植物营养与肥料学报 2014,20(2):318-325
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2014.0207

东北黑土区大豆生长、结瘤及产量对氮、磷的响应

严 君,韩晓增*,丁 娇,王 影
(中国科学院东北地理与农业生态研究所黑土区农业生态重点实验室,哈尔滨 150081)

摘要:氮肥和磷肥显著影响大豆的结瘤和产量。然而在土壤肥力较高、速效养分有效性差的东北地区,有关氮肥和磷肥施用量对大豆结瘤和产量影响的研究较少。本试验采用裂区田间试验,设置3个氮(N)水平(0、20和50 kg/hm^2)和3个磷(P)水平(0、20和40 kg/hm^2),研究氮、磷及其交互作用对大豆生长发育、结瘤特征及产量的影响。结果表明:单施氮肥大豆生物量和产量随着施氮量的增加而增加,而根瘤数量、干重、大小和结瘤指数呈逐渐下降的趋势。单施磷肥促进大豆生物量、产量、根瘤数量、干重、大小和结瘤指数的增加,但其增幅低于施氮处理下的增幅。氮×磷对大豆生长和产量促进作用高于单施氮和单施磷处理,但差异不显著;氮×磷处理下的根瘤数量、干重、大小和结瘤指数低于单施磷处理;氮×磷处理下N_2(N 50 kg/hm^2)处理下的大豆根瘤数量、干重、大小和结瘤指数高于N_1处理(N 20 kg/hm^2)下的,随着施磷量的增加大豆根瘤数量、干重、大小和结瘤指数增加,施磷能够抵消氮对大豆根瘤产生和形成的抑制。氮、磷及其交互作用对大豆根瘤的影响都是直接的,并且不是通过促进大豆生长间接促进的。因此氮和磷均是限制东北地区大豆结瘤和产量的因素,但氮是主导因素。若要获得大豆高产,氮肥施用量需要控制在50 kg/hm^2,磷肥在40 kg/hm^2;但若想最大的发挥大豆的结瘤固氮功能,那么应该不施或者减少氮肥的施用量到20 kg/hm^2,磷肥仍在40 kg/hm^2。

关键词:黑土;大豆;根瘤;产量;氮;磷
中图分类号:S143.7 **文献标识码**:A **文章编号**:1008-505X(2014)02-0318-08

Responses of growth, nodulation and yield of soybean to different nitrogen and phosphorus fertilization management

YAN Jun, HAN Xiao-zeng*, DING Jiao, WANG Ying
(*Key Laboratory of Mollisols Agroecology, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China*)

Abstract: The N and P fertilization impact the nodulation and yield of soybean significantly, however, there are not many reports on these in the Northeast China where the soil fertility is relatively high. Split plot field experiments were conducted to study the effects of N (0, 20 and 50 kg/ha), P (0, 20 and 40 kg/ha) and N×P interaction on soybean growth, nodulation characteristics and yield. The results show that the high rate of individual N application increases the biological and grain yield of soybean, but decreases the number, dry weight, size and nodulation index of nodules. High rate of individual P fertilizer increases the grain yield, nodule number, dry weight, size, nodulation index, although the increments in grain yield are lower than those of the N treatments. Compared with the control and the individual N or P application, the interactive effect of N and P (N×P) demonstrates the highest biomass and yield, but there are no significant differences among the N, P and N×P treatments. The nodule number, dry weight, size and nodulation index with N×P are lower than those of the individual P application, and the nodule number, dry weight, size and nodulation index of the N_2 treatment (N 50 kg/ha) are higher than those of the N_1 treatment (N 20 kg/ha). The increased P application rate offsets the negative effect of high N application rate on nodulation to some extent. The effects of N, P and N×P treatments on nodulation characteristics indicate

收稿日期:2013-04-23 **接受日期**:2013-08-09
基金项目:国家自然科学基金项目(41201246,41371296);现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-04)资助。
作者简介:严君(1982—),女,宁夏银川人,博士,主要从事大豆氮素营养研究。Tel:0451-86648128, E-mail:yanjun985625@163.com
* 通信作者 Tel:0451-86602940,E-mail:xzhan@neigaehrb.ac.cn

that the N and P have direct effect on the nodulation, and not via plant growth. Therefore, both N and P are the key factors to the nodulation and yield of soybean in Northeast China. To maximize soybean yield, the N and P application rates should be at 50 kg/ha and 40 kg/ha, and to maximize soybean nodulation and nitrogen fixation, the N and P application rates should be at 0, 20 N kg/ha and 40 P kg/ha.

