

施氮水平对 7S 亚基缺失大豆根系形态和结瘤固氮的影响

姜妍^{1,2}, 王清泉³, 李远明^{1,2}, 王绍东^{1,2}, 刘伟^{1,2}

(1. 黑龙江省绿色食品科学研究院, 黑龙江 哈尔滨 150028; 2. 东北农业大学 农学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 3. 黑龙江省森工总局 多种经营局, 黑龙江 哈尔滨 150003)

摘要:为有效推广功能型大豆 7S 亚基缺失品种,以 7S 亚基缺失大豆品系东富 2 号为研究对象,设置 4 种施氮水平(纯 N),N0(0 mg·kg⁻¹)、N1(25 mg·kg⁻¹)、N2(50 mg·kg⁻¹)、N3(75 mg·kg⁻¹),采用桶栽法研究大豆根系形态和结瘤固氮对不同施氮水平的响应。结果表明:N1(25 mg·kg⁻¹)水平下根系干重加大,根冠比增大,根瘤固氮潜力高,单株产量较高。N2(50 mg·kg⁻¹)水平下根长、根表面积、根体积在生育后期增长较快,根系干重较大,根冠比低,固氮酶活性最高,单株籽粒产量最高。N3(75 mg·kg⁻¹)水平下植株干重较大,无效生长较多,根瘤数少,固氮潜力和根冠比低,单株产量不高。综合籽粒产量和根系特性指标,功能型大豆 7S 亚基缺失品系东富 2 号的适宜施肥量为 25 ~ 50 mg·kg⁻¹。

关键词:7S 亚基缺失大豆;根系形态;固氮酶活性;氮水平
中图分类号:S565.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.11861/j.issn.1000-9841.2017.02.0267

Effect of Different Nitrogen Application Levels on the Root Morphology, Nodulation and Nitrogen Fixation in 7S Subunit Lacked Soybean

JIANG Yan^{1,2}, WANG Qing-quan³, LI Yuan-ming^{1,2}, WANG Shao-dong^{1,2}, LIU Wei^{1,2}

(1. Heilongjiang Academy of Green Food Science, Harbin 150028, China; 2. College of Agriculture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 3. Diversification Bureau, Heilongjiang Forest Industry Office, Harbin 150003, China)

Abstract: In order to popularize 7S subunit lacked soybean effectively, the experiment was conducted with 4 nitrogen levels (pure N-) including N0 (0 mg·kg⁻¹), N1 (25 mg·kg⁻¹), N2 (50 mg·kg⁻¹) and N3 (75 mg·kg⁻¹) with Dongfu 2 (7S subunit lacked soybean line). The response of soybean root morphology, nodulation and nitrogen fixation to different nitrogen application levels were studied with pot cultivation. The results showed that under N1 (25 mg·kg⁻¹) level root dry weight and root to shoot ratio increased, root nodule nitrogen fixation potential and yield per plant were higher than others. Under N2 (50 mg·kg⁻¹) level root length, root surface area, root volume were larger than the other treatments in the late growth stage, root dry weight was biggest, root to shoot ratio was lower, nitrogenase activity and seed yield per plant were highest. Under N3 (75 mg·kg⁻¹) level plant dry weight was higher, but plant invalid growth was occurred. Nodule number, nitrogen fixation potential, root to shoot ratio and yield were lower. Taking into account of seed yield and root characteristics, appropriate N fertilizer amount of 7S subunit lacked soybean was 25 ~ 50 mg·kg⁻¹.

Keywords: 7S subunit lacked soybean; Root morphology; Nitrogenase activity; Nitrogen level

氮素是影响大豆生长发育和产量形成的主要因素,大豆氮素来源主要有土壤氮、肥料氮和根瘤固氮三部分。大豆根瘤固氮量占总氮吸收量的 50% ~ 60%^[1],并呈现时期性变化^[2],其次是土壤氮,且不同大豆品种间的氮素构成存在差异^[3]。无论何种来源、何种形态氮均首先作用于根系,通过根系吸收养分和有关信号传导影响着大豆根系与地上部分的生长。植物养分吸收和产量形成是根系形态特征和植株生理特性共同作用的结果^[4]。根系变化对土壤养分的反应和环境适应非常重要,对整个植株的生长和产量的形成起决定性作用^[5]。矿质养分中以氮素的供应对根系生长、形态以及根

