

2 种水生植物根际溶液磷素时空变异及有机酸分泌

王震宇¹, 温胜芳¹, 罗先香¹, 李爱峰¹, 邢宝山^{1,2}, 李锋民^{1*}

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266100; 2. Department of Plant, Soil and Insect Sciences, University of Massachusetts, Amherst MA01003, USA)

摘要:利用根际土壤溶液的原位抽提和微量样品分析技术, 比较了喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)和香蒲(*Typha latifolia*) 2 种水生植物根际土壤溶液磷素含量的时空变异和根系分泌有机酸种类及数量的差异, 从植物吸收磷素、根系分泌有机酸和根际土壤 pH 值变化等角度探讨了植物磷素高效净化的根际调控机制. 结果表明, 2 种水生植物的根际溶液磷素含量均明显低于非根际溶液; 喜旱莲子草的根际溶液磷酸根离子质量浓度($2.53 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)显著低于香蒲的根际溶液($5.43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)($p < 0.05$), 且喜旱莲子草根系对土壤溶液磷酸根的影响范围大于香蒲. 与香蒲相比, 喜旱莲子草分泌了较多的苹果酸(浓度 $27.33 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$), 在活化土壤磷素、促进根系对磷素的吸收方面起了更大的作用. 喜旱莲子草吸收磷素的根际效应强于香蒲.

关键词:根际土壤溶液; 磷素; 有机酸; 水生植物

中图分类号: X173 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)08-2248-05

In Situ Dynamics of Phosphorus in the Rhizosphere Solution and Organic Acids Exudation of Two Aquatic Plants

WANG Zhen-yu¹, WEN Sheng-fang¹, LUO Xian-xiang¹, LI Ai-feng¹, XING Bao-shan^{1,2}, LI Feng-min¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Department of Plant, Soil and Insect Sciences, University of Massachusetts, Amherst MA01003, USA)

Abstract: A mini-rhizotron experiment with *Alternanthera philoxeroides* and *Typha latifolia* was conducted to measure the spatial and temporal dynamics of phosphorus in the rhizosphere solution. The organic acids in the *in situ* rhizosphere soil solution were analyzed. A decreasing phosphorus concentration gradient in soil solution toward the root was observed for both *A. philoxeroides* and *T. latifolia*. The phosphorus concentration in the rhizosphere soil solution of *A. philoxeroides* ($2.53 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) was lower than that of *T. latifolia* ($5.43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) in the forth sampling day. Compared to *T. latifolia*, *A. philoxeroides* released more malic acid ($27.33 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) which was more efficient in phosphorus mobilization. *A. philoxeroides* was more effective in phosphorus uptake in the rhizosphere than *T. latifolia*.

Key words: rhizosphere soil solution; phosphorus; organic acids; aquatic plants

磷素通过扩散进入水体会改变水质^[1], 导致水体的富营养化^[2]. 利用水生植物根系的吸收在截获土壤磷素方面有着明显的作用和潜力, 而且不同种类植物对磷素的需求也显著不同^[3,4]. 这种差异与水生植物的根际环境密切相关^[5,6]. 植物根系的影响能够使根际与非根际的土壤溶液在化学特性上表现出显著的差异^[7~10]. 在湿地系统中, 根际调控能力是水生植物磷素净化效率的关键因素^[11]. 土壤溶液中养分含量的变化直接表征着养分强度的变化, 研究植物根际土壤溶液中磷素含量的动态变化对于揭示不同植物种类磷素净化效率的差异十分必要.

对于水生植物的根际效应, 已有一些关于根际土壤/沉积物的磷素形态的研究^[12], 但对原位根际土壤溶液磷素变化的研究鲜见报道. 根分泌的有机阴离子或酸类物质被认为是植物提高非酸性土壤磷素利用的主要机制之一^[8]. 然而, 对根系分泌有机

酸的研究大都是采用溶液培养或土壤提取的方法^[13,14], 很难模拟植物生长的正常环境. 近来, 土壤溶液样品收集^[15]和微量样品分析^[16]技术的应用和改进为研究原位根际土壤溶液磷素的时空变异及有机酸分泌提供了可能. 用根际土壤溶液原位收集技术对陆地植物根际土壤溶液的养分动态变化、重金属的含量形态及有机酸分泌等的研究已有零星报道^[9,10,17,18], 为其在湿地研究中的应用奠定了基础.

