

磷素对大豆生长发育影响的研究进展

张小明<sup>1</sup>, 曾宪楠<sup>2</sup>, 孙羽<sup>2</sup>

(1. 东北农业大学 农学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江省农业科学院 耕作栽培研究所, 黑龙江 哈尔滨 150086)

**摘要:**大豆是重要的粮食、油料和饲料作物,是生活生产的重要原料。磷素作为大豆生长发育必不可少的元素之一,在大豆植株的生长发育、产量形成等方面都起着至关重要的作用。国内外学者研究结果显示:施用磷肥可以增加大豆植株抗旱、抗倒伏性;增加植株对矿质元素的吸收,促进干物质积累和产量形成。为合理施用磷肥促进产量增加、提高籽粒品质做出了显著贡献,为农业生产提供理论依据。对磷素对大豆的抗逆性、养分代谢、生理特性、农艺性状、干物质积累、产量和品质的影响进行了综述,旨在为磷肥的合理施用及大豆磷高效育种提供理论参考。

**关键词:**大豆;磷素营养;产量;研究进展

**中图分类号:**S565.1      **文献标识码:**A      **DOI:**10.11861/j.issn.1000-9841.2016.01.0176

The Research Progress of Phosphorus Fertilizer Effect on Soybean

ZHANG Xiao-ming<sup>1</sup>, ZENG Xian-nan<sup>2</sup>, SUN Yu<sup>2</sup>

(1. College of Agriculture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Crop Tillage and Cultivation Institute of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China)

**Abstract:** Phosphorus is one of the essential elements of soybean growth which plays an important role in the growing development and yield formation. Domestic and foreign scholars researched the effects of applying fertilizer on soybean plant resistance, mineral elements absorption capacity, dry matter accumulation and physiological changes. It makes a significant contribution on yield increasing and seed quality improvement, and then providing a theoretical basis for agricultural production. This paper summarized the effect of phosphorus on resistance, nutrients metabolizing, physiological and agronomic traits, yield and quality of soybean.

**Keywords:** Soybean; Phosphorus nutrition; Yield; Research development

大豆既是重要的粮食作物,同时又是油料作物和饲料作物。磷是大豆植株生长发育和产量形成不可或缺的元素之一,参与组成核酸、核蛋白、磷脂和ATP等生物活性物质,是糖类、脂肪及氮代谢过程不可缺少的元素,此外碳水化合物的合成与运输也需要磷的参与<sup>[1]</sup>。磷是电子传递、卡尔文循环、同化物运输和光合磷酸化的结构组分,对光合作用有重要的调节作用,矿物质营养也可通过调节作物叶绿体的光化学反应活性来影响光合产物的合成<sup>[2]</sup>。磷素不足的大豆植株,不能正常代谢,蛋白质含量显著减少,从而使含油量下降,相反糖类物质含量增多<sup>[3]</sup>。磷素对增强大豆植株的抗逆性也有重要作用,适当增施磷肥可有效提高大豆植株的耐寒、耐旱能力<sup>[4]</sup>。但是长期施入过量的磷肥,会导致土壤富磷状态,随着径流等多种方式将磷素带入水体,导致水体污染,全球每年将有3 000~4 000万t的P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>进入水体。中国科学院的学者对全国131个湖泊进行了监测,发现其中有67个湖泊受到农业流失的磷素影响,造成水体富营养化<sup>[5]</sup>。

本文对磷素对大豆的抗逆性、养分代谢、生理特性、农艺性状、干物质积累、产量和品质的影响进行了综述,旨在为磷肥的合理施用及大豆磷高效育种提供理论参考。

1 磷素对大豆抗逆性的影响

1.1 抗旱性

根系形态影响作物对养分和水分的吸收能力,所以大豆根系的生理生化特性对大豆抗旱能力起着至关重要的作用<sup>[6]</sup>。不同基因型的大豆在干旱情况下根系表现出不同变化,抗旱品种的根重、根长、侧根数量等指标都要高于不抗旱品种<sup>[7-8]</sup>。干旱情况下施入磷肥既可以改变根系生长状态,又可以提升植株的保水能力,提高水分利用率,维持正常生理代谢。通过干旱条件下施入磷肥,可以得出磷肥能够改善植株体内水分的分配和植株的生长特性,从而更好地适应和抵抗水分胁迫带来的危害,增强植株的抗旱性能<sup>[9]</sup>。磷素作用在大豆植株上也产生同样效果,即增强大豆的抗旱性<sup>[10]</sup>。

