

## 缺磷胁迫对大豆植株磷素与干物质积累的影响

郭晓双<sup>1</sup>, 吴冬婷<sup>2</sup>, 周全<sup>3</sup>, 姚玉波<sup>4</sup>, 龚振平<sup>1</sup>, 马春梅<sup>1</sup>, 夏玄<sup>1</sup>

(1. 东北农业大学农学院, 黑龙江哈尔滨 150030; 2. 黑龙江省纪检监察干部学院, 黑龙江哈尔滨 150026; 3. 黑龙江省八五二农场, 黑龙江宝清 155620; 4. 黑龙江省农业科学院经济作物研究所, 黑龙江哈尔滨 150086)

**摘要:** 磷是大豆体内重要化合物的组成因素, 缺磷胁迫会影响大豆植株对磷素的吸收和分配, 从而影响干物质的积累。通过采用砂培方法, 自大豆 V3 期开始, 连续进行 4 次缺磷处理, 研究了缺磷胁迫对大豆植株磷素和干物质积累的影响。结果表明: 在苗期至花期和花荚期缺磷胁迫, 磷素由幼嫩向成熟生长和已成熟的叶部向外转移, 以供给新生长的茎叶根和荚果对磷素的需要; 苗期至花荚期缺磷处理对成熟和由幼嫩向成熟生长的叶片干物质积累影响不明显, 说明叶片在向外输出磷素时, 预留出自身生长需要的磷素; 在结荚、鼓粒期缺磷胁迫, 可导致成熟营养器官早衰; 缺磷处理对干物质影响明显小于对磷素积累的影响, 说明外界磷素供应不足时, 大豆植株会更高效地利用磷素。

**关键词:** 大豆; 缺磷胁迫; 磷素; 干物质

中图分类号: S565.1

文献标识码: A

DOI: 10.11861/j.issn.1000-9841.2014.04.0545

## Effect of Phosphorus Deficiency Stress on Phosphorus and Dry Matter Accumulation in Soybean

GUO Xiao-shuang<sup>1</sup>, WU Dong-ting<sup>2</sup>, ZHOU Quan<sup>3</sup>, YAO Yu-bo<sup>4</sup>, GONG Zhen-ping<sup>1</sup>, MA Chun-mei<sup>1</sup>, XIA Xuan<sup>1</sup>

(1. College of Agriculture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Discipline Inspection Cadre Institute in Heilongjiang, Harbin 150026, China; 3. 852 State Farm in Heilongjiang, Baoqing 155620, China; 4. Institute of Industrial Crops, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China)

**Abstract:** Phosphorus is an important compound composition of soybean plant. Phosphorus deficiency stress can affect the absorption and distribution of phosphorus in soybean, thus affecting the accumulation of dry matter. From V3 stage, four consecutive phosphorus deficiency treatments were set to determine the effect of phosphorus deficiency stress on phosphorus and dry matter accumulation of soybean with sand culture. The results showed that phosphorus shifted outwards from the young to mature and mature leaves to supply new growing leaves, stems, roots and pods needing for phosphorus in the seedling to flowering and flowering-podding phase phosphorus deficiency stress. The effect on dry matter accumulation of the young to mature and mature leaves was not obvious, illustrating that leaves had set aside their own growth needs of phosphorus when leaves phosphorus exported. Phosphorus deficiency stresses in the podding and seed-filling stages led premature senescence of mature vegetative organs. The effect of phosphorus deficiency treatment on dry matter accumulation was significantly less than phosphorus accumulation. It illustrated that when external phosphorus supply shortage, the soybean plants made use of phosphorus more efficiently.

**Key words:** Soybean; Phosphorus deficiency stress; Phosphorus; Dry matter

磷是大豆体内重要化合物的组成因素, 这些物质对大豆的生长发育与新陈代谢起着十分重要的作用, 同时磷素以多种形式参与大豆体内各种生理生化过程, 从而影响作物的生长状况<sup>[1]</sup>。适宜的磷素水平有利于大豆植株氮素积累, 磷素水平过高或过低都会对大豆的根瘤重量产生影响从而抑制氮素积累<sup>[2-4]</sup>。同时, 过低的供磷水平, 不能满足大豆生长发育的需要, 导致产量降低; 而过高的供磷水平可能过度地增强植株呼吸强度, 养分消耗更多, 不利于植株的正常生长发育和产量形成<sup>[5-6]</sup>。吴冬