本实验以南四湖湿地为研究区域, 利用根际土壤溶液原位抽提和微量样品分析技术研究喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)和香蒲(*Typha latifolia*)

收稿日期: 2008-09-18; 修订日期: 2008-11-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(30570340); “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAC10B03); NSFC-JST 重大国际合作项目(20510076)

作者简介: 王震宇(1969~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为污染环境的生物修复, E-mail: wang0628@ouc.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: lfm01@ouc.edu.cn

2 种水生植物根际土壤溶液的磷素时空变异和根系分泌有机酸种类和数量的差异,探讨了植物磷素高效净化的根际调控机制,以期为湖泊湿地生态修复提供理论依据和高效的新途径.

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤为中性壤土,有效磷(Olsen-P)含量 $151.5\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,总磷 0.12% ,有机质 $22.4\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,碱解氮 $155.0\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,有效钾 $587.8\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$.土壤经自然风干、过 2 mm 筛、混匀后装入根箱.

1.2 根箱设置

试验中所用根箱体积为 $330\ \text{cm}^3$ (长 33 cm,宽 11.5 cm,厚 2.2 cm).根箱的一面排列有间隔 5 mm $\times$ 5 mm 的小孔,微型抽提管可以通过这些小孔插入土壤中^[15].根箱的另一面为透明玻璃板,易于观察根箱内植物根系的生长情况.微型抽提管(Rhizosphere Research Products, Wageningen, Netherlands)的最前端为多孔陶瓷 P80 材料(孔隙度 48%,最大孔径为 $1\ \mu\text{m}$),其外径为 1 mm.微型抽提管通过内径 0.75 mm 的聚醚醚酮管(Rhizosphere Research Products, Wageningen, Netherlands)与真空收集器相通,在一定的负压下通过每个微型抽提管抽出的土壤溶液分别收集于容量为 $200\ \mu\text{L}$ 的聚丙烯小瓶(Agilent)中^[15].计算机控制的真空泵与收集器相连,可以维持收集系统压力恒定.

1.3 灌溉系统

为了避免由灌溉引起土壤的不均一性,灌溉溶液由供试土壤加水($m_{\text{土}}:m_{\text{水}}=1:3$)浸提所得.

1.4 植物培养

供试植物为喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)和香蒲(*Typha latifolia*)2 种水生植物,采自南四湖新薛河人工湿地示范区.选植株生长一致的小苗(地上部长度为 5 cm 左右,将根剪为 2 cm 长)移栽到根箱中,每种植物各种 3 个根箱,每个根箱种 3 棵植株.培养室温度为 $23^{\circ}\text{C}/17^{\circ}\text{C}$ (12 h/12 h)、光照度为 16 500 lx、相对湿度为 40%.植物生长过程中保持土壤淹水 3 cm,将根箱以 30° 的倾角放置,使根系贴着透明有机玻璃板(粘黑胶纸避光)生长.50 d 后植株根系长至根箱中下部,此时每种植物选一个根系长势较好的根箱,从根箱的小孔向根系周围插微型抽提管,10 个布于根际(距离根表 $< 1\ \text{mm}$),5 个布于非根际(距离根表 $> 5\ \text{mm}$).

1.5 土壤溶液的收集及土壤样品的获取

在 $(-30 \pm 2)\ \text{kPa}$ 的压力下连续收集土壤溶液 24 h,总共收集 4 次,此样品用于测定土壤溶液中的磷酸根离子.用于测定有机酸的土壤溶液样品是在日光开始照射 2 h 后,在 $(-300 \pm 20)\ \text{kPa}$ 的压力下连续收集 5 h,仅收集 1 次,整个收集过程中保持收集器处于冰浴环境,以防止有机酸分解.每个微型抽提管每次收集的溶液为 $100 \sim 200\ \mu\text{L}$.土壤溶液样品收集结束后,将根箱拆开收获植物.用刀片取距根 5 mm 以内的土壤作为根际土壤,其余为非根际土壤,分析其 pH 值和有效磷含量^[19];植株杀青烘干后,分析植株生物量和植物体磷素含量^[19].

