

一种更有效的根构型研究纸培系统

赵 静, 严小龙, 廖 红

(华南农业大学 根系生物学研究中心, 亚热带农业生物资源保护与利用国家重点实验室, 广东 广州 510642)

摘要:在原有营养袋纸培系统的基础上,改进了磷供应方式,研究了介质磷空间有效性对大豆根构型的调控及基因型差异. 结果表明:1)改进后的分层磷处理导致的介质磷空间有效模拟了农业生产系统中有效磷的分布,能够更高效地调控大豆根构型. 在上层高磷下层低磷的分层磷处理中,大豆总根长和总根表面积增加、平均基根生长角度变小、根系分布变浅、植株磷吸收和生物量提高. 2)改进后的分层磷处理导致的介质磷空间有效性对大豆根构型的调控基因型间差异显著. 磷高效大豆基因型 HN89 比磷低效基因型 HN112 对磷空间有效性变化的反应更快,总根长和总根表面积的变幅更大,磷含量和生物量更高.

关键词:营养袋纸培系统; 磷空间有效性; 根构型; 大豆
中图分类号:S565.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-411X(2012)02-0125-04

A More Efficient Paper Pouch System for Root Architecture Research

ZHAO Jing, YAN Xiao-long, LIAO Hong

(State Key Laboratory for Conservation and Utilization of Subtropical Agro-bioresources; Root Biology Center, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract:Based on the original paper pouch system, the author changed the method of phosphorus (P) supply, and studied the regulation of soybean root architecture by P spatial availability and its genotypic variations on specially designed paper pouch system. The results showed that: 1) Improved stratified-P treatment could represent the distribution of P in the agricultural soil, and more efficiently regulated root architecture changed. Stratified-P treatment, namely upper part was in high P conditions and lower part was in low P conditions, led to longer total root length, more root surface areas and increased the distribution of roots in upper high P part, root system became sallow, finally increased plant P uptake and biomass. 2) For the regulation of root architecture by stratified-P treatment, there was a significant genotypic difference between soybean genotypes with different P efficiency. P-efficient genotype, HN89, could respond to P spatial availability faster than P-inefficient genotype, HN112, and changed considerably on root architecture parameters, finally had higher P uptake and biomass.

Key words:paper pouch system; P spatial availability; root morphology and architecture; soybean

营养袋纸培系统由华南农业大学根系生物学研究中心发明^[1]. 该系统由 24 cm × 30 cm 蓝色无磷吸水纸(美国 Anchor Paper 公司)、具有 0.5 mm 孔径均匀小孔的聚乙烯塑料袋、支撑架、营养液以及室内控温、控光系统组成. 在该系统中,植物根系能正常生长,同时被原位地固定在二维平面上,可直接利用扫描仪将根系扫描入电脑中,获取根形态参数,自发明以来在根构型研究上广泛应用^[1-2]. 但这种原始的纸培系统只能对植物根系供给均一的低磷或高磷. 由于大量的人类活动(如施肥、耕地等)及气候的影

收稿日期:2011-03-29
作者简介:赵 静(1977—),女,讲师,博士;通信作者:廖 红(1969—),女,教授,博士,E-mail:hliao@scau.edu.cn
基金项目:国家自然科学基金(31000931)

响,磷在土壤中的分布极其不均匀,土壤上层有效磷含量高,下层有效磷含量低^[3]. 大量试验证明,根作为植物吸收养分和水分的主要器官,能感应环境中有效磷的变化并做出适应性反应,这种适应性的反应是植物耐低磷胁迫的机制之一^[4-7]. 目前的营养袋纸培系统及其他大部分关于低磷胁迫对植物根形态构型的影响大多是在均一条件下进行的,不符合实际农业生产环境中磷的分布情况,研究磷空间有效性对大豆根构型的调控具有较大的实际意义. 本文在原有营养袋纸培系统均一供磷的基础上,试图通过在上层加多一层吸水纸,实现营养纸上部供磷下部不供磷的分层磷处理,模拟农业生产系统中土壤有效磷的空间分布,以了解磷空间有效性分布对大豆构型的影响,为根形态构型的研究提供更有效的方法.

1 材料与方法

1.1 植物材料

大豆 *Glycine max* L. Merr. 材料采用 2 个磷效率差异显著的基因型:HN89 和 HN112,前者是磷高效基因型,后者是磷低效基因型^[8].