收稿日期:2015-08-17  
基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201103001);黑龙江省农业科技创新工程重点项目(2013ZD013)。  
第一作者简介:张小明(1982-),女,硕士,实验师,主要从事作物栽培与育种研究。E-mail:xiaomingzhang1982@126.com。

## 1.2 抗倒伏性

作物的抗倒伏特性是一个极为复杂的数量性状,涉及到很多抗性机制和代谢途径。对植株抗倒伏性影响的说法一直存在争议,部分学者认为蛋白质和多糖是影响植株抗倒伏性能的重要因素,因为多糖和蛋白质与茎秆的维管束数目、厚壁组织发达程度和抗折力有密切关系<sup>[11]</sup>;还有学者则认为植株抗倒伏能力受细胞中的木质素和纤维素含量影响<sup>[12]</sup>。茎秆强度和根重是决定大豆抗倒伏的重要因素<sup>[13]</sup>。合理施用磷肥能有效提高大豆茎秆中C/N比,增加木质素和纤维素含量,从而提高大豆植株抗倒伏的能力<sup>[14]</sup>。

## 2 磷素对大豆养分代谢的影响

施用磷肥有利于大豆对磷、氮、钾等矿质元素的吸收利用,使大豆营养成分均衡,有效增加大豆产量,改善品质。有研究指出,在不同生育时期施磷肥对植株的氮、钾素吸收的影响并不相同,在大豆成熟期之前,随着施磷量的增加,植株中的氮素含量也不断增加,在成熟期达到最大值;在开花期之前随着磷肥的施入,钾素吸收显著增加,开花期后效果逐渐减小<sup>[15-16]</sup>。植株体内的磷素可以有效促进植株对氮素的吸收利用,有利于光合产物的转运和营养物质的再分配,提高大豆产量<sup>[17]</sup>,而缺磷情况下的大豆植株生长受到严重抑制,并且影响共生固氮作用<sup>[18]</sup>。合理施入磷肥有利于大豆植株磷素代谢,可以使大豆植株中的磷素积累合理化,能够提高大豆产量<sup>[19]</sup>。王海英等<sup>[20]</sup>对不同品种大豆进行施磷肥试验,结果显示,施磷肥可以有效增加生育前期大豆对磷素的吸收,特别是对叶片、茎秆促进作用最为明显,并且提高了收获期籽粒中的磷素积累。土壤中的有效磷浓度对大豆植株体内的磷素积累量有决定性作用,高磷供应的处理大豆植株磷素积累量高于低磷素处理。磷素的转移能力较强,可以被重复利用,磷素的转移归为由衰老器官向新生器官转移,并且遵循就近原则。而大豆植株在受到低磷胁迫时,磷素的转移会提前发生,且转移量相应增多,并且打破磷素在大豆植株中原有的分配方式<sup>[21]</sup>。

大豆对矿质元素的吸收利用是相互影响的,因此,在大豆栽培生产过程中,可通过合理的肥料配施来促进矿质元素的协调吸收与利用,提高肥料的利用效率,达到增加大豆产量和提高种植收益的目的。在大豆的生产过程中,氮、磷、钾肥配施的增产效果要远好于单独施用任何一种肥料<sup>[22-23]</sup>。滕云等<sup>[24]</sup>利用不同的肥料组合进行研究,结果显示,在

磷钾肥充足施入时,大大减少氮肥施入也可大幅增产,在氮磷肥充足的条件下,适当减少钾肥的施入量同样会有很大的增产效果。在水分胁迫时,施用磷肥可以使大豆植株发生一系列变化来抵御不良环境,如增加根系长度和表面积,从而增加吸水面积,促进水分吸收,增加作物渗透调节能力<sup>[25]</sup>。

