

砂培法模拟磷素营养水平对大豆光合作用和产量的影响

陈国兴,夏玄,吕书财,张喜亭,龚振平

(东北农业大学 农学院,黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要:以大豆品种黑农 48 为试验材料,采用砂培盆栽法,通过在大豆生育期间淋浇不同磷素水平的营养液,研究了施磷素水平对大豆植株光合作用及产量的影响。结果表明:随着大豆的生长 CO₂ 的吸收速率、叶面积、光合速率逐渐增大,CO₂ 的吸收速率和光合速率基本在 R5 时期达到最大值,之后趋于逐渐下降的趋势,呈现单峰曲线变化。CO₂ 的吸收速率、叶面积随着磷素营养水平的增加逐渐增大,但当磷素营养水平达到 21 mg·L⁻¹时,再提高磷素水平对其已无明显作用。低磷胁迫(P_i 处理)大豆生育中前期的光合速率明显降低,低磷胁迫后再供给较高的磷素营养对大豆光合速率有一定的激活效应,使光合速率增大。大豆株高、粒数、节数和产量都随着磷素营养水平的上升呈现逐渐增高的趋势,当磷素营养水平达到 21 mg·L⁻¹时,再增加磷素营养对大豆株高和产量已无影响。低磷胁迫后再供给较高的磷素营养水平对大豆产量有一定的恢复作用。在营养生长阶段,如果缺磷极易减产,低磷胁迫时间越长产量越低。

关键词:大豆;磷素营养水平;光合速率;CO₂ 吸收速率;产量

中图分类号:S565.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.11861/j.issn.1000-9841.2017.04.0575

Effects of Phosphorus Nutrition on Photosynthesis and Yield of Soybean by Sanding Method

CHEN Guo-xing, XIA Xuan, LYU Shu-cai, ZHANG Xi-ting, GONG Zhen-ping

(Agronomy College of Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to clear the effect of phosphorus application on the photosynthesis and yield of soybean, Heinong 48 was taken as material and different phosphorus levels nutrient solutions were sprayed during growth period under sand cultivation condition. The results showed that the CO₂ absorption rate, leaf area and photosynthetic rate increased with the growth of soybean. The CO₂ absorption rate and photosynthetic rate reached the maximum at R5 stage, and then gradually decreased, showed a single peak curve. The CO₂ absorption rate and leaf area of soybean increased with the increase of phosphorus nutrient level. However, when the phosphorus level reached 21 mg·L⁻¹, the increase of phosphorus level had no significant effect. The photosynthetic rate of soybean during early growth stage was significantly decreased under low P stress (P_i treatment), The higher P supply after low P stress had a certain effect on the photosynthetic rate of soybean, and the photosynthetic rate increased. The plant height, the number of grains, the number of nodules and the yield of soybean increased with the increasing of phosphorus nutrient level. When the phosphorus level reached 21 mg·L⁻¹, the increase of phosphorus nutrition had no effect on plant height and yield of soybean. Phosphorus supply after high phosphorus stress could restore the soybean yield to some extent. In the vegetative growth stage, if the phosphorus deficiency the yield was very easy to cut, and the longer the phosphorus stress, the lower the yield.

Keywords: Soybean;Phosphorus nutrient level;Photosynthetic rate;CO₂ absorption rate; Yield

较高的光合生产力是大豆获得高产的生理基础。国内外学者对于光合作用对大豆产量的影响进行了较为全面的研究。庄波等^[1]通过新老品种对比研究发现,新品种叶片的光合速率高于老品种,特别是新品种冠层下部的光合速率明显高于老品种,是新品种产量提高的主要因素。石连旋等^[2]研究表明,新品系与亲本材料相比,具有特异的花序性状和叶片着生态势,并且新品系的光合速率在各个时期均高于亲本,在生殖生长期差异更显著,从而降低了大豆花荚脱落率,提高了产量。杜维广等^[3]通过多品种比较研究表明,生育期相近的品种(系),结荚期光合速率与产量呈正相关。郑殿君等^[4]研究表明,高产大豆品种叶片叶绿素含量和光合速率均高于低产大豆品种,大豆产量与叶片光合速率之间呈显著正相关。磷素在作物光合作用中具有重要的生理作用,Terry 等^[5]对苗期甜菜进行低磷处理,使叶片中 1,5 - 二磷酸核酮糖水平较对照降低了 60% ~ 69%。Mikulska 等^[6]在温室中对菜豆进行低磷处理,处理 18 d 后,叶片的光合速率较对照降低了 50%。Fredeen 等^[7]认为,低磷胁迫会明显降低大豆叶片 5 - 磷酸核酮糖激酶的初始活性,从而减少光合作用中碳转化为淀粉的生物合成。钟鹏等^[8]研究表明,磷浓度增加会增强大豆光合作用底物 CO₂ 的气孔导度和叶片的光合速率。

收稿日期:2017-02-10
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(GA14B101)。
第一作者简介:陈国兴(1990 -),男,硕士,主要从事大豆栽培生理研究。E-mail: chengx28@sina.cn。
通讯作者:龚振平(1966 -),男,教授,博导,主要从事大豆栽培生理及保护性耕作研究。E-mail: gzpyx2004@163.com。

