

## 大豆根系特征对氮阻遏的适应性调节

石海<sup>1,2</sup>, 苗淑杰<sup>1</sup>, 柏会子<sup>1,2</sup>

(1. 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, 黑龙江 哈尔滨 150081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**以黑农35为材料,采用盆栽培养方法,在2011年筛选的氮阻遏阈值基础上,设置低量氮、临界氮和阻遏氮3个施氮水平,探讨了大豆根系特征对氮阻遏的响应。结果表明:随着大豆的生长发育,不同氮水平条件下大豆根系形态指标、根瘤数及其干重、根干重及碳氮积累均呈单峰曲线变化,峰值出现在播种后65 d;根冠比、根瘤豆血红蛋白含量随生育进程而降低;在播种后65 d,根碳氮比处于最小值。根干物质重和根磷、氮积累量(播种后45 d除外)与施氮水平正相关,均在阻遏氮水平下( $108\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )达最大值,而碳氮比在临界氮水平下达最大值;各个时期,根系形态各指标(播种后45 d根尖数除外)均在临界氮水平下( $54\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )出现最大值;根瘤数、根瘤干重(播种后45 d除外)、根瘤豆血红蛋白含量与根系形态各指标变化规律相同。因此,初步认定在本试验条件下适宜大豆根系生长的最佳氮水平为 $54\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

**关键词:**根系特征;氮肥;氮阻遏;适应性调节

中图分类号:S565.1

文献标识码:A

文章编号:1000-9841(2013)04-0501-05

## Adaptive Regulation of Nitrogen Inhibitory on Root Characteristics of Soybean

SHI Hai<sup>1,2</sup>, MIAO Shu-jie<sup>1</sup>, BAI Hui-zi<sup>1,2</sup>

(1. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences/Key Laboratory of Mollisols Agroecology, Harbin 150081, China; 2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Three nitrogen application levels of soybean based on the nitrogen repression threshold of our previous experiments in 2011 were set by using pot experiments targeting Heinong 35 to investigate how root characteristics of soybean response to N inhibitory. The results showed that soybean root morphological indicators, the number and dry weight (DW) of nodule, root DW, C and N accumulation during the soybean growth periods of different nitrogen levels were all unimodal curves, with the peak appeared on the 65th days after sowing; root-shoot ratio and nodule leghemoglobin content decreased with soybean growth; root C-N ratio reached the minimum on the 65th days after sowing. DW, C and N accumulation of root (except for 45 days after sowing) was positively correlated with the nitrogen levels, with the maximum appeared at the level of N inhibitory ( $108\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), but the maximum of C-N ratio appeared in critical nitrogen level. In each period, all the root morphological indicators (except for tips on 45 days after sowing) reached to the maximum in critical nitrogen level ( $54\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); the number, DW (except 45 days after sowing) and leghemoglobin content in nodule had the same change laws. In summary, the critical nitrogen level ( $54\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) in the study is the best nitrogen level for the growth of soybean root.

**Key words:** Root characteristic; Nitrogen; N inhibitory; Adaptive regulation

作物要正常发育,其地上部光合作用和地下部吸收水分与养分的能力必须协调统一<sup>[1]</sup>。根是植物的三大营养器官之一,也是影响产量形成的重要器官,根系的形态决定着作物吸收水分和养分的能力<sup>[2-3]</sup>,直接关系到作物的生长发育。研究表明,根系生长较快的植物竞争能力也较强<sup>[4]</sup>。

氮是作物生长的必需元素之一,是作物体内蛋白质、核酸和一些激素的重要组成成分,与根系生长和根系形态性状密切相关<sup>[3-5]</sup>。相关学者研究了施氮对大豆根瘤生长和固氮的影响<sup>[6-7]</sup>,但却很少关注共生固氮的氮阻遏问题,直到2004年,陈文新院士才提出了共生固氮的氮阻遏问题。氮阻遏是指所有固氮生物均有一个共性,在有氮的条件下不固氮,固氮酶不能合成,或者失去活性<sup>[8]</sup>。

