

施氮量对滴灌高产春大豆根系生长及产量的影响

高 阳,楚光红,傅积海,张艳伟,章建新

(新疆农业大学农学院,新疆 乌鲁木齐 830052)

摘 要:为揭示施氮量对滴灌高产春大豆根系生长及产量的影响规律,在田间滴灌条件下采用挖掘取样法研究了 0 kg·hm⁻²(N₀)、75 kg·hm⁻²(N₇₅)、150 kg·hm⁻²(N₁₅₀)、225 kg·hm⁻²(N₂₂₅) 4 种施氮量对新大豆 27 号 0~80 cm 土层根系干物质质量、侧根长度、表面积、根系活性、伤流量、根瘤数、根瘤质量及产量的影响。结果表明:随着施氮量的增加,0~80 cm 土层根系总干物质质量、侧根总长度、侧根总表面积呈现先增后降的变化趋势,均以 N₁₅₀ 处理最高,在 R₅(始粒期)期分别较 N₀ 增加 27.3%、49.46%、38.14%,其中,0~20 cm 土层分别较 N₀ 增加 27.0%、29.02%、34.24%;R₅ 期 N₁₅₀ 单株伤流量较 N₀ 增加 176.0%,R₂(盛花期)期 0~20、20~40 cm 土层根系活力 N₁₅₀ 分别较 N₀ 增加 44.3%、25.1%;R₅ 期 N₁₅₀ 单位面积根瘤数及质量分别较 N₀ 减少 8.74%、34.6%;施氮可增加产量,以 N₁₅₀ 产量最高,为 4 889.62 kg·hm⁻²,氮肥农学利用效率 3.58 kg·kg⁻¹。施氮增加产量主要是促进 0~20 cm 土层根系生长,提高 0~40 cm 根系活力的结果。

关键词:大豆;施氮量;根系;生长;滴灌;产量

中图分类号:S565.106 **文献标志码:**A

Effect of nitrogen fertilizer amount on root growth and yield
of spring soybean in drip irrigation

GAO Yang, CHU Guang-hong, FU Ji-hai, ZHANG Yan-wei, ZHANG Jian-xin
(College of Agronomy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: In order to investigate the effect of nitrogen application amount on root growth and yield of spring soybean with high yield in drip irrigation, the excavation sampling method was used to study the effects of four nitrogen fertilizer amount treatments, which are 0 kg·hm⁻²(N₀), 75 kg·hm⁻²(N₇₅), 150 kg·hm⁻²(N₁₅₀) and 225 kg·hm⁻²(N₂₂₅) on soil root dry weight, root length and root surface area, activity and bleeding rate, nodule number, quality of 0~80 cm soil layer and yield of New Soybean No. 27. the total root dry weight, total lateral root length, and total lateral surface area of lateral roots, and the treatment was highest at N₁₅₀ and was at R₅(initial grain size).The results showed that the total dry weight, the length of lateral root and the surface area of lateral roots in 0~80 cm soil layer showed a trend of increasing at first and then decreasing with the increase of nitrogen application amount. and all of them was highest at N₁₅₀ treatment, compared with N₀ treatment, the total dry weight, the length of lateral root and the surface area of lateral roots in 0~80 cm soil layer at R₅ period increased by 27.3%,49.46% and 38.14%, respectively. while its in 0~80 cm soil layer at increased by 27.0%,29.02% and 34.24%. The wound flow of each plant at R₅ increased by 176.0%. The root activity of N₁₅₀ treatment in 0~20 cm and 20~40 cm soil layers at R₂ increased by 44.3% and 25.1%, respectively, The number and quality of root nodule at R₅ stage in N₁₅₀ treatment decreased by 8.74% and 34.6%,The yield of N₁₅₀ treatment was higher, which was 4 889.62 kg·hm⁻², and the utilization efficiency of nitrogen fertilizer was 3.58 kg·kg⁻¹. Nitrogen application can increase spring soybean is mainly to promote the root growth of 0~20 cm soil layer and increase the root activity of 0~40 cm.