刘婧琦等^[9]认为,与低磷处理相比,中磷和高磷处理下供试大豆品种的净光合速率均有所增加。综上所述,磷素营养的变化会显著影响作物的光合作用,从而影响产量的形成。但关于不同供磷水平以及生长发育过程中由低磷变高磷、高磷变低磷处理对大豆光合速率及产量的影响缺少系统研究。

磷肥施入土壤后极易被固定^[10],在田间或土壤盆栽试验很难控制速效磷水平,而采用砂培淋浇营养液的方法^[11-13]可以准确控制速效磷供应水平。本试验采用砂培淋浇营养液的方法,模拟不同磷素营养水平对大豆光合作用及产量的影响,为大豆磷素营养调控和科学施磷提供理论依据与参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2015-2016年在东北农业大学院内进行。品种为黑农48,于5月15日播种,保苗4株。试验采用江砂盆栽,选用内径为30 cm、深度为28 cm的塑料桶,在桶底钻直径为1 cm的孔。每盆装砂量为20 kg,江砂在装盆前用水洗净,置于防雨棚内,防止雨淋。试验设置4个磷素水平(2016年进行),营养液磷浓度分别为1 mg·L⁻¹(P₁)、11 mg·L⁻¹(P₁₁)、21 mg·L⁻¹(P₂₁)和31 mg·L⁻¹(P₃₁),于大豆全生育期处理。营养液的养分浓度及配制参考吴冬婷等^[11]的方法。P₁:KH₂PO₄、K₂SO₄、KCl含量分别为4.39,42.00和36.00 mg·L⁻¹;P₁₁:KH₂PO₄、K₂SO₄、KCl含量分别为48.26,28.00和24.00 mg·L⁻¹;P₂₁:KH₂PO₄、K₂SO₄、KCl含量分别为92.13,14.00和12.00 mg·L⁻¹;P₃₁:KH₂PO₄、K₂SO₄、KCl含量分别为136.00,0和0 mg·L⁻¹。营养液中(NH₄)₂SO₄、MgSO₄、CaCl₂、Na₂MoO₄·H₂O、CuSO₄·5H₂O、ZnSO₄·7H₂O、MnCl₂·4H₂O、H₃BO₃、FeSO₄·7H₂O含量分别为235.80,240.00,220.00,0.03,0.08,0.22,4.90,2.86,1.12 mg·L⁻¹。

大豆生育期间变磷处理(2015年进行),先低磷后高磷处理:VE~V4期浇P₁营养液,V4~R8期浇P₃₁营养液记为V₄P₁₋₃₁;VE~R2期浇P₁水平营养液,R2~R8期浇P₃₁水平营养液记为R₂P₁₋₃₁。先高磷后低磷处理:出苗至V4期浇P₃₁营养液,V4~R8期浇P₁营养液记为V₄P₃₁₋₁;出苗至R2期浇P₃₁营养液,R2~R8期浇P₁营养液记为R₂P₃₁₋₁。

从播种开始至对生真叶完全展开前,每天浇灌1次蒸馏水,每盆500 mL;从对生真叶完全展开后每天每盆浇灌1次500 mL对应营养液;在大豆生长旺盛期,每天浇灌2次营养液,每盆每次500 mL;为了

防止沙培中积累过多的盐分,每隔3 d每盆用1 L蒸馏水浇灌1次。在大豆V3期,进行根瘤菌接种。

1.2 测定项目与方法

磷素营养水平试验分别在V4、R2、R4、R5、R6期测定光合速率。变磷处理试验根据天气情况每隔3~5 d测定1次,连续测定3次。测定时间一般于上午9:00左右开始,每个处理选择长势均匀一致的4盆大豆,测定完光合后取样测叶面积。

1.2.1 光合速率 采用本研究室制作的大豆整株光合速率测定装置^[14]。该装置由底座、光照箱、箱内气体混合动力装置及气体输出测定装置4部分组成。底座选用钢制材质,用于放置待测的大豆材料,底座上有水封槽,用于插入光照箱及密封箱体;光照箱是用透明有机玻璃制成的封闭圆柱体,内壁设有3个风扇;光照箱的一侧中间偏上方有进气孔,另一侧中间偏下方有出气孔,用软管依次连接出气孔、气泵、干燥装置、CO₂分析仪(SI51型便携式CO₂分析仪,加拿大)及进气孔。测定时,先将待测大豆盆一同放入底座内,将光照箱放入底座后立刻开启装置,30 s后记录时间,并读取光照箱中CO₂浓度作为初始值,3 min后再读取CO₂浓度,作为测定的结束值,同时测定箱内空气温度和气压。

1.2.2 CO₂吸收速率 采用SI51型便携式CO₂分析仪进行测定。

1.2.3 叶面积 测定光合速率后的植株,收集全部绿色叶片,选择50片长势良好且没有损坏的叶片用打孔器打孔,将打下来的叶片分别收集于铝盒中,叶片在105℃杀青30 min后,65℃烘干并称重,计算叶面积。

1.3 数据分析

采用SPSS 17.0和Excel 2007进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 磷素营养水平对大豆光合作用的影响

2.1.1 CO₂吸收速率 由表1可见,大豆生育期间CO₂吸收速率呈现单峰曲线变化,在R5期CO₂吸收速率趋于最大值,之后逐渐降低。P₁处理CO₂的吸收速率显著低于P₁₁、P₂₁、P₃₁处理,说明低磷处理显著降低大豆CO₂吸收速率。P₁₁处理CO₂的吸收速率低于P₂₁、P₃₁处理,除V4期P₁₁与P₂₁差异不显著外,其它时期均达到差异显著性,而P₂₁与P₃₁处理之间无显著性差异。说明当磷素营养水平达到P₂₁(21 mg·L⁻¹)时,再提高磷素水平对提高CO₂吸收速率已无明显作用。