近些年虽然国内外学者已经开始关注并提出了

一些减缓氮阻遏效应的方法<sup>[9-11]</sup>,但是对具体的氮阻遏阈值及相关研究却鲜见报道,现从氮阻遏阈值问题着手,利用盆栽培养的方法,研究氮阻遏过程中大豆根系的一系列适应性变化,在充分发挥大豆共生固氮功能、减少氮肥施用和保持土壤氮平衡的前提下,提倡大豆高效生产,为大豆合理施肥提供一定的理论依据,最终为实现低碳农业提供实践支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验于2012年5~10月在中国科学院东北地理与农业生态研究所哈尔滨所区日光培养室内进行。供试大豆材料为当地主栽品种黑农35。基础肥料为磷  $30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), 钾  $30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

收稿日期:2013-03-13

基金项目:国家自然科学基金(41101219);中国科学院青年人才项目(KZCX2-EW-QN306)。

第一作者简介:石海(1985-),男,在读硕士,主要从事大豆结瘤固氮生理研究。E-mail: shihailone@126.com。

通讯作者:苗淑杰(1975-),女,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事大豆结瘤固氮和土壤碳氮循环研究。E-mail: miaoshujie@126.com。

( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), 氮肥为尿素(分析纯), 采用土培培养方式, 砂土比为 1:2, 培养所用土壤来自黑龙江省海伦市, 为 40~60 cm 的底层土, 全氮、全磷和全钾分别为 1.89, 0.91 和 20.61  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 速效氮、速效磷和速效钾分别为 196, 36 和 155  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 有机质 40.6  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , pH5.86。所用河沙先用自来水清洗 3 次, 再用蒸馏水洗 1 次, 晒干备用。

以筛选的氮阻遏临界值(54  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )为基础<sup>[12]</sup>, 设置 3 个施氮水平, 分别为低量氮(27  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 临界氮(54  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 阻遏氮(108  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 每个处理 3 次重复, 随机排列。每桶装入砂土 15 kg, 浇蒸馏水至土壤饱和。每桶播种均匀的大豆种子 7 粒, 出苗后, 每盆保留长势均匀的豆苗 3 株。在播种后 45、65 和 90 d 分别进行破坏性取样, 3 个取样时期分别代表结瘤盛期、固氮高峰期和结荚盛期, 取样时用自来水将附着在根表的土壤冲洗干净, 然后用蒸馏水漂洗 2 次, 编号, 带回实验室备用。

## 1.2 测定项目与方法

1.2.1 根系形态特征 用根系扫描仪分析系统(加拿大 Regent 公司)测定, 将根系样品, 放置在 30 cm×40 cm 树脂玻璃槽内, 注水至 3~4 mm 深, 使根系充分散开, 扫描根系后经过软件(WinRHIZO-2004a)分析, 获得根表面积、根体积及根尖数等形态指标, 根长用米尺进行测定。

1.2.2 根瘤数量和植株生物量 将取回的大豆植株根部洗净, 轻轻剥落根瘤, 调查根瘤数目。然后将大豆植株分成地上与地下两部分, 烘干至恒重(105℃杀青, 80℃烘干), 记录各部分干重, 粉碎备用。

1.2.3 C、N 积累 取粉碎的植物样品, 用元素分析仪(Elementar Analysensysteme GmbH, EL-III, German)测定 C、N 积累。

1.2.4 豆血红蛋白含量 取一定量的新鲜根瘤, 在 5℃的磷酸缓冲溶液(0.1  $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , pH6.8)中研磨匀浆, 磷酸缓冲液的体积为根瘤量的 4 倍。磨碎的匀浆倾入 10 mL 离心管中, 低温离心(4℃, 10 000  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ )30 min, 540 nm 分光光度计比色<sup>[7,13]</sup>。

## 1.3 数据分析

采用 Excel 2007、SPSS 17.0 和 Origin 8.5 软件对数据进行处理、统计分析和作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 大豆根系形态对氮阻遏的适应性变化

2.1.1 根长、根表面积、根体积和根尖数 由图 1 可知, 随着大豆的生长发育, 根长、根表面积、根体积、根尖数均呈先增加再降低的变化趋势, 在播种后 65 d 达到最大值。根长的变幅不如其他 3 个指标明显。根尖数在播种后 90 d 与播种后 65 d 差别不大。