Key words: black soil; soybean; nodule; yield; nitrogen; phosphorus

氮和磷是影响大豆生长的两大重要元素。氮素是植物体内蛋白质、核酸、叶绿素和一些激素等的重要组成成分，是影响大豆生长发育的主要因素。磷是构成作物体多种重要有机化合物（如脂肪、蛋白质、核蛋白）的合成及参与能量传递的高能磷酸化合物的磷酸基团的组成成分，对根瘤的形成、氮的固定、氨的转化以及氨基酸的形成具有重要的作用[1]。氮和磷对豆科作物共生固氮功能的促进作用主要是通过刺激寄主作物的生长，而间接影响根瘤的生长和功能[2]；也有研究认为它们是直接影响结瘤。Hellsten 和 Huss-Danell[3] 研究表明，磷对苜蓿根瘤和数量的影响大于对地上和根系的影响，因此磷是直接影响苜蓿的结瘤和固氮。

黑龙江省是我国大豆生产的最大省份，常年大豆种植面积在 360 万公顷左右，占全国大豆种植面积的 37%～44%，总产量平均占全国的 38%～46%，是我国大豆的主要供应基地。该地区种植大豆一直有施用氮和磷肥的习惯，并且近十年施用量不断提高，由 1960 年的不施肥，到目前平均每年的氮肥施用量高达 90 kg/hm^2，磷肥施用量达到 30 kg/hm^2，并且仍有增加的趋势。适时适量的施用氮和磷肥能够改善大豆的氮素营养，促进大豆生物量和产量的增加，并能使产生的碳水化合物更多地分配到根瘤和根系中，从而有利于根瘤数量和固氮量的增加[4-6]。然而过量的施用氮肥，抑制大豆结瘤同时对大豆产量亦无显著的促进作用；过量的施用磷肥，磷素在大豆植株体内含量过高又会过度加大植株的呼吸强度，引起养分过分消耗，不利于植株正常的生长发育[7]。因此明确限制东北黑土大豆根瘤生长的主要因素，找到适宜的氮肥和磷肥施用量，协调好氮、磷肥与大豆生长、结瘤及产量的关系，对于大豆生产具有重要的科学价值和研究意义。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验地位于东北黑土区海伦市前进乡光荣村（47°21′22″N，126°49′48″W），前茬作物为大豆。试验地形为漫川漫岗，坡度为 3°，属寒温带大陆性季风气候，一年一熟制，冬季寒冷干燥，夏季温热多雨，平均气温 1.5℃，极端最高温度为 37℃，极端最低温度 -39.5℃，多年平均降水量 530 mm，平均有效积温 2450℃，年均日照时数 2600～2800 h，无霜期为 125 d[8]。2011 年 5 月～10 月份大豆生长季内的日降水量、最低和最高温度见图 1。

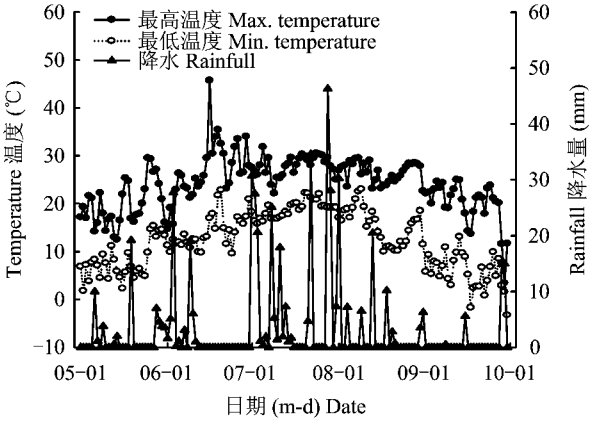

图 1　2011 年大豆生长季内日降水量、最低和最高温度的变化

Fig. 1　Changes of daily rainfall, maximum and minimum temperature in soybean growth season in 2011

1.2　试验设置

供试土壤类型为典型中层黑土，厚度为 20～30 cm。播种前取 0—20 cm 耕层土壤，风干、过筛后进行土壤基本理化性质的测定，其中土壤有机质含量 36.33 g/kg，全氮 1.99 g/kg，硝态氮 20.0 mg/kg；全磷 1.02 g/kg，速效磷 25.9 mg/kg；全钾 23.3 g/kg，速效钾 86.3 mg/kg，土壤 pH 为 6.35。2011 年 5 月 6 日播种，供试大豆品种为黑农 50。试验采用双因素多水平完全试验方案设计，小区为裂区设计，主区为施氮处理，分 3 个氮处理：1）N_0，不施氮肥；2）N_1，N 20 kg/hm^2；3）N_2，N 50 kg/hm^2；副区为施磷处理，分 3 个磷处理：1）P_0，不施磷肥；2）P_1，P 20 kg/hm^2；3）P2，P 40 kg/hm^2。氮肥为尿素 $CO(NH_2)_2$（46% N），磷肥为重过磷酸钙 $Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$（46% P_2O_5），苗期同时配施 K 20 kg/hm^2（硫酸钾，K_2O 51%），采用机器开沟，人工播种，株距为 0.10 m，

