

不同供磷水平下苗期大豆根系形态特征及吸水特性

朱向明, 韩秉进

(中国科学院 东北地理与农业生态研究所 黑土区农业生态院重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150081)

摘 要: 采用水培试验方法, 研究了供磷水平对苗期大豆根系形态特征及吸水特性的影响。结果显示: 同一时期, 供磷水平对根干重的影响小于对地上部干重的影响, 缺磷胁迫促进了根干重和根冠比增加; 供磷水平对大豆根系形态影响显著, 大豆根长、根表面积和根体积基本随供磷水平的升高呈现先减小后增大的趋势, 0~1 mm 直径范围内根长所占比例最高, 约在 93% 以上; 磷素浓度介于 0~30 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间时, 大豆日平均吸水速率随磷素浓度的增大而增大, 当磷素浓度大于 30 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 反而随着磷素浓度的增大而减小。由此可见, 大豆根系对不同浓度磷素处理具有一定的自我调节能力, 表现为“低促高抑”现象, 但这种能力是有限的。图 4, 表 1, 参 12。

关键词: 大豆; 磷; 根系形态; 根系吸水

中图分类号: S565.1 文献标识码: A

Root Morphology and Root-water-uptake Characteristics of Soybean Seedlings in Response to Different Levels of Phosphorus Supply

ZHU Xiang-ming, HAN Bing-jin

(Key Laboratory of Mollisol Agroecology, Northeast Institute of Geography and Agroecology, CAS, Harbin 150081, China)

Abstract: A nutrient solution experiment was conducted to investigate the effect of different levels of phosphorus supply on root morphology and root-water-uptake characteristics of soybean seedlings. Phosphorus concentration had less effect on root dry weight than on shoot dry weight. Low phosphorus stress increased root dry weight and root/shoot ratio. Phosphorus concentration has significant effect on root morphology of soybean seedlings. Root length, root surface area and root volume initially decreased and then increased with increasing phosphorus concentration. The proportion of root length within 0 ~ 1 mm diameter was 93%. Daily average root-water-uptake rates per plant increased with increasing phosphorus concentration within 0 ~ 30 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, but decreased when phosphorus concentration was over 30 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$. Thus, the soybean roots would change their root morphology in response to various phosphorus concentrations to some extent. In other words, soybean roots would increase under low phosphorus condition but decrease under high phosphorus condition.

Key words: soybean; nitrogen; root morphology; root-water-uptake

0 引 言

磷是植物生长必需的大量营养元素之一, 但是自然土壤中磷的有效性却很低。在我国, 约有 67% 的耕地缺磷, 北方地区的石灰性土壤中缺磷问题尤为突出^[1]。为不断提高作物单产, 生产中过量施用磷肥现象越来越突出^[2]。施入土壤的磷肥, 极易被土壤颗粒吸附、固持, 约有 75% ~ 90% 的磷残留于土壤^[1], 残留在土壤中的磷会以各种形态在土壤中大量累积。据估算, 仅 1995 年—2007 年这 13 a 间, 土壤中的积累态磷 (P_2O_5) 就高达 7 050 万 t^[3]。然而, 磷在土壤中的移动性很差, 其主要以扩散形式迁移运动, 扩散距离仅有 1 mm~2 mm, 而植物仅能吸收距根表面 1 mm~4 mm 根际土壤中的磷^[4]。由此可见, 一方面土壤有效磷无法满足植物生长需要, 另一方面磷素在土壤中大量积累。如何充分有效地挖掘利用土壤磷资源变得尤为重要, 对于减少磷肥资源浪费、降低环境污染风险都具有重要的现实意义。

对于大多数作物而言, 根系是作物从土壤中吸收水分和养分的唯一途径, 根系形态分布对根系吸收能

收稿日期: 2014-04-23; 修回日期: 2014-05-29.
基金项目: 国家自然科学基金 (51109200); 黑龙江省普通高等学校甜菜遗传育种重点实验室开放课题基金项目资助.
第一作者及通讯作者简介: 朱向明 (1981-), 男, 山东潍坊人, 博士, 主要从事大豆根系吸收方面研究.