1.2 营养袋纸培系统

营养袋纸培系统由蓝色无磷吸水纸(美国 Anchor Paper 公司生产)、含孔径为 0.5 mm 均匀小孔的聚乙烯塑料袋、支撑架以及营养液等部分组成. 该系统中,根系能正常生长,同时其根构型被原位地固定在二维平面上^[1]. 营养液为修改后的 1/2Hoagland 营养液^[9]. 试验设原有的均一低磷处理(LP, 0.2 μmol · L⁻¹ KH₂PO₄)、均一高磷处理(HP, 0.2 mmol · L⁻¹ KH₂PO₄)以及改进后的分层磷处理(SP, 营养纸上层 0 ~ 10 cm 供 0.2 mmol · L⁻¹ KH₂PO₄, 下层 10 ~ 30 cm 供 0.2 μmol · L⁻¹ KH₂PO₄) 3 种供磷方式. 分层磷处理时,先将 1 张完整的营养纸在含有 0.2 μmol · L⁻¹ KH₂PO₄ 的低磷营养液中浸湿达到饱和,另将 1 张营

养纸裁剪成 10 cm 长营养纸片(刚好为完整营养纸的 1/3),将此纸片放在含 0.2 mmol · L⁻¹ KH₂PO₄ 高磷营养液中浸湿达到饱和,然后在含有高磷营养液的纸片下面垫上一层保鲜膜,将垫有保鲜膜的含高磷营养液的营养纸叠放在含低磷营养液的营养纸上层 0 ~ 10 cm 处,注意保鲜膜要覆盖住含高磷营养纸片的边缘,防止高磷营养渗漏到下层低磷营养区中(图 1).

1.3 种子的萌发及移苗

供试大豆种子用 φ 为 3% 的 H₂O₂ 消毒 1 min,再用去离子水浸洗 3 次,在竖立的发芽纸筒中于 25 ℃ 萌发 36 h,待胚根长至 2 cm 左右且基根尚未分化时,移苗到营养袋纸培系统. 均一高磷处理和分层磷处理试验中,供给种子 0.2 mmol · L⁻¹ KH₂PO₄,在均一低磷处理试验中,供给种子 0.2 μmol · L⁻¹ KH₂PO₄. 幼苗在营养袋纸培系统中生长 1 周,当主根离蓝色营养纸底端还有 1 cm 时,收获植物,进行根构型参数的原位测定.

1.4 根形态参数的获得

用数字扫描仪将长在蓝色营养纸上的根系原位图象扫描存入计算机. 获得数字化的根系图像后,用 WinRHIZO(加拿大 Regent Instruments 公司)软件获取根数、根长及根表面积参数. 基根角度由基根与水平线之间的夹角来决定,每条根的平均基根角度是该条根所有基根角度的平均值. 测定完毕后将植株分地上部、根部进行收获,并测定其生物量和磷含量.

1.5 全磷含量测定

磷含量的测定采用干灰-钼锑抗比色法^[10].

1.6 数据分析

本试验所有数据均用 Excel 2003(Microsoft Company)进行平均数和标准差计算,并且利用 SAS(SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)统计软件进行单因素方差和 Duncan's 多重比较分析.

