 浓度的影响Fig. 5 Effects of alternation of Al and P treatments on concentration Al and P extractable by 50 mmol L⁻¹ H₂SO₄ from the roots

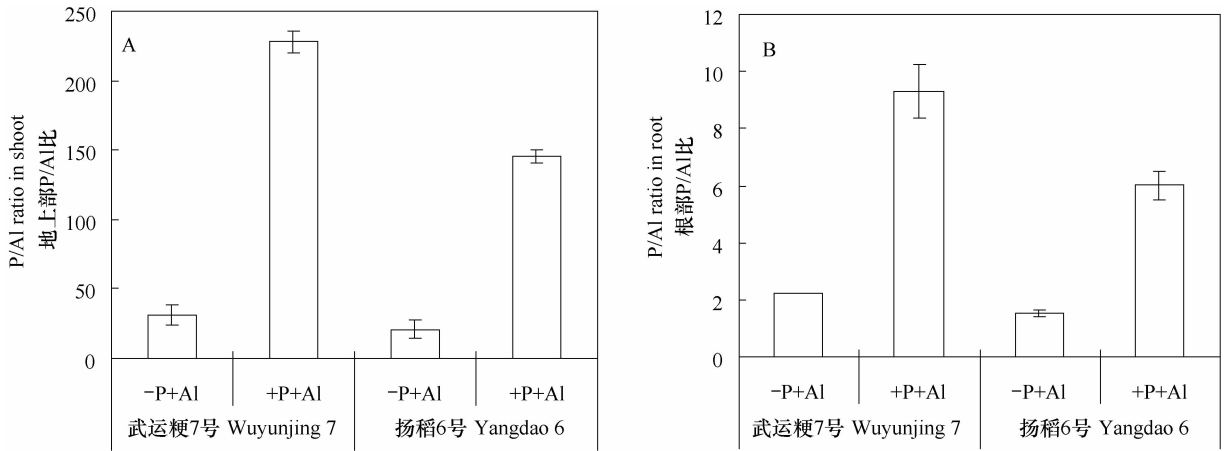


图6 Al-P交替处理对两个水稻品种体内P/Al比的影响

Fig. 6 Effects of alternation of Al and P treatments on P/Al ratios in the shoot and root of the two cultivars of rice

表1 Al-P交替处理对两个水稻品种磷吸收效率和磷利用效率的影响

Table 1 Effects of alternation of Al and P treatments on P uptake efficiency and P use efficiency of the two cultivars of rice
(Values shown are means \pm SD, $n = 3$)

处理 Treatment	磷吸收效率 P uptake efficiency (P mg g ⁻¹ root DW)		磷利用效率 P use efficiency (shoot DW g ² mg ⁻¹ P)	
	武运梗7号 Wuyunjing 7	扬稻6号 Yangdao 6	武运梗7号 Wuyunjing 7	扬稻6号 Yangdao 6
	+ Al - P	0.46d	0.34d	1.55c
+ Al + P	4.98b	3.12c	0.30e	0.65d
- Al - P	0.52d	0.30d	1.54c	3.43a
- Al + P	5.47a	3.10c	0.26e	0.66d

注:表中不同字母表示差异显著($p \leq 0.05$),用Duncan多重比较

Note: Different letters affixed to the data in the table means significant difference at 0.05 level by Duncan

3 讨论

很多研究者认为长期铝胁迫能够改变根系形态^[23-24]。图3结果表明,铝胁迫下,扬稻6号三个根形态参数(根长、根表面积及根体积)受抑制的程度要显著高于武运梗7号,这与其耐铝性是一致的。加磷缓解了铝对两个水稻品种根形态参数的抑制作用,而且,在扬稻6号上表现得较武运梗7号要更为明显。Tan和Keltjens^[12]研究也发现铝对根的毒害症状随着磷的增加而降低。此外,加磷也缓解了铝对两个水稻品种生物量的抑制作用,而且,这种缓解作用同样是在扬稻6号上表现得较武运梗7号更为明显。因此,磷缓解了铝对两个水稻品种根形态和生物量的

抑制作用,而且这种缓解作用在铝敏感的扬稻6号上表现得更为明显。这个结果与过去在玉米^[13]和胡枝子^[15]上的研究结果不一致,他们认为磷提高了耐性品种的耐铝性,而在敏感品种上表现的不明显。这可能与植物整体的耐铝能力有关,一般而言水稻的耐铝能力高于玉米和胡枝子等。