Keywords: soybean; nitrogen rate; root system; growth; drip irrigation; yield

新疆是我国春大豆的高产区。晚熟大豆品种中黄 35 与膜下滴灌技术结合在新疆获得 6.0 t · hm⁻² 的超高产^[1]。大豆获得高产必需积累相应的氮量^[2]。大豆有土壤、肥料和根瘤固氮三种氮来源,三者之间既相辅相成,又相互制约,共同为大豆提供生长发育所需要的氮素营养^[3]。施用适量氮肥,补充土壤氮素的不足是大豆高产关键技术措施之一^[4]。根系生长状况不仅决定作物获得水分和养分的能力,还影响植物地上部分生长发育和产量的形成^[5-6]。氮肥对大豆生长和产量的影响是从根系生长开始的^[7]。适当的氮素可促进大豆根系生长,增加根系干物质量,过量氮素则抑制其生长^[8]。夏大豆根系性状因不同施肥量而异,造成根系对地上部的供养能力不同,最终影响籽粒产量^[9]。大豆生物量和产量随着施氮量的增加而增加,而根瘤数量、干物质量、大小呈逐渐下降的趋势,若想要最大发挥大豆结瘤固氮功能,就需不施氮或少施氮^[10]。已有的氮肥对大豆根系生长的影响研究多是东北盆(筐)栽试验的结果,有关氮肥对新疆春大豆根系生长影响的研究很少^[11]。本文在田间滴灌条件下系统地研究了施氮量对中熟品种新大豆 27 号根系生长和产量的影响规律,为新疆大豆高产栽培提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2016 年在新疆伊宁县农业科技示范园(萨地克于孜乡)进行。试验地为壤土,前茬春玉米,玉米收后秸秆还田。0~20 cm 土层有机质 17.3 g · kg⁻¹、碱解氮 57.8 mg · kg⁻¹、有效磷 22.6 mg · kg⁻¹、速效钾 235 mg · kg⁻¹、pH8.5,翻地前机施 P₂O₅ 138 kg · hm⁻²和 K₂O 120 kg · hm⁻²。4 月 11 日人工播种,品种为新大豆 27 号。行距宽行 50 cm、窄行 30 cm。第 1 片复叶全展时定苗,株距 8.3 cm,理论保苗 30 万株 · hm⁻²。定苗后按“1 管 2 行”将毛管铺于窄行中间。分别在 6 月 13 日、7 月 14 日、8 月 5 日、8 月 19 日滴水,滴水量(水表控制)依次为 750、600、750、600 m³ · hm⁻²。生育期间人工除草 2 次,9 月 17 日收获。

1.2 试验设计

试验采用单因子完全随机区组设计,以普通尿素(含氮量 46%)为氮源。根据实验地肥力水平,设置 0 kg · hm⁻² (N₀)、75 kg · hm⁻² (N₇₅)、150 kg · hm⁻² (N₁₅₀)、225 kg · hm⁻² (N₂₂₅) 4 个氮肥(纯氮)处理,各处理均由单独的施肥装置控制,3 次重复,小

区面积 32.0 m² (10.0 m×3.2 m)。施氮时期及施氮量见表 1。

表 1 各处理施氮量及施肥时期
Table 1 Nitrogen application amount and fertilizer application period

处理 Treatment	施氮量/(kg · hm ⁻²) Nitrogen application amount		总施氮量 Total /(kg · hm ⁻²)
	6 月 13 日 (R ₁)	7 月 14 日 (R ₃)	
N ₀	0	0	0
N ₇₅	75	0	75
N ₁₅₀	75	75	150
N ₂₂₅	150	75	225

1.3 测定项目与方法

1.3.1 根系形态及根瘤测定 分别于 6 月 11 日 (R₁:始花期)、6 月 25 日 (R₂:盛花期)、7 月 11 日 (R₃:始荚期)、7 月 25 日 (R₅:始粒期)、8 月 11 日、8 月 25 日 (R₆:满粒期),分别选取具代表性的样点,挖取各处理 0~20、20~40、40~60、60~80 cm 土层(止于无根土层)根系,每层取土体积为 0.019 2 m³ (0.4 m×0.24 m×0.2 m,长×宽×高,长为宽行中点与窄行中点的距离,宽为行长,高为深度),2 次重复。分别收集各土层中根系及根瘤,用水洗净(放置一个 100 目筛子,以防止根及根瘤被冲走)根系和根瘤上的泥土。将计数后根瘤放入烘箱在 105℃ 杀青 30 min,在 80℃ 下烘干至恒量称质量。

根系形态采用根系扫描分析仪 (WinRHIZO - 2004a, Canada) 测定。将冲洗净侧根样放入 30 cm×40 cm 树脂玻璃槽中,加入适量的水(使其淹过根样),用毛刷将根样(0~20、20~40 cm 土层去除主根)充分散开后,进行扫描获取图像,经专用数字化软件 (WinRHIZO - 2004a) 分析后获得根长、根表面积、根体积、平均直径、根尖数等形态指标。将扫描完根样在 80℃ 下烘干称质量。

1.3.2 根系活力及伤流量测定 参照张宪政^[12]的氯化三苯基四氮唑 (TTC) 法,取样方法与根系取样相同,选取各层的嫩根 0.5 g 左右。参照熊庆娥^[13]的方法:测定日期同根系,各处理每次选取连续 6 株,于北京时间 20:00 时从子叶节处剪断植株,迅速将装有脱脂棉(已称质量,精确到 0.1 mg)的离心管套住下胚轴,脱脂棉紧贴切口,管口用塑料薄膜密封,次日 8:00 时取下离心管,封口称重。