表 1 磷素营养水平对大豆 CO₂ 吸收速率的影响

Table 1 Effects of phosphorus nutrition levels on CO ₂ absorption rate of soybean (μmol·min ⁻¹ ·4plants ⁻¹)				
开始时期 Starting period	磷素营养水平 Phosphorus nutrition levels			
	P ₁	P ₁₁	P ₂₁	P ₃₁
V4	3. 83 ±0. 36 c	16. 93 ±1. 30 b	21. 97 ±0. 80 ab	25. 22 ±2. 60 a
R2	18. 92 ±1. 76 c	43. 95 ±4. 13 b	80. 55 ±1. 05 a	79. 67 ±2. 41 a
R4	32. 15 ±2. 69 c	88. 56 ±2. 04 b	158. 73 ±11. 20 a	144. 62 ±3. 05 a
R5	48. 21 ±5. 96 c	126. 69 ±7. 33 b	159. 57 ±7. 55 a	162. 50 ±4. 83 a
R6	40. 30 ±3. 21 c	64. 51 ±7. 21 b	103. 31 ±4. 56 a	108. 34 ±10. 51 a

同行不同字母表示差异显著性($P < 0.05$),下同。
The different letters in the same row indicate significant differences ($P < 0.05$), the same below.

表 2 是大豆生育期间改变磷素营养水平后,大豆 CO₂ 吸收速率的变化情况。由表 2 可见,P₁ 与 P₃₁处理比较,在 V4 和 R2 期开始的两个试验阶段都表现出显著差异,从而表明低磷处理显著降低大豆 CO₂ 吸收速率。

从 V4 期开始,由低磷变为高磷处理(P₁₋₃₁),处理 4 d 后 CO₂ 吸收速率明显高于 P₁ 处理,而随着处理时间的增加而提高,但处理到 15 d 仍低于 P₃₁ 处理。在 R2 期开始由低磷变高磷处理的 CO₂ 吸收速率变化趋势与 V4 期开始处理基本一致,只是在处理 5 d 时 CO₂ 吸收速率未达到显著性差异。说明低磷胁迫后供给较高的磷素营养可以显著提高 CO₂ 的吸收速率,但要达到 P₃₁ 处理下的 CO₂ 吸收速率水

平需要一个很长的过程。在 V4 期开始处理阶段,由高磷变为低磷处理(P₃₁₋₁),在处理 4,10 d 时与 P₃₁处理下的 CO₂ 吸收速率比较无显著性差异,当处理 15 d 时 CO₂ 的吸收速率显著性低于 P₃₁ 处理,但仍明显高于 P₁ 和 V₄P₁₋₃₁ 处理。在 R2 期开始由高磷变低磷处理的 CO₂ 吸收速率显著低于 P₃₁ 处理,同样明显高于 P₁ 和 R₂P₁₋₃₁ 处理。表明在较高的磷素水平下的大豆低磷胁迫处理,在一定程度上显著降低 CO₂ 吸收速率,但由于前期的高磷处理使大豆积累了较大的叶面积,使 CO₂ 的吸收速率相对低磷处理条件下仍然处于较高的水平;而且也表明 R2 期大豆植株对低磷胁迫更敏感。

表 2 变磷处理对大豆 CO₂ 吸收速率的影响

Table 2 Effect of variable phosphorus treatment on CO ₂ absorption rate of soybean (μmol·min ⁻¹ ·4plants ⁻¹)					
开始时期 Starting period	处理天数 Treatment days/d	变磷处理 Variable phosphorus treatments			
		P ₁	P ₁₋₃₁	P ₃₁₋₁	P ₃₁
V4	4	10. 06 ±1. 87 c	21. 73 ±1. 25 b	77. 01 ±1. 32 a	71. 29 ±2. 88 a
	10	16. 77 ±3. 22 c	61. 35 ±4. 27 b	144. 94 ±11. 29 a	158. 3 ±13. 84 a
	15	20. 35 ±2. 42 d	73. 58 ±2. 36 c	118. 28 ±13. 71 b	167. 42 ±7. 75 a
R2	5	20. 35 ±2. 42 c	21. 66 ±3. 52 c	110. 17 ±9. 84 b	158. 97 ±1. 69 a
	12	30. 93 ±4. 15 d	79. 81 ±3. 34 c	294. 47 ±6. 22 b	327. 35 ±9. 11 a
	17	37. 58 ±1. 32 d	89. 63 ±1. 87 c	266. 47 ±12. 99 b	316. 64 ±17. 33 a

2. 1. 2 叶面积 叶面积是反映作物长势的一个重要生理学参数,与光合速率共同决定着大豆植株同化 CO₂ 的能力。由表 3 可见,4 个磷素营养水平处

理随着大豆的生长叶面积逐渐增加;而且随着磷素营养水平的增加叶面积增大。

P₁ 处理下大豆的叶面积显著低于 P₁₁、P₂₁、P₃₁

处理,说明在 P_1 磷素营养水平下显著降低了大豆的叶面积。 P_{11} 处理大豆的叶面积明显低于 P_{21} 和 P_{31} 处理,除在 V4 期 P_{11} 与 P_{21} 无显著差异外,在其它时期均达到显著性差异。在 V4 和 R4 期表现出 P_{21} 处