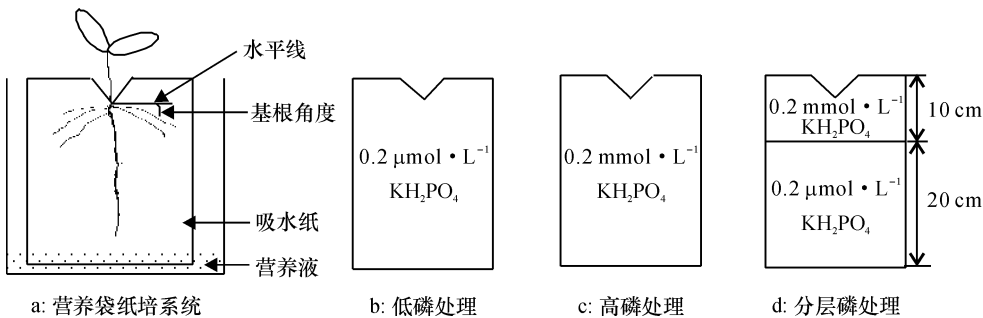


图 1 特殊设计的营养袋纸培系统及磷处理

Fig. 1 Specially designed paper pouch system and P treatments

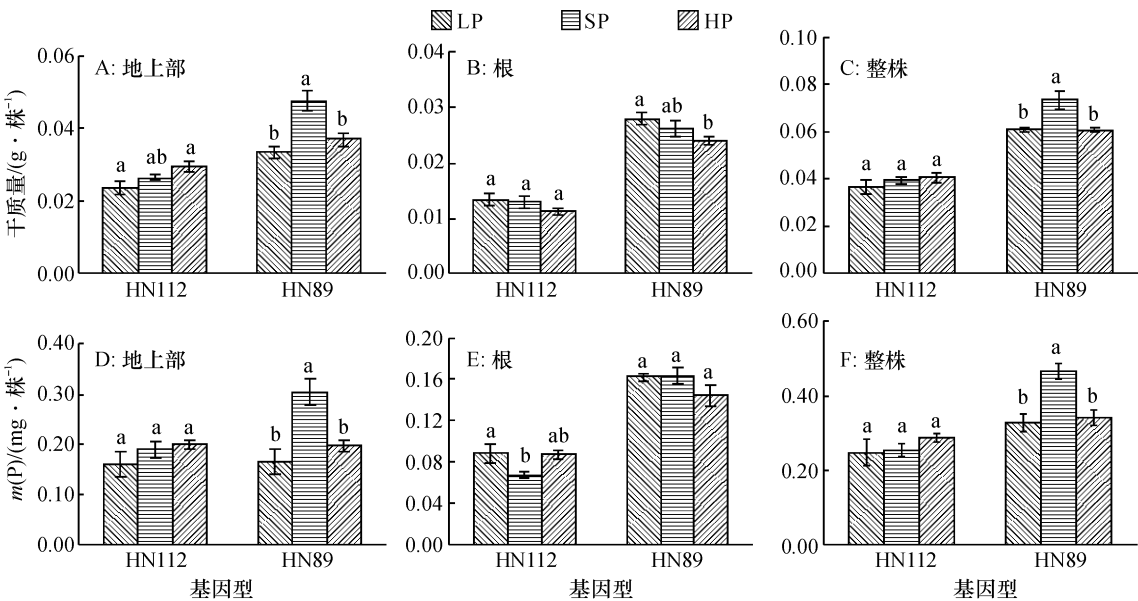
2 结果与分析

2.1 磷空间有效性对大豆生长和磷吸收的影响

图2显示,大豆的生长和磷吸收受磷空间有效性分布影响显著. 分层磷处理显著地提高了磷高效品种 HN89 的地上部生物量及地上部磷含量,使得植物的总生物量及总磷吸收量显著提高 ($F_{\text{干质量}} = 271.07$; $F_{\text{P含量}} = 52.43$, $P < 0.001$),说明分层磷处理能促进植株的生长和磷的吸收. 磷低效的大豆品种 HN112 在3种磷处理条件下的生物量和磷含量差异不显著. 磷空间有效性分布首先调节植株地上部生长和磷吸收,表现在分层磷处理下 HN89 地上部生物量

和地上部磷含量显著高于均一高磷处理和均一低磷处理的地上部生物量和地上部磷含量 ($F_{\text{干质量}} = 215.01$; $F_{\text{P含量}} = 43.31$, $P < 0.001$),而地下部的生物量和磷含量则在3种磷处理下没有显著差异.

磷高效的大豆基因型 HN89 根形态构型对不同磷供应方式的适应性反应快过磷低效的大豆基因型 HN112,基因型间差异显著 ($F_{\text{干质量}} = 169.04$, $F_{\text{P含量}} = 32.07$, $P < 0.001$). 不同供磷处理1周后,HN89 在分层磷处理下的生物量和磷吸收已显著高于均一高磷和均一低磷处理,而 HN112 的生物量和磷吸收在各磷处理间差异不显著.



图中数据为4次重复的平均值,相同基因型中凡是柱子上标有一个相同小写字母者,表示差异不显著($P > 0.05$, Duncan's 法).

