

## 长期定量施肥对大豆根系形态和根瘤性状的影响

乔云发, 韩晓增

(中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 黑龙江 哈尔滨 150081)

**摘要:**为阐明施肥对大豆根系生长和结瘤性状的影响,以中国科学院海伦农业生态实验站长期定位施肥试验为平台,研究了施用不同种类肥料(NPK、NPKM、NK、NP 和 PK)对大豆根系特征和根瘤性状的影响。结果表明:各施肥处理大豆根长、根表面积和根体积变化趋势相似,均在结荚期出现峰值。NPK 和 NP 处理的根长和根表面积比其它施肥处理大,而平均根直径仅小于 NPKM 处理,与其它处理间差异不显著。大豆根干重呈单峰曲线变化,各施肥处理间差异不大。根冠比在五叶期最大,各施肥处理间根冠比的差异主要在鼓粒期之前表现出来,从鼓粒期开始,处理间没有显著差异,从五叶期到鼓粒期,CK 和 PK 处理根冠比较 NPK 处理低。供给充足氮的 NK 处理,根瘤数最少,根瘤干重增长率最慢,PK 处理根瘤数和根瘤干重最大。由此推断,氮肥能促进大豆地下部生长,充足的氮素抑制根瘤原基发育成根瘤,进一步抑制根瘤的生长。

**关键词:**长期施肥;大豆;根系形态;根瘤

**中图分类号:**S565.1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-9841(2011)01-0119-04

## Effects of Long-term Fertilization on Root Phenotype and Nodulation of Soybean

QIAO Yun-fa, HAN Xiao-zeng

(Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, Heilongjiang, China)

**Abstract:**To study the effect of fertilization on growth and nodulation of soybean, the experiment analyzed the root phenotype and nodulation of soybean, grown in long-term fertilization trail of Hailun station, CAS. We selected five fertilizers, including NPK, NPKM, NK, NP and PK to research their function on soybean root growth and nodulation. Results indicated that root length, surface and volume showed similar changing trend among different fertilization treatments, and reached peak at podding stage. There were larger root length and root surface in NPK and NP than other treatments. However, average root diameter was the largest in NPKM. Root dry biomass changed as a single peak trend, and there was no significant difference among fertilization treatments. From 5th leaf stage to filling stage, the ratio of root to shoot in CK and PK were lower than NPK, the ratio up to largest value, which was different among treatments before filling period. All these suggested that nitrogen promoted soybean root growth. Otherwise, the nodule number and weight were lower in NK, and higher in PK than other treatments. Those results indicated that sufficient nitrogen application such as NK, inhibited nodule primordium developed to nodule and nodule growth.

**Key words:** Long-term fertilization; Soybean; Root phenotype; Nodule

根系是植物生长的基础,健壮的根系为植株提供充足的养分和水分<sup>[1]</sup>。作物的生长发育是地上与地下部形态功能相协调的结果,根系形态决定了作物获得养分和水分的能力<sup>[2-3]</sup>,反应作物根系形态的参数,主要包括根生物量、根长、根表面积、平均根直径和根体积等<sup>[2,4-5]</sup>。豆科作物的共生固氮作用为农业生产提供了重要的氮素资源,大豆与根瘤菌共生固氮作用所固定的氮素约占大豆一生对氮素需求的50%~60%<sup>[6]</sup>。施肥是提高作物产量的关键措施之一,施肥必然影响大豆营养元素间的协调供应,大豆根系形态及根瘤性状受到营养元素种类及总体供应状况的影响<sup>[7]</sup>。目前,对大豆根系的

研究主要集中在养分和水分胁迫、生长习性及其产量等方面,对大豆根瘤的研究主要集中在根瘤菌分布及其侵染能力差异<sup>[2,8-9]</sup>,而施肥对大豆根系形态和结瘤动态的研究报道较少。因此,试验研究了东北松嫩平原黑土区长期定位施肥对大豆根系形态和结瘤性状的影响,为揭示大豆地下部与施肥的相互作用,提高大豆产量提供科学依据。