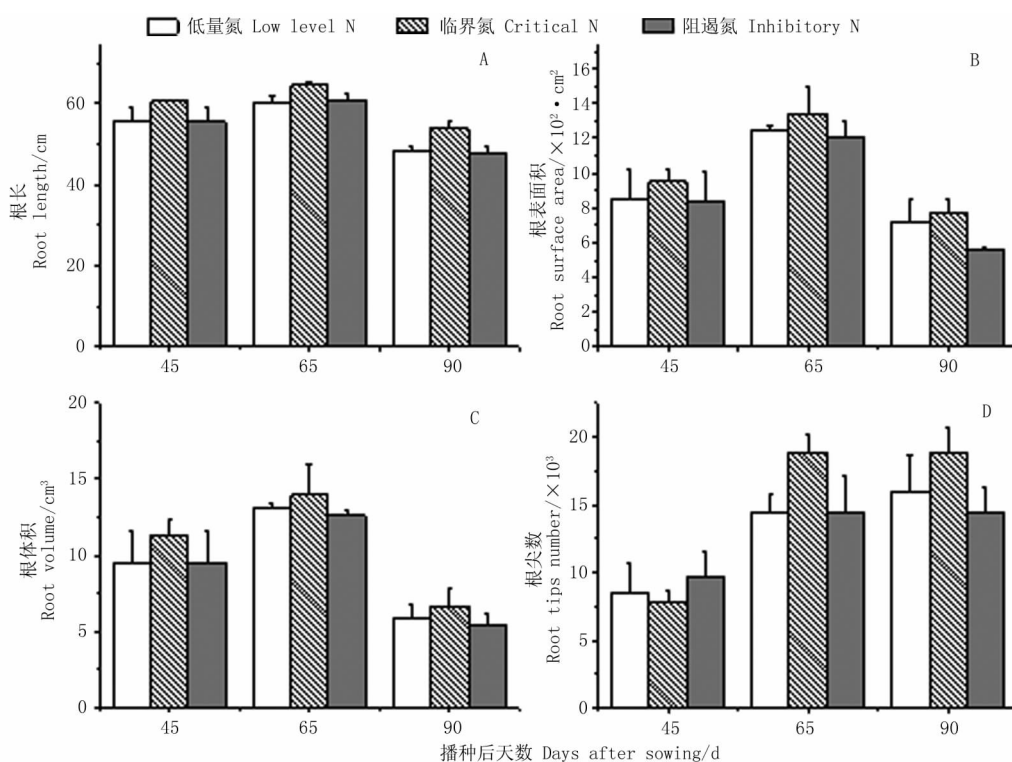


图 1 根长、根表面积、根体积根尖数对氮阻遏的适应性变化

Fig. 1 Adaptive response of nitrogen inhibitory on length, surface area, volume and tips number of root

各测定时期大豆根长、根表面积、根体积和根尖数(播种后 45 d 根尖数除外),均随施氮量的增加呈单峰曲线变化,并在临界氮水平达最大值。整个生育期,在临界氮水平下:根长比同时期的低量氮分别增加了 8%、7% 和 12%,比阻遏氮增加了 9%、6% 和 12%;根表面积分别是同时期的低量氮的 1.12、1.08 和 1.07 倍,阻遏氮的 1.13、1.11 和 1.38 倍;根体积比同时期的低量氮分别增加了 19%、6% 和 13%,比阻遏氮增加了 20%、11% 和 22%;播种后 65 d 和 90 d 单株根尖数分别为 18 840 和 18 896 个,是同时期低量氮的 1.31 和 1.18 倍,阻遏氮的 1.30 和 1.32 倍。统计分析结果表明,在播种后 90 d,根长在临界氮水平下与其他两个施氮水平处理间差异达到了显著水平( $P < 0.05$ )。其他各时期不同施氮水平处理间均无明显差异。

**2.1.2 根冠比** 根冠比是影响作物养分吸收的重要因素之一,环境胁迫时,根冠比会增加<sup>[14]</sup>。不同施氮水平处理在播种后 45 d 表现出一定的差别(图 2),但处理间差异不明显( $P > 0.05$ ),在播种后 65 d 和 90 d 差别不大,说明施氮水平对播种后 45 d 大豆根系生长有影响,而随着时间的推移,对大豆根系生长无显著影响。在播种后 45 d,临界氮水平下大豆根冠比为 0.42,是低量氮的 1.11 倍,是阻遏氮的 1.17 倍,由此可以看出临界氮水平下能有效提高大豆根冠比,而低量氮或阻遏氮水平则降低大豆根冠比,且低量氮水平比阻遏氮水平大豆根冠比大。