力影响很大。根系吸水是根系吸收养分的基础，为适应土壤中养分供应不均匀的情况，作物根系具有很大的可塑性^[5]。例如，低磷条件下，作物根系构型发生改变，主根生长受抑，侧根和根毛形成增多，伸长增大^[6]。目前关于供磷水平与大豆产量及磷营养效率关系研究较多^[7-9]，但是对于大豆根系形态特征及吸水特性与供磷水平之间关系的研究还鲜见报道。因此，研究旨在明确供磷水平对苗期大豆根系形态特征及吸水特性的影响，为大豆磷素营养调控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 前期准备

试验在中国科学院黑土区农业生态重点实验室温室中进行。播种前对大豆种子（黑农35）进行如下处理：先用1%的H₂O₂溶液对其进行表面消毒30 min，然后用无菌水冲洗3遍后，放入25℃黑暗培养箱中进行催芽。约2 d后将种子取出并种植到事先准备好的石英砂中。大豆生长环境控制为：日/夜温度约25/18±2℃，光照时间14 h（6:00 ~ 20:00），相对湿度约40%±5%，冠层顶部的有效光强度约500 μmol·m⁻²·s⁻¹。在此期间用标准营养液进行充分灌溉，以保证充足的水分与养分供应。标准营养液（μmol·L⁻¹）组成^[10]为：Ca（NO₃）₂，1000；K₂SO₄，600；MgSO₄，200；CaCl₂，600；KH₂PO₄，30；H₃BO₃，5；ZnSO₄，0.75；MnSO₄，1；CuSO₄，0.2；（NH₄）₆Mo₇O₂₄，0.005；EDTA-Fe，10。每天调节pH至5.6~6.0。

1.2 试验设计

播种后8 d左右，将生长在石英砂中的大豆移栽到定植板上，然后将定植板放到盛有不同磷素浓度营养液的水盆中。水盆高15 cm，长60 cm，宽36 cm，每个盆中都盛有特定的营养液29 L，盆上平放一块64 cm×40 cm的定植板，板上布满40个内径为2 cm的小孔，大豆下胚轴用海绵包扎后插入小孔，使大豆植株保持直立，而根系则全部浸没在营养液中。试验共设5个磷素浓度处理，分别为0（P₀）、4（P₄）μmol·L⁻¹、15（P₁₅）μmol·L⁻¹、30（P₃₀，标准）μmol·L⁻¹、60（P₆₀）μmol·L⁻¹，其余营养元素与微量元素与标准营养液浓度完全一致。各处理营养液每隔3 d更换一次，并且通过供气泵24 h不间断地向水盆中供给空气。

为测量大豆蒸腾速率另外布置了一个平行实验。平行试验用高15 cm、内径18 cm的带盖塑料桶代替上述试验中的水盆，桶盖上事先钻好3个内径2 cm的小孔，这样小桶与定植板小孔的密度基本一致。每个处理设置2个重复，其余条件与水盆完全一致。每次更换营养液前后都称量桶重，其质量减少即为该处理条件下大豆的蒸散量。考虑到仍会有少量水分从海绵空隙中蒸发损失，每个处理又增设了一个没有种植大豆的小塑料桶，同样在更换营养液前后称量桶重，其质量减少即为该处理的蒸发量。大豆的蒸腾量即可通过蒸散量与蒸发量之差计算获得。

1.3 取样与测定

水培试验共持续42 d，共取样4次。第一次取样时间为处理后第10 d（即播种后第18 d），此后每6 d取样一次，取样时从各处理中随机挑选6株。将整株分为地上部和地下部，地下部根系先经扫描仪（SNAPSCAN 1236，AGFA，Germany）扫描后，经专用数字化软件（WinRHIZO-2004a）分析后获取根长、根表面积、根体积、平均直径等形态指标，然后将地上部和根系分别在75℃条件下烘48 h获取干重。

2 结果与讨论

2.1 供磷水平对大豆生物量及根冠比的影响

大豆地上部和根系的生物量都随大豆的生长而增长，见图1。除24 d外，同一时期，大豆地上部干重随供磷水平的升高而增大，见图1b。地下部干重情况则与之不同，在同一时期，随着供磷水平的升高，地下部干重呈先减小后增加的趋势，见图1a。同一时期，根冠比均呈先减小后平稳的趋势，见图2。这与王树起等^[11]在砂培试验中有关低磷胁迫对大豆根系的影响基本一致。磷胁迫时根干重和根冠比增加，是植物对低磷条件适应的一个重要特点，植物通过提高根冠比增加根系生物量，有利于大豆根系对水分和养