图2 磷空间有效性对大豆生长和磷吸收的影响

Fig. 2 Effects of P spatial availability on soybean growth and P uptake

2.2 磷空间有效性对大豆根形态构型的影响

从图3~图5可见,磷空间有效性显著调控了大豆根形态构型. 磷空间有效性影响了大豆根系形态指标,总根长、总根表面积在分层磷处理下显著提高(图4). 与均一低磷和均一高磷相比,磷低效品种 HN112 在分层磷处理下,植株的总根长分别提高了

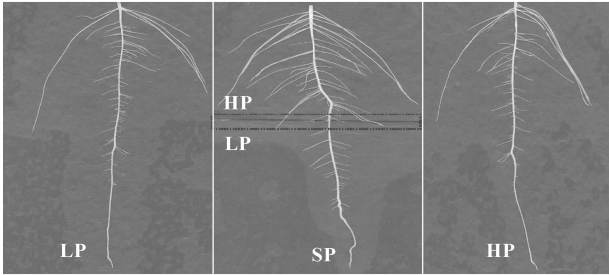
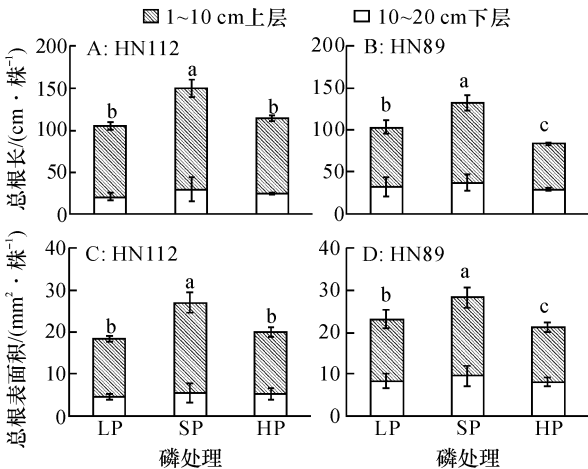


图3 磷有效性对 HN89 大豆根系生长的影响

Fig. 3 Effects of P availability on root growth in soybean genotype HN89

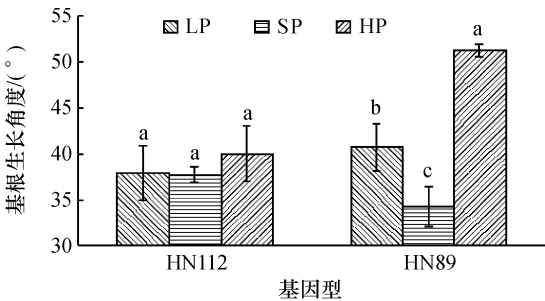


图中数据为4次重复的平均值,相同基因型不同处理柱子上凡是标有一个相同小写字母者,表示差异不显著($P > 0.05$, Duncan's 法).

图4 磷空间有效性对大豆总根长、总根表面积及其分布的影响
Fig. 4 Effects of P availability on soybean total root length, total root surface area

24% 和 28%, 而磷高效品种 HN89 也分别提高了 27% 和 36%, 磷处理间差异显著 ($F_{根长} = 6.41, P < 0.001$). 分层磷处理显著地提高了 2 个品种的总根表面积 ($F_{根表面积} = 9.77, P < 0.001$). 其他根形态指标如根数及根平均直径对磷空间有效性的反应有着相同的趋势(数据略).

磷空间有效性影响了大豆根系的分布, 根系变浅. 在均一高磷和均一低磷处理下, 分布在上层的平均根长及平均根表面积分别占总根长、总根表面积的 71% 和 77%, 在分层磷处理下, 该比例则提高到 80% 和 83%, 表明大部分的根系主要分布于供有磷的营养纸上层, 根系变浅, 从而利于磷的吸收(图 4). 分层磷处理使基根生长角度变浅, 在均一高磷、均一低磷及分层磷处理条件下, HN89 的基根生长角度分别为 46.9° 、 37.8° 和 28.1° , 处理间差异显著 ($F = 6.12, P < 0.001$). HN112 有着相同的趋势, 但未达到显著水平 ($F = 16.42$), (图 5).



图中数据为 4 次重复的平均值, 相同基因型柱子上凡是标有一个相同小写字母者, 表示差异不显著 ($P < 0.05$, Duncan's 法).

图 5 磷空间有效性对大豆基根生长角度的影响
Fig. 5 Effects of spatial P availability on soybean average growth angle

3 讨论与结论

植物根形态构型的适应性变化是植物适应低磷胁迫的一个重要机制^[11]. 由于磷在土壤中的分布极其不均匀, 土壤上层有效磷含量高, 下层有效磷含量低^[3], 研究植物对磷的这种空间有效性分布的适应性反应对于根系育种, 提高作物磷效率非常重要. 本文在原有营养袋纸培系统的基础上, 改进了供磷的方式, 比较了原有的均一高磷、均一低磷和改进后模拟自然界磷分布的分层磷处理大豆植株, 研究磷空间有效性分布对大豆根构型的调控及对植株生长和磷吸收的影响. 结果显示, 分层磷处理导致的磷空间有效性分布显著地影响了大豆根系的生长. 分层磷处理促进了大豆总根长、总根表面积, 同时提高了根系在上层有磷供应部分的分布, 表现在上层根长、根表面积增多及平均基根角度变浅. 这与菜豆^[12]和水稻^[13]上分层试验的结果基本一致. 植物对磷胁迫的