理下大豆的叶面积显著低于 P_{31} 处理,其它时期无显著性差异。说明当磷素营养水平达到 P_{21} ($21\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 时,再增加磷素营养对增加大豆叶面积作用不明显。

表 3 磷素营养水平对大豆叶面积的影响
Table 3 Effects of phosphorus nutrition levels on the leaf area of soybean ($1.0\times10^{-2}\text{ m}^2\cdot4\text{plants}^{-1}$)

开始时期 Starting period	磷素营养水平 Phosphorus nutrition levels			
	P_1	P_{11}	P_{21}	P_{31}
V4	$2.88\pm0.14\text{ c}$	$4.64\pm0.50\text{ b}$	$5.00\pm0.46\text{ b}$	$6.64\pm0.54\text{ a}$
R2	$6.03\pm0.70\text{ c}$	$10.85\pm0.25\text{ b}$	$18.86\pm0.40\text{ a}$	$20.51\pm1.30\text{ a}$
R4	$6.40\pm0.35\text{ d}$	$19.13\pm1.54\text{ c}$	$25.42\pm0.88\text{ b}$	$29.47\pm0.57\text{ a}$
R5	$10.28\pm0.48\text{ c}$	$22.47\pm2.35\text{ b}$	$30.94\pm2.71\text{ a}$	$31.82\pm1.39\text{ a}$
R6	$9.30\pm0.32\text{ c}$	$23.27\pm2.98\text{ b}$	$40.22\pm2.82\text{ a}$	$39.27\pm1.03\text{ a}$

表 4 是大豆生育期间改变磷素营养水平后,大豆叶面积的变化情况。由表 4 可见, P_1 与 P_{31} 处理比较,在 V4 和 R2 期两个阶段的大豆叶面积都表现出显著性的差异,低磷处理显著降低了大豆的叶面积。

在 V4 期开始,由低磷变高磷处理(P_{1-31}),在处理 4 d 后叶面积无显著性增加,处理 10 d 后大豆叶面积明显高于 P_1 处理,并且随着处理时间的增加而提高,但在处理 15 d 时仍明显低于 P_{31} 处理。在 R2 期开始,由低磷变高磷处理的大豆叶面积表现为 P_{1-31} 处理的大豆叶面积高于 P_1 处理,在处理 17 d 后达到了差异显著性水平。表明低磷胁迫后再供

给较高的磷素营养水平可以显著提高大豆的叶面积,也间接说明磷素营养水平对大豆叶面积的影响是营养生长阶段大于生殖生长阶段。 P_{31} 与 P_{31-1} 处理相比较,在 V4 期开始由高磷变低磷处理(P_{31-1}),仅在处理 15 d 后表现为 P_{31-1} 处理下的大豆叶面积显著低于 P_{31} 处理。在 R2 期开始处理,在处理 12 d 后表现为 P_{31-1} 处理下的大豆叶面积显著低于 P_{31} 处理。在一定程度上可以间接表明,在大豆生育期间进行低磷胁迫,由于前期的磷素积累作用使得叶面积仍处于较高状态,一段时间后才逐渐表现缺磷症状,对低磷的敏感性较低。

表 4 变磷处理对大豆叶面积的影响
Table 4 Effect of variable phosphorus treatment on the leaf area of soybean ($1.0\times10^{-2}\text{ m}^2\cdot4\text{plants}^{-1}$)

开始时期 Starting period	处理天数 Treatment days/d	变磷处理 Variable phosphorus treatments			
		P_1	P_{1-31}	P_{31-1}	P_{31}
V4	4	$4.90\pm0.32\text{ b}$	$5.19\pm0.44\text{ b}$	$26.52\pm1.08\text{ a}$	$27.23\pm2.38\text{ a}$
	10	$4.94\pm0.40\text{ c}$	$13.26\pm1.59\text{ b}$	$49.12\pm1.52\text{ a}$	$44.67\pm2.95\text{ a}$
	15	$6.77\pm0.49\text{ d}$	$21.31\pm0.73\text{ c}$	$42.80\pm1.59\text{ b}$	$53.24\pm1.72\text{ a}$
R2	5	$7.46\pm0.77\text{ b}$	$5.51\pm0.70\text{ b}$	$53.56\pm4.61\text{ a}$	$53.24\pm1.72\text{ a}$
	12	$7.53\pm0.92\text{ c}$	$14.78\pm0.35\text{ c}$	$71.86\pm0.27\text{ b}$	$83.96\pm7.68\text{ a}$
	17	$9.03\pm0.32\text{ c}$	$20.3\pm0.97\text{ b}$	$76.01\pm5.04\text{ a}$	$84.42\pm3.49\text{ a}$

2.1.3 光合速率 光合作用对作物生长起着决定性的作用,光合速率反映了单位叶面积的光合能力。由表 5 可见,随着大豆的生长光合速率逐渐增大,基本在 R5 期达到最大值,之后为逐渐下降的趋势,与 CO₂ 吸收速率的变化趋势基本相同,同样呈现单峰曲线变化。

P₁ 处理的大豆光合速率与其它处理相比较,在 V4 和 R5 期,P₁ 处理的光合速率显著低于 P₁₁、P₂₁、P₃₁ 处理,其它时期没表现出明显的规律性,表明低磷胁迫显著降低大豆生育中前期的光合速率。在 R6 期,P₁ 处理的光合速率反而高于其它高磷处理。可能是磷素营养水平越低的处理,其生育期略微延长的结果。