### 1 材料与方 法

#### 1.1 试验区基本概况

试验地位于黑龙江省海伦市的中国科学院海

收稿日期:2010-11-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41001138);国家科技支撑计划资助项目(2009BADB3B04)。

第一作者:乔云发(1976-),男,博士,副研究员,主要从事黑土碳、氮循环方面研究。E-mail: qiaoyunfa@163.com。

通讯作者:韩晓增(1957-),男,研究员,博士生导师,主要从事土壤与植物营养、施肥和农业生态方面研究。E-mail: hanxz@sina.ac.cn。

伦农业生态实验站(N 47°27', E 126°55'), 该站处于我国东北黑土区的中心, 海拔高度 240 m 左右, 属于温带大陆性季风气候, 冬季寒冷干燥, 夏季高温多雨, 四季分明, 雨热同季, 年平均气温 1.5°C,  $\geq 10^\circ\text{C}$  活动积温 2 600 ~ 2 800°C, 无霜期 125 ~ 135 d, 年降雨量 500 ~ 600 mm。试验区地形较为平坦, 供试土壤为典型黑土, 土壤母质为第四纪黄土状母质, 试验前土壤的基本营养状况为有机碳、全氮、全磷和全钾分别为 27.96、2.21、1.61 和 20.20  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 碱解氮、速效磷和速效钾分别为 239.7、41.2 和 228.9  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

### 1.2 试验设计

试验共设 6 个处理: ①无肥(CK); ②化肥 NP(NP); ③化肥 NK(NK); ④化肥 PK(PK); ⑤化肥 NPK(NPK); ⑥化肥 NPK + 有机肥(NPKM), 3 次重复, 小区面积 63  $\text{m}^2$ , 随机排列。化学氮肥为尿素, 磷肥为磷酸二铵, 钾肥为硫酸钾, 有机肥为腐熟猪粪。有机肥在每年 10 月份秋季整地时一次性施入; 大豆和小麦春季播种时全部化肥作基肥; 玉米 1/3 氮肥、全部磷钾肥在春季播种时作基肥, 剩余 2/3 氮肥在拔节期作为追肥, 施肥量见表 1。试验开始于 1991 年, 玉米-大豆-小麦轮作, 一年一熟制, 当季作物为大豆。分别在大豆第 5 片三出复叶展开期(五叶期)、开花期、结荚期、鼓粒期和成熟期取样, 每个小区取 3 株。

表 1 施肥量

Table 1 Fertilization volume ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )

作物 Crops	N	P( $\text{P}_2\text{O}_5$ )	K( $\text{K}_2\text{O}$ )	OM
玉米 Maize	112.50	45.00	30.00	22 500
大豆 Soybean	20.25	51.75	18.75	22 500
小麦 Wheat	112.50	45.00	30.00	22 500

### 1.3 测定项目与方法

根系形态指标采用根系扫描分析仪(WinRHIZO Reg V2004a, Canada)测定。取样后将根系用流水缓缓冲洗干净, 冲洗时在根系下面放置 100

目筛以防止脱落的根系被水冲走。根系形态特性用根系分析系统测定, 经专用数字化软件(WinRHIZO, 2004a)分析后获得根长、根表面积、根体积、平均根直径等形态指标。调查根瘤数量和测定根瘤干重。

### 1.4 数据分析

采用 Excel 2003 软件对数据进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 施肥对大豆根干重和根冠比的影响

在全生育期内, 各处理大豆根干重呈单峰曲线变化, NPKM 处理在结荚期达最大为 93.24  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 而其它处理在鼓粒期达最大。在五叶期, 施肥对根干重影响不大, 但处理间差异逐渐增大, NPKM 处理根干重大于 NPK 处理, 这说明施有机肥促进根系生长; 长期不施磷肥 NK 处理, 根干重小于 NPK 处理, 而 PK、NP 和 NPK 处理间差异不大, 这说明磷肥对大豆根系生长影响比氮肥大, 黑土中钾含量较高, 施钾肥对大豆根系生长没有明显作用; 长期不施肥 CK 处理, 根干重大于 NK 处理, 而小于 NPK 处理, 这主要是由于长期施用氮钾肥, 加速土壤中磷素的消耗, CK 处理的磷含量高于 NK 处理高, 低于 NPK 处理。