“之”字形排列,每个小区6行,垄宽0.65 m,每个小区的面积是20 m^2(4 m×5 m)。试验共18个处理,完全随机排列,每个处理重复4次,共72个小区。

1.3 测定项目和研究方法

盛花期(7月15日)第一次取样。每个处理随机选择3株大豆,取样时将完整的大豆根系从土壤中取出,并从子叶痕处将大豆分为地上和根系两部分。取大豆根系时,以大豆植株为中心,挖0.5 m × 0.5 m × 0.5 m的坑,以保证大豆根系的完整。取出来的大豆根系用水冲干净后,先进行根瘤数量的调查。大豆的地上、根系和根瘤先放在烘箱里105℃杀青30 min,然后60℃烘3 d至恒重。根瘤的大小为单个根瘤的重量,而结瘤指数为根瘤干重占大豆地上鲜重的百分比[9-10]。在成熟期时(9月20日)第二次取样,每个处理选取2 m^2 长势一致的大豆,用于大豆产量和株高、株荚数、株粒数、株荚重、株粒重、百粒重等产量构成因子的测定。

1.4 数据统计分析

采用Excel 2003,DPS2000对试验数据进行差异性分析,并计算LSD。

2 结果与分析

2.1 不同处理对大豆生长的影响

N_0P_0 处理的SPAD、株高、地上和根系生物量最低(表1)。单施磷处理以 N_0P_2 处理的SPAD、株高、地上和根系生物量最大,较 N_0P_0 处理分别增加了2.9%、0.8%、17.6%和19.0%,处理间差异不显著。单施氮处理中以 N_2P_0 处理的SPAD、株高、地上和根系生物量最大,较 N_0P_0 处理分别增加了3.0%、2.0%、35.5%和26.6%,其中氮对大豆地上和根系生物量有显著的影响($P<0.05$)。氮×磷交互作用下的大豆SPAD、株高、地上和根系生物量高于 N_0P_0、单施氮和单施磷处理,以 N_2P_2 处理的SPAD、株高、地上生物量最大,而根系生物量以 N_1P_2 处理最大,较 N_0P_0 处理增加了73.4%,但氮、磷交互作用对大豆SPAD、株高、地上和根系生物量的影响处理间差异不显著。

表1 氮、磷及氮×磷对大豆R2期SPAD、株高、地上和根系生物量的影响

Table 1 Effects of N, P and N×P interaction on SPAD, height, shoot biomass and root biomass of soybean at the R2 stage

处理 Treatment		SPAD	株高(cm) Height	地上生物量(g/plant) Shoot biomass	根系生物量(g/plant) Root biomass
N_0	P_0	40.06	50.55	10.09	0.79
	P_1	41.04	50.68	10.78	0.81
	P_2	41.22	50.94	11.87	0.94
N_1	P_0	40.98	51.33	10.85	0.95
	P_1	41.22	51.56	11.90	1.20
	P_2	41.70	51.61	13.31	1.37
N_2	P_0	41.25	51.57	13.67	1.00
	P_1	41.60	52.13	13.98	1.14
	P_2	41.90	53.13	14.05	1.16
方差分析 Analysis of variance (P)					
N		ns	ns	<0.05	<0.05
P		ns	ns	ns	ns
N×P		ns	ns	ns	ns

注(Note):P代表磷肥处理 P stands for phosphorus treatment;N代表氮肥处理 N stands for nitrogen treatment;ns代表没有显著差异 ns stands for no significant difference.

2.2　不同处理对大豆结瘤特征的影响

单施磷处理的大豆根瘤数量、干重、大小和结瘤指数随着施磷量的增加呈逐渐增加的变化趋势，较 N_0P_0 处理分别增加了 37%、34%、2% 和 14%，其中根瘤数量、大小和结瘤指数处理间差异极显著（$P<0.01$）。单施氮处理的大豆根瘤数量、干重、大小和结瘤指数在 N_2P_0 处理时最小，较 N_0P_0 处理分别下降了 63%、20%、53% 和 43%，处理间差异极显著（$P<0.01$）。氮、磷交互作用对大豆根瘤数量、干重、大小和结瘤指数无显著的影响（表 2），以 N_1P_2 处理的根瘤数量、干重和结瘤指数最大，但较 N_0P_0 处理分别下降了 34%、41% 和 15%。N_2 处理下的根瘤数量、干重和结瘤指数低于 N_1 处理的，但大豆根瘤数量、干重和结瘤指数均随着施磷量的增加而增加，说明施磷能够抵消氮对大豆结瘤的抑制。