1.6 土壤溶液分析

用毛细管电泳仪(Agilent 3D CE, G1601 A, Germany)测定土壤溶液样品中的 PO_4^{3-} 质量浓度和 9 种有机酸(草酸、柠檬酸、马来酸、富马酸、酒石酸、苹果酸、琥珀酸、乳酸、乙酸)含量.根据 Westergaard 等^[20]测定土壤溶液阴离子的方法,以磷酸根为目标离子,从检测波长、缓冲液组成浓度、电泳温度和电压等几方面对电泳条件进行了优化.优化后的电泳条件为:缓冲溶液由 $32\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 三羟甲基氨基甲烷(99%), $4\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 苯偏三酸(99.9%)和 $0.3\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 十六烷基三甲基溴化铵(99%)组成, pH 为 8.5;国产熔融石英毛细管,内径为 $50\ \mu\text{m}$,长度为 $56/64.5\ \text{cm}$ (到检测口的长度为 56 cm,总长 64.5 cm);分离电压为 $-20\ \text{kV}$,温度为 25°C ;检测波长为 $205\ \text{nm}/10\ \text{nm}$,参比波长为 $350\ \text{nm}/80\ \text{nm}$.在选定的条件下,用 PO_4^{3-} 和有机酸的混合标准重复进样 8 次,迁移时间的相对标准偏差为 $0.03\% \sim 0.5\%$,峰面积相对标准偏差为 $0.2\% \sim 0.7\%$;样品加标回收率在 $87.2\% \sim 124.0\%$ 之间, PO_4^{3-} 的质量浓度检出限为 $0.68\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ($S/N=3$),除富马酸以外的 8 种有机酸的浓度检测限在 $2.29 \sim 5.13\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间(富马酸的检测限为 $9.5\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, $S/N=3$),可以满足样品的测定需求.

1.7 数据处理

用软件 SPSS10.0 对实验数据进行统计分析,用 ANOVA(Student-Newman-Keuls 检验法)过程进行 2 种水生植物间的根际磷素含量及分泌有机酸的差异显著性分析.

2 结果与讨论

2.1 植株生长和磷素吸收量的差异

植物经过近 2 个月时间的生长,单位根箱的喜旱莲子草和香蒲的生物量之间没有显著差异,然

而，磷素吸收总量却有着极显著的差异，喜旱莲子草吸收的磷素总量(16.46 mg)约是香蒲(9.61 mg)的1.7倍(表1)，这说明喜旱莲子草吸收磷素的能力强于香蒲。另外，植物体单位生物量的磷素含量也有极显著差异，喜旱莲子草植株的磷素含量(2.94 mg·g⁻¹)约是香蒲(1.57 mg·g⁻¹)的1.9倍(表1)，说明喜旱莲子草在体内累积磷素的能力较强。

表1 单位根箱的喜旱莲子草和香蒲生物量、植株磷素含量和磷素吸收总量¹⁾

Table 1 Biomass and phosphorus concentration of aquatic plants per mini-rhizotron			
种类	生物量/g	磷素含量/mg·g ⁻¹	磷素吸收总量/mg
喜旱莲子草	5.60 ± 0.28	2.94 ± 0.10	16.46 ± 0.9
香蒲	6.12 ± 0.99	1.57 ± 0.20 **	9.61 ± 1.3 **

1) * 表示显著性差异 ($p < 0.05$), ** 表示显著性差异 ($p < 0.01$), 下同

2.2 根际土壤溶液中磷素含量的时空变异

从图1可以看出，喜旱莲子草和香蒲根系的影响使土壤溶液的PO₄³⁻质量浓度表现出了一定的时空差异。2种植物根际(距离根表 < 1 mm)的土壤溶液PO₄³⁻质量浓度均低于非根际(距离根表 > 5 mm)的土壤溶液PO₄³⁻质量浓度。由土壤溶液中的磷素

的迁移可知，当植物根系对磷素的吸收大于质流为植物提供的磷素时，往往会在植物根系周围形成磷素耗竭区^[21]，同位素示踪试验提供了直接的证据表明植物根际土壤溶液中磷素含量的降低^[22]。Wang等^[10]对美国河岸带5种植物的原位根际土壤溶液的研究也发现，玉米、三叶杨和麦草3种植物在距离根表不同的距离上存在着明显的磷素浓度梯度，黄豆和柳枝稷则没有明显的磷素浓度梯度。