1.3.3 产量及其结构测定 在成熟期每小区选取中间 4 行实收 4.8 m² (3 m×1.6 m),分别人工脱粒,晾干后称取质量和百粒重,同时用谷物水分测定仪测定各小区籽粒含水量,将各小区产量折合成标准含水量 (13.5%) 的产量。成熟前每小区连续选 10

株,逐株统计粒数,以 30 株的平均值计算单株粒数。

1.3.4 氮肥农学利用率计算 氮肥农学利用率=(施氮区产量-空白区产量)÷施氮量

1.4 数据处理

采用 SPSS 19.0 和 Excel(2013 版)软件进行数据分析及绘图,方差分析采用 Duncan 法。

2 结果与分析

2.1 施氮量对春大豆侧根干物质质量和侧根干物质质量密度时空变化的影响

各处理根系侧根总干物质质量在 6 月 11 日(R₁期)至 6 月 25 日(R₂期)的积累量占 6 月 25 日的 66.9%~73.7%。处理间 6 月 25 日至 8 月 25 日的侧根总根干物质质量差异达显著水平(图 1A)。处理 N₇₅、N₁₅₀、N₂₂₅的侧根系总重多大于 N₀。7 月 25 日

(R₅期)至 8 月 25 日(R₆期)均以 N₁₅₀处理侧根总根系干物质质量最大,7 月 25 日 N₇₅、N₁₅₀、N₂₂₅根系分别较 N₀增加 10.83%、27.3%、13.29%。由图 1B、1C、1D、1E 可知,随着土层变深侧根干物质质量密度呈剧降变化趋势,R₅期 0~20、20~40 cm 土层侧根干物质质量分别占总侧根干物质质量的 88.92%~89.95%和 5.60%~6.54%。施氮处理 0~20 cm 土层侧根干物质质量密度与 N₀处理差异显著,7 月 25 日 N₇₅、N₁₅₀、N₂₂₅侧根干物质质量密度分别比 N₀增加 10.59%、27%、14.35%;20~40、40~60、60~80 cm 土层侧根干物质质量密度处理间差异均不显著。大豆根系主要是在 R₁~R₅期建成的,R₁~R₂期增加施氮量显著增加 0~80 cm 土层大豆侧根干物质质量,主要是 0~20 cm 土层侧根干物质质量增加的结果。7 月 25 日~8 月 25 日均以 N₁₅₀处理较高。

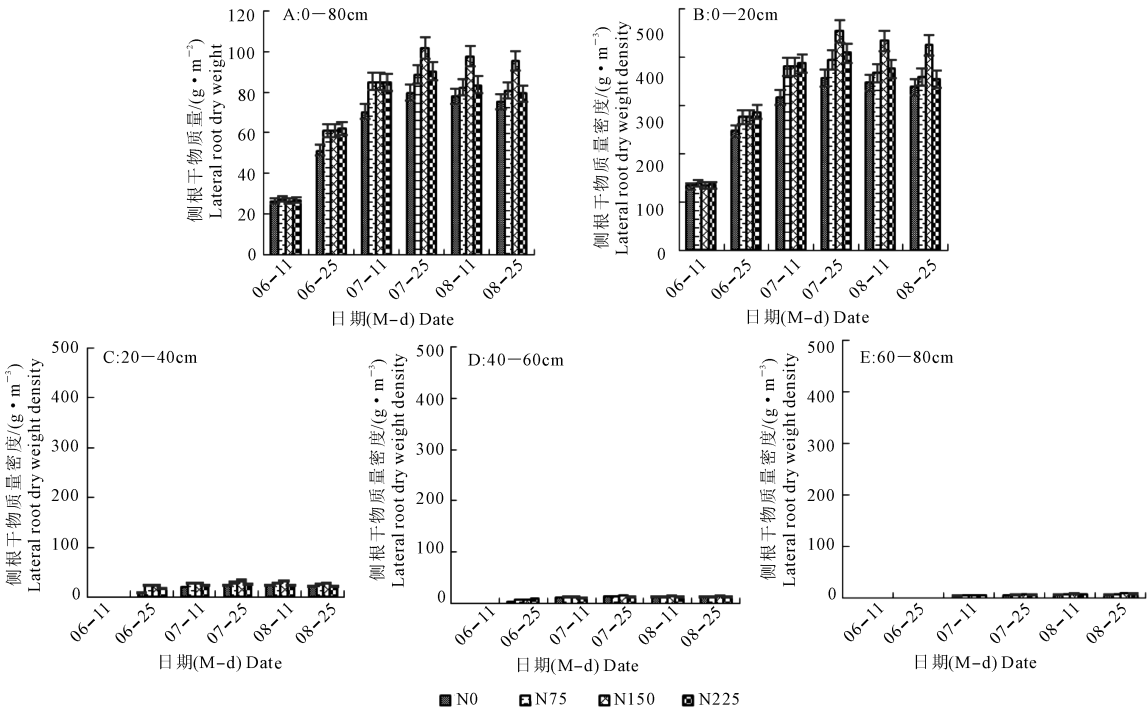


图 1 各处理不同土层大豆总侧根干物质质量 (A) 和侧根干物质质量密度 (B~E) 的变化
Fig.1 Changes of soybean on total lateral root dry weight (A) and lateral root dry weight density (B~E) in different soil layers