婷等<sup>[7]</sup>研究表明, 苗期和花期缺磷明显降低大豆产量, 而结荚期缺磷对产量影响不明显。在缺磷胁迫下, 磷的转移发生得更早, 量更大, 并且磷在大豆植株体内的转移和分配也发生一些变化<sup>[8-9]</sup>。缺磷胁迫会影响植株中磷素的吸收和分配, 大豆植株的磷素和干物质积累表现更为明显和直接, 而在此方面缺少系统的研究报道。本试验采用砂培方法, 自大豆 V<sub>3</sub> 期开始, 连续进行 4 次缺磷处理, 研究缺磷胁迫对大豆植株磷素与干物质积累的影响, 以期为大豆合理施用磷肥提供依据和参考。

收稿日期: 2013-10-09

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划(2014BAD11B01); 黑龙江省科技攻关项目(GA09B104-1)。

第一作者简介: 郭晓双(1986-), 女, 硕士, 主要从事大豆栽培生理研究。E-mail: qinshi416624@sina.cn。

通讯作者: 龚振平(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事大豆栽培生理及保护性耕作研究。E-mail: gzpyx2004@163.com。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

试验于 2011 年在东北农业大学香坊植物实验实习基地进行,采用砂培方法,盆栽材料为直径 0.30 m、高 0.28 m,装砂量为 20 kg 的塑料桶,为防止盆内存水,盆底钻直径为 1 cm 的孔,装盆前先将江砂用自来水洗净。供试大豆品种为绥农 14,每盆保苗 4 株。供试正常营养液成分参考 Hoagland 营养液配方,无磷营养液为用  $\text{K}_2\text{SO}_4$  43.5  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{KCl}$  37.25  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  代替 Hoagland 营养液中的  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ,其他成分正常。

### 1.2 试验设计

从已培养的供试材料中选取长势均匀一致的 45 盆大豆进行缺磷试验。试验在 4 个连续生育时期进行,分别为三片复叶期~始花期(V3~R1)、始花期~始荚期(R1~R3)、始荚期~鼓粒初期(R3~R5)、鼓粒初期~鼓粒期(R5~R6),以三片复叶期 5 盆正常施磷处理作为初始对照(CK0)。每一缺磷处理阶段 10 盆植株,其中 5 盆浇灌无磷营养液,5 盆浇灌正常营养液(CK),并且,在未到达缺磷处理生育时期时,均浇灌正常营养液。

具体培养方法为从播种至大豆对生真叶完全展开前,每日淋浇 500 mL 清水;对生真叶展开后,每日淋浇 500 mL 对应的营养液;在大豆生长旺盛期,每天淋浇 2 次 500 mL 营养液;同时为防止盐分积累,每隔 3 d 用 1 000 mL 清水淋洗 1 次。在大豆第三片复叶完全展开时,进行根瘤菌接种,其方法是取上年冷冻保存的田间大豆根瘤,清洗研碎后加入到营养液中,每升营养液中约含 5 g 根瘤,连续淋浇 5 d。

### 1.3 测定项目与方法

除 V3 期外,R1、R3、R5 和 R6 期按照不同节位进行取样。R1 期分为下部(0~3 节),上部(4~7 节)和根系 3 部分;R3、R5、R6 期分为下部(0~3 节),中部(4~7 节),上部(8~12 节)和根系 4 部分。取样时将大豆植株各节器官进一步分解为叶片、叶柄、茎、荚果 4 部分。根系先用自来水冲洗干净,再用蒸馏水冲洗 3 次,而后用滤纸吸干。分解后的植株在 105℃ 下杀青 0.5 h 后,65℃ 烘干至恒重,称重,粉碎后测定磷含量:以  $\text{CuSO}_4$  和  $\text{K}_2\text{SO}_4$  为催化剂,用浓  $\text{H}_2\text{SO}_4$  消化后,采用钼锑抗比色法测定<sup>[10]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 缺磷胁迫下大豆植株磷素的积累与分配