各处理大豆根冠比在全生育期内呈下降趋势, 五叶期最大, 说明大豆在五叶期后, 地上部生长优先于地下部, 植株光合同化产物供应给地上部的比例增加。处理间根冠比差异主要表现在鼓粒期之前, 从鼓粒期开始, 处理间没有显著差异(从五叶期到鼓粒期, CK 和 PK 处理根冠比较 NPK 处理大, 说明氮肥促进地上部生长)。而不同施肥处理对大豆根冠比的影响主要在五叶期到开花期。NPKM 处理根冠比较 NPK 处理小, 这说明施用有机肥促进大豆地上部生长。大豆全生育期, 不施钾肥的 NP 处理根冠比与 NPK 处理间没有显著差异。

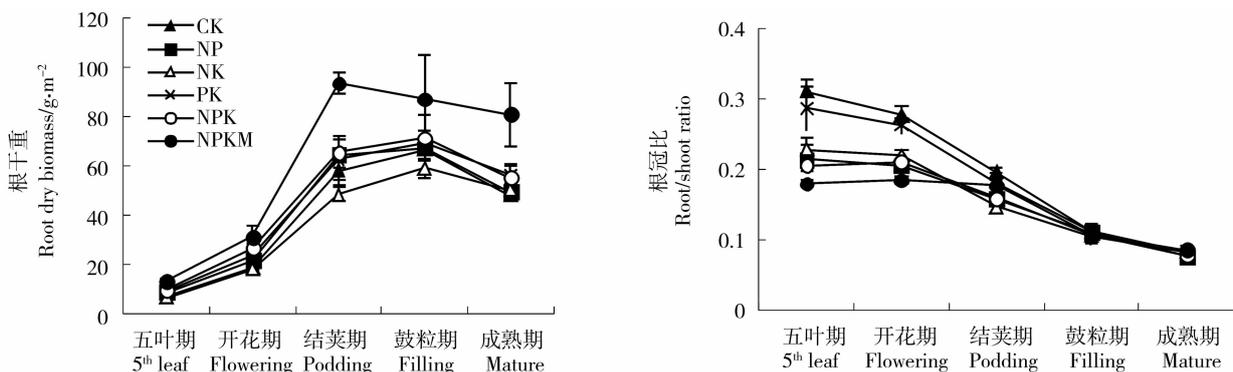


图 1 不同施肥条件下大豆根干重和根冠比的动态变化

Fig. 1 Dynamics of root dry mass and root shoot ratio of soybean under different fertilizations