表 2　氮、磷及氮 × 磷对大豆结瘤特征的影响

Table 2　Effects of N, P and N × P interaction on nodular traits of soybean

处理 Treatment		根瘤干重 Nodule dry weight (mg/plant)	根瘤数量 Nodule number (No./plant)	根瘤大小 Nodule size (mg/nodule)	结瘤指数 Nodulation index
N_0	P_0	159	36	4.43	0.85
	P_1	202	47	4.33	1.03
	P_2	217	48	4.52	0.97
N_1	P_0	80	24	3.32	0.48
	P_1	92	35	2.62	0.65
	P_2	104	40	2.60	0.72
N_2	P_0	60	29	2.08	0.49
	P_1	64	31	2.06	0.52
	P_2	70	33	2.12	0.54
方差分析 Analysis of variance (P)					
N		<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
P		ns	<0.01	<0.01	<0.01
N × P		ns	ns	ns	ns

注（Note）：P 代表磷肥处理 P stands for phosphorus treatment；N 代表氮肥处理 N stands for nitrogen treatment；ns 代表没有显著差异 ns stands for no significant difference.

单施磷处理下，N_0P_1 处理的瘤重、瘤数和地上生物量相对于总生物量的值最大，较 N_0P_0 处理分别增加了 19%、22% 和 0.3%，处理间差异显著（$P<0.01$，表 3）。磷对根瘤数量、干重相对于总生物量的影响大于磷对地上和根系生物量相对于总生物量的影响，表明磷是直接影响大豆结瘤，而不是通过影响大豆生物量，而间接促进大豆结瘤。单施氮处理下，N_0P_0 处理的瘤重、瘤数、根系生物量相对于总生物量的值最大，而 N_2P_0 处理的值最小，较 N_0P_0 处理分别下降了 40%、4% 和 15.3%，处理间差异显著（$P<0.01$）。氮对根瘤数量、干重相对于总生物量的影响大于氮对地上和根系生物量相对于总生物量的影响，氮亦是直接影响大豆结瘤。氮 × 磷交互作用下，N_1P_2 处理的根瘤干重、数量和根系生物量相对于总生物量的值最大，而地上生物量相对于总生物量的值最小；N_1 和 N_2 处理下的根瘤干重、数量、地上和根系生物量相对于总生物量的值变化不大，差异不显著，但随着施磷量的增加，呈逐渐增加的变化趋势，即施磷能够缓解氮对大豆根瘤数量和干重的影响，两者是相辅相成的。

表3 不同处理对根瘤数量、根瘤重量、地上和根系生物量相对于总生物量的影响(干重)

Table 3 Nodule number, nodul weight, shoot and root biomass of soybean under different treatments (dry weight)

处理 Treatment		根瘤 Nodule weight (mg/g)	根瘤数量 Nodule number (No./g)	地上部生物量 Shoot biomass (mg/g)	根系生物量 Root biomass (mg/g)
N_0	P_0	14.6	3.3	927	73
	P_1	17.4	4.0	930	70
	P_2	16.9	3.7	927	73
N_1	P_0	6.8	2.0	919	81
	P_1	7.0	2.7	908	92
	P_2	7.1	2.7	907	93
N_2	P_0	4.1	2.0	932	68
	P_1	4.2	2.1	925	75
	P_2	4.6	2.2	924	76
方差分析 Analysis of variance (P)					
N		<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
P		<0.05	<0.01	<0.01	<0.01
N×P		ns	ns	ns	ns

注(Note): P 代表磷肥处理 P stands for phosphorus treatment; N 代表氮肥处理 N stands for nitrogen treatment; ns 代表没有显著差异 ns stands for no significant difference. 表中数据为各处理小区测定项目的总量除以该小区总生物量 The average data of listed items are the total amount of tested items divided by the total biomass of the plots.