## 2.2 大豆结瘤形成和生长对氮阻遏的适应性变化

### 2.2.1 根瘤数和根瘤干重 随着大豆生育期的推

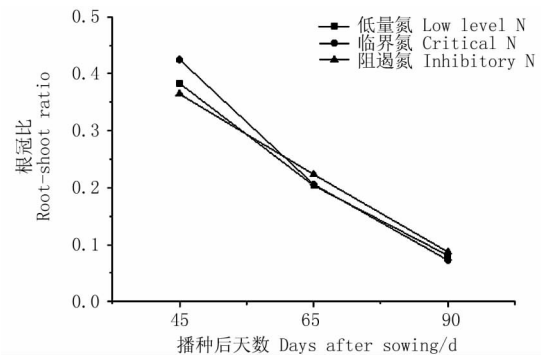


图 2 根冠比对氮阻遏的适应性反应

Fig.2 Adaptive response of nitrogen inhibitory on root-shoot ratio

进,根瘤数、根瘤干重变化趋势相同,均呈单峰曲线变化,在播种后 65 d 达到最大值(图 3)。

从施氮水平的影响来看,各时期不同施氮水平处理间根瘤数和根瘤干重的变化趋势相同,均为先增加后降低并在临界氮水平下达到最大值(播种后 45 d 根瘤干重除外)。临界氮水平下:各时期单株根瘤数分别为 165、582 和 403 个,在相同时期,是低量氮的 1.02、1.04 和 1.63 倍,是阻遏氮的 1.46、1.04 和 1.03 倍;播种后 65 d 和 90 d 单株根瘤干重分别为 1.38 和 1.33 g,在相同时期,比低量氮增加了 1% 和 45%,比阻遏氮增加了 9% 和 32%。统计分析结果表明,在播种后 45 d,根瘤数和根瘤干重在阻遏氮水平下与其他两个施氮水平处理间差异极显著( $P < 0.01$ )。在播种后 90 d,根瘤数在低量氮水平下与其他两个施氮水平处理间差异极显著( $P < 0.01$ ),根瘤干重在临界氮水平与其他两个施氮水平处理间差异极显著( $P < 0.01$ )。

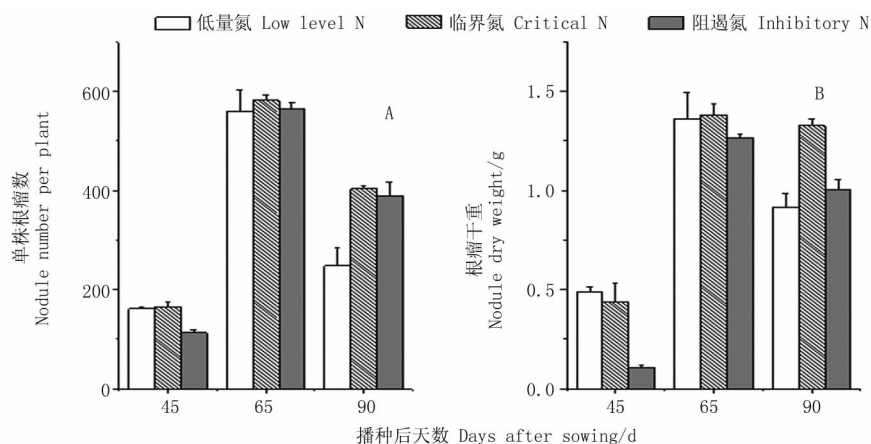


图 3 根瘤数和根瘤干重对氮阻遏的适应性反应

Fig.3 Adaptive response of nitrogen inhibitory on nodule number and nodule dry weight

**2.2.2 根瘤豆血红蛋白含量** 根瘤豆血红蛋白含量是表征植株固氮功能强弱的指标之一<sup>[15-16]</sup>。根瘤豆血红蛋白含量随着大豆生长发育逐渐减少(图 4),播种后 90 d,根瘤已变黑,失去了相应的固氮作

用,根瘤内豆血红蛋白含量由于太少或者没有而无法测定具体数值,因此,整体来说变化规律呈线性变化,随大豆生长发育逐渐减少。从施氮水平的影响来看,各时期不同施氮水平处理间变化趋势相

同,均呈单峰曲线变化,单位根瘤重血红蛋白含量在临界氮水平下达最大值。临界氮水平下:播种后 45 d 和 65 d 根瘤血红蛋白含量分别为 13.61 和 8.63  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,比同时期低量氮增加了 1% 和 1%,比阻遏氮增加了 6% 和 3%。统计分析结果表明,各时期不同施氮水平处理间无明显差异。