从表 1 可以看出,在各生育时期 CK 处理的植株磷素积累量都高于缺磷处理,二者上、中部的叶茎柄和根部都达到了显著差异水平。

V3~R1 期缺磷处理的下部的叶片、叶柄、茎磷素积累量分别是 CK 的 49.5%、3.6%、30.1%;上部的叶片、叶柄、茎分别是 CK 的 42.6%、27.2%、45.6%,根部是 49.1%。V3~R1 期 CK 处理各器官的磷素积累量较大;缺磷处理只有上部新生器官和根系的磷素积累量比较大,而下部的叶片、叶柄磷素积累量明显减少,表明磷素开始向外转移,下部的茎部略有增加,可能是磷素转移通过茎部运输的结果。

R1~R3 期缺磷处理的下部叶片、叶柄、茎、荚果磷素积累量分别是 CK 处理相应部位的 95.2%、41.9%、57.7%、17.3%;中部的叶片、叶柄、茎、荚果分别是 CK 的 65.5%、41.1%、44.5%、63.1%;上部的叶片、叶柄、茎、荚果分别占 CK 的 51.4%、27.7%、31.2%、67.2%,根部是 49.9%。CK 处理的下部器官磷素积累量均变化不大,缺磷处理的下部叶片、叶柄磷素积累量明显减少,表明磷素开始向外转移;中部器官除荚果外都是由幼嫩向成熟发展的过程,CK 处理的各器官磷素积累量都明显增加,而缺磷处理叶、柄磷素积累量很少;上部是新生器官,所以 CK 处理和缺磷处理的磷素积累量都在增加;缺磷处理的上中下三个部位的荚果都是新生器官,所以磷素积累量都是增加的,因为茎部担负着运输磷素的责任,叶片和叶柄中磷素先转移到茎部,再向荚果中运输,所以茎部的磷素积累量也在增加。

R3~R5 期缺磷处理的上、中部的叶片、叶柄和茎部的磷素积累量占 CK 的比例极为相似,分别为 75.0%、53.0%、64.0% 左右,荚果占 60.5% 和 87.8%,而缺磷处理的下部器官中只有叶片受到较大影响。CK 处理除了荚果中磷素在迅速积累外,其他部位各器官都是只有少量积累,而缺磷处理荚果也在快速增加,但是叶片、叶柄的磷素量都在减少,中、下部茎部磷素少量增加,上部茎中的磷素减少,因为中、下部的磷素正在通过茎部向外转移,而上部的茎已经将自身的磷素转移。

R5~R6 期的磷素积累量的变化同 R3~R5 期相似,荚果在鼓粒期间积累的磷素量最多。

表 1 试验期间大豆植株磷素积累情况

Table 1 The P accumulation in the plant of soybean during the experiment (mg·pot<sup>-1</sup>)