Al、P间相互作用也体现在对水稻P和Al吸收的影响。图4A和图4B表明,加磷条件下Al胁迫显著降低了武运梗7号地上部和根部P浓度,而扬稻6号地上部和根部P浓度变化不明显,这可能与加磷条件下铝胁迫导致武运梗7号磷吸收效率降低而扬稻6号磷吸收效率不受影响有关(表1)。这与过去在高粱^[11-12]、玉米^[13]、大豆^[25]以及胡枝子^[15]上的研究结果类似,图4D结果表明磷显著增加了

铝在两个水稻品种根中的累积。这可能是由于加磷条件下,Al 与 P 形成 Al-P 化合物,沉淀并累积在根表或根组织中^[26]。在植物根中 Al-P 化合物的形成是非常重要的,因为它没有活性的,降低了铝对根的毒害作用^[27-28]。顾明华和黎晓峰^[29]研究证实,水稻对铝的吸收主要是通过质外体途径,且铝主要集中在水稻根质外体(包括根表、自由空间和细胞壁)上。50 mmol L⁻¹ H₂SO₄ 提取的 Al 和 P 主要来自根表和自由空间中的 Al 和 P^[12]。图 5 结果表明,铝胁迫下,加磷处理同时增加了根表和根自由空间中 Al、P 的浓度。推测磷和铝形成了 Al-P 化合物,从而降低了铝的活度,减轻了铝对根部的毒害作用,这可能是磷降低水稻铝毒害的原因。同时,虽然两个品种间根表及根自由空间中 Al 浓度没有差别,而武运梗 7 号根表及根自由空间中 P 浓度显著高于扬稻 6 号,表现出耐铝品种更强的质外体解铝毒能力。

P/Al 比是研究 Al、P 相互作用的一个重要的参数,能够进一步揭示磷在缓解铝毒害中的作用。Gaume 等^[13]研究认为耐铝玉米品种具有高的 P/Al 比,能将 Al 固定在根中,可能是其耐铝性高的一个重要原因。本研究也得到了类似的结果(图 6)。Sun 等^[15]研究发现磷提高了耐铝胡枝子品种的耐铝性,而在敏感品种上未表现出这种作用。此外,研究还发现加磷提高了耐铝胡枝子品种根中 P/Al 比,然而敏感胡枝子根中 P/Al 增加得很少。综合以上结果,可初步得出这样的结论,即磷对铝毒的缓解效果与根和地上部的 P/Al 比有重要关系。根部和地上部高的 P/Al 比意味着铝在根中有效地固定以及磷向地上部有效地转运以保持地上部良好的磷供应。我们的结果也支持 Jan 和 Pettersson^[17]的研究结果,即水稻耐铝的部分原因在于其维持地上部高磷含量的能力。

磷缺乏是酸性土壤上除铝毒之外的限制作物生长的最主要的因子^[30],同时,铝会干扰作物磷的吸收和同化,从而导致作物出现生理性缺磷^[31]。在这种条件下,植物会具备多种机制以应对酸性土壤中存在的多重胁迫如铝毒和磷缺乏等。Miranda 和 Rowell^[32]认为植物中存在通过有效利用磷从而降低铝毒害的机制。Cumming 和 Ning^[33]研究表明,从枝菌根真菌提高了金色须芒草的耐铝性可能与其提高了金色须芒草磷利用效率有关。Zheng 等^[34]认为耐铝荞麦品种具有高效利用磷的机制。Liao 等^[14]证明耐性大豆品种较铝敏感大豆品种具有高

效利用磷的能力。因此,适应酸性土壤的耐铝品种可能具有有效利用磷的能力,从而能够降低铝毒害^[23]。尽管近年来水稻耐铝机制研究取得了很大的进步,然而,关于不同水稻品种耐铝性和磷吸收效率以及利用效率之间的关系还不是很清楚。本研究结果表明,耐铝水稻品种武运梗 7 号的磷吸收效率要显著高于敏感品种扬稻 6 号,然而,铝敏感品种扬稻 6 号的磷利用效率要显著高于耐性水稻品种武运梗 7 号(表 1)。即两个水稻品种的耐铝性与磷吸收效率相一致,而与磷利用效率相反。这个结果的意义在于为酸性土壤水稻育种提供了一个理论基础,即选育适应酸性土壤的水稻基因型不仅要关注其耐铝性高低还要关注其磷利用效率高,要综合考虑。只有这样,才能提高酸性土壤水稻产量。然而,由于实验中只采用了两个品种,要论证水稻耐铝性和磷利用效率之间的关系还需要更多的品种来进一步验证。