调控反应包括 2 种: 一种是依赖于全株或地上部营养状况的系统调控; 另一种是来源于根部磷营养元素浓度的短期波动的局部调控^[14]. 在局部供磷的情况下, 植物分布在低磷区的根系会感应到磷信号, 并将这种“缺磷”信号传递到植株, 促进根系在富磷区的生长和分布, 扩大根系接触磷的面积和机会, 磷对植株根构型的这种调控可使植物吸收更多的磷, 从而促进植株的生长.

植物根形态构型对磷空间分布能作出适应性反应, 基因型间差异显著, 磷高效基因型的反应快过磷低效基因型. 本试验中不同供磷处理 1 周, HN89 在分层磷处理下的生物量和磷吸收已显著高于均一高磷和均一低磷处理, 而此时 HN112 生物量和磷吸收在各种磷处理下差异不显著. 磷高效大豆基因型 HN89 比磷低效基因型 HN112 对磷空间有效性分布的反应快、且变幅大, 最终在生物量和磷含量上基因型间差异显著 ($F_{干质量} = 169.04, F_{P含量} = 32.07, P < 0.001$). HN89 的各根形态参数对磷供应的适应性变化上较 HN112 大, HN112 的总根长, 总根面积及平均基根生长角度在处理 7 d 后, 均一高、低磷之间还没有达到显著差异, 而 HN89 的相应参数在均一低磷处理下已显著地高于均一高磷处理下的相应参数, 与前人结果一致, 表现出短期低磷胁迫处理会促进根系的生长^[8]. 尤其在根构型参数 - 平均基根角度上, HN89 对 3 种不同磷供应方式都能作出显著性变化, 从而调节根的分布, 增加磷的吸收. 这一结果与大田试验结果一致^[8], 对通过根系改良、培育耐低磷品种具有指导意义.

参考文献:

[1] LIAO Hong, YAN Xiao-long. Adaptive changes and genotypic variation of root architecture of common bean in response to phosphorus deficiency [J]. Acta Botanica Sinica, 2000, 42 (2) : 158-163.
[2] 曹爱琴, 严小龙. 不同供磷条件下大豆根构型的适应性变化 [J]. 华南农业大学学报, 2001, 22 (1) : 1.
[3] POTHULURI J. KISSEL D, WHITNEY D. Phosphorus uptake from soil layers having different soil test phosphorus levels [J]. Agronomy Journal, 1986, 78 (6) : 991-994.
[4] 廖红, 严小龙. 菜豆根构型对低磷胁迫和适应性变化及基因型差异 [J]. 植物学报, 2000, 42 (2) : 158-163.
[5] BONSER A, LYNCH J P, SNAPP S. Effect of phosphorus deficiency on growth angle of basal roots in *Phaseolus vulgaris* [J]. New Phytologist, 1996, 132 (2) : 281-288.
[6] LÓPEZ-BUCIO J, AREDO C R, LUIS H L. The role of nutrient availability in regulating root architecture [J]. Current Opinion in Plant Biology, 2003, 6 (3) : 280-287.

足时,供试大豆对硼的吸收减少,硼不足时,对磷的吸收却是叠加效应;适量硼水平,增加磷水平,能显著促进供试大豆植株磷和硼的吸收;适量磷水平,增加硼水平,对磷低效大豆基因型无明显影响,但对磷高效和中效大豆基因型植株磷和硼的吸收有明显的促进作用,且磷高效大豆基因型表现得更显著。

以上结果表明,植物必需营养元素磷和硼都对大豆的生长和养分吸收具有重要影响,并且这种影响与大豆基因型差异密切相关。因此,华南酸性土壤地区在发展大豆产业时,不仅要注重选种和育种工作,还应注重磷和硼的科学配施,充分满足大豆对磷的需求,并在此基础上,改善硼的供应以利于磷高效大豆基因型产量的进一步提高。

致谢:感谢华南农业大学根系生物学研究中心全体老师和研究生对本研究的支持和帮助,同时也感谢佛山科学技术学院的喻敏博士对本研究的关注和悉心指导!