部位 Position	器官 Organ	V3	V3 ~ R1		R1 ~ R3		R3 ~ R5		R5 ~ R6	
		CK0	CK	缺磷 P- deficiency	CK	缺磷 P- deficiency	CK	缺磷 P- deficiency	CK	缺磷 P- deficiency
上部 Top	叶片 Leaf		24.06 ± 1.22 a	10.25 ± 1.60 b	44.53 ± 1.20 a	22.88 ± 2.77 b	42.34 ± 3.64 a	31.90 ± 0.90 b	69.75 ± 4.17 a	47.37 ± 0.58 b
	叶柄 Petiole		3.94 ± 0.24 a	1.07 ± 0.20 b	14.66 ± 0.57 a	4.06 ± 0.19 b	21.53 ± 2.61 a	11.48 ± 0.66 b	31.64 ± 2.59 a	17.29 ± 2.60 b
中部 Middle	茎 Stem		4.67 ± 0.21 a	2.13 ± 0.10 b	14.84 ± 1.29 a	4.63 ± 0.51 b	18.92 ± 1.92 a	12.19 ± 1.31 b	24.85 ± 2.26 a	18.35 ± 0.70 b
	荚果 Pod				5.95 ± 1.39 a	4.00 ± 0.44 a	79.23 ± 10.98 a	47.9 ± 3.75 b	229.7 ± 23.75 a	203.68 ± 13.22 b
下部 Bottom	叶片 Leaf				37.14 ± 1.83 a	24.34 ± 1.03 b	36.73 ± 0.17 a	28.76 ± 1.66 b	38.01 ± 2.88 a	22.19 ± 2.43 b
	叶柄 Petiole				9.13 ± 0.81 a	3.75 ± 0.22 b	19.01 ± 0.85 a	9.90 ± 1.31 b	12.64 ± 0.76 a	7.95 ± 0.66 b
	茎 Stem				20.58 ± 1.54 a	9.15 ± 0.88 b	34.71 ± 1.77 a	23.49 ± 2.05 b	29.35 ± 5.05 a	18.79 ± 1.59 b
	荚果 Pod				14.09 ± 0.56 a	8.89 ± 1.40 b	73.98 ± 8.80 a	64.95 ± 5.82 a	149.51 ± 0.94 a	135.35 ± 4.31 a
	叶片 Leaf	5.71 ± 0.54	10.24 ± 1.05 a	5.07 ± 0.49 b	8.09 ± 0.40 a	7.70 ± 0.75 a	11.88 ± 0.81 a	4.82 ± 0.52 b	4.31 ± 0.67 a	2.19 ± 0.77 a
	叶柄 Petiole	1.11 ± 0.09	1.38 ± 0.01 a	0.05 ± 0.01 b	1.48 ± 0.15 a	0.62 ± 0.21 b	1.92 ± 0.32 a	1.23 ± 0.41 a	6.17 ± 0.85 a	0.82 ± 0.07 b
	茎 Stem	0.81 ± 0.09	4.62 ± 0.44 a	1.39 ± 0.15 b	17.57 ± 0.11 a	10.14 ± 1.44 a	24.29 ± 2.61 a	19.82 ± 2.62 a	24.45 ± 1.64 a	16.87 ± 2.24 a
	荚果 Pod				6.52 ± 0.24 a	1.13 ± 0.20 b	14.68 ± 3.09 a	10.02 ± 2.39 a	27.55 ± 14.2 a	13.29 ± 1.72 b
	根 Root	2.72 ± 0.05	14.42 ± 1.13 a	7.08 ± 0.33 b	46.47 ± 1.54 a	23.17 ± 2.75 b	61.03 ± 5.24 a	31.43 ± 0.36 b	89.65 ± 2.86 a	44.6 ± 2.48 b

2.2 缺磷胁迫对大豆干物质的影响

在大豆的各生育时期,CK 处理各器官的干物质都高于缺磷处理,但是只有新生器官如: V3 ~ R1 期的上部、R1 ~ R3 期的上部和 R1 ~ R3 期的全部荚果与对照差异达到了显著水平。V3 ~ R1 期缺磷处理的下部叶片、叶柄、茎分别是 CK 的 94.5%、17.0%、75.6%,上部的叶片、叶柄、茎分别是 CK 的 67.1%、64.7%、51.2%,根系是 86.0%。R1 ~ R3 期表现出与 V3 ~ R1 期相同的规律性,缺磷处理的下部的叶片、叶柄、茎、荚果分别是 CK 的 93.6%、89.7%、74.6%、23.8%;而中部的叶片、叶柄、茎、荚果分别是 CK 的 89.8%、78.9%、77.9%、77.7%;缺磷处理的上部的叶片、叶柄、茎、荚果分别是 CK 的 69.6%、59.1%、59.5%、80.3%,根系是 89.4%。R3 ~ R5 期 CK 处理的干物质与缺磷处理的几乎都未达到显著差异。说明缺磷对大豆生育前期干物质积累影响大,对新生器官的干物质影响比较明显。R5 ~ R6 期 CK 处理的下部叶部、茎和根的干物质显著高于缺磷处理,原因可能是缺磷促进成熟器官早衰。

表2 试验期间大豆植株干物质积累情况

Table 2 The dry matter accumulation in the plant of soybean during the experiment ( $\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$ )