2.3 不同处理对大豆产量和产量构成因子的影响

氮、磷及其交互作用对大豆株高、株荚数、株粒数、株粒重、株荚重和产量均有影响(表4)。单施磷处理中的 N_0P_2 处理大豆株高、株荚数、株粒数、株粒重、株荚重和产量最大,较 N_0P_0 处理分别增加了10%、51%、6%、6%、13%和40%,其中株荚数和百粒重处理间差异极显著($P<0.01$)。单施氮处理促进大豆产量、株高、株荚数、株粒数、株粒重和株荚重的增加,其中 N_1P_0 和 N_2P_0 处理的大豆株高、株荚数、株粒数、株粒重、株荚重和产量均高于 N_0P_0 处理,与 N_0P_0 处理间差异极显著($P<0.01$),而 N_1P_0 和 N_2P_0 处理间差异不显著。氮、磷交互作用下以 N_1P_2 处理的株荚数、株荚重、株粒数、株粒重和产量最大,较 N_0P_0 处理分别增加了101%、65%、53%、56%和74%,而大豆株高以 N_2P_2 处理最高,较 N_0P_0 处理增加了15%。N_1 处理下的大豆株荚数、株荚重、株粒数、株粒重和产量高于 N_0 和 N_2 处理下的值;同一施氮处理下,大豆株荚数、株粒数、株粒重、株荚重和产量均有随着施磷量的增加,呈逐渐增加的变化趋势。施用磷肥能够促进大豆株荚数、株粒数、株粒重、株荚重和产量的增加,但其增产效果低于氮肥对大豆产量的促进作用。

3 讨论与结论

3.1 氮、磷对大豆生长和产量的影响

氮和磷是限制作物生长的重要元素,有关氮和磷肥对大豆生长和产量的影响报道不一。Taylor等[11]研究表明,播前施用N 60~70 kg/hm^{2}时,大豆产量和始花期生物量达到最大。Starling等[12]通过田间试验,研究表明播前施用N 50 kg/hm^{2}能够促进始花期大豆干物质积累量的增加(平均增加25%),产量平均增加8%。然而Wood等[13]研究表明,在Alabama供试的7个地区施用相同量的氮肥,其中有5个地区产量增加显著,而另外2个地区不增产。Wesley等[14]报道,在Kansas供试的8个地区,其中有6个地区施氮产量增加显著,平均增产11.8%,而另外2个地区不增产。大豆对氮肥的反应不同,主要与播前土壤中的硝态氮含量有关[13,15]。播前土壤硝态氮含量<8 kg/hm^2,施用氮

表 4　氮、磷及氮 × 磷交互作用对大豆产量和产量构成因子的影响

Table 4　Effects of N, P and N × P interaction on the yield and yield components

处理 Treatment		株高 Height (cm)	株荚数 Pod per plant (No./plant)	株荚重 Pod weight (g/plant)	株粒数 Seed number (Seed/plant)	株粒重 Seed weight (g/plant)	百粒重 100-seed weight (g)	产量 Yield (kg/hm^2)
N_0	P_0	93.41	32.00	4.47	88	11.44	15.8	1498
	P_1	100.68	42.92	4.87	94	12.48	15.9	1755
	P_2	102.63	48.25	4.74	93	12.90	16.9	1898
N_1	P_0	101.78	43.75	5.12	110	13.55	16.0	2067
	P_1	107.09	57.50	6.02	108	14.74	16.4	2380
	P_2	107.21	64.33	7.36	135	17.85	16.5	2609
N_2	P_0	104.15	42.42	5.76	104	14.34	15.8	2101
	P_1	105.87	45.33	5.69	112	14.55	17.2	2135
	P_2	107.68	46.08	6.21	116	15.30	17.3	2600
方差分析 Analysis of variance (P)								
N		<0.01	<0.01	<0.05	<0.05	<0.05	<0.01	<0.05
P		ns	<0.01	ns	ns	ns	<0.01	ns
N × P		<0.05	<0.01	ns	ns	ns	ns	ns

注(Note): P 代表磷肥处理 P stands for phosphorus treatment; N 代表氮肥处理 N stands for nitrogen treatment; ns 代表没有显著差异 ns stands for no significant difference.

肥(75 kg/hm^2)能够增产[11]。Stone 等[15]得出播前 0—180 cm 土体中的土壤硝态氮含量 < 190 kg/hm^2,施用氮肥(150 kg/hm^2)能够增产,反之施用氮肥不增产或增产不显著。本研究中施用氮肥能够显著促进盛花期大豆 SPAD、株高、地上和根系生物量,以及成熟期大豆的株高、荚数、粒数、荚重、粒重和产量的增加,这与前人的研究结果一致。这与我国东北地区土壤养分有效性差、大豆生长季节短、播种时土壤温度低、土壤中的根瘤菌主要以慢生根瘤菌为主[16]有关,适量施用氮肥能够促进大豆的生长发育[17]。此外本研究中播前土壤中的硝态氮含量为 20 mg/kg,施氮量达到 20 kg/hm^2 即能显著促进大豆生物量和产量的增加;而当氮肥施用量继续增加到 50 kg/hm^2,氮肥对大豆生物量和产量的促进作用较 20 kg/hm^2 处理仍有增加,但增加不显著。