4 结 论

1) 不加磷条件下,铝处理降低了扬稻 6 号地上部和根部干重,而对武运梗 7 号的生物量没有显著影响;加磷非常显著地增加了两个品种水稻地上部的生物量,但未增加武运梗 7 号的根系生物量。在不加磷条件下,铝处理使扬稻 6 号的根长、根表面积、根体积均显著下降,而根直径显著增加,武运梗 7 号的根长、根表面积也显著下降,根直径显著增加,但程度不如扬稻 6 号明显;加磷减轻了铝对根系参数的影响。因此磷缓解了水稻的铝毒害,且对扬稻 6 号的缓解效果更加明显。

2) 加磷显著提高了两个品种地上部和根部 P/Al 比。

3) 与耐铝品种武运梗 7 号相比,铝敏感品种扬稻 6 号虽然磷吸收效率低,但磷利用效率高。

参 考 文 献

- [1] Kochian L V, Hoekenga O A, Piñeros M A. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency. *Annu Rev Plant Biol*, 2004, 55: 459—493
- [2] Fageria N K, Carvalho J R P. Influence of aluminum in nutrient solutions on chemical composition in upland rice cultivars. *Plant Soil*, 1982, 69: 31—44
- [3] Vasconcelos S S, Jacob-Neto J, Rossiello R O P. Differential root responses to aluminum stress among Brazilian rice genotypes. *J Plant Nutr*, 2002, 25: 655—669
- [4] Ganesan K, Sankaranarayanan C, Balakumar T. Physiological

- basis of differential aluminum tolerance in rice genotypes. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 1993, 24: 2 179—2 191
- [5] Ma J F, Shen R F, Zhao Z Q, et al. Response of rice to Al stress and identification of quantitative trait loci for Al tolerance. *Plant Cell Physiol*, 2002, 43: 652—659
- [6] Chen R F, Shen R F. Root phosphate exudation and pH shift in the rhizosphere are not responsible for aluminum resistance in rice. *Acta Physiol Plant*, 2008, 30: 817—824
- [7] Yang J L, Li Y Y, Zhang Y J, et al. Cell wall polysaccharides are specifically involved in the exclusion of aluminum from the rice root apex. *Plant Physiol*, 2008, 146: 602—611
- [8] Foy C D. Plant adaption to acid, aluminum-toxic soils. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 1988, 19: 959—987
- [9] Yan X, Lynch J P, Beebe S E. Genetic variation for phosphorus efficiency of common bean in contrasting soil types: I. Vegetative response. *Crop Sci*, 1995, 35: 1 086—1 093
- [10] Yan X, Lynch J P, Beebe S E. Genetic variation for phosphorus efficiency of common bean in contrasting soil types: II. Yield response. *Crop Sci*, 1995, 35: 1 094—1 099
- [11] Tan K, Keltjens W G. Interaction between aluminium and phosphorus in sorghum plants. I. Studies with the aluminium sensitive sorghum genotype TAM428. *Plant Soil*, 1990, 124: 15—23
- [12] Tan K, Keltjens W G. Interaction between aluminium and phosphorus in sorghum plants. II. Studies with the aluminium tolerant sorghum genotype SC0283. *Plant Soil*, 1990, 124: 25—32
- [13] Gaume A, Mächler F, Frossard E. Aluminum resistance in two cultivars of *Zea mays* L.: Root exudation of organic acids and influence of phosphorus nutrition. *Plant Soil*, 2001, 234: 73—81
- [14] Liao H, Wan H Y, Shaff J, et al. 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 Physiol*, 2006, 141: 674—684
- [15] Sun Q B, Shen R F, Zhao X Q, et al. Phosphorus enhances Al resistance in Al-resistant *Lespedeza bicolor* but not in Al-sensitive *L. cuneata* under relatively high Al stress. *Ann Bot*, 2008, 102: 795—804
- [16] Jan F, Pettersson S. Varietal diversity of upland rice in sensitivity to aluminium. *J Plant Nutr*, 1989, 12: 973—993
- [17] Jan F, Pettersson S. Effects of low aluminum levels on growth and nutrient relations in three rice cultivars with different tolerances to aluminum. *J Plant Nutr*, 1993, 16: 359—372
- [18] Fageria N K, Wright R J, Baligar V C. Rice cultivar response to aluminum in nutrient solution. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 1988, 19: 1 133—1 142
- [19] Sivaguru M, Paliwal K. Differential aluminum tolerance in some tropical rice cultivars II. Mechanism of aluminum tolerance. *J Plant Nutr*, 1993, 16: 1 717—1 732
- [20] Chen R F, Shen R F, Gu P, et al. Response of rice (*Oryza sativa*) with root surface iron plaque under aluminium stress. *Ann Bot*, 2006, 98(2): 389—395
- [21] Elliott G C, Läuchli A. Phosphorus efficiency and phosphate-iron interactions in maize. *Agron J*, 1985, 77: 399—403
- [22] Siddiqi M Y, Glass A D. Utilization Index: A modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. *J Plant Nutr*, 1981, 4: 289—302
- [23] Foy C D, Chaney R L, White M S. The physiology of metal toxicity in plants. *Annu Rev Plant Physiol*, 1978, 29: 511—566
- [24] Ciamporova M. Morphological and structural response of plant roots to aluminum at organ, tissue and cellular levels. *Biol Plant*, 2002, 45: 161—171
- [25] Nian H, Ahn S J, Yang Z M. Effect of phosphorus deficiency on aluminium-induced citrate exudation in soybean (*Glycine max*). *Physiol Plant*, 2003, 117: 229—236
- [26] Taylor G J. Current views of the aluminum stress response: The physiological basis of tolerance. *Curr Top Plant Biochem Physiol*, 1991, 10: 57—93
- [27] Pellet D M, Grunes K L, Kochian L V. Organic acid exudation as an aluminium-tolerance mechanism in maize (*Zea mays* L.). *Planta*, 1995, 196: 788—796
- [28] Pellet D M, Papernik L A, Jones D L, et al. Involvement of multiple aluminium exclusion mechanisms in aluminium tolerance in wheat. *Plant Soil*, 1997, 192: 63—68
- [29] 顾明华, 黎晓峰. 硅对减轻水稻的铝胁迫效应及其机理研究. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(3): 360—366. Gu M H, Li X F. Effect of silicon on alleviation of aluminum toxicity and corresponded mechanisms in rice (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(3): 360—366
- [30] Selles F, Campbell C A, Zentner R P. Effect of cropping and fertilization on plant and soil phosphorus. *Soil Sci Soc Am J*, 1995, 59: 140—144
- [31] Foy C D, Brown J C. Toxic factors in acid soils. II. Differential aluminium tolerance of plant species. *Soil Sci Soc Am Proc*, 1964, 28: 27—32
- [32] Miranda L N, Rowell D L. Aluminium-phosphate interactions in wheat. *New Phytol*, 1989, 113: 7—12
- [33] Cumming J R, Ning N. Arbuscular mycorrhizal fungi enhance aluminum resistance of broomsedge (*Andropogon virginicus* L.). *J Exp Bot*, 2003, 54: 1 447—1 459
- [34] Zheng S J, Yang J L, He Y F, et al. Immobilization of aluminium with phosphorus in roots is associated with high aluminium resistance in buckwheat. *Plant Physiol*, 2005, 138: 297—303