## 3 磷素对大豆生理特性和农艺性状的影响

### 3.1 生理特性

施用磷肥可以有效改善大豆植株的生理特性。施磷肥可以明显促进提高大豆籽粒中的亚麻酸、棕榈酸、亚油酸含量,相反籽粒中的中油酸含量有所下降,而硬脂酸的变化与磷肥处理关系不明显;氨基酸总量增加1.85%,必需氨基酸中除甘氨酸、丝氨酸、组氨酸含量下降外,其它氨基酸的增幅为1.94%<sup>[26]</sup>。施磷肥不但使籽粒中的生理特性发生改变,而且在一定范围内随施磷量的增加,大豆叶片中的硝酸还原酶(NR)活性也随之增大,并且促进大豆对氮素的吸收,提高氮素利用率<sup>[27]</sup>。磷素增加了植株体内的固氮酶、硝酸还原酶的活性,有利于籽粒中氨基酸的形成和蛋白质的积累,从而促进了大豆植株的形态建成和产量形成<sup>[28]</sup>。施入磷肥可以升高植株胞间CO<sub>2</sub>含量的同时降低叶片中叶绿素和胡萝卜素降解速率、呼吸作用及琥珀酸脱氢酶活性<sup>[29]</sup>。在植株遭遇逆境时,细胞内活性氧产生与清除之间的平衡遭到破坏,活性氧大量积累对细胞产生破坏作用,适当施入磷肥,可以引起植株体内的生理变化以提高植株抗逆性,如在水分胁迫时施入磷肥可以有效增加植株体内的CAT、POD和SOD活性,同时减少MDA积累<sup>[30-31]</sup>。在缺磷或高磷逆境中,抗坏血酸氧化酶活性降低,对防止大豆生物膜脂过氧化,抗御逆境极为不利。

### 3.2 农艺性状

磷素不仅可以改变植株内部的生理特性,而且还会对植株表型特征产生很大作用。缺磷导致细胞分裂、光合作用和呼吸作用等代谢降低,减缓植株生长,导致叶片小,光合速率低<sup>[32]</sup>。同时植株体内的磷素调整着叶片中淀粉/蔗糖的比值和光合产物的分配情况,因此缺磷减少花数、推迟开花<sup>[33]</sup>。缺磷胁迫下,为抵御不良环境,大豆植株的根系发生一系列变化,如根系变长,表面积、体积增加以便吸收磷素,满足植株生长发育的需求,除改变自身形态外,根系还会分泌有机酸和酸性磷酸酶等物质来帮助磷素的吸收<sup>[34]</sup>。不同品种的大豆植株生长发育情况都会受到施磷水平的影响,低磷胁迫对大豆植株的株高、植株干重、叶面积、根体积和主根长

度等生长指标产生显著或极显著的影响<sup>[35]</sup>。

## 4 磷素对大豆干物质积累和产量的影响

### 4.1 干物质积累

大豆植株的干物质积累情况随着生长发育的进行而变化,而且在不同生育时期的生长中心也有所不同,磷肥可显著影响大豆植株干物质积累的规律。适当的施入磷肥可以显著地促进碳水化合物在大豆植株体内的运输,有利于大豆植株的生长发育,增加干物质的积累。在一定范围内,随着磷肥的施入,大豆植株的干物质质量、叶面积、叶绿素含量、氮素含量、磷素含量及磷素积累量都在大幅升高,而分配到根系的干物质质量少于其它地上部位,所以根冠比在逐步下降<sup>[36]</sup>。低磷处理的大豆根系干物质质量平均每株 0.8 g,而磷素供应正常的大豆植株根系干物质质量平均每株 1.4 g,远高于磷肥不足的大豆植株<sup>[37]</sup>。施磷肥的增产效果还与土壤中有有效磷含量有密切关系,胡根海等<sup>[38]</sup>利用含磷量不同的土壤进行施磷肥处理,结果显示,缺磷土壤中施用磷肥可显著增加大豆产量,而磷素含量充足的土壤中再施入磷肥,对大豆植株的增产效果不明显。过低的磷素水平无法满足大豆植株的生长发育的需求,营养物质合成不足,导致产量下降,而过高的磷素供应导致植株徒长,呼吸作用加强,养分大量消耗,反而不利于大豆植株的正常生长发育,也会导致干物质下降的结果。