部位 Position	器官 Organ	V3	V3 ~ R1		R1 ~ R3		R3 ~ R5		R5 ~ R6		
		CK0	CK	缺磷 P- deficiency	CK	缺磷 P- deficiency	CK	缺磷 P- deficiency	CK	缺磷 P- deficiency	
上部 Top	叶片 Leaf		6.53 ±	4.38 ±	11.36 ±	7.91 ±	12.77 ±	10.26 ±	18.44 ±	17.52 ±	
			0.19 a	0.28 b	0.60 a	0.88 b	1.39 a	0.61 a	1.52 a	0.30 a	
	叶柄 Petiole		1.67 ±	1.08 ±	3.62 ±	2.14 ±	4.76 ±	4.28 ±	5.97 ±	4.63 ±	
			0.01 a	0.07 b	0.17 a	0.20 b	0.61 a	0.31 a	0.21 a	0.36 b	
	茎 Stem		1.68 ±	0.86 ±	4.37 ±	2.60 ±	6.92 ±	5.11 ±	8.16 ±	9.05 ±	
			0.01 a	0.18 b	0.36 a	0.25 b	0.76 a	0.30 a	0.64 a	0.88 a	
中部 Middle	叶片 Leaf				1.32 ±	1.06 ±	17.27 ±	12.06 ±	46.20 ±	44.13 ±	
					0.17 a	0.19 b	2.38 a	0.47 a	5.77 a	2.75 a	
	叶柄 Petiole				9.22 ±	8.28 ±	9.74 ±	10.63 ±	9.84 ±	7.85 ±	
					0.42 a	0.63 a	0.95 a	0.59 a	0.79 a	0.82 a	
	茎 Stem				3.04 ±	2.40 ±	3.70 ±	3.23 ±	2.83 ±	2.50 ±	
					0.29 a	0.26 a	0.17 a	0.37 a	0.21 a	0.01 a	
下部 Bottom	叶片 Leaf				6.57 ±	5.12 ±	9.51 ±	8.51 ±	9.12 ±	8.08 ±	
					0.22 a	0.11 b	0.51 a	0.60 a	0.46 a	0.69 a	
	叶柄 Petiole				3.05 ±	2.37 ±	16.78 ±	15.51 ±	27.84 ±	27.97 ±	
					0.06 a	0.21 b	2.21 a	2.12 a	1.39 a	2.48 a	
	茎 Stem		2.28 ±	3.64 ±	3.44 ±	2.49 ±	2.33 ±	2.96 ±	1.74 ±	1.71 ±	0.71 ±
			0.07	0.07 a	0.10 a	0.05 a	0.27 a	0.23 a	0.17 b	0.24 a	0.20 b
	叶柄 Petiole		0.58 ±	0.53 ±	0.09 ±	0.58 ±	0.52 ±	0.65 ±	0.51 ±	1.31 ±	0.31 ±
			0.08	0.21 a	0.05 b	0.02 a	0.17 a	0.11 a	0.16 a	0.15 a	0.02 b
	茎 Stem		0.13 ±	2.62 ±	1.98 ±	6.42 ±	4.79 ±	6.29 ±	6.27 ±	7.90 ±	4.91 ±
			0.05	1.15 a	0.11 b	0.19 a	1.06 a	0.39 a	0.61 a	0.67 a	0.46 b
	荚果 Pod				1.30 ±	0.31 ±	2.76 ±	2.21 ±	4.92 ±	2.39 ±	
					0.02 a	0.07 b	0.58 a	0.61 a	1.53 a	0.75 a	
	根 Root		1.62 ±	5.42 ±	4.66 ±	11.10 ±	9.92 ±	12.73 ±	9.83 ±	15.65 ±	10.8 ±
			0.07	0.13 a	0.24 b	0.59 a	1.41 a	0.54 a	1.12 a	1.16 a	0.53 b

### 3 讨 论

外界磷素供应水平,直接影响到磷素在植株体内的分配,当磷素缺乏时,叶片中的磷素向生殖器官中转移<sup>[11]</sup>。于洋等<sup>[12]</sup>的研究表明,土壤磷素浓度在  $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,营养器官向荚果中转移磷素量达最高,随土壤中磷素含量升高其转移率呈波动变化。本试验结果表明,V3 ~ R1 期缺磷处理由幼嫩向成熟生长的叶部磷素向外转移,供应新生长的茎叶和根对磷素的需要;R1 ~ R3 期缺磷处理成熟和由幼嫩到成熟生长的叶部磷素向外转移,供应新生器官对磷素的需要;R3 ~ R5、R5 ~ R6 期缺磷处理大豆营养器官的磷素都向外转移,以保证荚果生长发育对磷素需要。