EFFECTS OF P ON GROWTH OF RICE SEEDLING UNDER Al STRESS AND RELATIONSHIP BETWEEN Al TOLERANCE AND P EFFICIENCY OF THE RICE

Zhang Qiming^{1,2,3} Chen Rongfu¹ Zhao Xueqiang¹ Dong Xiaoying¹ Shen Renfang^{1†}

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

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Research Institute for Tobacco Science, Jiangxi Province, Nanchang 330029, China)

Abstract Two rice cultivars Wuyunjing 7 (Al-tolerant) and Yangdao 6 (Al-sensitive), differing sharply in aluminum tolerance, were selected as subjects in a hydroponic experiment to investigate effects of P on growth of the rice seedling under Al stress and relationship between Al tolerance and P efficiency of the rice through alternation of Al and P treatments for two weeks. Results show that in the aspect of biomass and root parameters, P application alleviated toxic effects of Al on both cultivars. The concentration of P was obviously higher in Cultivar Wuyunjing 7 than in Cultivar Yangdao 6, while the concentration of Al in root was lower in the former than in the latter, and as a result, the P/Al ratio was significantly higher in the former than in the latter. However, though the two cultivars did not differ in Al concentration in the root surface and inter-root free space, Cultivar Wuyunjing 7 was significantly higher than Cultivar Yangdao 6 in P concentration therein, demonstrating that the rice cultivar, high in Al tolerance, is higher in capability of its apoplast of detoxifying Al, which may be related to the higher P uptake efficiency of Wuyunjing 7. In addition, compared with Wuyunjing 7, Yangdao 6 was though lower in P uptake efficiency, it was higher in P utilization efficiency, which suggests that the Al tolerances of the two cultivars do not consist with their P uptake efficiencies and P utilization efficiencies, which may serve as a theoretical basis for selecting and breeding rice seeds for paddy fields of acid soil, that is to say, to select and breed rice of genotypes suitable to acid paddy soils, it is essential to focus on Al tolerance and P utilization efficiency as well.

Key words Phosphorus; Rice (*Oryza sativa* L.); Al stress; Seedling growth; Al tolerance; P efficiency