### 4.2 产量

土壤中的磷素不足是限制大豆产量的主要因素之一,施磷肥是目前解决土壤磷素缺乏的重要且有效的手段,但是磷肥的增产效果受很多因素控制,如土壤有效磷含量、施磷量、基因型等。王建国等<sup>[39]</sup>研究表明,土壤有效磷含量低于  $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,施入磷肥增产效果明显,而土壤有效磷含量高于  $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,再施磷肥对大豆增产效果有限。不同品种大豆分别在低磷、正常、高磷 3 种土壤水平下施磷肥的增产效果分别为:低磷土壤中施入磷肥增产效果显著,而正常磷素水平的土壤中施入磷肥产量有所增加,但增产效果不显著,而高磷土壤中施入磷肥,大豆产量不但没有增加迹象,反而减产,因为磷素含量过高导致大豆对磷素“奢侈吸收”现象<sup>[40]</sup>。不仅土壤有效磷含量影响施肥效果,磷肥的施用量同样制约着大豆植株的增产效果,磷肥施入量少于  $62 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时,随磷肥施入量增加,产量逐渐升高;当磷肥施入量超过  $62 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  以后,增产作用不大<sup>[41]</sup>。乔镇江等<sup>[42]</sup>利用不同磷效基因型的大豆品种巴西 10 号(磷高效)和本地 2 号(磷低效)进行磷素研究,随着磷肥的施入,两个品种的大

豆植株的干物质积累量、叶绿素含量、产量等指标都随之不断增加,但是低磷效品种的大豆施磷肥后产量增加量更多。

### 4.3 品质

大豆籽粒中的蛋白质含量除受到品质遗传特性的控制外,还受到磷肥的影响,适宜的磷肥施入量可以有效增加大豆籽粒中蛋白质和脂肪的合成;当大豆植株遭到缺磷胁迫时,植株体内的代谢无法正常进行,其中蛋白质、脂肪的合成受阻而糖类产生增多;当磷素供应过量时,植株生长过盛,呼吸作用加强,养分过度消耗,反而不利于大豆植株的生长发育和品质的提高<sup>[43]</sup>。

## 5 展望

磷素增加大豆植株的抗逆性,通过生理变化和生长指标的改变使植株适应不良环境,同时磷素能够促进大豆植株对营养元素的吸收,从而增加干物质积累,促进产量的形成,提高蛋白质和脂肪的含量。磷素对大豆植株生长发育和产量的形成具有重要调节作用,随着分子生物学、遗传学和基因组学的不断发展,利用克隆、全基因组测序等分子手段来研究大豆植株对低磷胁迫的响应机理和大豆耐低磷特性的分子调控机制,并结合育种方法对大豆耐低磷品种进行鉴定和筛选,将进一步提高植株对土壤有效磷素的利用率,减少磷肥施入量。

## 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. Study on the physiological function of phosphorus to soybean [J]. Scientia Agricultura Sinica, 1999, 32(3): 59-65.)
- [2] 单守明,刘国杰,李绍华,等. DA-6 对草莓叶绿体光化学反应和 Rubisco 活性的影响[J]. 中国农业大学学报,2008,13(2):7-10. (Shan S M, Liu G J, Li S H, et al. Effects of different concentrations of DA-6 on chloroplast photochemical reaction and rubisco activities in strawberry [J]. Journal of China Agricultural University, 2008, 13(2): 7-10.)
- [3] 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.)
- [4] Kutamal A S, Aliyu B S, Saratu A. Influence of phosphorus fertilizer on the development of root nodules in cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) and soybean (*Glycine max* L. Merrill) [J]. International Journal of Pure and Applied Sciences, 2008, 2(3): 27-31.
- [5] Withers P J A, Davidson L A, Foy R H. Prospects for controlling non-point phosphorus loss to water: A UK perspective [J]. Journal of Environment Quality, 2000, 29: 167-175.