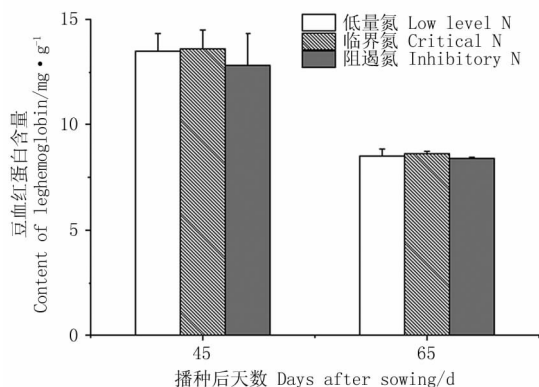


图 4 根瘤血红蛋白含量对氮阻遏的适应性反应

Fig. 4 Adaptive response of nitrogen inhibitory on nodule leghemoglobin

### 2.3 大豆根干重及碳氮积累对氮阻遏的适应性变化

2.3.1 根干重 由图 5 可知,随着大豆生长发育,单株根干重呈现先增加后降低的趋势,在播种后 65 d 达最大值,单株分别为 3.14、3.23 和 3.68 g,比相同施氮水平下播种后 45 d 增加了 56%、26% 和 75%,比播种后 90 d 增加了 15%、19% 和 20%。

从施氮水平的影响来看,在播种后 45 d,临界氮水平的单株根干重最大(2.55 g),是低量氮的 1.27

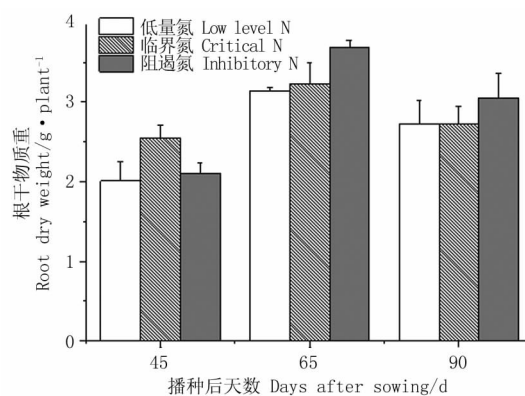


图 5 根干物质重对氮阻遏的适应性反应

Fig. 5 Adaptive response of nitrogen inhibitory on root DW

倍,阻遏氮的 1.21 倍;在播种后 65 和 90 d,根干重与施氮水平呈正相关,均在阻遏氮水平下达最大值(分别为 3.68 和 3.06 g),是播种后 65 d 低量氮和临界氮水平的 1.17 和 1.14 倍,是播种后 90 d 低量氮和临界氮水平的 1.12 和 1.12 倍。统计分析结果表明,各时期不同施氮水平处理间无明显差异。

2.3.2 根 C、N 积累 随着大豆生长发育,各施氮水平根 C、N 积累逐渐增加,播种后 65 d 达到最大值,以后降低(图 6)。播种后 65 d 单株根 C 积累为 1 400、1 461 和 1 672 mg,是相同施氮水平下播种后 45 d 的 1.6、1.3 和 1.8 倍,是播种后 90 d 的 1.2、1.3 和 1.3 倍;播种后 65 d 单株根 N 积累为 74、75 和 95 mg,分别比相同施氮水平播种后 45 d 增加了 88%、66% 和 141%,比播种后 90 d 增加了 126%、125% 和 124%。