### 2.2 施肥对大豆根系形态性状的影响

各处理根长、根表面积和根体积对施肥影响的变化趋势相似,在结荚期表现为峰值,这说明大豆

根系生长是各参数相互协调的结果。而平均根直径在开花期达最大,随着生育期延长,根系平均根直径变化不明显。

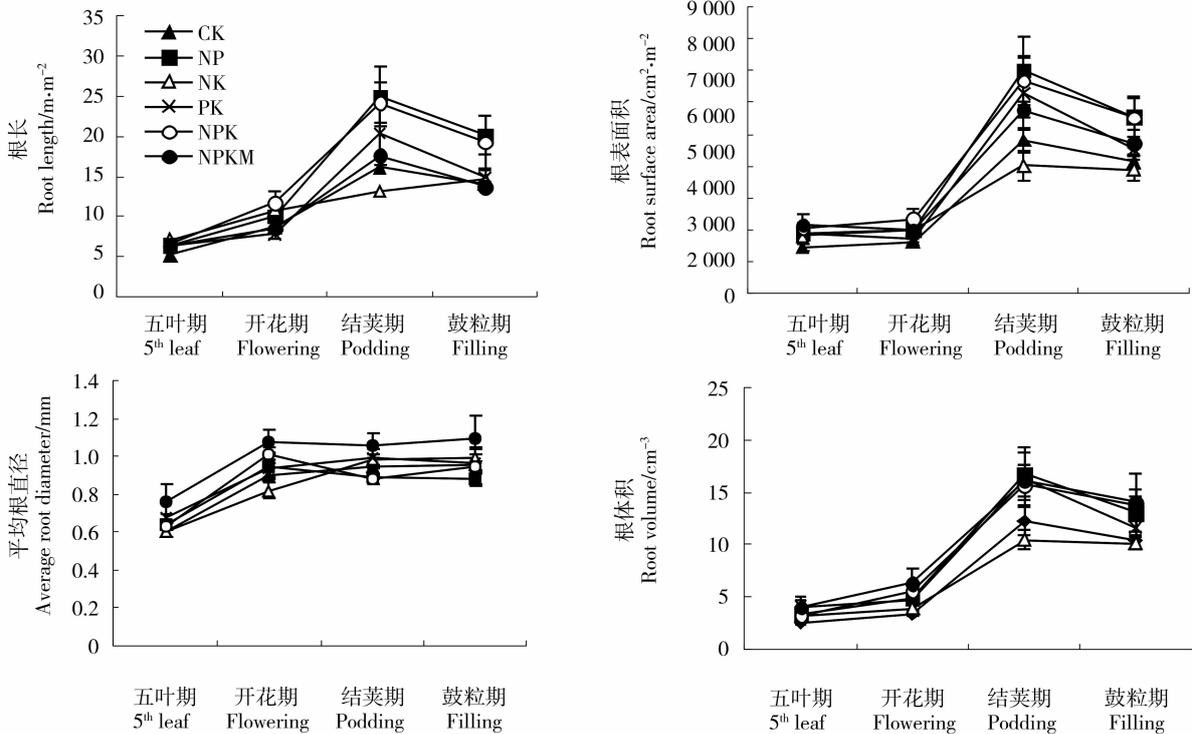


图 2 大豆根长、根表面积、平均直径和体积的动态变化

Fig.2 Dynamics of root length, root surface, average root diameter and root volume of soybean under different fertilizations

平衡施肥 NPK 处理和 NP 处理,根长和根表面积大于其它施肥处理,而平均根直径小于 NPKM 处理。这主要是由于 NPKM 处理,施用有机肥促进土壤中大团聚体增加,土壤物理性状有利于大豆根系生长。缺磷 NK 处理,根长、根表面积和根体积都最小,这说明磷素对大豆根系生长起到非常重要的作用。NK 和 PK 处理相比,由于大豆能够共生固氮,提供一定的氮素营养,PK 处理根系生长受到缺氮的影响不及 NK 处理受缺磷的影响严重。

抑制大豆根瘤形成,另一方面充足的氮也抑制根瘤原基发育成根瘤,同时抑制根瘤的生长。PK 处理根瘤数、根瘤干重均最大,这主要是由于充足的磷素供给促进大豆结瘤,同时大豆生长需要一定的氮源,大豆为了满足自身氮素需求,通过增加根瘤的数量和重量来增强根瘤的固氮量。长期不施肥的 CK 处理,根瘤数较少,仅比 NK 处理高,而单个根瘤干重却为所有施肥处理中最大的,这主要是由于长期没有外源肥料供给,土壤本身提供的有效养分降低,大豆为了自身生长需要,启动相对较少的根瘤来发挥最大的根瘤固氮能力,来为大豆生长提供有效氮素。