2.2 施氮量对春大豆侧根长和侧根长密度时空变化的影响

由图 2A 可见,各处理总侧根长在生育期间均呈单峰曲线变化,在 7 月 25 日(R₅期)达到峰值后缓慢下降。施氮处理总侧根长与 N₀差异均达显著水平,7 月 25 日 N₇₅、N₁₅₀、N₂₂₅总侧根长较 N₀增加 34.59%、49.46%、30.45%,7 月 25 日~8 月 25 日均以 N₁₅₀处理总侧根长较长。由图 2B、2C、2D、2E 可知,侧根长在 0~20、20~40、40~60、60~80 cm 土层分别占 0~80 cm 土层总侧根长的 57.12%~59.72%、

19.76%~23.07%、12.44%~13.11%、7.01%~7.42%,侧根长密度随着土层加深呈下降趋势。施氮处理 0~20、20~40、40~60 cm 土层根长密度与 N₀处理差异显著,7 月 25 日 0~20 cm 土层 N₇₅、N₁₅₀、N₂₂₅侧根长较 N₀增加 16.11%、29.02%、14.37%,20~40 cm 土层 N₇₅、N₁₅₀、N₂₂₅侧根长较 N₀增加 41.78%、57.08%、32.32%;60~80 cm 土层根长密度处理间差异不显著。增加施氮量显著增加 0~80 cm 土层大豆侧根长,主要是 0~40 cm 土层侧根长增加的结果。7 月 25 日~8 月 25 日均以 N₁₅₀处理较长。

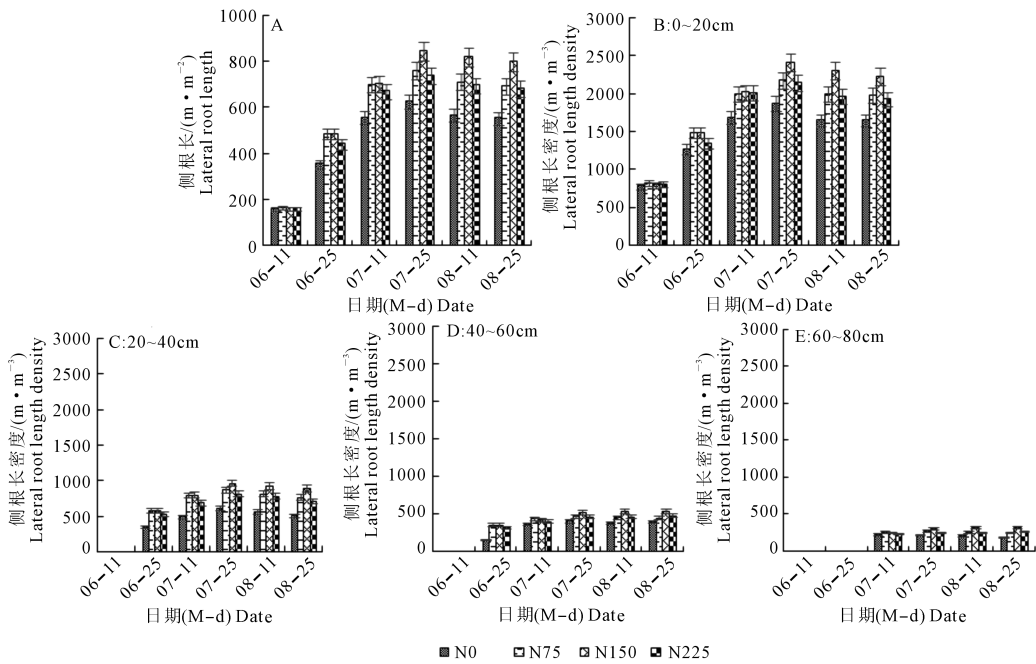


图 2 各处理不同土层大豆总侧根长 (A) 和根长密度 (B~E) 的变化

Fig. 2 Changes of soybean on total length of lateral root (A) and root length density (B~E) in different soil layers