系在介质中的分布影响最明显^[6]。土壤中氮是影响大豆共生固氮重要因素,不适宜的氮肥施用量和方式会影响大豆根瘤的生长和固氮水平^[7-8],而单纯依靠共生固氮达不到增产的效果^[9]。因此,施氮水平对于不同大豆品种的根系特征特性和产量形成的影响尤为重要。

7S 球蛋白为大豆贮藏蛋白的主要成分之一,它对于大豆蛋白营养价值和功能特性起到重要作用^[10],降低 7S 含量有利于大豆营养价值的提升和豆腐凝胶硬度,而不会降低大豆蛋白的含量^[11]。7S 亚基缺失大豆为豆制品加工企业提供了功能性原料的同时,提高了大豆的附加值和生产效益。配套

栽培措施及其理论研究,尤其是施氮水平直接影响大豆根系生长发育,进而影响到籽粒产量的形成,可为该品种高产优质高效推广奠定基础。本研究设计不同施氮水平,分析7S亚基缺失大豆品系东富2号的根系生长特点,研究大豆根系形态特征、根瘤固氮能力和植株干物质重的氮肥效应,以期为功能型大豆品种氮肥的合理施用和配套高产栽培技术的形成提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试大豆为7S亚基缺失大豆品系东富2,为本课题组育成的大豆特用新品系。使用肥料为尿素(N46%),磷酸二氢钾(P₂O₅52%,K₂O 34%),产地均为大庆。供试土壤基础养分含量为:有机质含量6.37 g·kg⁻¹,碱解氮68.67 mg·kg⁻¹,有效磷47.3 mg·kg⁻¹,速效钾116.9 mg·kg⁻¹,pH7.65。

1.2 试验设计

试验于2015年在黑龙江省绿色食品科学研究所大棚进行不同氮素水平桶栽试验,,设计4个氮素水平,分别为N0:不施、N1:25 mg·kg⁻¹(相当施尿素100 kg·hm⁻²,以此类推)、N2:50 mg·kg⁻¹、N3:75 mg·kg⁻¹,每个处理10桶,共40桶,每桶苗后保留3株。所用桶直径为28 cm,高度为24 cm,计算所需用量后,装盆之前将磷酸二氢钾按常规用量施入土中拌匀,每桶磷酸二氢钾用量约为1 g。然后按试验设计分别施入不同尿素后装桶待播,每桶装土重量约为12 kg。其管理方式同大田。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 根系形态参数 在V5(分枝期)、R2(盛花期)、R4(盛荚期)、R5(鼓粒初期)4个时期进行根系外部形态的测定。采用整体取样法,取样前将整桶土灌水,次日土壤松软状态后导出,在3个桶内各取一株作为3次重复,用水浸泡快速清洗干净根系,将地上部分与地下部分分离,用滤纸将水分吸干。利用EPSON V750扫描仪、Win RHIZO LC4800-II根系分析系统,分析不同生育时期不同施氮水平下的大豆根系形态特征,包括根系长度、直径、面积和体积等参数。

1.3.2 固氮酶活性 在花荚期进行大豆固氮酶活的测定。采用整体取样法,取样前将整桶土灌水,次日土壤松软状态后导出,取出3株植株后,用水先浸泡再快速清洗干净根系,以子叶节为界将地上部分与地下部分分离,用滤纸将水分吸干。将清理干

净的根系用滤纸吸干根瘤表层的水分,每个处理的根系单独放入500 mL棕色广口瓶中,用插入针头的橡胶塞密封,待各个处理的根系全部装入瓶后,用注射器抽出50 mL空气,再从储气袋中精确取出50 mL乙炔注入广口瓶中,反应1~2 h。先将顶空瓶内空气抽出4 mL,再将广口瓶内反应的混合气体抽出4 mL打入顶空瓶内,用微量进样器从顶空瓶内取出0.1 mL反应气体,用上海天美GC-7900气相色谱分析仪直接进样测定。色谱柱条件:GDX-502 不锈钢柱,2 m×4 mm;温度设定:柱温60℃,检测温度120℃,进样温度120℃;载气设定:N₂压力85,空气压力50,H₂压力50,H₂发生器输出压力30;检测器:氢火焰检测器。

试验结束后测定大豆根瘤重量,将大豆根系中根瘤全部取下,计算根瘤数量,称量鲜重后,放入烘箱内85℃烘干至恒重计重。

计算公式如下^[4]:

固氮酶活性(mL·g⁻¹·h⁻¹)=(乙烯量/根瘤干重)/反应时间

单株根瘤固氮潜力(mL·h⁻¹)=单位根瘤干重还原乙炔量×单株根瘤干重

1.3.3 生物量和根冠比 在V5(分枝期)、R2(盛花期)、R3(初荚期)、R4(盛荚期)、R5(鼓粒初期)5个时期进行取样,取样方式同1.3.1,测定大豆植株生物量。大豆植株的地上部分和地下部分分别在105℃杀青后65℃烘干至恒重计重,测定大豆植株干物质重量。根冠比为根干重与地上部分植株干重比值。

1.3.4 单株产量 在大豆成熟期收获考种,测定单株荚数、单株粒数和单株粒重等产量因子。

1.4 数据分析

采用Excel 2010和DPS 7.05统计软件进行数据处理和差异显著性分析。

2 结果与分析

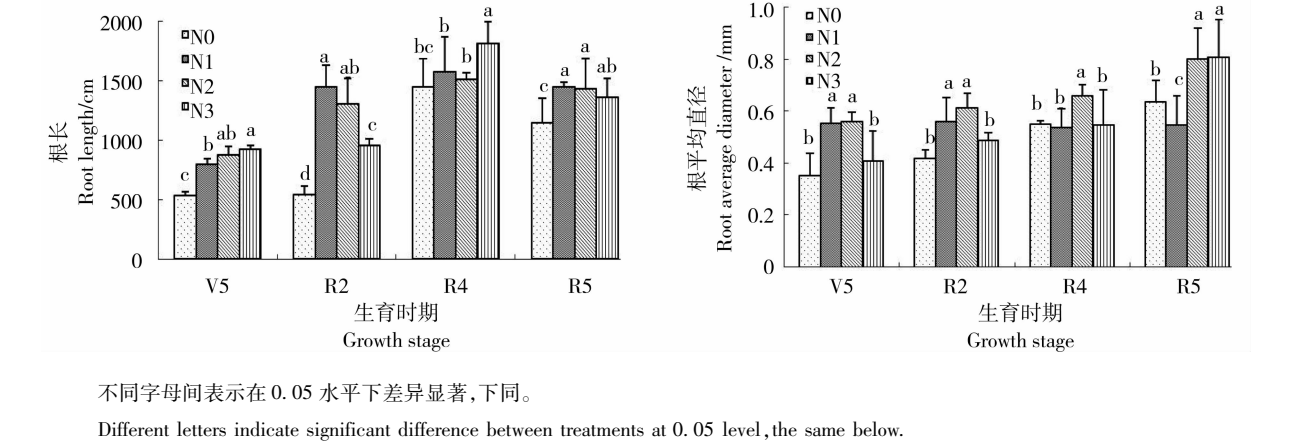
2.1 不同施氮水平下大豆根系形态特征变化

2.1.1 根长和根直径 从图1可以看出,大豆单株根长在4个时期的变化趋势为逐渐升高后下降,4种氮素水平处理的变化规律一致,不同处理的根长均在R4达到最高值,R4期后开始减少。N3处理在R4的根长达最大值,显著长于其它处理的根长。在R5期,N1、N2、N3的根长度差异不显著,显著高于N0处理。N1和N2处理随生育期延长,根长逐渐增加,到R5期下降幅度不大,根系生长速度较缓

慢,持续生长时间长,土壤肥效环境良好。

从单株根平均直径图中亦可看出(图1),N1处理的根平均直径在各个生育时期变化不明显,即根系横向生长不及纵向生长。N0、N2、N3随生育期延长,单株根平均直径增加,在R5期,N2和N3处理

的总根平均直径显著高于N0和N1处理,在生育后期,氮素增加有利于根系直径的增加,根系粗壮,N0处理根直径逐渐增加,N1处理各时期根直径变化不大,但是前期根直径值较高,前期氮素吸收利用效果较好。



不同字母间表示在 0.05 水平下差异显著,下同。
Different letters indicate significant difference between treatments at 0.05 level, the same below.