分的吸收利用。

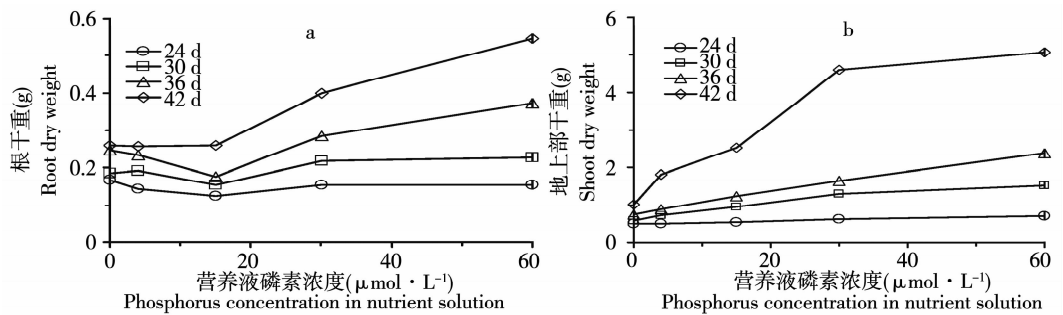


图 1 大豆各生长阶段根干重、地上部干重与供磷水平的关系

Fig. 1 The relationship between root dry weigh、shoot dry weight and phosphorus concentration during various growth period of soybean

注：d：播种后天数，下同；(a) 根干重；(b) 地上部干重。

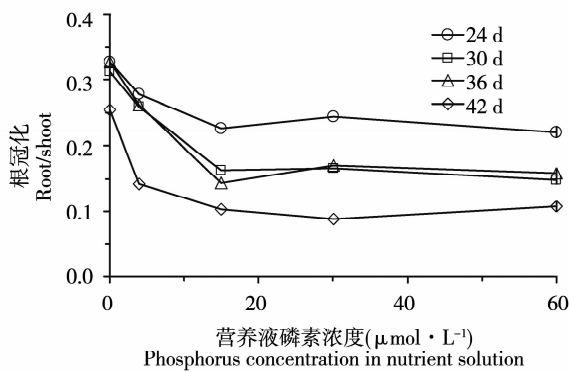


图 2 大豆各生长阶段根冠比与供磷水平的关系

Fig. 2 The relationship between root/shoot ratio and phosphorus concentration during various growth period of soybean

2.2 供磷水平对大豆根系生长发育的影响

供磷水平对大豆根系形态（根长、根表面积、根体积、平均直径等）有显著影响，见图3。根系长度可以反映根系与土壤的接触面积，也能反映其在土壤中的伸展空间，在植物获取磷素方面起着重要作用。在 24 d、30 d、36 d，无磷处理根系总长度最大；在 42 d，正常供磷（30 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ）根系总长度最大，这也进一步表明了缺磷胁迫促进了大豆根系的伸长，但是随着大豆的生长，正常供磷条件下大豆根系会达到一个较为理想的长度，高磷处理反而会抑制根系的伸长。

供磷水平对根表面积和根体积的影响基本类似。在 42 d 以前，随着磷浓度的升高，根表面积和根体积呈现先减小后增大的趋势；42 d 以后，根表面积和根体积随供磷水平的升高而增大。这说明，大豆根系对磷素胁迫具有一定的自我调节能力，但是这种能力是有限的，尤其是到了大豆生长后期，适当的磷可以增加大豆根系的表面积和体积。赵利等^[12]在施磷量对老芒麦根系的影响中也有类似的发现，随施磷量的增加，根表面积和总根长均呈现先减小后增加的趋势。这就是磷素对植物根系发育产生“低促高抑”现象。根系平均直径基本随供磷水平的升高而增大。

植物根系由不同粗细的根组成。将根直径划分为 0~1 mm、1 mm~3 mm、3 mm~4.5 mm、>4.5 mm 4 个级别，并定义 0~1 mm 为细根，1 mm~3 mm 为中粗根，3 mm~4.5 mm 为粗根，>4.5 mm 为特粗根。其中细根对植物吸收功能影响最大，占的比例也最高。在试验过程中，细根所占的比例均在 93% 以上，并且所占比例基本随供磷水平的升高而降低，见表 1。供磷水平对细根根长影响显著，随供磷水平的升高，各处理细根呈先减小后增加的趋势。这与根表面积、根体积以及地下部干重随供磷水平的变化趋势是一致的。