表 6 是大豆生育期间改变磷素营养水平后,大豆光合速率的变化情况。由表 6 可知,在 V4 期开始处理,P₁ 与 P₃₁ 处理相比较,除处理 4 d 后无显著差异外,之后 P₁ 处理的大豆光合速率显著低于 P₃₁

处理。在 R2 期开始处理的大豆光合速率变化趋势与 V4 期开始处理基本相一致。

在 V4 处理阶段,由低磷变高磷处理(P₁₋₃₁)的大豆光合速率显著高于 P₁ 处理,在 R2 期开始处理的大豆光合速率变化趋势与 V4 期开始处理基本相一致。在 V4 期开始处理,P₁₋₃₁ 处理的大豆光合速率除在处理 4 d 后明显高于 P₁ 和 P₃₁ 处理外,之后直到 15 d 与 P₃₁ 处理都无明显差异,而在 R2 期开始处理的大豆光合速率,在处理阶段 P₁₋₃₁ 处理始终显著高于 P₃₁ 处理。说明低磷胁迫后再供给较高的磷素营养水平对大豆光合速率有一定的促进作用,使光合速率增大,一段时间后又恢复高磷水平下的稳定状态。由高磷变低磷处理(P₃₁₋₁)与 P₃₁ 处理比较,在 V4 和 R2 期,其光合速率均无显著性差异。可能是前期的高磷处理对之后的一段低磷生长阶段有部分的磷素回补作用,使大豆光合速率在一段时间内不会降低,反而有增加的趋势。

表 5 磷素营养水平对大豆光合速率的影响
Table 5 Effects of phosphorus nutrition levels on photosynthetic rate of soybean (μmol·s⁻¹·m⁻²)

开始时期 Start period	磷素营养水平 Phosphorus nutrition levels			
	P ₁	P ₁₁	P ₂₁	P ₃₁
V4	1.95 ± 0.30 b	5.63 ± 0.13 a	6.46 ± 1.24 a	6.8 ± 0.92 a
R2	5.31 ± 0.38 b	6.73 ± 0.52 a	7.13 ± 0.15 a	6.66 ± 0.42 a
R4	7.56 ± 0.59 b	7.83 ± 0.50 b	9.74 ± 0.47 a	8.07 ± 0.18 b
R5	7.94 ± 0.65 b	11.09 ± 0.89 a	8.95 ± 0.36 b	8.56 ± 0.44 b
R6	7.22 ± 0.51 a	5.52 ± 0.24 b	4.50 ± 0.25 b	4.70 ± 0.18 b

表 6 变磷处理对大豆光合速率的影响
Table 6 Effect of variable phosphorus treatment on photosynthetic rate of soybean (μmol·s⁻¹·m⁻²)

开始时期 Start period	处理天数 Treatment days/d	变磷处理 Variable phosphorus treatments			
		P ₁	P ₁₋₃₁	P ₃₁₋₁	P ₃₁
V4	4	3.77 ± 0.75 b	7.03 ± 0.20 a	4.87 ± 0.27 b	5.24 ± 0.62 b
	10	3.85 ± 0.84 b	8.16 ± 0.83 a	6.07 ± 0.38 a	7.15 ± 0.95 a
	15	4.55 ± 0.35 b	6.05 ± 0.20 a	4.62 ± 0.52 b	5.33 ± 0.24 ab
R2	5	4.55 ± 0.35 b	6.75 ± 0.44 a	4.12 ± 0.78 b	5.07 ± 0.27 b
	12	6.21 ± 0.16 c	9.00 ± 0.31 a	6.83 ± 0.13 bc	7.23 ± 0.54 b
	17	7.12 ± 0.19 ab	7.35 ± 0.45 a	6.06 ± 0.53 ab	5.62 ± 0.60 b

2.2 磷素营养水平对大豆产量的影响

由表 7 可见,大豆株高、粒数、节数和产量都随着磷素营养水平的上升呈现逐渐增高的趋势,P₁ 处理的大豆各指标明显低于 P₁₁、P₂₁、P₃₁ 处理,说明低磷胁迫显著影响大豆生长,但 P₂₁ 处理水平下的大豆

株高和产量与 P₃₁ 处理差异不显著,表明磷素营养水平达到 21 mg·L⁻¹ 时,再增加磷素营养对大豆株高和产量已无影响。P₁ 处理的大豆百粒重显著低于 P₂₁、P₃₁ 处理,但与 P₁₁ 处理比较无显著性差异。一定程度上表明低磷胁迫显著降低大豆的百粒重。

表 7 磷素营养水平对大豆产量构成因素的影响
Table 7 Effects of phosphorus nutrition levels on yield components of soybean

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	节数 Nodes number	单株粒数 Seeds number per plant	百粒重 100-seed weight/g	产量 Yield /(g·pot ⁻¹)
P ₁	34.44 ± 0.96 c	10.9 ± 0.29 c	16.38 ± 1.85 d	24.88 ± 1.00 b	18.21 ± 3.28 c
P ₁₁	59.34 ± 1.84 b	13.5 ± 0.18 b	38.00 ± 1.81 c	23.71 ± 0.63 b	35.47 ± 2.13 b
P ₂₁	72.03 ± 2.48 a	13.4 ± 0.36 b	51.47 ± 3.84 b	28.66 ± 1.53 a	62.59 ± 2.71 a
P ₃₁	72.8 ± 2.63 a	14.6 ± 0.25 a	61.58 ± 2.22 a	27.17 ± 0.75 a	62.41 ± 1.53 a

同列不同字母表示差异显著性($P < 0.05$),下同。
The different letters in the same line indicate significant differences ($P < 0.05$), the same below.