图1 大豆单株根长和根直径在不同施氮水平下动态变化

Fig. 1 Dynamics of root length and root average diameter per soybean plant under different nitrogen applications

2.1.2 根表面积和根体积 理论上根表面积和根体积与根长和根直径有直接的正相关关系。从图2看出,N0、N1处理的根表面积变化趋势与根长一致,受根长影响明显,出现先升高后下降的变化规律。氮素水平低,根系在R4期之后生长缓慢,但两者的区别是N0处理前期增长缓慢,在R4期生长迅速后趋于平稳,N1处理前期生长迅速,在R4期后生长缓慢。N2、N3处理的根表面积随着生育期的延长逐渐增加,且在R5期增加快速,显著高于N0、N1处理,这与根直径的变化情况一致,说明氮素施用量的增加导致的根表面积的变化受根直径的影响较大。N2处理的根表面积从R4到R5增长速度

较快,根表面积的增加表明N2处理的土壤环境有利于根横向生长,根系吸收养分面积增加,根系发育良好。

从根体积图可看出(图2),根体积的整体变化趋势和根表面积相似,N2、N3处理的根体积随着生育期的延长逐渐增加,且在R5期增加快速,显著高于N0、N1处理。随着施氮量增加,大豆根系的体积和表面积在R5期以后的增长速度较快,但各处理的个体间存在差异。可见,增加氮素可明显提高大豆根长度或根直径,扩增根表面积和根体积,其处理间差异大小还受其它因子的影响。

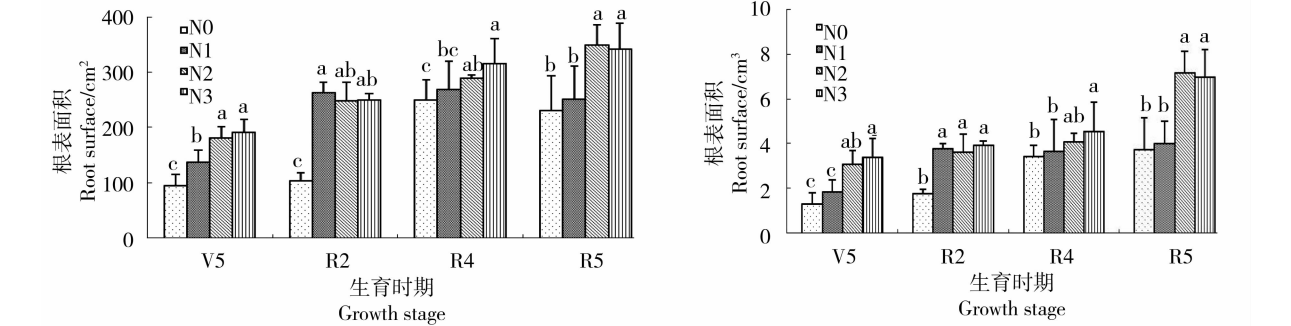


图2 大豆单株根表面积和根体积在不同施氮水平下动态变化

Fig. 2 Dynamics of root surface area and root volume per soybean plant under different nitrogen applications

2.2 不同施氮水平下大豆根系结瘤固氮能力变化

从表1中可以看出,各个处理中R3期的大豆根瘤数量、根瘤鲜重和根瘤干重显著低于R4期,在R3期进行大豆根瘤固氮酶活性检测的预试验,由于

大豆根瘤数量较少(表1),部分根瘤固氮酶活性较低,无法进行处理间比较。R4期的大豆根瘤数量较多(表1,图3),大豆根瘤固氮酶活试验结果较为理想(图4),处理间差异明显。N2、N3处理的单株根

瘤固氮酶活性显著高于 N0、N1 处理,且 N2 处理的单株根瘤固氮酶活性最高。N2 处理的单株根瘤固氮酶活性比 N0 增加了 48.6%,比 N1 和 N3 分别增加了 47.6% 和 10.2%。可见,大豆根瘤的数量多和重量大不会直接导致固氮酶活性的提高,即固氮酶活性与根瘤数量和重量相关性不明显。

表 1 不同处理和时期的大豆单株根瘤数量和重量

Table 1 Nodule number and weight per soybean plant under different treatments and stages

处理 Treatment	时期 Stage	根瘤数 Nodule number	根瘤鲜重 Nodule fresh weight/g	根瘤干重 Nodule dry weight/g
N0	R3	91.7 ± 25.1 b	0.41 ± 0.06 b	0.11 ± 0.01 b
	R4	202.3 ± 105.0 a	1.37 ± 0.61 a	0.39 ± 0.13 a
N1	R3	129.0 ± 11.5 b	1.24 ± 0.45 b	0.34 ± 0.02 b
	R4	211.7 ± 122.4 a	1.60 ± 1.01 a	0.57 ± 0.31 a
N2	R3	95.7 ± 29.4 b	0.68 ± 0.08 b	0.17 ± 0.01 b
	R4	166.3 ± 26.7 a	0.83 ± 0.06 a	0.31 ± 0.01 a
N3	R3	22.0 ± 13.9 b	0.13 ± 0.01 b	0.02 ± 0.00 b
	R4	120.3 ± 13.0 a	0.53 ± 0.15 a	0.26 ± 0.10 a

表中差异显著性分析是指同一处理的不同时期。不同字母差异显著 ($P < 0.05$)。
Significant analysis of difference mean the different stages in a treatment. Different letters indicate means significant difference ($P < 0.05$).