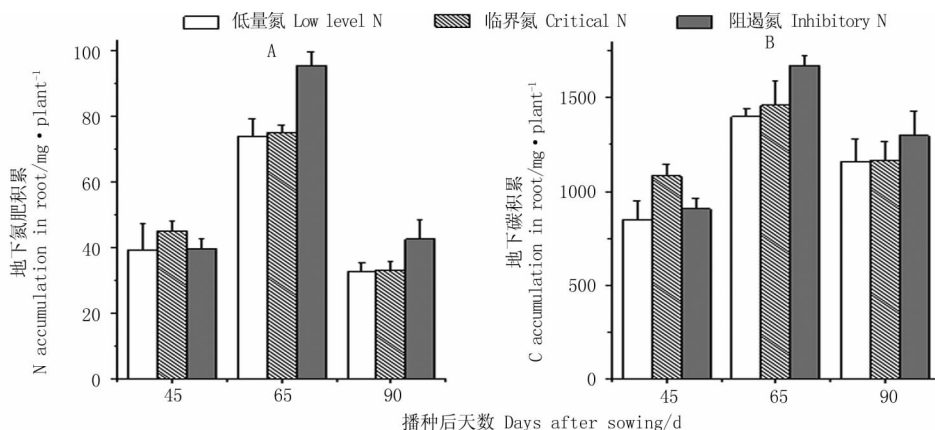


图 6 地下碳氮积累对氮阻遏的适应性反应

Fig. 6 Adaptive response of nitrogen inhibitory on C、N accumulation in root

从施氮水平的影响来看,在播种后 45 d,根 C、N 积累均在临界氮水平下达最大值,此时,C 积累为 1 083 mg,比低量氮水平增加了 27%,比阻遏氮水平增加了 19%;N 积累为 45 mg,比低量氮水平增加了 15%,比阻遏氮水平增加了 14%。在播种后 65 d 和

播种后 90 d,根 C、N 积累变化趋势相同,均与施氮水平呈正相关。

统计分析结果表明,播种后 65 d 阻遏氮地下部 N 积累与其他两个施氮水平处理间差异极显著( $P < 0.01$ ),其他各时期不同施氮水平处理间无明显差异。

### 3 结论与讨论

根系形态是评价植物吸收土壤养分能力的重要指标之一<sup>[17]</sup>,随着大豆生长发育,根长、根表面积、根体积、根尖数变化趋势一致,均为先增加后降低的趋势。说明播种后 65 d 根部生长旺盛,促进了大豆根系形态的建成,而根长、根表面积和体积的增加,增加了根系与土壤中肥料接触的机会,也增强了根系对养分的吸收能力。从施氮水平来看,整个生育期根长、根表面积、根体积和根尖数变化规律相同(播种后 45 d 根尖数除外),均呈单峰曲线变化,在临界氮水平下达到最大值。根部 C、N 积累量也在临界氮水平下达到最大值。表明在本试验条件下,临界氮水平适宜大豆根系生长发育,此时,根部碳氮积累量最大,根部活性最强,能促进大豆根瘤固氮。

播种后 65 d 正处于大豆结瘤盛期,此时的根瘤数和根瘤干重均达到最大值,且在临界氮条件下根瘤数和干重也明显高于其他两个氮处理。这一结果说明临界氮水平有利于根瘤的形成和生长,而低量氮和阻遏氮水平对大豆根瘤生长起抑制作用,且体现出阻遏氮水平时的氮阻遏效应。这一结果与房增国等<sup>[18]</sup>和严君等<sup>[19]</sup>研究结果相似。同样地,在播种后 65 d 根瘤处于固氮盛期,尽管此时单位根瘤生物量豆血红蛋白含量不高,但是较大的根瘤数目弥补了这一不足,而且在临界氮水平下达到最大值,证实了临界氮是大豆根瘤固氮的最适宜氮条件。因此,可以从研究大豆结瘤固氮过程中的氮阻遏现象出发,调整氮肥施用量,最终充分发挥大豆根瘤的固氮功能,提高大豆生产的经济效益。

综上所述,可初步认定为本试验条件下,临界氮水平( $54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )为适宜大豆根系生长,促进根瘤形成和发挥最佳固氮功能的最佳氮水平。

### 参考文献

- [1] Yamaguchi J, Tanaka A. Minimum space for root development without mechanical stress for obtaining a high yield of rice[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1990, 36(3): 515-518.
- [2] Costa C, Dwyer L M, Hamilton R I, et al. A sampling method for measurement of large root systems with scanner-based image analysis[J]. Agronomy Journal, 2000, 92: 621-627.
- [3] 金剑, 王光华, 刘晓冰, 等. 东北黑土区高产大豆 R5 期根系分布特征[J]. 中国油料作物学报, 2009, 28(3): 426-433. (Jin J, Wang G H, Liu X B, et al. Characteristics of root distribution at R5 stage in high yielding soybean in black soil[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2009, 28(3): 426-433.)