### 2.3 施肥对结瘤性状的影响

结瘤性状直接影响大豆固氮能力,施肥对大豆结瘤特性有很大影响,氮素充足的 NK 处理,根瘤数最少,这主要有 2 个方面的原因,一方面,由于缺磷

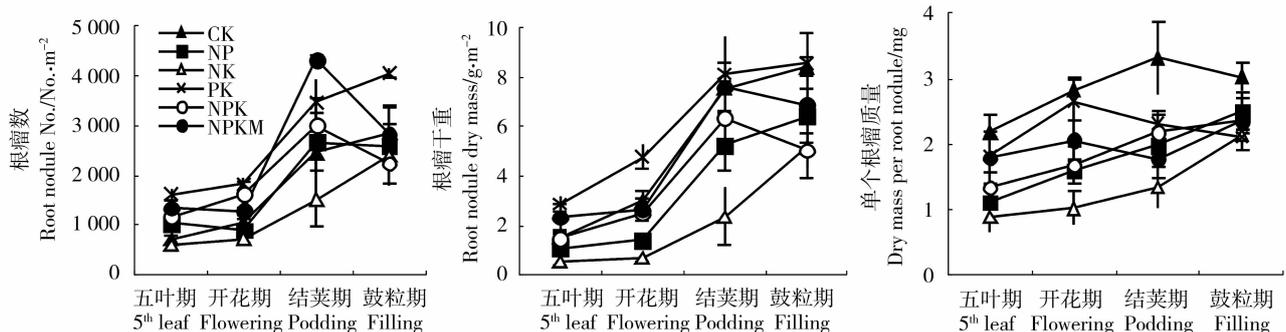


图 3 大豆根瘤数、根瘤干重和单个根瘤干重的动态变化

Fig.3 Dynamics of root nodule No., root nodule dry mass and dry mass per root nodule of soybean under different fertilizations

### 3 讨论

根系是作物生长所需养分的主要通道,根系形态决定作物获得养分和水分的能力<sup>[10]</sup>,如根长、根表面积和根体积都直接影响着作物对养分的吸收和运输能力<sup>[11-12]</sup>。环境介质中的养分状态直接影响根系特征,如磷素在土壤中的不易移动性和易固定性,决定了植物对磷素营养的吸收主要依靠根系吸收其周围所接触到的土壤有效磷<sup>[13]</sup>,因此根系参数也将随着土壤磷素状况而发生改变。

施肥是影响土壤养分分布的直接因素,势必影响着根系参数的变化。该研究结果表明,施肥对大豆根系形态影响较大,尤其以有机无机肥配合施用(NPKM)时根系生物量最大,并表现出单峰曲线变化规律。长期不施磷肥的NK处理,根干重较小,而PK、NP和NPK处理间差异不大。此外,施肥调控着地上部和根系的协调生长,各处理大豆根冠比在全生育期内呈下降趋势,五叶期最大,大豆在五叶期后,地上部生长优先于地下部,植株光合同化产物优先供给地上部,且分配比例增加。各处理根长、根表面积和根体积变化趋势相似。由此可见,植物根系较强的可塑性使其能够适应不断变化的环境,而环境因素是仅次于遗传背景影响根系发育的重要因素<sup>[7,14]</sup>。

大豆的共生固氮过程受多种生物和非生物因素调控,其中磷氮是2个非常重要的因素。在根瘤形成初期需要一定的氮以保证结瘤,而持续供氮又会抑制根瘤生长<sup>[15]</sup>。磷是结瘤和根瘤生长过程能量的来源和蛋白、核酸的重要组分,缺磷直接影响大豆的结瘤固氮过程<sup>[16]</sup>。因此,土壤中的氮磷条件直接影响大豆的根瘤形成和生长过程。该研究结果表明,长期氮素充足的NK处理,根瘤数最少,根瘤干重增长速率最慢。PK处理根瘤数、根瘤干重最大。这些结果不仅表明氮磷在大豆共生固氮中的重要作用,而且说明磷的作用较氮更为重要,关于在调控大豆结瘤过程中如何交互起作用的问题,有必要进一步研究。

### 参考文献

[1] 王树起,韩晓增,乔云发,等. 低分子量有机酸对大豆根系形态和磷素吸收积累的影响[J]. 大豆科学, 2009, 28(2):210-216. (Wang S Q, Han X Z, Qiao Y F, et al. Effect of low molecular weight organic acids on root morphology and phosphorus accumulation in soybean[J]. Soybean Science, 2009, 28(2): 210-216.)