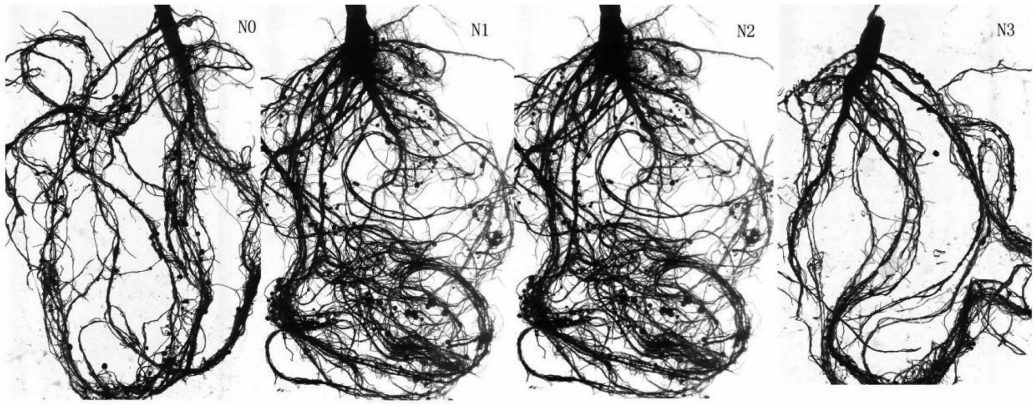


图 3 R4 期不同氮水平下根系形态及结瘤变化

Fig. 3 Change of root morphology and nodulation at R4 under different nitrogen applications

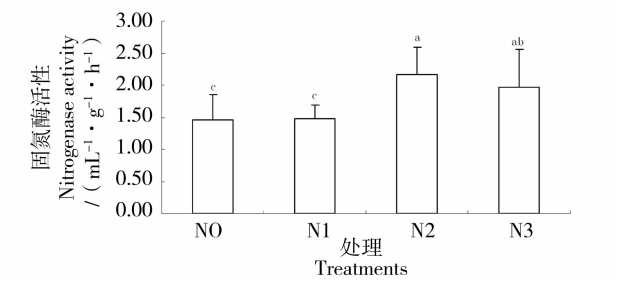


图 4 R4 期根瘤固氮酶活性在不同氮水平下变化
Fig. 4 Change of nodule nitrogenase activity at R4 under different nitrogen applications

大豆单株的根瘤固氮潜能能反应出大豆根瘤固氮的能力,它由大豆单株根瘤重量和根瘤固氮酶活性两者决定。从图 5 中可以看出,N1 处理的单株根瘤固氮潜力显著高于其他处理,是由于 N1 处理的根瘤数量和根瘤重量较高,在 N1 处理条件有利于根瘤数量和重量的形成,根瘤生长状况良好。从根瘤数上看,在 N1 处理的根瘤数量和根瘤重量较

高,单株根瘤固氮潜力大,实际测定根瘤固氮酶活性低于 N2 处理,而 N2 处理的根瘤数量和根瘤重量处于较低水平,单株根瘤固氮潜力不大,但实际测定的根瘤固氮酶活性却最高,可以推测 N2 处理的根瘤固氮效率较高,有效根瘤数较多。

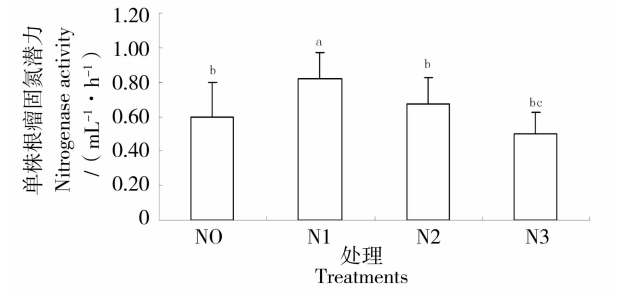


图 5 R4 期单株根瘤固氮潜力在不同氮水平下变化
Fig. 5 Change of the nitrogen fixation potential at R4 under different nitrogen applications