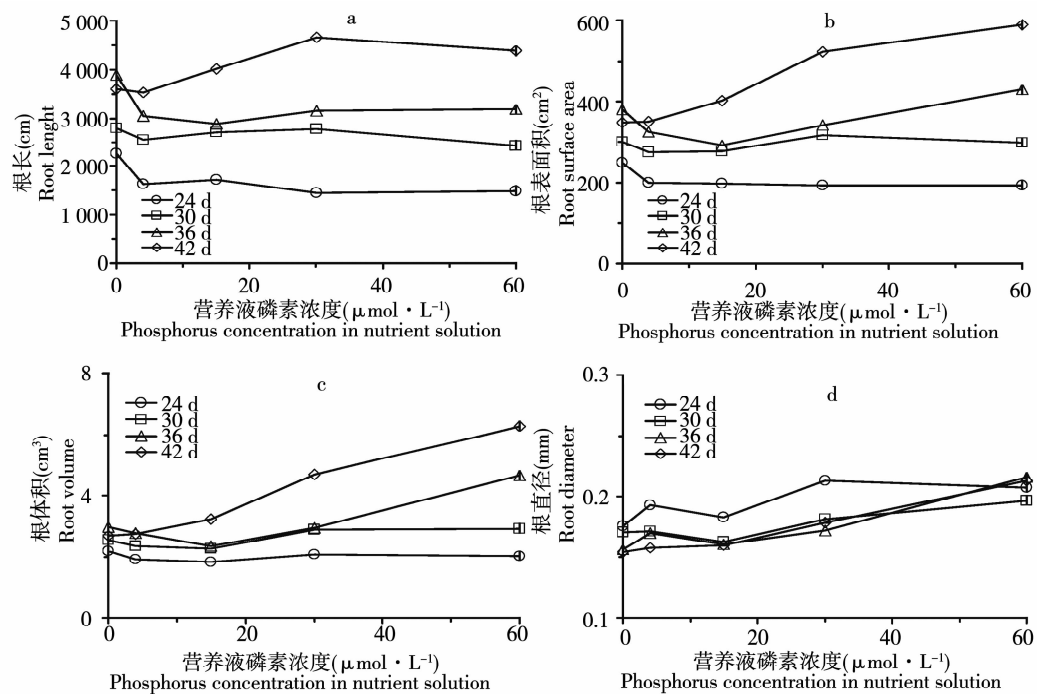


图 3 大豆各生长阶段根长、根表面积、根体积、根直径与供磷水平的关系

Fig. 3 The relationship between root length、surface area、volume、diamater and phosphorus concentration during various growth period of soybean

注：(a) 根长；(b) 根表面积；(c) 根体积；(d) 根直径

表 1 大豆各生长阶段不同根系直径范围内根长分布 ($\text{cm} \cdot \text{株}^{-1}$)

时期		根直径 Root diameters (mm)			
Period	Treatment	0 ~ 1	1 ~ 3	3 ~ 4.5	>4.5
24 d	P ₀	2 218.6 a	32.1 a	1.3	0.1
	P ₄	1 608.1 b	27.6 a	1.0	0.0
	P ₁₅	1 688.3 b	28.0 a	0.6	0.2
	P ₃₀	1 408.3 bc	39.2 b	1.7	0.6
	P ₆₀	1 441.3 bc	41.9 b	2.1	0.4
30 d	P ₀	2 761.1 a	35.7 a	1.2	0.3
	P ₄	2 506.1 a	37.2 a	1.0	0.2
	P ₁₅	2 672.7 a	37.9 a	0.9	0.3
	P ₃₀	2 724.8 a	51.1 b	1.1	0.5
	P ₆₀	2 342.0 b	63.7 c	2.0	1.3
36 d	P ₀	3 830.8 a	46.9 a	1.0	0.0
	P ₄	2 981.3 b	59.1 b	1.0	0.0
	P ₁₅	2 829.5 b	57.3 b	1.5	0.1
	P ₃₀	3 076.9 b	78.2 c	2.1	0.8
	P ₆₀	3 000.2 b	174.1 d	5.0	2.1
42 d	P ₀	3 535.9 a	55.0 a	2.0	0.1
	P ₄	3 489.3 a	42.6 a	1.0	0.4
	P ₁₅	3 907.3 ab	92.2 b	1.6	0.4
	P ₃₀	4 504.4 b	153.4 b	2.8	0.5
	P ₆₀	4 115.8 ab	257.4 d	13.9	8.0