与香蒲相比，喜旱莲子草在垂直于根的方向上的土壤溶液磷素浓度梯度更为明显。抽提第4 d时，喜旱莲子草根际的土壤溶液PO₄³⁻质量浓度(2.53 mg·L⁻¹)显著低于香蒲(5.43 mg·L⁻¹)($p < 0.05$)；喜旱莲子草的土壤溶液PO₄³⁻质量浓度随根系影响时间的增加还有降低的趋势，根系对土壤溶液PO₄³⁻质量浓度的影响可以达到距离根表5 mm以外的区域，而香蒲根系的影响仅在距离根表1 mm以内。对该2种水生植物根际土壤有效磷的分析也发现，喜旱莲子草根际土壤有效磷含量(80.17 μg·g⁻¹)低于香蒲(124.37 μg·g⁻¹, $p < 0.01$)^[11]。植物对土壤溶液中磷素的吸收最终降低了根际土壤的有效磷含量，这在一定程度上减少了土壤磷素向环境释放的风险^[23]。说明喜旱莲子草吸收土壤磷素的能力强于香蒲，可能会更有效地截获水体中的磷素。

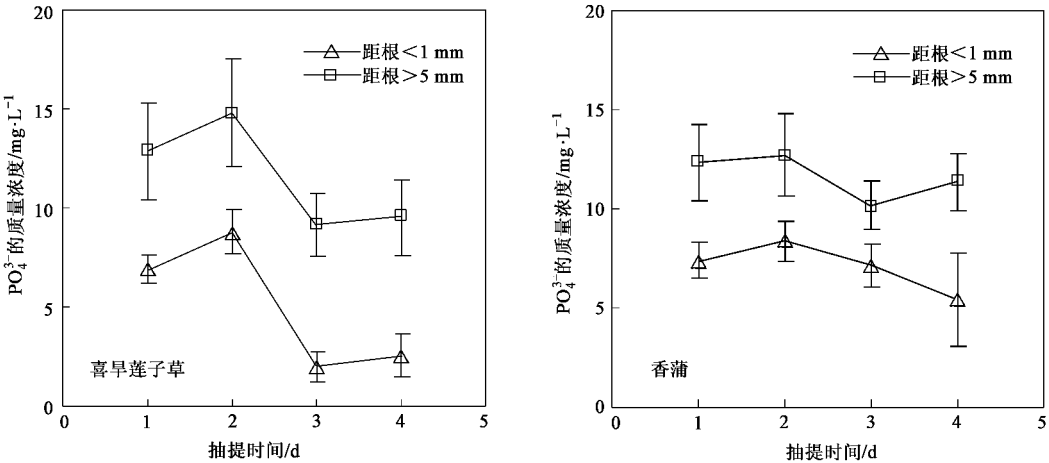


图1 喜旱莲子草和香蒲土壤溶液中磷酸根离子质量浓度的时空变异

Fig.1 Time course of phosphorus concentration in the soil solution for *A. philoxeroides* and *T. latifolia*

2.3 根际土壤溶液中的有机酸

根系分泌的酸类物质或有机酸阴离子被认为是提高非酸性土壤磷素利用的主要机制之一^[8]。根系分泌的有机酸不仅可以通过降低根际土壤的pH值活化土壤难溶磷素，而且还可以与Fe、Al、Ca等离子形成螯合物通过离子交换等作用增加土壤难溶磷

素的释放^[24]。对喜旱莲子草和香蒲根际土壤溶液检测发现，喜旱莲子草根际土壤溶液的有机酸总浓度达到40.73 μmol·L⁻¹，远远高于香蒲(12.40 μmol·L⁻¹)，见表2。从9种有机酸组分(草酸、柠檬酸、马来酸、富马酸、酒石酸、苹果酸、琥珀酸、乳酸、乙酸)的分析来看，喜旱莲子草分泌了苹果

酸(浓度 27.33 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)和酒石酸(浓度 13.40 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$),而香蒲的根际土壤溶液中仅检测到酒石酸(浓度 12.40 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$),见表 2. Dessureault-Rompré 等^[18]用根际土壤溶液原位抽提技术对白羽扇豆的有机酸分泌的研究发现,白羽扇豆根际土壤溶液中含有大量的柠檬酸(浓度 394.6 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)和一定量的草酸(浓度 5.4 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)、苹果酸(浓度 2.2 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)和乙酸(浓度 24.5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$). Dinkelaker 等^[25]研究表明,白羽扇豆分泌大量柠檬酸明显地提高了根际土壤磷素的有效性. 陆文龙等^[26]用流动法研究了柠檬酸、苹果酸、草酸和酒石酸对土壤磷素释放的影响,结果表明,对于石灰性土壤磷素的活化能力为草酸 $\geq$ 柠檬酸 $>$ 苹果酸 $>$ 酒石酸. 因此,与香蒲相比,喜旱莲子草分泌的较多量苹果酸在活化土壤磷素、促进根系对磷素的吸收方面起到了更大的作用.