表 8 是大豆生育期间改变磷素营养水平后,大豆农艺性状及产量的变化情况。P₁ 处理的大豆株高显著低于 P₃₁ 处理。由低磷变高磷处理(P₁₋₃₁), V4 和 R2 两个时期都显著增高了大豆的株高,但明显低于 P₃₁ 处理;由高磷变低磷处理(P₃₁₋₁),两个阶段的大豆株高与 P₃₁ 处理差异不显著。大豆节数与大豆株高的变化趋势基本一致。由此表明,低磷胁迫对大豆植株营养生长阶段的影响明显大于对大豆植株生殖生长阶段的影响。

从百粒重角度可见,P₁ 处理的大豆百粒重明显低于 P₃₁ 处理。由低磷变高磷处理(P₁₋₃₁), V4 和 R2 期两个阶段的大豆百粒重都相对较高,与 P₃₁ 处理下的大豆百粒重无显著性差异。说明低磷胁迫显著降低大豆的百粒重,对于前期低磷胁迫,在后期能够及时地给予较高的磷素水平营养可以显著增加百粒重,甚至逐渐趋近于 P₃₁ 处理条件下的百粒重水平。由高磷变低磷处理(P₃₁₋₁),在 V4 期开始低磷

胁迫,其百粒重显著低于 P₃₁ 处理,而 R2 期开始低磷胁迫处理的大豆百粒重与 P₃₁ 处理比较无显著性差异。一定程度表明低磷胁迫时间越长,对百粒重的影响越大。

从产量角度分析可见,P₁ 处理的大豆产量显著低于 P₃₁ 处理。由低磷变高磷处理(P₁₋₃₁),在 V4 期开始处理的大豆产量明显高于在 R2 期开始处理的大豆产量,两个处理的大豆产量又明显高于 P₁ 处理,但又显著低于 P₃₁ 处理。说明低磷胁迫后再供给较高的磷素营养水平对大豆产量有一定的促进作用。在营养生长阶段,如果缺磷极易减产,其产值明显低于正常产量标准,低磷胁迫时间越长产量越低。由高磷变低磷处理(P₃₁₋₁),在 V4 和 R2 期开始处理的大豆产量无显著差异性,但明显低于 P₃₁ 处理下的大豆产量水平。大豆粒数与产量的变化趋势基本一致。

表 8 变磷处理对大豆产量构成因素的影响
Table 8 Effect of variable phosphorus treatment on yield components of soybean

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	节数 Nodes number	单株粒数 Seeds number per plant	百粒重 100-seed weight/g	产量 Yield /(g·pot ⁻¹)
P ₁	39.81 ± 2.51 d	12.06 ± 0.39 c	21.56 ± 4.18 c	19.96 ± 0.71 c	14.84 ± 3.08 d
R ₂ P ₁₋₃₁	50.75 ± 2.04 c	13.25 ± 0.10 b	54.00 ± 2.97 b	22.87 ± 0.42 ab	49.4 ± 5.37 c
V ₄ P ₁₋₃₁	57.13 ± 1.76 c	13.5 ± 0.53 b	79.19 ± 1.88 a	22.89 ± 0.38 ab	74.27 ± 2.01 b
V ₄ P ₃₁₋₁	102.63 ± 4.55 a	15.31 ± 0.16 a	41.63 ± 5.82 b	21.49 ± 0.66 bc	38.56 ± 5.72 c
R ₂ P ₃₁₋₁	90.63 ± 3.39 b	14.75 ± 0.23 a	43.38 ± 8.81 b	23.62 ± 0.55 a	41.3 ± 5.20 c
P ₃₁	95.13 ± 4.09 ab	15.5 ± 0.44 a	79.25 ± 3.61 a	24.03 ± 0.64 a	94.8 ± 7.72 a

3 讨论

杜维广等^[3] 对大豆全生育期的研究认为大豆的光合速率在整个生育期中呈双峰曲线变化,其峰值出现在始花期和结荚鼓粒期,但结荚鼓粒期低于

始花期。郑殿君等^[4] 对多品种大豆研究表明,每一个产量水平的大豆品种在整个生育期内光合速率表现为从苗期开始逐渐升高,到结荚期达到最高值,之后开始逐渐下降。本试验研究表明,随着大豆的生长,CO₂ 的吸收速率、叶面积、光合速率逐渐

增大,CO₂ 的吸收速率和光合速率基本在 R₅ 时期达到最大值,之后趋于逐渐下降的趋势,呈现单峰曲线变化。本研究结果与郑殿君等^[4]的研究趋势相一致,而与杜维广等^[3]的研究有差异性,可能是由于测定时期的不同导致的结果。