参考文献:

- [1] GRAHAM P H, VANCE C P. Legumes: Importance and constraints to greater use [J]. *Plant Physiol*, 2003, 131: 872-877.
- [2] 张秋红,张香香,王文香. 大豆低聚糖的生理功能及在食品中的应用[J]. *食品研究与开发*, 2005, 26: 166-168.
- [3] GOLDBERG S. Reactions of boron with soils [J]. *Plant Soil*, 1997, 193: 35-48.
- [4] SHORROCKS V M. The occurrence and correction of boron deficiency [J]. *Plant Soil*, 1997, 193: 121-148.
- [5] BALIGAR V C, FAGERIA N K, ESWARAN H, et al. Nature and properties of red soils of the world [M]//WILSON M J, HE Z, YANG X. *The red soils of China*. [S. l.]: Kluwer Academic Publishers, 2004: 7-28.

- [6] KOCHIAN L V, HOEKENGA O A, PINEROS M A. How do crop plants tolerate acid soils: Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency [J]. *Ann Rev Plant Biol*, 2004, 55: 459-493.
- [7] 刘鹏. 大豆钼、硼营养研究进展 [J]. *中国农学通报*, 2001, 17: 41-44.
- [8] STANGOULIS J, WEBB M, GRAHAM R. Boron efficiency in oilseed rape: II: Development of a rapid lab-based screening technique [J]. *Plant Soil*, 2000, 225: 253-261.
- [9] 刘鹏,杨玉爱. 钼硼对大豆氮磷钾吸收及产量的影响 [J]. *中国油料作物学报*, 2000, 22: 57-63.
- [10] LIAO Hong, WAN Hui-yan, 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 [J]. *Plant Physiol*, 2006, 141: 674-684.
- [11] HUANG C Y, SCHULTE EE. Digestion of plant tissue for analysis by ICP emission spectroscopy [J]. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 1985, 16: 943-958.
- [12] LYNCH J. The role of nutrient-efficient crops in modern agriculture [J]. *J Crop Pro*, 1998, 1: 241-264.
- [13] BERNACCHI C J, KIMBALL B A, QUARLES D R, et al. Decreases in stomatal conductance of soybean under open-air elevation of $[CO_2]$ are closely coupled with decreases in ecosystem evapotranspiration [J]. *Plant Physiol*, 2007, 143: 134-144.
- [14] 石磊,赵华,徐芳森. 硼、磷缺乏对甘蓝型油菜不同硼效率基因型苗期生长的影响 [J]. *中国油料作物学报*, 2004, 26: 50-53.
- [15] 严红,李文雄. 不同水平硼与小麦体内磷积累的关系 [J]. *东北农业大学学报*, 2001, 32: 209-213.
- [16] DELL B, HUANG L B. Physiological response of plants to low boron [J]. *Plant Soil*, 1997, 193: 103-120.

【责任编辑 周志红】

(上接第128页)

- [7] TICCONI C A, ABEL S. Short on phosphate: Plant surveillance and countermeasures [J]. *Trends in Plant Science*, 2004, 9(11): 548-555.
- [8] ZHAO Jing, FU Jia-bing, LIAO Hong, et al. Characterization of root architecture in an applied core collection for phosphorus efficiency of soybean germplasm [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(15): 1611-1620.
- [9] 刘鹏,周国权,严小龙,等. 低磷对大豆主根伸长生长的影响 [J]. *植物生理学通讯*, 2008, 44(4): 726-728.
- [10] 劳家桢. *土壤农化分析手册* [M]. 北京: 农业出版社, 1988: 229-299.
- [11] YAN Xiao-long, WU Ping, LING Hong-qing, et al. Plant nutriomics in China: An overview [J]. *Annals of Botany*,

2006, 98(3): 473-482.

- [12] LIAO Hong, GE Zheng-yang, YAN Xiao-long. Ideal root architecture for phosphorus acquisition of plants under water and phosphorus coupled stresses: From simulation to application [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(16): 1346-1351.
- [13] HE Yong, LIAO Hong, YAN Xiao-long. Localized supply of phosphorus induces root morphological and architectural changes of rice in split and stratified soil cultures [J]. *Plant and Soil*, 2003, 248: 247-256.
- [14] FORDE B, LORENZO H. The nutritional control of root development [J]. *Plant and Soil*, 2001, 232: 51-68.

【责任编辑 周志红】