2.3 大豆生物量和根冠比的变化

从图 6 中可以看出,根干重的整体变化趋势与植株干重相似,在 V5 期,各处理间根干重较低,差异不显著,在 R2 期 N1 和 N2 处理的根干重显著高于其他两个处理,在 R3 期 N3 处理显著高于其他处理。在 R4 期,N1、N2 和 N3 处理根干重明显升高,且 N1 和 N2 处理显著高于其他两个处理,这之前根形态发育良好,根瘤固氮能力高有一定的关系。在 R5 期时,N1、N2 和 N3 处理根干重有所下降,植株地上部分养分需求量大,根系养分输出量增加。

从图 7 中可以看出在分枝期不同处理的植株干重水平较低,在 R2 期,N1 处理的植株干重显著高于其他处理,R3 期 N3 处理显著高于其他处理,增长速度较快。进入 R4 期后,不同处理的植株干重迅速积累,N2 处理与 N1 处理相差不明显,显著高于 N0 和 N3 处理,到 R5 期时,N2 处理的植株干重积累的更多,显著高于其他处理,该处理的植株地上部分增加和根系干重下降呈互补趋势,进一步验证了不同时期不同组织器官养分运输和积累的规律。

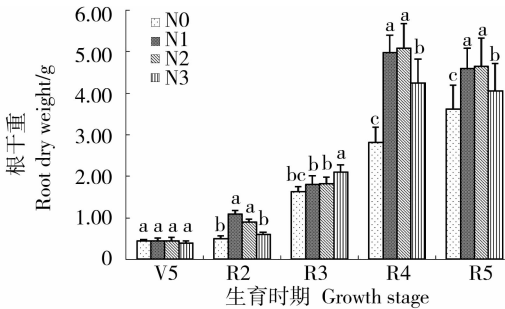


图 6 单株根干重在不同施氮水平下动态变化
Fig. 6 Dynamics of root dry weight per plant under different nitrogen applications

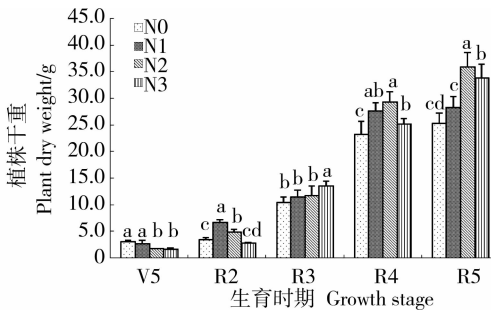


图 7 单株植株干重在不同施氮水平下动态变化
Fig. 7 Dynamics of plant dry weight per plant under different nitrogen applications

利用地下肥料资源,达到地上部分生长良好,增加籽粒产量的目的。通过根冠比看出(图 8),V5 期 N0 和 N1 处理的根冠比显著低于其他两个处理,R2 期 N0、N1 和 N2 处理根冠比处理显著低于 N3 处理,R3、R4 和 R5 期 N0、N2 和 N3 处理的根冠比显著低于 N1 处理,N1 处理根系较为发达,持续生长时间长,持续供养潜力大。根冠比较低的处理地下部分与地上部分生长协调性好,地上部分生长发育状况好,有利于籽粒的形成。N0 处理在各个生育期中根冠比较低,但是其地上部分干重相比其他处理也最低。生育前期 N1 处理根冠比较低,在 R3 期后 N2 和 N3 处理的根冠比较低,即在氮素水平较低时大豆植株在生育前期生长旺盛,根系与地上部分生长协调性好,在生育后期,氮素供应不足,地上部分生长缓慢;在氮素水平较高时大豆植株在生育后期生长旺盛,氮素供应充分,根系和地上部分发育良好,生长协调性好,有利于干物质积累和产量的形成。

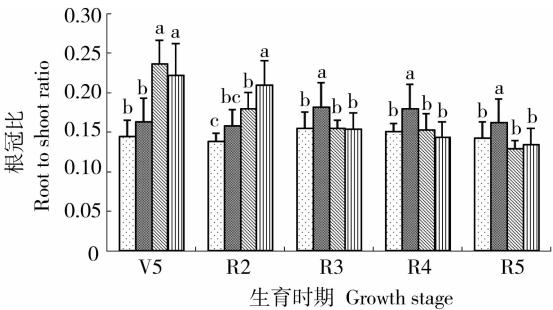


图 8 根冠比在不同施氮水平下动态变化
Fig. 8 Dynamics of root to shoot ratio under different nitrogen applications