大豆对磷更有特殊的需求,脂肪和蛋白质、核蛋白的合成都需要磷的参与[1]。缺磷显著影响磷代谢产物的生成,降低大豆叶面积、叶片数量、节数和分枝数,减少相对出叶速率,阻止大豆植株对其它养分的吸收,从而导致大豆产量和品质下降[18-19]。然而过高的供磷水平会增强植株的呼吸强度,养分消耗更多,不利于植株的生长发育和产量形成[20-21]。适量施磷促进大豆叶面积指数,株高,生物量和产量的增加[22-23]。大豆产量对磷肥的反应与土壤速效磷含量有关,在黄沙土、棕黄土的研究结果表明,土壤速效磷含量低于 20 mg/kg 时,施磷促进大豆产量的增加;在淋溶黑土和草甸黑土上,土壤速效磷含量在 60 mg/kg 时,施磷对产量无显著的促进作用;土壤速效磷含量高于 12 mg/kg 时,施磷不能促进大豆产量的增加[24]。本研究中播前土壤中的速效磷含量为 25.9 mg/kg,施用磷肥能显著促进大豆生物量和产量的增加,但处理间差异不显著。对大豆株荚数和百粒重的影响显著。Gan 等[25]通过田间试验,得出氮、磷交互作用能够改善植株的氮素营养状况,能在一定程度上延缓叶片和根系的衰老,促进叶片的生长,使整个生育期保持较高的叶面积指数、比叶面积和冠根比,从而促进了干物质积累量及其向荚粒中的分配,单株荚数、粒数、百粒重和籽粒产量均有所增加,但氮、磷交互作用对大豆生物量和产量的促进作用较单施氮和磷处理差异不显著。本研究的结果与之一致,氮、磷

交互作用对盛花期大豆的SPAD、株高,地上和根系生物量以及成熟期时大豆的株荚重、株粒数、株粒重和产量均无显著的促进作用。

3.2 氮、磷对大豆结瘤特征的影响

氮肥对根瘤形成和发育的影响,是通过对土壤无机氮浓度的影响来实现的,也就是说氮肥施入土壤后成为土壤无机氮的一部分,从而对大豆根系共生固氮系统直接产生影响[26]。适量施氮后根系中碳水化合物含量增加,促进了大豆的光合作用,从而有利于碳水化合物向根瘤和根系中的分配,有利于根瘤的产生和形成[27-28]。本研究中施氮抑制了大豆根瘤的产生和形成,并随着施氮量(单施氮处理)的增加大豆根瘤数量、干重、大小和结瘤指数呈逐渐下降的趋势,N_2P_0 处理较 N_0P_0 处理分别下降了63%、20%、53%和43%。这可能是由于施氮后植株C/N比减小,供给根瘤的碳水化合物减少,从而影响根瘤的产生、形成和发育。

磷是植物生长和所有细胞代谢过程中所必需的,而生物固氮过程是一个需要较高能量的过程,因此缺磷对豆科作物根瘤中的能量状态有着负面影响[29]。大豆缺磷植株中向根瘤提供的碳水化合物减少,限制根瘤的产生和根瘤固氮酶活性[30]。而施磷通过促进根瘤原基的增加,促进根瘤的形成,从而有利于大豆根瘤的发育[18, 23, 31-32]。本研究中施磷后,大豆根瘤数量、干重、大小和结瘤指数显著高于 N_0P_0 处理,且处理间差异极显著($P<0.01$)。此外施磷后,大豆根瘤数量和干重都有显著的增加,表明该地区还是相对缺磷的,因此在实际生产中还是需要适时适量地施用一定量的磷肥。本研究中氮、磷交互作用下大豆根瘤数量和干重无显著的差异,与Gan等[25]在田间的研究结果一致,而在砂培条件下,氮、磷交互作用对不同生育时期的大豆根瘤数量和干重均具有显著的影响,这是由于砂培条件下氮、磷交互作用显著,而在田间条件下土壤的基础肥力相对于砂培条件下高,因此氮、磷交互作用体现不出来。