2.3 施氮量对春大豆侧根表面积和侧根表面积密度时空变化的影响

不同处理春大豆侧根系总表面积与根长变化趋势相同,7月25日(R₅期)达峰值后缓慢下降。6月25日至8月25日施氮处理根表面积与N₀差异达显著水平,均表现为N₁₅₀>N₇₅>N₂₂₅>N₀(图3A)。7月25日N₇₅、N₁₅₀、N₂₂₅总根表面较N₀增加22.88%、38.14%、17.80%。由图3B、3C、3D、3E可见,随着土层加深根表面积密度呈剧降变化趋势,0~20 cm 土层侧根表面积密度占总面积的53.75%~55.92%,20~40 cm 占总面积的23.01%~26.19%。施氮处理0~20、20~40、40~60 cm 土层根表面积密度与N₀差异显著,7月25日0~20 cm 土层N₇₅、N₁₅₀、N₂₂₅根表面积较N₀处理分别高出19.09%、34.24%、11.53%,20~40 cm 土层分别高出38.97%、54.41%、33.82%;60~80 cm 土层根长密度处理间差异不显著。增加施氮量显著增加0~80 cm 土层大豆侧根表面积,主要是0~40 cm 土层侧根表面积增加的结果。7月25日~8月25日均以N₁₅₀处理较大。

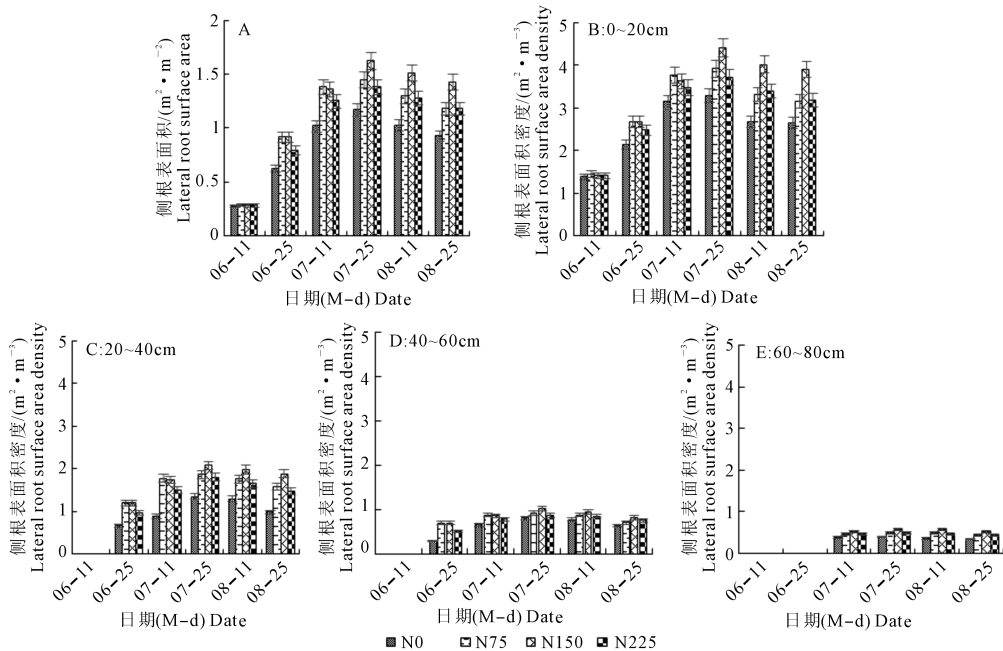


图 3 各处理不同土层大豆总侧根表面积 (A) 和表面积密度 (B~E) 的变化

Fig. 3 Changes of soybean on total surface area of lateral root (A) and surface area density (B~E) in different soil layers

2.4 施氮量对春大豆根系伤流和根系活力的影响

由图 4A 可见,单株根系伤流量在生育期间呈单峰曲线变化,6 月 11 日后逐渐增加,至 7 月 15 日~8 月 11 日达峰值后迅速下降。 N_0 、 N_{75} 处理峰值出现在 7 月 25 日, N_{150} 、 N_{225} 峰值出现在 8 月 11 日。6 月 25 日~8 月 25 日施氮处理单株伤流量与 N_0 差异显著,多表现为 $N_{150}>N_{225}>N_{75}>N_0$,7 月 25 日(R_5 期) N_{150} 较 N_0 增加 176%。6 月 25 日至 8 月 25 日各土层

根系活力均呈下降趋势,同一时期随土层变深,根系活力也呈下降的变化趋势,0~20、20~40 cm 土层施氮处理较 N_0 差异显著,表现为 $N_{150}>N_{75}>N_{225}>N_0$,6 月 25 日(R_2 期)0~20、20~40 cm 根系活力 N_{150} 处理分别较 N_0 增加 44.3%、25.1%;40~60、60~80 cm 土层施氮处理较 N_0 差异不显著(见图 4B)。施氮肥增加根系伤流量和 0~40 cm 土层根系活力,均以 N_{150} 较高。