- [6] 李伏生,康绍忠. CO<sub>2</sub>浓度和氮素水平对春小麦水分利用效率的影响[J]. 作物学报,2002,28(6):835-840. (Li F S,Kang S Z. Effects of CO<sub>2</sub> concentration and nitrogen levels on water use efficiency in spring wheat[J]. Agronomica Sinica,2002,28(6):835-840. )
- [7] 王金陵. 王金陵论文集[D]. 哈尔滨:东北林业大学出版社,1992:238-241. (Wang J L. Proceedings of Wang Jinling [D]. Harbin:The Northeast Forestry University Press,1992:238-241. )
- [8] 任冬莲,路贵和,刘学义. 大豆成苗期抗旱性与根系生长的关系[J]. 中国油料作物学报,1993(1):37-39. (Ren D L,Lu G H,Liu X Y. Study on the relationship between tolerance to drought and growth of roots of soybean in seedling stage[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences,1993,(1):37-39. )
- [9] Flavio H. Gutiérrez-boem, Grant W T. Phosphorus nutrition and water deficits in field-grown soybeans[J]. Plant and Soil, 1998, 207(1): 87- 96.
- [10] 李志刚,谢甫绶,宋书宏,等. 作物不同基因型的磷素营养研究进展[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版),2002,17(4):307-312. (Li Z G, Xie F T, Song S H, et al. Reserch progress of different crops genotypes phosphorus nutrition [J]. Journal of Inner Mongolia University for Nationalities (Natural Sciences),2002,17(4):307-312. )
- [11] 周蓉,涂赣英,沙爱华,等. 大豆种质的倒伏性调查及其相关农艺性状分析[J]. 大豆科学,2007,26(1):41-44. (Zhou R,Tu G Y,Sha A H, et al. Analysis of lodging and some related agronomic characiters in soybean germplasm[J]. Soybean Science, 2007,26(1):41-44. )
- [12] Duan C R,Wang P Q. Relationship between the minute structure and lodging resistance of rice stems[J]. Colloides Surface,2004,53:155-158.
- [13] Berry P M,Spin K J,Sterling. Methods for rapidly measuring the lodging resistance of wheat cultivars[J]. Journal of Agronomy and Crop Science,2003,189:390-401.
- [14] 郭凯. 磷、钾素营养对套作大豆钾素积累分配和植株抗倒性能的影响[D]. 成都:四川农业大学,2009. (Guo K. Phosphorus, potassium nutrition potassium accumulation and distribution intercropped soybeans and plant lodging properties [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University,2009. )
- [15] 蔡柏岩,葛普萍,金惠玉,等. 磷素水平对不同大豆品种钾素吸收效率的影响[J]. 大豆科学,2006,25(1):42-47. (Cai B Y,Ge B P,Jin H Y, et al. The effect on phosphorus amount to potassium absorb efficiency of different soybean cultivars [J]. Soybean Science,2006,25(1):42-47. )
- [16] 蔡柏岩,葛普萍,祖伟. 磷素水平对不同大豆品种氮素营养的影响[J]. 中国油料作物学报,2006,28(2):156-161. (Cai B Y,Ge B P,Zu W. The effect of phosphorus level on nitrogen uptake of different soybean varieties [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2006,28(2):156-161. )
- [17] 刘志明,王培秋,简自强,等. 大豆推荐施肥技术[J]. 吉林农业,2011(4):140-149. (Liu Z M,Wang P Q,Jian Z Q, et al. Soybean recommended fertilization technology [J]. Jilin Agriculture,2011(4):140-149. )
- [18] Hanway J J,Weber C R. Accumulation of N,P and K by soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) plants[J]. Agronomy Journal,1971,63:406-408.
- [19] 高聚林,刘克礼,张永平,等. 春小麦磷素吸收、积累与分配规律的研 究[J]. 麦类作物学报,2003,23(3):107-112. (Gao J L, Liu K L,Zhang Y P, et al. Study on principle of P assimilation, accumulation and distribution of spring wheat [J]. Acta Tritical Crops,2003,23(3):107-112. )
- [20] 王海英,谢甫绶,张惠君,等. 施肥对不同来源大豆品种磷素积累分配的影响[J]. 大豆科学,2009,28(1):108-112. (Wang H Y,Xie F T,Zhang H J, et al. Effect of fertilization level on phosphorus accumulation and distribution of soybean cultivars from different regions [J]. Soybean Science,2009,28(1):108-112. )
- [21] 王应祥,寥红,严小龙. 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,Yan X L. Preliminary studies on the mechanisms of soybean in adaptation to low P stress [J]. Soybean Science,2003,22(3):208-212. )
- [22] Ham G E. Influence of fertilizer placement on yield response of soybean[J]. Agronomy Journal,1973,65:81-84.
- [23] Itandall G W,Evans S D,Eagavara P T K, et al. Effect on corn and soybean yields and plant P and K concentrations[J]. Journal of Production Agriculture,1997,10(4):572-580.
- [24] 滕云,张忠学,魏永霞,等. 不同氮磷钾配比对东北半干旱区大豆产量及土壤水分的影响[J]. 东北农业大学学报,2005,36(3):273-279. (Teng Y,Zhang Z X,Wei Y X, et al. Effect of soybean yield and soil water in semiarid district of northeast under the different ratios of N,P and K [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2005,36(3):273-279. )
- [25] 赵艳玲. 施磷量对大豆不同生育时期水分胁迫补偿效应的研究[D]. 赤峰:内蒙古农业大学,2006. (Zhao Y L. Effect of phosphorus application on soybean (*Glycine max* L. Merr.) in different growth stages of water stress [D]. Chifeng: Inner Mongolia Agricultural University,2006. )
- [26] 魏自民,王世平,席北斗,等. 富磷垃圾肥对大豆营养及产量品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2006,12(2):282-284. (Wei Z M,Wang S P,Xi B D, et al. Effect of P-enriched municipal solid waste compost on nutrient accumulation and seed quality in soybean[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science,2006,12(2):282-284. )
- [27] 蔡柏岩,葛普萍,祖伟. 施磷水平对不同基因型大豆品种硝酸还原酶活性影响[J]. 大豆科学,2007,26(3):360-362. (Cai B Y,Ge Z P,Zu W. The affection of phosphours level to different genotype soybean nitrate reductase (NR) activities[J]. Soybean Science,2007,26(3):360-362. )
- [28] 黄亚群,马文奇. 旱作豌豆磷肥效应研究[J]. 河北农业大学学报,1994,17(增刊):58-61. (Huang Y Q,Ma W Q. The effect of phosphoric fertilizer on growth and root distribution of bea under rainfed condition [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 1994,17(S):58-61. )
- [29] 曲东,王保莉,山仑. 水分胁迫下磷对玉米叶片光合色素的影响[J]. 西北农业大学学报,1996,24(4):94-98. (Qu D,Wang B L,Shan L. Effect of water stress phosphorus on photosynthetic pigments of maize leaves [J]. Acta Universitatis Agricultural Borealioccidentalis, 1996,24(4):94-98. )
- [30] 钟鹏,朱占林,李志刚,等. 干旱和低磷胁迫对大豆叶保护酶活性的影响[J]. 中国农学通报,2005,21(2):153-154,204. (Zhong P,Zhu Z L,Li Z G, et al. Effects of low-phosphorus and drought stress on protective enzyme activity of soybean[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005,21(2):153-154,204. )
- [31] 潘晓华,刘水英,李锋,等. 低磷胁迫对不同水稻品种叶片膜