3.3 限制东北地区大豆结瘤和产量的关键性因素

磷对豆科作物结瘤、固氮和生长均有影响,然而磷对共生固氮的特殊作用与其对作物生长的影响区别开来,也很难将磷对豆科作物生长和结瘤固氮的作用分开。有研究表明,磷主要是刺激寄主作物的生长,而间接影响根瘤菌的存活或根瘤的生长和固氮功能的发挥等[33-35],也有研究认为磷是直接影响大豆结瘤和固氮的[36]。在我国东北冷凉地区,土壤肥力较高,但速效氮和磷养分有效性差,氮肥和磷肥对大豆根瘤数量、干重、大小和结瘤指数相对于总生物量的值显著高于对地上和根系生物量相对于总生物量的值,也就说氮和磷是直接影响大豆结瘤特征的,而非通过促进大豆生长间接促进大豆结瘤的。其中氮比磷对大豆生长、结瘤和产量的影响要显著,因此氮是限制东北地区大豆生长、结瘤和产量的主要因素。

参考文献:

[1] 董钻. 大豆产量生理(第二版)[M]. 北京: 中国农业出版社. 2012. 82.
Dong Z. Soybean yield physiology (II)[M]. Beijing: China Agriculture Press. 2012. 82.

[2] Robson A D, O'hara G W, and Abbott L K. Involvement of phosphorus in nitrogen fixation by subterranean clover (*Trifolium subterraneum* L.)[J]. Aust. J. Plant. Physiol., 1981. 8(5): 427-436.

[3] Hellsten A, Huss-Danell K. Interaction effects of nitrogen and phosphorus on nodulation in red clover (*Trifolium pratense* L.)[J]. Acta Agr. Scand. B-S. P., 2000, 50(3): 135-142.

[4] Robson A D. Mineral nutrients limiting nitrogen fixation in legumes[A]. Andrew C S, Kamprath E J. Mineral nutrition of legumes in tropical and subtropical soils[C]. Proceedings of a workshop held at CSIRO Cunningham Laboratory, Brisbane, Australia, January 16-21, 1978, under the auspices of the U. S./Australia Co-operative Science Program. 1978. 277-293.

[5] Graham P H, Vance C P. Nitrogen fixation in perspective: an overview of research and extension needs[J]. Field Crop Res., 2000, 65(2-3): 93-106.

[6] 田艳洪, 刘元英, 张文钊, 等. 不同时期施用氮肥对大豆根瘤固氮酶活性及产量的影响[J]. 东北农业大学学报, 2007, 39(5): 15-19.
Tian Y H, Liu Y Y, Zhang W Z *et al*. Effect of N fertilization at different stage on nitrogenase activity and yield of soybean[J]. J. Northeast Agric. Univ., 2007, 39(5): 15-19.

[7] 丁洪, 李生秀. 磷素营养与大豆生长和共生固氮的关系[J]. 西北农业大学学报, 1998, 26(5): 67-70.
Ding H, Li S X. The relation of phosphorous nutrition to growth and symbiotic nitrogen fixation of soybean cultivars[J]. J. Northwest Agric. Univ., 1998, 26(5): 67-70.

[8] Zhang S L, Zhang X Y, Ted Huffman *et al*. Influence of topography and land management on soil nutrients variability in Northeast China[J]. Nutr. Cycl. Agroecosys., 2011, 89(3): 427-438.

[9] Betts J H and Herridge D F. Isolation of soybean lines capable of nodulation and nitrogen-fixation under high-levels of nitrate supply[J]. Crop Sci., 1987, 27(6): 1156-1161.

[10] Pereira P A A and Bliss F A. Selection of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) for N_2 fixation at different levels of

available phosphorus under field and environmentally-controlled conditions[J]. Plant Soil, 1988, 115: 75-82.

[11] Taylor R S, Weaver D B, Wood C W *et al*. Nitrogen application increases yield and early dry matter accumulation in late-planted soybean[J]. Crop Sci., 2005, 45(3): 854-858.

[12] Starling M E, Wood C W, Weaver D B. Starter nitrogen and growth habit effects on late-planted soybean[J]. Agron. J., 1998, 90(5): 658-662.

[13] Wood C W, Torbert H A, Weaver D B. Nitrogen fertilizer effects on soybean growth, yield, and seed composition[J]. J. Prod. Agr., 1993, 6(3): 354-360.

[14] Wesley T L, Lamond R E, Martin V L *et al*. Effects of late-season nitrogen fertilizer on irrigated soybean yield and composition[J]. J. Prod. Agric., 1998, 11(3): 331-336.

[15] Stone L R, Whitney D A, Anderson C K. Soybean yield response to residual NO_3-N and applied N[J]. Plant Soil, 1985, 84: 259-265.

[16] Wang H, Man C X, Wang E T *et al*. Diversity of rhizobia and interactions among the host legumes and rhizobial genotypes in an agricultural-forestry ecosystem[J]. Plant Soil, 2009, 314(1-2): 169-182.