谢甫绶等^[15]研究指出,施磷对大豆开花期至鼓粒期的光合速率、气孔导度、叶面积指数影响较大,有利于提高光合速率、气孔导度等光合指标,且对生育后期大豆的光合速率、气孔导度等下降速度有减缓作用。钟鹏等^[8]也指出,低磷明显降低了大豆叶片的光合速率和大豆叶面积。在玉米、小麦等作物中也有相似报道,Usuda 等^[16]对玉米进行低磷胁迫处理,处理 20 d 后,光合速率较对照降低了 68%,且随着时间的推移逐渐增大。张建恒等^[17]对小麦的研究指出,缺磷条件下叶绿素含量、气孔导度、光合速率等均大致以磷高效品种最高,中效品种次之,低效品种最低。本试验中,只有磷素营养水平极低的情况下才会对大豆的光合速率产生影响,且对苗期和花期的影响比较明显,当磷素水平达到 P₁₁ (11 mg·L⁻¹) 时,已无明显影响,大豆 CO₂ 吸收速率和叶面积随着磷素营养水平的增加逐渐增大,但当磷素营养水平达到 P₂₁ (21 mg·L⁻¹) 时,再提高磷素水平对提高 CO₂ 吸收速率和叶面积已无明显作用。这表明光合速率对磷的敏感程度较低,但在磷素营养水平较低的情况下明显降低了大豆光合速率,与前人的研究结果基本一致。

本试验中,由高磷变低磷处理 (P₃₁₋₁),处理前期的光合速率与 P₃₁ 处理无显著差异,可能是前期积累的磷在后期有一定的回补作用的结果。由低磷变高磷处理 (P₁₋₃₁),处理前期的光合速率显著高于 P₃₁ 处理,表明大豆植株在低磷胁迫条件下转高磷处理,对光合速率有很强的激活效应,也可能是激活了相关酶活性的关系。Fredeen 等^[7]研究认为,低磷可以降低卡尔文循环酶活性,尤其是大豆叶片 5-磷酸核酮糖激酶的初始活性明显降低,从而减少光合作用中碳转化为淀粉的生物合成。进而可以认为低磷胁迫影响了相关酶活性,导致了光合速率的变化。但也可能是由于低磷限制了叶面积的生长,从而间接影响大豆植株 CO₂ 吸收速率。Chaudhary 等^[18]通过对蚕豆、绿豆、大豆的研究,在结荚期开始,进行低磷与正常磷素处理比较发现,叶片磷含量与叶面积的相关性高于叶片的光合速率。也有研究表明,缺磷引起的气孔因素可能是导致大豆光合速率下降的主要原因^[19]。但从本试验 P₁₋₃₁ 处理条件下 CO₂ 吸收速率和光合速率的变化情况可以推断出,光合相关酶对磷素的应激效应可能高于叶

面积对磷素的应激效应。

王建国等^[20]认为,在有效磷含量很低的土壤中,施磷能够显著增加大豆产量,还能够增加大豆蛋白质含量。本试验表明,全生育期不同磷素水平处理,当磷素营养水平达到 21 mg·L⁻¹ 时,再增加磷素营养对大豆产量已无明显影响,与王建国等^[20]的研究结果有一定的一致性。相关研究认为,开花期前后植株对磷素最为敏感,在此阶段的不良影响,即使在生育后期给予充足的磷素也很难恢复正常,在结荚期以后磷素对植株产量的影响就相对减弱了^[21]。本试验表明,前期低磷胁迫,后期能够及时地给予较高的磷素水平营养,基本能达到正常产量水平;在营养生长阶段,如果缺磷极易减产,其产量值明显低于正常产量标准,低磷胁迫时间越长产量越低。与王维军^[21]的结论基本一致;对于前期高磷处理后期缺磷处理,其产量低于正常产量水平。

4 结 论

随着大豆的生长 CO₂ 的吸收速率、叶面积、光合速率逐渐增大,CO₂ 的吸收速率和光合速率基本在 R₅ 时期阶段达到最大值,之后趋于逐渐下降的趋势,呈现单峰曲线变化。大豆的 CO₂ 的吸收速率、叶面积随着磷素营养水平的增加逐渐增大,但当磷素营养水平达到 P₂₁ (21 mg·L⁻¹) 时,再提高磷素水平对其已无明显作用。对于光合速率的影响则不同,低磷胁迫 (P₁ 处理) 大豆生育中前期的光合速率明显降低,但当磷素水平达到 P₁₁ (11 mg·L⁻¹) 时,已无明显影响。低磷胁迫后再供给较高的磷素营养水平对大豆光合速率有一定的激活效应,使光合速率增大;由高磷变低磷的变化可能是前期的高磷处理对之后的一段低磷生长阶段有部分的磷素回补作用,使大豆光合速率在一段时间内不会降低。大豆株高、粒数、节数和产量都随着磷素营养水平的上升呈现逐渐增高的趋势,当磷素营养水平达到 21 mg·L⁻¹ 时,再增加磷素营养对大豆株高和产量已无影响。低磷胁迫后再供给较高的磷素营养水平对大豆产量有一定的促进作用。在营养生长阶段,如果缺磷极易减产,低磷胁迫时间越长产量越低。

参考文献

- [1] 庄波,徐克章,杜双洋,等. 新、老大豆品种冠层产量和光合作用的比较[J]. 华南农业大学学报, 2010, 31(1): 6-9. (Zhuang B, Xu K Z, Du S Y, et al. Comparison of canopy yield and photosynthesis of new and old soybean varieties [J]. Journal of South China Agricultural University, 2010, 31(1): 6-9.)