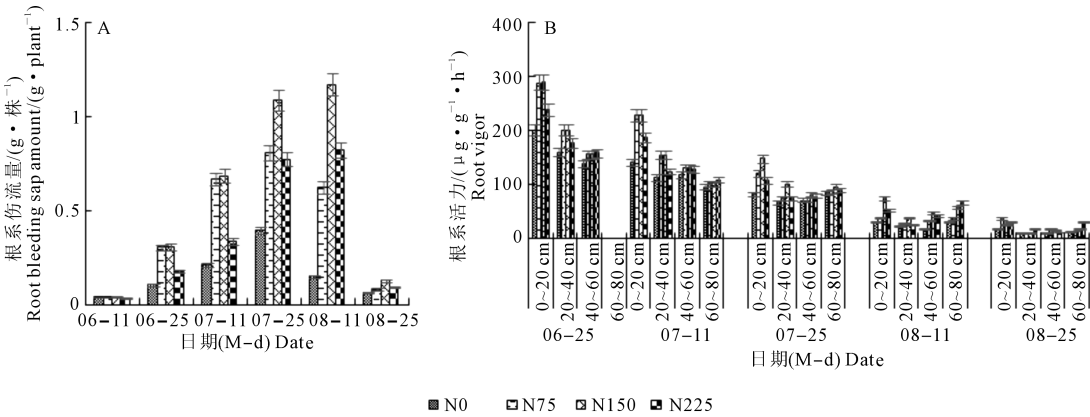


图 4 各处理根系伤流量(A)和根系活力(B)的变化

Fig. 4 Changes of soybean on bleeding sap amount and activity of root

2.5 施氮量对春大豆根瘤数和根瘤干物质质量的影响

各处理根瘤数在 7 月 25 日前后达峰值。6 月 25 日至 8 月 25 日期间 N_0 、 N_{75} 、 N_{150} 的根瘤数与 N_{225} 间差异显著,表现为 N_0 、 N_{75} 、 N_{150} 均大于 N_{225} (图 5A)。6 月 11 日~8 月 25 日根瘤干物质质量呈递增趋势,施氮处理与 N_0 间差异显著,多表现为 $N_0>N_{75}>N_{150}>N_{225}$,8 月 25 日 N_0 处理根瘤干物质质量为 $18.89 g \cdot m^{-2}$,较 N_{75} 、 N_{150} 、 N_{225} 处理分别高出 8.69%、31.36%、120.42%(图 5B)。施氮量增加单位面积根瘤数和根瘤干物质质量减少,且单位面积根瘤干物质

量下降对施氮量增加较根瘤数更敏感, N_{150} 根瘤数与 N_0 相近,根瘤干物质质量明显低于 N_0 。

2.6 施氮量对春大豆产量及产量构成因素的影响

由表 2 可见,施氮处理 N_{150} 、 N_{225} 与 N_0 间产量差异显著,分别较 N_0 处理增加 12.35%、5.31%;处理间单株粒数、荚数差异显著,百粒重差异不显著;随施氮量增加氮肥农学利用效率降低。增加施氮量产量增加是单株荚数、粒数增加的结果;以 N_{150} 产量和氮肥农学利用效率较高,分别为 $4\ 889.62 kg \cdot hm^{-2}$ 、 $3.58 kg \cdot kg^{-1}$ 。

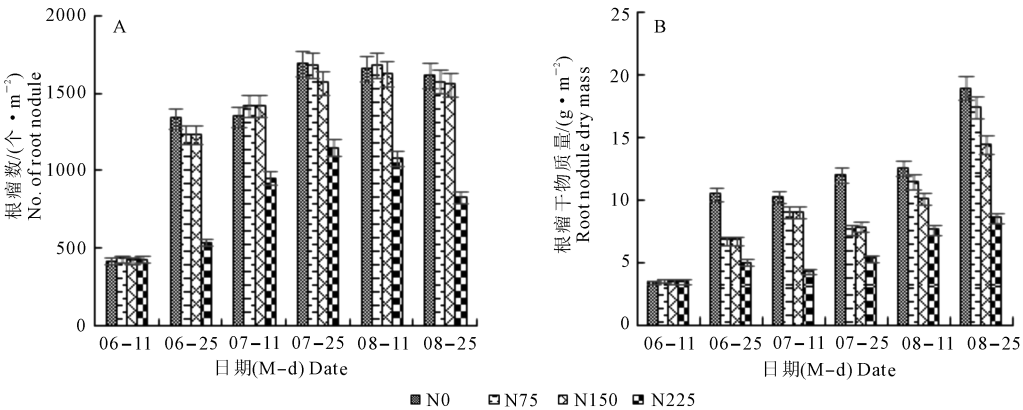


图 5 各处理根瘤数量(A)和根瘤干物质质量(B)的变化

Fig. 5 Changes of soybean on root nodule amount and dry mass of nodule

表 2 春大豆产量及产量构成因素

Table 2 The yield and its yield components of soybean

处理 Treatment	单株荚数 Number of pods per plant	单株粒数 Number of grains per plant	百粒重/g 100 – seed weight	产量/(kg · hm ⁻²) yield	氮肥农学利用效率/(kg · kg ⁻¹) Agronomic efficiency of nitrogen fertilizer
N0	30.58 c	74.73 c	19.78 a	4352.10 c	–
N75	33.79 a	79.88 b	19.20 a	4516.21 bc	2.19 b
N150	34.63 a	84.24 a	19.63 a	4889.62 a	3.58 a
N225	32.29 b	78.18 c	19.82 a	4583.02 b	1.03 c

注:不同小写字母表示不同处理在 $P<0.05$ 水平上差异显著。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments at $P<0.05$ probability level.