表 2 喜旱莲子草和香蒲根际土壤溶液的有机酸浓度/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Organic acid in the rhizosphere soil solution of *A. philoxeroides* and *T. latifolia*/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$

种类	总有机酸	酒石酸	苹果酸
喜旱莲子草	40.73	13.40	27.33
香蒲	12.40**	12.40	未检出**

土壤 pH 值是影响土壤中磷酸盐形态和转化的重要因素,可以明显改变土壤溶液的磷素含量^[27]. 在石灰性土壤中,磷与钙形成难溶性盐导致磷素的有效性降低. 根际土壤 pH 值的降低有利于土壤磷素向土壤溶液的释放^[28,29]. 研究发现,喜旱莲子草的根际土壤 pH 值(7.27)显著低于香蒲(7.43, $p < 0.05$)^[11]. 根据石灰性土壤的磷素吸附解吸附试验结果, pH 值低的喜旱莲子草会向土壤溶液释放更多磷素^[30]. 然而,喜旱莲子草根际土壤溶液的磷酸根离子质量浓度比香蒲的低(图 1),这可能是由于喜旱莲子草根系对磷素的较强吸收能力掩盖了 pH 值降低的影响. 这与文献^[11]发现的喜旱莲子草磷素吸收有效性(单位根长吸收磷素的能力)高于香蒲的结果一致. 这些都共同说明了喜旱莲子草吸收磷素的根际效应强于香蒲.

3 结论

- (1) 喜旱莲子草的单位生物量的磷素含量和吸收磷素总量高于香蒲,其对磷素有较强的吸收累积能力.
- (2) 2 种水生植物根际溶液的磷素质量浓度均

明显低于非根际溶液;喜旱莲子草根际土壤溶液 PO_4^{3-} 质量浓度(2.53 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)显著低于香蒲(5.43 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)($p < 0.05$),且其根系对磷酸根的影响范围大于香蒲.

(3) 与香蒲相比,喜旱莲子草分泌了较多的苹果酸(浓度为 27.33 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$),在活化土壤磷素、促进根系对磷素的吸收方面起到了更大的作用.

(4) 喜旱莲子草吸收磷素的根际效应强于香蒲.

参考文献:

[1] Hanrahan G, Gledhill M, House W A, *et al.* Seasonal refinement of the coefficient modeling approach [J]. Journal of Environmental Quality, 2001, **30**:1738-1746.

[2] Carpenter S R, Caraco N F, Correll D L, *et al.* Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen [J]. Ecological Application, 1998, **8**:559-568.

[3] Jungk A, Claassen N. Availability in soil and acquisition by plants as the basis for phosphorus and potassium supply to plants [J]. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 1989, **152**:151-157.

[4] Zoysa A K N, Loganathan P, Hedley M J. Phosphate rock dissolution and transformation in the rhizosphere of tea (*Camellia sinensis* L.) compared with other species [J]. European Journal of Soil Science, 1998, **49**:477-486.

[5] Begg C B M, Kirk G J D, Mackenzie A F, *et al.* Root-induced iron oxidation and pH changes in the lowland rice rhizosphere [J]. New Phytologist, 1994, **128**(3): 469-477.

[6] Reddy R K, Robert G W, Robert H K. Biogeochemistry of Phosphorus in wetland [A]. In: Phosphorus: Agriculture and the environment [C]. Solomon: Agronomy Monograph American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 2005. 264-361.

[7] Marschner H. Mineral nutrition of higher plants [M]. New York: Academic Press, 1995.

[8] Hinsinger P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review [J]. Plant and Soil, 2001, **237**:173-195.

[9] Wang Z Y, Göttelein A, Bartonek G. Effects of growing roots of Norway spruce (*Picea abies* [L.] karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) on rhizosphere nutrient chemistry in a forest soil [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2001, **164**:35-41.