脂过氧化及保护酶活性的影响[J]. 中国水稻科学,2003,17(1):57-60. (Pan X H, Liu S Y, Li F, et al. Effect of low-phosphorus stress on membrane lipid peroxidation and protective enzyme activities in rice leaves of different cultivars [J]. Chinese Journal of Rice Science,2003,17(1):57-60. )

[32] Terry N, Ulrieh A. Effects of potassium defieieney on the photos thesis and respiration of leaves of sugar beet under conditions of low sodium supply [J] . Plant Physiology, 1973, 51 ( 6 ) : 1099-1101.

[33] 余松烈. 作物栽培学(北方本) [M]. 北京:农业出版社, 1980:102-108. (Yu S L. Crop cultivation (North) [M]. Beijing: Agriculture Press, 1980:102-108. )

[34] 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. ( Wang S Q, Han X Z, Yan J, et al. Impact of phosphorus deficiency stress on root morphology, nitrogen concentration and phosphorus accumulation of soybean (*Glycine max* L. ) [J]. Chinese Journal of Soil Science,2010,41(3):644-650. )

[35] 丁玉川,陈明昌,程滨,等. 磷营养对不同大豆品种生长和磷吸收利用效率的影响[J]. 华北农学报,2006,21(1):121-124. ( Ding Y C, Chen M C, Cheng B, et al. Effect of phosphorus on plant growth and phosphorus uptake and use efficiency in different soybean cultivars[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, ,2006,21(1):121-124. )

[36] 赵华,徐森,石磊. 植物根系形态对低磷胁迫应答的研究进展 [J]. 植物学通报,2006, 23(4):409-417. ( Zhao H, Xu S, Shi L. Advances in plant root morphology adaptability to phosphorus deficiency stress [J]. Chinese Bulletin of Botany,2006, 23(4): 409-417. )

[37] 丁洪,李生秀. 大豆品种耐低磷和对磷肥效应的遗传差异 [J]. 植物营养与肥料学报,1998,4(3):257-263. ( Ding H, Li S X. Genetic difference of response of soybean cultivars to low phos-

phorus stress and phosphorus fertilizer [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science,1998,4(3):257-263. )