2.4 大豆产量构成因子变化

基于以上根系外部形态、固氮能力、干物质重及地上部分干物质重,考察构成产量的基本因素。从表 2 中可以看出,单株荚数和单株粒数 N1 和 N2 处理较高,显著高于 N0 和 N3 处理,高低顺序依次为 N2 > N1 > N0 > N3。单株粒重 N1 和 N2 处理之间相差不显著,显著高于 N0 和 N3 处理,高低顺序依次为 N2 > N1 > N0 > N3。N2 处理氮素供应充分,利用效果好,通过根系外部形态建成,结瘤固氮,吸收养分积累根系干物质,并最终输送到植株地上部分,其产量构成因子表现最高。N1 处理在氮肥减少的情况,根系生长发育状况良好,固氮潜力大,植株地上部分积累干物质质量少于 N2 处理,氮单株籽粒产量并未因此而减少,并且达到了降低成本、减氮不减产、保护土壤生态的效果。

表 2 不同施氮水平下单株产量因子变化

Table 2 Change of yield factors per soybean plant under different nitrogen applications

处理 Treatments	单株荚数 Pod number per plant	单株粒数 Seed number per plant	单株粒重 Seed weight per plant/g
N0	50.00 ± 14.73 b	130.00 ± 30.05 b	18.33 ± 4.11 b
N1	62.33 ± 15.31 a	156.00 ± 29.14 a	20.60 ± 3.78 a
N2	67.00 ± 11.79 a	157.00 ± 31.63 a	21.73 ± 5.57 a
N3	41.67 ± 3.79 c	103.67 ± 12.70 c	14.27 ± 1.88 c

3 讨 论

在土壤缺氮情况下,豆科植物可与土壤中某些根瘤菌形成特异性固氮根瘤^[12],播种前施入适量氮肥作为起爆氮有利于根瘤数量的形成和植物的生长^[13],且简便的施肥操作在大豆品种的实际应用推广上容易被农民接受。Marshner^[14]研究在播种前施用适量的氮肥,能够促进根瘤的产生和形成,对大豆的生物固氮亦无显著负作用。亦有研究表明,施氮对根瘤固氮有明显的抑制作用,其抑制程度和时间与施肥量呈正相关,施肥量越大,抑制越重,时间越长^[8]。因此,控制氮肥用量,促进豆科植物结瘤固氮对提高豆科植物的生物固氮能力乃至产量的增加具有至关重要^[15]。

作物的根系与地上部分是一个相互作用的统一整体,土壤作为植物生长的基础媒介,根系通过媒介直接或间接吸收土壤和空气中的养分,并对土壤养分的形态和数量反应敏感^[16]。在 N0 处理下,在生育后期根表面积和根体积较小,根系干物质重增加,固氮能力增大,而植株地上部分干物质重较低,根冠比增大,使地上部分的光合产物被根系所消耗,植株地上部分积累少。轻度缺氮会抑制植物地上部生长而促进根系生长,但严重缺氮会抑制整个植株生长^[17-19]。N1 处理的根系固氮潜力大,干重增加,根冠比增大,植株干物质重增加缓慢,但并未因此对大豆单株籽粒产量造成不利影响,可见,籽粒产量的增加需要适当的根系生物量和较强的固氮能力作为产量基础,为地上部分提供养分和形成粒重。N2 处理的根长、根表面积、根体积在生育后期增长速度较快,固氮酶活性最高,根系干物质积累多,根系生长最健壮,合适的施氮水平促进了地上部分干物质积累,单株籽粒产量最高^[20-21]。N3 处理的根系生长发育良好,根表面积和根体积较大,根系干物重较低,植株干重较大,且根冠比低^[22],导致植株地上部分徒长,单株籽粒产量不高,

根系和地上部分的无效生长占很大比例。因此,合理的施用氮肥可以促进 7S 亚基缺失大豆根系的生长,改变根系的分布,调控作物平衡生长,使作物维持适中的根冠比,促进大豆根系结瘤和提高固氮能力。大豆根系的生长状况和根瘤固氮能力,直接影响着大豆植株地上部分的生长以及产量的形成。本研究施氮水平 N1 处理下大豆根系生长状况良好,根瘤固氮潜力高,单株产量较高,而且减氮不减产,节本增效,保护土壤环境。施氮水平 N2 处理下大豆的根系和地上部分协调生长状况良好,根系生长健壮,固氮酶活性高,单株产量最高。