- [4] Kroon H D, Mommer L, Nishiwaki A. Root competition: Towards a mechanistic understanding[M]. Berlin: Ecological Studies, 2003: 215-233.
- [5] 王树起, 韩晓增, 乔云发, 等. 施氮对大豆根系形态和氮素吸收积累的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(6): 1069-1073. (Wang S Q, Han X Z, Qiao Y F, et al. Root morphology and nitrogen accumulation in soybean (*Glycine max* L.) under different nitrogen application levels[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(6): 1069-1073.)
- [6] 董守坤, 刘丽君, 孙聪姝, 等. 利用<sup>15</sup>N 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 levels on nodule growth of soybean using <sup>15</sup>N tracing method[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(4): 985-988.)
- [7] 王树起, 韩晓增, 乔云发, 等. 不同供 N 方式对大豆生长和结瘤固氮的影响[J]. 大豆科学, 2009, 28(5): 859-862. (Wang S Q, Han X Z, Qiao Y F, et al. Soybean (*Glycine max* L.) growth and nitrogen fixation as affected by different N supplying modes[J]. Soybean Science, 2009, 28(5): 859-862.)
- [8] 陈文新, 陈文峰. 发挥生物固氮作用减少化学氮肥施用量[J]. 中国农业科技导报, 2004, 6(6): 3-5. (Chen W X, Chen W F. Exertion of biological nitrogen fixation in order to reducing the consumption of chemical nitrogenous fertilizer[J]. Review of China Agricultural Science and Technology, 2004, 6(6): 3-5.)
- [9] 李玉英, 孙建好, 李春杰, 等. 施氮对蚕豆/玉米间作系统蚕豆农艺性状及结瘤特性的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(10): 3467-3474. (Li Y Y, Sun J H, Li C J, et al. Effects of inter-specific interactions and nitrogen fertilization rates on the agronomic and nodulation characteristics of intercropped faba bean[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(10): 3467-3474.)
- [10] Chu G X, Shen Q R, Cao J L. Nitrogen fixation and N transfer from peanut to rice cultivated in aerobic soil in an intercropping system and its effect on soil N fertility[J]. Plant and Soil, 2004, 263: 17-27.
- [11] Salvagiotti F, Cassman K G, Specht J E, et al. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review[J]. Field Crops Research, 2008, 11(1): 1-13.
- [12] 石海, 苗淑杰, 刘居东, 等. 施氮对结瘤和非结瘤近等位基因大豆生长和固氮性状的影响[J]. 大豆科学, 2012, 31(6): 961-965. (Shi H, Miao S J, Liu J D, et al. Effects of nitrogen application on growth and nitrogen fixation in nodulation and non-nodulation isoline soybean[J]. Soybean Science, 2012, 31(6): 961-965.)
- [13] 左元梅, 刘永秀, 张福锁. 与玉米混作改善花生铁营养对其根瘤形态结构及豆血红蛋白含量的影响[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2003, 29(1): 33-38. (Zuo Y M, Liu Y X, Zhang F S. Effects of improvement of iron nutrition by mixed cropping with maize on nodule microstructure and leghaemoglobin content of peanut[J]. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology, 2003, 29(1): 33-38.)