[10] Wang Z Y, Kelly J M, Kovar J L. *In situ* dynamics of phosphorus in the rhizosphere solution of five species [J]. Journal of Environmental Quality, 2004, **33**(4): 1387-1392.

[11] 王震宇, 温胜芳, 邢宝山, 等. 4 种水生植物根际磷素耗竭效应的比较[J]. 环境科学, 2008, **29**(9): 2475-2480.

[12] 周小宁, 王圣瑞, 金相灿. 沉水植物黑藻对沉积物有机、无机磷形态及潜在可交换磷的影响[J]. 环境科学, 2006, **27**(12): 2421-2425.

- [13] Neumann G, Massonneau A, Martinoia E, *et al.* Physiological adaptation to phosphorus deficiency during proteoid root development in white lupin [J]. *Planta*, 1999, **208**: 373-382.
- [14] Watt M, Evans J R. Proteoid roots: physiology and development [J]. *Plant Physiology*, 1999, **121**: 317-323.
- [15] Göttlein A, Hell U, Blasek R. A system for microscale tensiometry and lysimetry [J]. *Geoderma*, 1996, **69**: 147-156.
- [16] Göttlein A, Blasek R. Analysis of small volumes of soil solution by capillary electrophoresis [J]. *Soil Science*, 1996, **161**: 705-715.
- [17] Dessureault-Rompré J, Nowack B, Schulin R, *et al.* Spatial and temporal variation in organic acid anion exudation and nutrient anion uptake in the rhizosphere of *Lupinus albus* L. [J]. *Plant Soil*, 2007, **301**: 123-134.
- [18] Dessureault-Rompré J, Nowack B, Schulin R, *et al.* Modified micro suction cup/rhizobox approach for the *in-situ* detection of organic acids in rhizosphere soil solution [J]. *Plant Soil*, 2006, **286**: 99-107.
- [19] Ryan J, Estefan G, Rashid A. Soil and Plant Analysis Laboratory Manual [M]. Alipho: International Center for Agricultural Research in the Dry Areas, 2001. 82-134.
- [20] Westergaard H, Hansen H C B, Borggaard O K. Determination of anions in soil solutions by capillary zone electrophoresis [J]. *Analyst*, 1998, **123**: 721-724.
- [21] Barber S A. Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach [M]. New York: John Wiley, 1995.
- [22] Lewis D G, Quirk J P. Phosphate diffusion in soil and uptake by plants. III. P^{31} -movement and uptake by plants as indicated by P^{32} -autoradiography [J]. *Plant Soil*, 1967, **27**: 445-453.
- [23] Koopmans G F, Chardon W J, Ehlert P A I, *et al.* Phosphorus availability for plant uptake in a phosphorus-enriched non-calcareous sandy soil [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, **33**: 965-975.
- [24] Johnson J F, Alland D L, Vance C P. Phosphorus stress-induced proteoid roots show altered metabolism in *Lupinus albus* [J]. *Journal of Plant Physiology*, 1994, **104**: 657-665.
- [25] Dinkelaker B, Romheld V, Marschner H. Citric acid excretion and precipitation of calcium citrate in the rhizosphere of white lupin [J]. *Plant Cell and Environment*, 1989, **12**: 285-292.
- [26] 陆文龙, 王敬国, 曹一平, 等. 低分子量有机酸对土壤磷释放动力学的影响[J]. *土壤学报*, 1998, **35**(4): 493- 500.
- [27] Morel C, Hinsinger P. Root-induced modifications of the exchange of phosphate ion between soil solution and soil solid phase [J]. *Plant and Soil*, 1999, **211**: 103-110.
- [28] 范晓晖, 刘芷宇. 根际 pH 环境与磷素利用研究进展[J]. *土壤通报*, 1992, **23**(5): 238-240.
- [29] 刘世亮, 介晓磊, 李有田, 等. 土壤-植物根际磷的生物有效性研究进展[J]. *土壤与环境*, 2002, **11**(2): 178-182.
- [30] Geelhoed J S, Vanriemsdijk W H, Findenegg G R. Effects of sulphate and pH on the plant-availability of phosphate adsorbed on goethite [J]. *Plant Soil*, 1997, **197**: 241-249.