[38] 胡根海,章建新,唐长青. 北疆春大豆生长动态及干物质积累与分配[J]. 新疆农业科学,2002,39(5):264-267. ( Hu G H, Zhang J X, Tang C Q. Growth changing and dry matter accumulation and distribution in spring soybean Beijiang [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2002,39(5):264-267. )

[39] 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. )

[40] 程凤娟,涂攀峰,严小龙,等. 酸性红壤中磷高效大豆新种质的磷营养特性[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(1):71-81. ( Cheng F X, Tu P F, Yan X L, et al. Phosphorus nutrition characters for new soybean germplasm with high phosphorus efficiency in acidic red soils [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science,2010, 16(1):71-81. )

[41] 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. Phosphorus nutrition and fertilization of soybean [J]. Scientia Agricultura Sinica,1963(11):41-44. )

[42] 乔振江,蔡昆争,骆世明. 低磷和干旱胁迫对大豆植株干物质积累及磷效率的影响[J]. 生态学报,2011,31(19):5578-5586. ( Qiao Z J, Cai K Z, Luo S M. Interactive effects of low phosphorus and phosphorus efficiency of soybean plants[J]. Acta Ecologica Sinica,2011,31(19):5578-5586. )

[43] Kutama A S, Aliyu B S, Saratu A O. Influence of phosphorus fertilizer on the development of root nodules in cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) and soybean (*Glycine max* L. Merrill) [J]. International Journal of Pure and Applied Sciences, 2008, 2 ( 3 ) : 27-31.

(上接第 170 页)

[11] Astrup T, Mullertz S. The fibrin plate method for estimating fibrinolytic activity [J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 1952,40(2):346-351.

[12] 马明,杜金华,于玲,等. 高纳豆激酶酶活枯草芽孢杆菌的筛选及菌种鉴定[J]. 中国食物与营养, 2006(8):29-32. ( Ma M, Du J H, Yu L, et al. Screening and identification of *Bacillus subtilis* strains with high activity of Nattokinase-producing [J]. Food and Nutrition in China, 2006(8):29-32. )

[13] 马明,杜金华,王囡,等. 一株产纳豆激酶菌株的分离筛选及鉴定[J]. 食品与发酵工业, 2007, 33(5):37-41. ( Ma M, Du J H, Wang N, et al. Indentification and screening of a strain of high nattokinase [J]. Food and Fermentation Industries, 2007, 33(5):37-41. )

[14] Stackebrandt E, Goebel B M. Taxonomic note: A place for DNA-DNA reassociation and 16S rRNA sequence analysis in the present species definition in bacteriology[J]. International Journal of Systematic Bacteriology,1994,44:846-849.

[15] 袁慎亮,邢德明,窦少华,等. 一株产纤溶酶菌株的分离鉴定及其纤溶组分分析[J]. 微生物学通报, 2014, 41(9):1843-1849. ( Yuan S L, Xing D M, Dou S H, et al. Isolation and i-

dentification of a fibrinolytic enzyme producing bacterium and its analysis of the fibrinolytic components [J]. Microbiology, 2014, 41(9):1843-1849. )

[16] 李小东,王成涛,赵磊,等. 纤溶豆豉的制备及其对小鼠溶栓效果的评价[J]. 食品科学,2012,33(3):228-231. ( Li X D, Wang C T, Zhao L, et al. Preparation of fibrinolytic douchi and evaluation of its thrombolytic effectiveness *in vivo* [J]. Food Science, 2012,33(3):228-231. )

[17] 袁军,谢声勇,沈榕强,等. 溶栓酶体内溶栓作用初探及其胶囊剂的制备[J]. 中国农学通报,2012,28(35):59-64. ( Yuan J, Xie S Y, Shen R Q, et al. Primary studies on fibrinolytic function of fibrinolysis enzyme *in vivo* and preparation of its capsules [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28 ( 35 ) : 59-64. )

[18] 胡少瑾,马世江,高秀丽. 纳乐胶囊治疗急性脑梗死的临床研究[J]. 中国民康医学,2013(6):52-55. ( Hu S J, Ma S J, Gao X L. The clinical study on treatment of acute cerebral infarction with NaLe capsule [J]. Medical Journal of Chinese People's Health, 2013(6):52-55. )