3 讨 论

滴灌施肥技术与传统施肥方法相比,其显著特点是可以将水肥通过滴灌系统直接输送到作物根区附近,使水分和养分在土壤中均匀分布,从而保证养分被根系直接吸收利用,避免灌水不均匀和减轻土壤板结。大豆对氮肥的反应主要取决于土壤矿质氮含量的高低,R₁期土壤矿质氮含量对大豆生物量和产量的影响大于其它生育时期^[15]。适当的氮素可促进大豆根系生长,增加根系干物质量,过量氮素则抑制其生长^[8,16-17]。不同生育时期氮肥施用量与大豆根瘤干物质量、数量间均具有显著的线性负相关关系^[18]。东北筐栽试验表明适量施氮对根瘤生长有显著的促进作用,当氮素供应不足时会抑制根瘤的生长,但当氮素供应过量时也会抑制根瘤的形成^[3]。倪丽^[11]等研究表明:在漫灌条件下不同施氮处理明显抑制根瘤的形成,对侧根数略有促进作用,但对大豆根系生长促进不明显。本试验结果表明:滴灌条件下在大豆 R₁~R₂期,施氮量在 0~225 kg·hm⁻² 的范围内,随着施氮量增加,0~80 cm 土层侧根总干物质量、侧根总长度、侧根总表面积、0~40 cm 土层根系活性、单株根系伤流量均表现为先增后降的变化趋势(主要是 0~20 cm 土层变化的结果)。其中,当施氮量在 0~150 kg·hm⁻² 的范围内大豆根系生长及单株伤流量处于上升趋势,而当施氮量为 225 kg·hm⁻² 时对大豆根系生长及单株伤流量促进作用明显弱于 150 kg·hm⁻² 处理;增施氮肥减少单位面积根瘤数和根瘤干物质量,N₁₅₀ 处理根瘤数和根瘤干物质量较大,而 N₂₂₅ 处理明显抑制单位面积根瘤数和根瘤干物质量;产量以 150 kg·hm⁻² 处理较高(4 889.62 kg·hm⁻²),较 0 kg·hm⁻² 处理产量(4 352.1 kg·hm⁻²)增产 12.35%,其氮肥农学利用效率为 3.58 kg·kg⁻¹。可见,R₁~R₂ 期施氮肥大豆产量增加主要是促进 0~20 cm 土层根系生长,增加对土壤养分吸收量的结果。这是由于大豆 66.9%~73.7% 的根干物质量是 R₁~R₅ 期形

成的缘故,并且此时又是大豆花数和荚数形成的时期,促进根系生长增加花数和荚数,增加产量^[19]。本研究的适宜施氮量明显高于东北的 50 kg·hm⁻² (产量仅为 2 600 kg·hm⁻²)^[9],可能是由于产量较高造成施氮量较高。由于大豆根系生长和高产形成的适宜土壤矿质氮含量远高于根瘤的形成和固氮的适宜矿质氮含量,适宜施氮量在促进根系生长、增加产量的同时,减少单位面积的根瘤质量,过量施氮肥还减少单位面积的根瘤数量,进一步减少单位面积根瘤质量,均不利于大豆根瘤固氮能力的发挥。即施氮肥在促进根系生长增加大豆产量的同时,可能减少根瘤的固氮量。在本试验期间,2016 年 6、7 月降水量分别为 82.9、45.5 mm,分别较历年平均增加 145.26%、48.20%,导致第二次施氮肥推迟到 7 月 14 日;试验处理均在 7 月 28 日因大风暴雨倒伏;8 月份(灌浆期)平均温度(23℃)比历年平均值(22.4℃)高 0.6℃,均不利于大豆高产形成,主要降低了百粒重(若按正常年份百粒重 23 g 计算,N₁₅₀ 处理产量可达 5 728.32 kg·hm⁻²)。上述情况对试验结果产生了一定的影响。对于新疆超高产春大豆,如何合理施用氮肥,协调根系生长与根瘤固氮能力的关系是需要进一步研究的问题。