注：同列不同的字母表示差异显著 ($p < 0.05$, LSD 检验)。

2.3 供磷水平对大豆根系吸水速率的影响

根系吸水速率是根系吸收水分和养分能力的集中体现。不同供磷处理条件下各生长阶段单株大豆的日平均吸水速率（用单位时间内单株大豆蒸腾所消耗掉的水的体积来表示）如图 4 所示。对任一处理，大豆日平均吸水速率均随大豆的生长而增大。当磷素浓度介于 0 ~ 30 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间时，大豆日平均吸水速率随磷素浓度的增大而增大，当磷素浓度大于 30 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，反而随着磷素浓度的增大而减小。这充分说明根系吸收能力需要一定浓度的营养元素保证，但也并非越高越好。

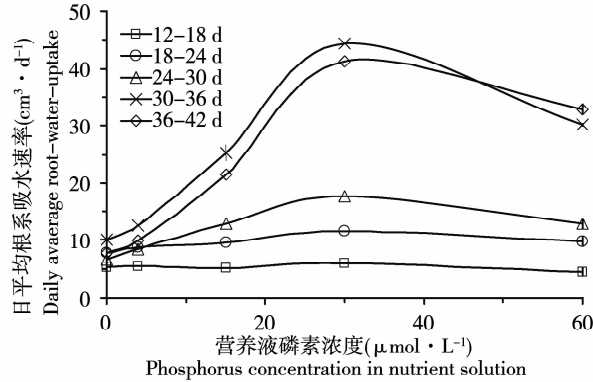


图 4 大豆各生长阶段日平均根系吸水速率与营养液磷素浓度关系

Fig. 4 The relationship between daily average root – water – uptake rate and phosphorus concentration in nutrient solution during various growth period of soybean

3 初步结论

① 同一时期，大豆地上部干重随供磷水平的升高而增大；地下部干重随着供磷水平的升高，呈先减小后增加的趋势。

② 供磷水平对大豆根系形态有显著影响。42 d 以前，无磷处理根长最大，42 d 时正常供磷 (30 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 根长最大；根系平均直径基本随供磷水平的升高而增大。随供磷水平的升高，各处理细根 (0 ~ 1 mm) 呈先减小后增加的趋势。

③ 当磷素浓度介于 0 ~ 30 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间时，大豆日平均吸水速率随磷素浓度的增大而增大，当磷素浓度大于 30 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，反而随着磷素浓度的增大而减小。

参考文献：

[1] 李继云, 刘秀娣, 周 伟, 等. 有效利用土壤养分元素的作物育种新技术研究 [J]. 中国科学 (B 辑), 1995, 25 (1): 41 – 48.

[2] 鲁如坤. 我国的磷矿资源和磷肥生产消费——磷矿资源和磷肥生产 [J]. 土壤, 2004, 36 (1): 1 – 4.

[3] 鲁如坤, 史正元, 顾益初. 土壤积累态磷研究 II ——磷肥的表现积累利用率 [J]. 土壤, 1995, 27 (6): 286 – 289.

[4] 李庆逵. 现代磷肥的研究进展 [J]. 土壤学进展, 1986 (2): 1 – 7.

[5] 李宝珍, 王松伟, 冯慧敏, 等. 氮素供应形态对水稻根系形态和磷吸收的影响 [J]. 中国水稻科学, 2008, 22 (5): 665 – 668.

[6] 陈 磊, 王盛锋, 刘自飞, 等. 低磷条件下植物根系形态反应及其调控机制 [J]. 中国土壤与肥料, 2011 (6): 1 – 12.

[7] 王美丽, 严小龙. 大豆根形态和根分泌物特性与磷效率 [J]. 华南农业大学学报, 2001, 22 (3): 1 – 4.

[8] Marschner P, Solaiman Z, Rengel Z. Brassica genotypes differ in growth, phosphorus uptake and rhizosphere properties under P – limiting conditions [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39 (1): 87 – 98.

[9] 任立飞, 张文浩, 李衍素, 等. 低磷胁迫对黄花苜蓿生理特性的影响 [J]. 草业学报, 2012, 21 (3): 242 – 249.

[10] Tang C, Hinsinger P J, Drevon J J, et al. Phosphorus deficiency impairs early nodule functioning and enhances proton release in roots of Medicago truncatula L [J]. Annals of Botany, 2001, 88 (1): 131 – 138.

[11] 王树起, 韩晓增, 严 君, 等. 缺磷胁迫对大豆根系形态和氮磷吸收积累的影响 [J]. 土壤通报, 2010, 41 (3): 644 – 650.

[12] 赵 利, 王明亚, 毛培胜, 等. 不同氮磷处理对老芒麦种子产量、产量组分及根系的影响 [J]. 草地学报, 2012, 20 (4): 662 – 668.