- growth stages on N uptake and N-fixation of soybean[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 1996, 18(4): 45-48, 72. )
- [9] 罗翔宇,董彦明,刘志远,等.启动氮加追肥对氮在大豆体内积累分配规律及产量的影响[J].大豆科学,2012,31(3):78-83. (Luo X Y, Dong Y M, Liu Z Y, et al. Nitrogen accumulation, distribution and yield of soybean as affected by starter-N plus topdressed N[J]. Soybean Science, 2012, 31(3): 78-83. )
- [10] 董雪. 氮素调控对大豆光合产物积累及根瘤固氮的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2009:47-54. (Dong X. The effects of N management on photosynthate distribution and nitrogenase activity of soybean [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2009: 47-54. )
- [11] 张晓艳,郑殿峰,冯乃杰,等.密度对大豆群体碳氮代谢相关指标及产量、品质的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(5):128-132. (Zhang X Y, Zheng D F, Feng N J, et al. Effect of plant density on soybean carbon and nitrogen metabolism, yield and quality[J]. Agriculture Research in the Arid Areas, 2011, 29(5): 128-132. )
- [12] 肖亦农,谢甫缙,肖万欣.不同肥密处理对超高产大豆氮素吸收和产量的影响[J].大豆科学,2011,30(5):669-776. (Xiao Y N, Xie F T, Xiao W X. Effects of different fertilizer level and planting density on nitrogen absorption and yield of super-high-yielding soybean[J]. Soybean Science, 2011, 30(5): 669-776. )
- [13] 翟云龙.种植密度对高产春大豆生长发育及氮磷钾吸收分配的效应研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2005:23-27. (Di Y L. Study on the effect of plant density on the growth and development, nitrogen phosphorus potassium absorption and distribution of high-yield spring soybean [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2005: 23-27. )
- [14] 王立刚,刘景辉,刘克礼,等.大豆对氮素吸收规律的研究[J].中国农学通报,2004,20(6):162-165. (Wang L G, Liu J H, Liu K L, et al. The study on the law of nitrogen absorption in soybean [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2004, 20(6): 162-165. )
- [15] 王海艳,孙超,罗盛国,等.优化施肥对大豆氮素积累及产量的影响[J].东北农业大学学报,2012,43(4):11-15. (Wang H Y, Sun C, Luo S G, et al. Effect of optimized fertilization on N accumulation and yield of soybean[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2012, 43(4): 11-15. )
- [16] 蒋彭炎.水稻高产栽培理论与技术讲座(2)—高产水稻的若干生物学规律[J].中国稻米,1994(2):43-45. (Jiang P Y. Lectures on high-yielding cultivation theory and technology of rice (2)—biology regularities of high-yield rice[J]. China Rice, 1994(2): 43-45. )
- [17] 杜金哲,李文雄,胡尚连,等.春小麦不同品质类型氮的吸收、转化利用及与籽粒产量和蛋白质含量的关系[J].作物学报,2001,27(2):253-260. (Du J Z, Li W X, Hu S L, et al. Nitrogen assimilation, transfer and utilization in relation to grain protein content and yield of spring wheat genotypes differing in quality[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 27(2): 253-260. )
- [18] 侯立白,李奇真,孙克用.应用<sup>15</sup>N示踪法对大豆不同来源氮素吸收与利用的研究[J].作物学报,1985,11(3):187-189. (Hou L B, Li Q Z, Sun K Y. Studies on the absorption and utilization of different nitrogen sources by soybean by means of <sup>15</sup>N isotope tracer[J]. Acta Agronomica Sinica, 1985, 11(3): 187-189. )
- [19] 侯国梅.追施氮肥对大豆体内氮素运转与分配的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2009:38-41. (Hou G M. Effects of top-dressed N-fertilizer on translocation and distribution in soybean plants [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2009: 38-41. )
- [20] 金剑,刘晓冰,王光华,等.氮素积累、分配与大豆产量的关系[J].大豆通报,1998(6):25. (Jin J, Liu X B, Wang G H, et al. Studies on the relationships between nitrogen accumulation, distribution and yield of soybean[J]. Soybean Bulletin, 1998(6): 25. )

#### (上接第 505 页)

- [14] 沈宏,施卫明,王校常,等.不同作物对低磷胁迫的适应机理研究[J].植物营养与肥料学报,2001,7(2):172-177. (Shen H, Shi W M, Wang X C, et al. Study on adaptation mechanisms of different crops to low phosphorus stress[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2001, 7(2): 172-177. )
- [15] Dakorad F. A functional relationship between leghemoglobin and nitrogenase based on novel measurements of the proteins in legume root nodules[J]. Annals of Botany, 1995, 15: 49-54.
- [16] Sinclair T R, Serra J R. Legume nitrogen fixation and drought[J]. Nature, 1995, 378(23): 344-347.
- [17] Lynch J. Root architecture and plant productivity[J]. Plant Physiology, 1995, 109(1): 7-13.
- [18] 房增国,左元梅,李隆.玉米/花生间作条件下不同施氮水平对花生铁营养和固氮的影响[J].植物营养与肥料学报,2004,10(4):386-390. (Fang Z G, Zuo Y M, Li L, et al. Effects of different nitrogen levels on iron nutrition and nitrogen fixation of peanut in maize-peanut mixed cropping system[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(4): 386-390. )
- [19] 严君,韩晓增,王守宇,等.不同施氮量及供氮方式对大豆根瘤生长及固氮的影响[J].江苏农业学报,2010,26(1):75-79. (Yan J, Han X Z, Wang S Y, et al. Effects of different N supply levels and methods on nodule growth and nitrogen fixation in soybean (*Glycine max* L.) [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2010, 26(1): 75-79. )