在大豆不同生育期间,植株对磷素积累情况也在改变。贺振昌<sup>[13]</sup>的研究指出,大豆从出苗期至结

荚期磷素积累比较缓慢,结荚期以后明显加快。吴明才等<sup>[1]</sup>认为,在磷素供应充足情况下,大豆磷素积累高峰出现在结荚期、鼓粒期。本试验结果表明,叶片、叶柄等营养器官对磷素积累最快时期出现在 R1 ~ R3 期,而籽粒积累最快的阶段为 R5 ~ R6 期,与前人研究结果一致。

姚玉波等<sup>[2]</sup>利用砂培方法研究表明,磷素营养液在低于  $31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,会降低大豆产量。王建国等<sup>[14]</sup>认为,在缺磷土壤中,施磷在一定范围内能够显著增加大豆产量。缺磷处理对由幼嫩向成熟生长叶片的干物质积累影响不明显,表明叶片在向新生器官转移磷素时,预留出自身生长需要的磷素;缺磷处理使成熟器官的干物质减少,可能是缺磷导致成熟器官早衰的结果。本研究4个生育时期缺磷处理对干物质的影响明显小于对磷素积累的影响,说明外界磷素供应不足时,大豆植株会更高效地利用磷素,以降低对生长的影响。

## 参考文献

- [1] 吴明才, 肖昌珍, 郑普英. 大豆磷素营养研究[J]. 中国农业科学, 1999, 32(3): 59-65. (Wu M C, Xiao C Z, Zheng P Y. Phosphorus nutrition of soybean[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1999, 32(3): 59-65.)
- [2] 姚玉波, 吴冬婷, 龚振平, 等. 磷素水平对大豆氮素积累及产量的影响[J]. 核农学报, 2012, 26(6): 947-951. (Yao Y B, Wu D T, Gong Z P, et al. Effect of phosphorus level on nitrogen accumulation and yield in soybean[J]. Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 2012, 26(6): 947-951.)
- [3] Tsvetkova G E, Georgiev G I. Effect of phosphorus nutrition on the nodulation, nitrogen fixation and nutrient use efficiency of bradyrhizobium japonicum soybean (*Glycine max* L. Merr.) symbiosis[J]. Bulgarian Journal of Plant Physiology Special Issue, 2003: 331-335.
- [4] Miao S J. Nodule formation and development in soybeans (*Glycine max* L.) in response to phosphorus supply in solution culture[J]. Pedosphere, 2007, 17(1): 36-43.
- [5] Myo W, Sutkhet N, Ed S. Effects of phosphorus on seed oil and protein contents and phosphorus use efficiency in some soybean varieties[J]. Kasetsart Journal (Nature Science), 2010, 44: 1-9.
- [6] 王维军. 大豆的磷素营养与施肥[J]. 中国农业科学, 1963(11): 41-44. (Wang W J. Soybean phosphorus nutrition and fertilization[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1963(11): 41-44.)
- [7] 吴冬婷, 张晓雪, 龚振平, 等. 磷素营养对大豆磷素吸收及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3): 670-677. (Wu D T, Zhang X X, Gong Z P, et al. Effects of phosphorus nutrition on P absorption and yields of soybean[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(3): 670-677.)
- [8] 苗淑杰, 乔云发. 大豆根系特征与磷素吸收利用的关系[J]. 大豆科学, 2007, 26(1): 16-20. (Miao S J, Qiao Y F. Relationship between root characters and phosphorus absorption in soybean[J]. Soybean Science, 2007, 26(1): 16-20.)
- [9] 王应祥, 廖红. 大豆适应低磷胁迫的机理初探[J]. 大豆科学, 2003, 22(3): 208-212. (Wang Y X, Liao H. Preliminary studies on the mechanisms of soybean in adaptation to low P stress[J]. Soybean Science, 2003, 22(3): 208-212.)
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 268-270. (Bao S D. Soil agro-chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 268-270.)
- [11] Steven J, Crafts B. Phosphorus nutrition influence on leaf senescence in soybean[J]. Plant Physiology, 1992, 98: 1128-1132.
- [12] 于洋, 马春梅, 龚振平, 等. 不同磷水平下大豆植株磷素积累与转运动态的研究[J]. 作物杂志, 2012(6): 68-73. (Yu Y, Ma C M, Gong Z P, et al. Research of phosphorus accumulation and dynamics of transportation in soybean under different phosphorus levels[J]. Crops, 2012(6): 68-73.)