[2] 石连旋,苗以农,朱长甫. 大豆光合生理生态的研究第18报不同株型大豆某些生理特性的研究[J]. 大豆科学,2003,22(2):97-101. (Shi L X, Miao Y N, Zhu C P. Preliminary studies on some physiological characters of soybean lines with different plant types[J]. Soybean Science,2003,22(2):97-101.)

[3] 杜维广,王育民,谭克辉. 大豆品种光合活性的差异及其与产量的关系[J]. 作物学报,1982,8(2):131-135. (Du W G, Wang Y M, Tan K H. The relationship between photosynthesis activity and yield of soybean varieties[J]. Acta Agronomica Sinica, 1982,8(2):131-135.)

[4] 郑殿君,张治安,姜丽艳,等. 不同产量水平大豆叶片净光合速率的比较[J]. 东北农业大学学报,2010,41(9):1-5. (Zheng D J, Zhang Z A, Jiang L Y, et al. Comparison of net photosynthetic rate of soybean leaves at different yield levels [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2010, 41 (9): 1-5.)

[5] Terry N. Leaf phosphate status, photosynthesis and carbon partitioning in sugar beet. II. Diurnal changes in sugar phosphates, adenyates, and nicotinamide nucleotides[J]. Plant Physiology, 1989, 90(3):820-826.

[6] Mikulska M, Bomsel J L, Rychter A M. The influence of phosphate deficiency on photosynthesis, respiration and adenine nucleotide pool in bean leaves[J]. Photosynthetica, 1998, 35(1):79-88.

[7] Fredeen A L, Raab T K, Rao I M, et al. Effects of phosphorus nutrition on photosynthesis in *Glycine max* (L.) Merr. [J]. Planta, 1990, 181(3):399-405.

[8] 钟鹏,吴俊江,刘丽君,等. 低磷和干旱胁迫对不同基因型大豆光合生理特性的影响[J]. 大豆科学,2009,28(5):806-810. (Zhong P, Wu J J, Liu L J, et al. Effects of low phosphorus stress and drought stress on photosynthetic physiological characteristics of soybean genotypes with different genotypes [J]. Soybean Science, 2009,28(5):806-810.)

[9] 刘婧琦,谢甫绋,敖雪,等. 磷对不同磷效率大豆品种光合生理和农艺性状的影[J]. 大豆科学,2009,28(2):217-220. (Liu J Q, Xie F T, Ao X, et al. Effect of different phosphorus levels on photosynthetic rate and agronomic traits between soybean cultivars with different phosphorus efficiency [J]. Soybean Science,2009,28(2):217-220.)

[10] Holford I C R. Soil phosphorus: Its measurement, and its up-take by plants [J]. Australian Journal of Soil Research, 1997, 35: 227-239.

[11] 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]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer,2012,18(3):670-677.)

[12] 王晓君,陈慧,张斯文,等. 缺钾胁迫对大豆植株钾素与干物质积累的影响[J]. 中国农学通报,2015,31(21):71-75. Wang X J, Chen H, et al. (Effects of potassium deficiency on potassium and dry matter accumulation in soybean plants [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31 (21): 71-75.)

[13] 董守坤,刘丽君,孙聪姝,等. 利用¹⁵N标记研究氮素水平对大豆根瘤生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2011,17(4):985-988. (Dong S K, Liu L J, Sun C S, et al. Effects of nitrogen level on soybean root growth by ¹⁵N marking [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2011, 17 (4): 985-988.)

[14] 王晓伟,闫超,万涛,等. 施氮水平对大豆光合作用及产量的影响[J]. 作物杂志,2011(2):49-52. (Wang X W, Yan C, Wan T, et al. Effects of nitrogen application on photosynthesis and yield of soybean [J]. Crops, 2011(2):49-52.)

[15] 谢甫绋,孙海姝,张惠君,等. 磷素对不同品质类型大豆光合生理的影响[J]. 大豆科学,2012,31(2):232-236. (Xie F T, Sun H S, Zhang H J, et al. Effects of phosphorus on photosynthetic physiology of different quality soybean [J]. Soybean Science, 2012, 31 (2): 232-236.)

[16] Usuda H, Shimogawara K. Phosphate deficiency in maize. I. Leaf phosphate status, growth, photosynthesis and carbon partitioning [J]. Plant and Cell Physiology, 1991, 32(4):497-504.

[17] 张建恒,李宾兴,王斌,等. 不同磷效率小麦品种光合碳同化和物质生产特性研究[J]. 中国农业科学,2006,39(11):2200-2207. (Zhang J H, Li B X, Wang B, et al. Studies on the characteristics of photosynthesis and dry matter production in wheat varieties with different P efficiency [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(11): 2200-2207.)

[18] Chaudhary M I, Aduyamfi J J, Saneoka H, et al. The effect of phosphorus deficiency on nutrient uptake, nitrogen fixation and photosynthetic rate in mashbean, mungbean and soybean [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2008, 30(4):537-544.

[19] 原向阳,郭平毅,黄洁,等. 缺磷胁迫下草甘膦对抗草甘膦大豆幼苗光合作用和叶绿素荧光参数的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2014,20(1):221-228. (Yuan X Y, Guo P Y, Huang J, et al. Effects of glyphosate on photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of glyphosate-tolerant soybean seedlings under phosphorus deficiency [J]. Chinese Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20 (1): 221-228.)

[20] 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.)

[21] 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.)