4 结 论

施氮肥主要促进 0~20 cm 土层根系生长,提高 0~40 cm 土层根系活力,增加根系伤流量,均以 N₁₅₀ 处理的 0~80 cm 土层根量较大;增施氮肥减少单位面积根瘤数和根瘤干物质量,N₁₅₀ 处理根瘤数与 N₀ 相近,根瘤干物质量明显低于 N₀;增施氮肥增加产量,以 N₁₅₀ 处理产量较高,为 4 889.62 kg·hm⁻²。施氮肥增加产量主要是促进根系 0~20 cm 土层根系生长,提高 0~40 cm 根系活力的结果。

参 考 文 献:

[1] 王连铮,罗赓彤,王岚,等. 北疆春大豆中黄 35 公顷产量超 6 吨的栽培技术创建[J]. 大豆科学, 2012, 31(2): 217-223.
[2] 王聪,章建新.滴水量对中熟超高产大豆氮磷钾吸收分配和产

量的影响[J].中国农学通报, 2015, 31(12): 50-56.

[3] 王树起, 韩晓增, 乔云发, 等. 施氮对大豆根瘤生长和结瘤固氮的影响[J]. 华北农学报, 2009, 24(2): 176-179.

[4] Marschner H, Kirkby E A, Cakmak I. Effect of mineral nutritional status on shoot-root partitioning of photoassimilates and cycling of mineral nutrients [J]. Journal of Experimental Botany, 1996, 47: 12551-263.

[5] Costa C, Dwyer L M, Hamilton R I. A sampling method for measurement of large root systems with scanner-based image analysis [J]. Agronomy Journal, 2000, 92(4): 621-627.

[6] 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, 15(6): 1063-106.

[7] 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.

[8] 乔云发, 苗淑杰, 韩晓增. 氮素形态对大豆根系形态性状及释放 H⁺ 的影响[J]. 大豆科学, 2006, 25(3): 265-269.

[9] 张含彬, 任万军, 杨文钰, 等. 不同施氮量对套作大豆根系形态与生理特性的影响[J]. 作物学报, 2007, 33(1): 107-112.

[10] 严君, 韩晓增, 丁娇, 等. 东北黑土区大豆生长、结瘤及产量对氮、磷的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2): 318-325.

[11] 倪丽, 章建新, 金加伟, 等. 氮肥施用对高产大豆根系、干物质积累及产量的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2004, 27(2): 36-39.

[12] 张宪政. 作物生理研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1992: 139-142.

[13] 熊庆娥. 植物生理实验教程[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2003: 36-42.

[14] 李伏生, 陆申年. 灌溉施肥的研究和应用[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(02): 233-240.

[15] 严君, 韩晓增. 盆栽条件下土壤矿质氮含量对大豆结瘤、固氮和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(10): 1929-1938.

[16] 严君, 韩晓增, 祖伟. 不同形态氮肥对大豆根系形态及磷效率的影响[J]. 大豆科学, 2010, 29(6): 1003-1007.

[17] 石海, 苗淑杰, 柏会子. 大豆根系特征对氮阻遏的适应性调节[J]. 大豆科学, 2013, 32(4): 501-505.

[18] 严君, 韩晓增, 王影, 等. 大豆固氮能力和产量对施氮量的响应[J]. 大豆科学, 2013, 32(6): 778-785.

[19] 李春艳, 李思忠, 楚光红, 等. 不同滴水量处理下大豆根系生长与花荚形成的关系[J]. 南京农业大学学报, 2016, 39(2): 198-204.



(上接第 45 页)

[25] 葛玮健, 常艳丽, 刘俊梅, 等. 壤土区长期施肥对小麦-玉米轮作体系钾素平衡与钾库容量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3): 629-636.

[26] 朱宝国, 张立波, 张春峰, 等. 追氮方式对寒地玉米干物质积累、转运及氮肥利用率的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(3): 698-702.

[27] 鱼欢, 杨改河, 王之杰. 不同施氮量及基追比例对玉米冠层生理性状和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 266-273.

[28] 张福锁, 陈新平, 陈清, 等. 中国主要作物施肥指南[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2009.

[29] 张哲, 孙占祥, 张燕卿, 等. 秸秆还田与氮肥配施对春玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(3): 144-152.

[30] 王明国, 马玉兰, 冯静, 等. 宁夏农户施肥调查与评价[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 30(1): 13-15.

[31] 闫湘, 金继运, 何萍, 等. 提高肥料利用率技术研究进展[J]. 中国农业科学, 2008, 41(2): 450-459.

[32] 谢建昌. 世界的粮食与肥料问题[J]. 土壤学进展, 22(3): 1-19.

[33] 赵护兵, 王朝辉, 高亚军, 等. 陕西省农户小麦施肥调研评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 245-253.

[34] 赵护兵, 王朝辉, 高亚军, 等. 西北典型区域旱地冬小麦农户施肥调查分析.[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(4): 840-848.