[2] 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.)

[3] 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.

[4] 陈杨,李隆,张福锁. 大豆和蚕豆苗期根系生长特征的比较[J]. 应用生态学报, 2005, 16(11):2112-2116. (Chen Y, Li L, Zhang F S. Root growth characteristics of soybean and faba bean at their seedling stage[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(11):2112-2116.)

[5] Vameralo T, Saccomani M, Bona S, et al. A comparison of root characteristics in relation to nutrient and water stress in two maize hybrids[J]. Plant and Soil, 2003, 255:157-167.

[6] Ohwaki Y, Sugahara P. Active extrusion of protons and exudation of carboxylic acids in response to iron deficiency by roots of chickpea (*Cicer arietinum* L.) [J]. Plant Soil, 1997, 189:49-55.

[7] 王庆成,程云环. 土壤养分空间异质性与植物根系的觅食反应[J]. 应用生态学报, 2004, 5(6):1063-1068. (Wang Q C, Cheng Y H. Response of fine roots to soil nutrient spatial heterogeneity[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(6): 1063-1068.)

[8] 杨秀红,吴宗璞,张国栋. 无限结荚习性与亚有限结荚习性大豆品种根系性状的比较研究[J]. 大豆科学, 2001, 20(3):231-234. (Yang X H, Wu Z P, Wang G D. A comparative study on characteristic of root system between indeterminate and sub-indeterminate soybean varieties [J]. Soybean Science, 2001, 20(3):231-234.)

[9] 江木兰,张学江,徐巧珍,等. 大豆-根瘤菌的固氮作用[J]. 中国油料作物学报, 2003, 25(1):50-58. (Jiang M L, Zhang X J, Xu Q Z, et al. Nodulation and nitrogen-fixation in soybean-rhizobium[J]. Chinese Journal of oil Crop Sciences, 2003, 25(1):50-58.)

[10] 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.

[11] 廖红,严小龙. 低磷胁迫下菜豆根构型性状的 QTL 定位[J]. 农业生物技术学报, 2000, 8(1):67-70. (Liao H, Yan X L. Molecular mapping of QTLs conferring root architecture of common bean in response to phosphorus deficiency[J]. Journal of Agricultural Biotechnology, 2000, 8(1): 67-70.)

[12] Rubio G, Walk T, Ge Z. Root gravitropism and below-ground competition among neighbouring plants: A modeling approach [J]. Annals of Botany, 2001, 88: 929-940.

[13] 王美丽,严小龙. 大豆根形态和根分泌物特性与磷效率[J]. 华南农业大学学报, 2001, 22(3):1-3. (Wang M L, Yan X L. Characteristics oil root morphology and root exudation of soybean in relation to phosphorus efficiency[J]. Journal of South China Agricultural University, 2001, 22(3):1-3.)

[14] 张永清,苗果园. 根土空间对高粱根系生理特征及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(4):635-639. (Zhang Y Q, Miao G Y. Effects of soil root-growing space on root physiological characteristics and grain yield of sorghum[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(4):635-639.)

[15] 苗淑杰,乔云发,韩晓增,等. 根瘤形成后缺磷对大豆生长和根瘤固氮功能的影响[J]. 作物学报, 2009, 35(7):1344-1349. (Miao S J, Qiao Y F, Han X Z, et al. Effects of phosphorus deficiency on growth and nitrogen fixation of soybean after nodule formation [J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(7):1344-1349.)

[16] 苗淑杰,乔云发,韩晓增. 大豆结瘤固氮对磷素的需求[J]. 农业系统科学与综合研究, 2006, 22(4):276-282. (Miao S J, Qiao Y F, Han X Z. Requirement of phosphorus for soybean cultivars nodulation and nitrogen fixation [J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2006, 22(4): 276-282.)