[17] Sagan M, Ney B, Duc G. Plant symbiotic mutants as a tool to analyse nitrogen nutrition and yield relationship in field-growth peas (*Pisum sativum* L.)[J]. Plant Soil, 1993, 153(1): 33-45.

[18] Tsvetkova G and Georgiev G. Effect of phosphorus nutrition on the nodulation, nitrogen fixation and nutrient use efficiency of *Bradyrhizobium japonicum*-soybean (*Glycine max* L. Merr.) symbiosis[J]. Bulg. J. Plant Physiol, 2003, (Spec. Issue): 331-335.

[19] Chaudhary M I, Adu-Gyamfi 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 Physiol. Plant., 2008, 30(4): 537-544.

[20] Win M, Nakasathien S, Sarobol Ed. Nakasathien, and E. Sarobol. Effects of phosphorus on seed oil and protein contents and phosphorus use efficiency in some soybean varieties[J]. Kasetsart J. (Nat. Sci.), 2010, 44: 1-9.

[21] 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: 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 Nutr. Fert. Sci., 2012, 18: 670-677.

[22] Chiezey U F, and Odunze A C. Soybean response to application of poultry manure and phosphorus fertilizer in the Sub-humid Savanna of Nigeria[J]. J. Ecol. Nat. Environ., 2009, 1(2): 25-31.

[23] Abbasi M K, Majeed A, Sadiq A *et al*. Application of *Bradyrhizobium japonicum* and phosphorus fertilization improved growth, yield and nodulation of soybean in the sub-humid hilly region of Azad Jammu and Kashmir, Pakistan[J]. Plant Prod. Sci., 2008, 11(3): 368-376.

[24] Ferguson R B, Shapiro C A, Dobermann A R *et al*. Fertilizer recommendations for soybean [M]. Cooperative Extension, Institute of Agriculture and Natural Resources, University of Nebraska Lincoln, 2003.

[25] Gan Y B, Stulen I, van Keulen H *et al*. Physiological changes in soybean wuyin9 in response to N and P nutrition[J]. Ann. Appl. Biol, 2002, 140(3): 319-329.

[26] 韩晓增, 严君, 李晓慧. 大豆共生固氮能力对土壤无机氮浓度的响应与调控[J]. 大豆科技, 2010, (1): 6-8.
Han X Z, Yan J, Li X H. Response and control of soybean symbiotic nitrogen-fixing ability on soil inorganic nitrogen concentration[J]. Soybean Sci. & Tech., 2010, (1): 6-8.

[27] Premaratne K, Oertli J. The influence of potassium supply on nodulation, nitrogenase activity and nitrogen accumulation of soybean (*Glycine max* L. Merrill) grown in nutrient solution [J]. Fert. Res., 1994, 38(2): 95-99.

[28] Tagoe S O, Horiuchi T, Matsui T. Effects of carbonized and dried chicken manures on the growth, yield, and N content of soybean[J]. Plant Soil, 2008, 306(1-2): 211-220.

[29] Sa T M, Israel D W. Energy status and functioning of phosphorus-deficient soybean nodules[J]. Plant Physiol., 1991, 97(3): 928-935.

[30] Schulze J, Kupietz A, Merbach W. N_2 fixation in different varieties of *Vicia faba* L. and *Pisum sativum* L. during pod-filling [J]. Agribiol. Res., 1998, 51(3): 261-269.

[31] Kuang R B, Liao H, Yan X L *et al*. Phosphorus and nitrogen interactions in field-grown soybean as related to genetic attributes of root morphological and nodular traits[J]. J. Integr. Plant Biol., 2005, 47(5): 549-559.

[32] Miao S J, Qiao Y J, Han X Z *et al*. Nodule formation and development in soybeans (*Glycine max* L.) in response to phosphorus supply in solution culture[J]. Pedosphere, 2007, 17(1): 36-43.

[33] Jakobsen I. The role of phosphorus in nitrogen fixation by young pea plants (*Pisum sativum*)[J]. Physiol. Plant., 1985, 64(2): 190-196.

[34] Yang Y. The effect of phosphorus on nodule formation and function in the *Casuarina-Frankia* symbiosis[J]. Plant Soil, 1995, 176(1): 161-169.

[35] Reddell P, Yang Y, and Shipton W A. Do Casuarina cunninghamiana seedlings dependent on symbiotic N_2 fixation have higher phosphorus requirements than those supplied with adequate fertilizer nitrogen[J]. Plant Soil, 1997, 189(2): 213-219.

[36] Gentili F, Huss-Danell K. Local and systemic effects of phosphorus and nitrogen on nodulation and nodule function in Alnus incana[J]. J. Exp. Bot., 2003, 54(393): 2757-2767.