- [13] 贺振昌. 高产大豆营养与施肥的探讨[J]. 中国农业科学, 1982(1): 65-70. (He Z C. Investigation on the nutrient and fertilizer requirements of a high-yielding soybean[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1982(1): 65-70.)
- [14] 王建国, 李兆林, 李文斌, 等. 磷肥与大豆产量及品质的关系[J]. 农业系统科学与综合研究, 2006, 22(1): 55-57. (Wang J G, Li Z L, Li W B, et al. Application of phosphorus in relation to soybean yield and quality[J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2006, 22(1): 55-57.)
- (上接第 544 页)
- [6] 王璇, 马鸣超, 关大伟, 等. 胶质类芽孢杆菌 PCR 快速检测方法[J]. 微生物学报, 2011, 51(11): 1485-1493. (Wang X, Ma M C, Guan D W, et al. Rapid identification for *Paenibacillus mucilaginosus* by PCR[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2011, 51(11): 1485-1493.)
- [7] 王振亚. 胶质类芽孢杆菌 3016 基因组学初步研究[D]. 山东: 山东农业大学, 2012: 1-5. (Wang Z Y. Preliminary analysis on the genome of *Paenibacillus mucilaginosus* 3016[D]. Shandong: Shandong Agricultural University, 2012: 1-5.)
- [8] Bijoy Muktan, Jayati Saha, Prabir K. Sarkar. Antioxidant activities of soybean as affected by *Bacillus*-fermentation to kinema[J]. Food Research International, 2008, 41(6): 586-593.
- [9] 张红侠, 冯锐华, 李俊, 等. 黄土高原地区优良大豆根瘤菌的筛选与接种方式研究[J]. 大豆科学, 2010, 29(6): 996-1002. (Zhang H X, Feng R H, Li J, et al. Screening of superior soybean rhizobial strains and analyzing of different inoculation methods in loess plateau region of China[J]. Soybean Science, 2010, 29(6): 996-1002.)
- [10] 周相娟. 根瘤菌、铵态氮、光照强度对大豆固氮和光合特性作用影响的研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006: 41-42. (Zhou X J. Effects of rhizobia,  $\text{NH}_4^+$ -fertilizer and light strength on nitrogen fixation and photosynthesis of soybean[D]. Beijing: The Institute of Botany, Chinese Academy of Science, 2006: 41-42.)
- [11] 孔祥生. 植物生理学试验技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008: 77-80. (Kong X S. Experimental technology of plant physiology[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2008: 77-80.)
- [12] Maxwell K, Johnson G N. Chlorophyll fluorescence—a practical guide[J]. Journal of Experimental Botany, 2000, 51: 659-668.
- [13] Langsdorf G, Buschmann C, Sowinski M, et al. Multicolour fluorescence imaging of sugar beet leaves with different nitrogen status by flash lamp UV-excitation[J]. Photosynthetica, 2000, 38: 539-551.
- [14] Terashima I, Hikosaka K. Comparative ecophysiology of leaf and canopy photosynthesis[J]. Plant Cell Environment, 1995, 18: 1111-1128.
- [15] Krause G H, Weis E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: The basics[J]. Annual Review of Plant Physiology Plant Molecular Biology, 1991, 42: 313-349.
- [16] 赵明, 姜雯, 丁在松, 等. 玉米和小麦在光合诱导期间非光化学淬灭 (qN) 差异 (英文)[J]. 作物学报, 2005, 31(12): 1544-1551. (Zhao M, Jiang W, Ding Z S, et al. Corn and wheat during photosynthetic induction of non photochemical quenching (qN) difference[J]. Acta Agronomica Sinica, 2005, 31(12): 1544-1551.)
- [17] 朱宝国, 于忠和, 王囡囡, 等. 有机肥和化肥不同比例配施对大豆产量和品质的影响[J]. 大豆科学, 2010, 29(6): 97-100. (Zhu B G, Yu Z H, Wang N N, et al. Effect of different proportion combined application of organic and chemical fertilizer on soybean yield and quality[J]. Soybean Science, 2010, 29(6): 97-100.)