4 结 论

本研究设置不同氮素水平,针对植株根系和地上部分整个体系,通过分析根系外部形态特征、结瘤固氮能力、干物质重及产量构成因子,明确了功能型大豆 7S 亚基缺失品系东富 2 号的适宜施氮量。综合单株籽粒产量构成因子和根系特征特性指标,在施氮水平 N1 处理下大豆根系生长状况良好,根瘤固氮潜力高,单株产量较高,在施氮水平 N2 处理下,根长、根表面积、根体积在生育后期增长速度较快,根系生长最健壮,根冠比低,固氮酶活性最高,植株地上部分干物质积累较多,单株籽粒产量最高。因此,功能型大豆 7S 亚基缺失品系东富 2 号的适宜施氮水平为 25 ~ 50 mg·kg⁻¹。

致谢: 特别感谢龚振平老师、夏玄同学及杨大亮在试验过程中给予的帮助!

参考文献

[1] 董钻. 大豆产量生理 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 101-109. (Dong Z. Soybean yield physiology [M]. Beijing: Agriculture Press, 2000: 101-109.)

[2] 龚振平, 金喜军, 马春梅, 等. 春大豆对不同来源氮素吸收利用的研究 [J]. 土壤通报, 2010, 41 (5): 1138-1141. (Gong Z P, Jin X J, Ma C M, et al. Study on the absorption and utilization of

various source nitrogen by spring soybean[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010,41(5):1138-1141.)

[3] 陈慧,邸伟,姚玉波,等. 不同大豆品种根瘤固氮酶活性与固氮量差异研究[J]. 核农学报,2013,27(3):379-383. (Chen H, Di W, Yao Y B, et al. Study on the difference of nodule nitrogenase activity and amount of nitrogen fixation of different soybean varieties[J]. Journal of Nuclear Agricultural Science, 2013,27(3):379-383.)

[4] Lynch J P. Root architecture and plant productivity[J]. Plant Physiology,1995,109(1):7-13.

[5] 张福锁. 土壤与植物营养研究新动态[M]. 北京:北京农业大学出版社,1992:73-82. (Zhang F S. Dynamic research on soil and plant nutrition[M]. Beijing:Beijing Agricultural University Press,1992:73-82.)

[6] Marschner H, Kirkby E A, Cakmak T. Effect of mineral nutritional status on shoot-root partitioning of photoassilates and cycling of mineral nutrients[J]. Journal of Expeimental Botany, 1996, 47: 1255-1263.

[7] 桑原真人. タイズの多収条件と窒素代謝(2)[J]. 农业および园艺, 1986, 61(5):590-598. (Setiyono. Environment conditions and nitrogen metabolization of soybean[J]. Journal of Agronomy and Horticulture, 1986, 61(5):590-598.)

[8] 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. (Wang S Q, Han X Z, Qiao Y F, et al. Nodule growth, nodulation and nitrogen fixation in soybean(*Glycine max* L.) as affected by nitrogen application[J]. Acta Agriculturae Boreali-sinica, 2009, 24(2):176-179.)

[9] 甘银波,陈静. 大豆不同生长阶段施用氮肥对生长、结瘤及产量的影响[J]. 大豆科学,1998,17(4):45-49. (Gan Y B, Chen J. Effects of N application at different growth stages on growth nodulation and yield of soybeans[J]. Soybean Science, 1998, 17(4):45-49.)

[10] 刘珊珊,王志坤,葛玉君,等. 大豆 7S 球蛋白亚基相对含量与品质性状间的相关分析[J]. 中国油料作物学报,2008,30(3):284-289. (Liu S S, Wang Z K, Ge Y Y, et al. Correlations between relative content of individual subunit of 7S globulin and quality characteristics in soybean germplasm[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2008,30(3):284-289.)

[11] Fukushima D. Recent progress of soybean protein foods: Chemistry, technology and nutrition[J]. Food Reviews International, 1991,7(3):323-351.

[12] Kassaw T, Frugoli J. Journey to nodule formation: from molecular dialogue to nitrogen fixation[J]. Symbiotic Endophytes,2013,37:3-25.

[13] Mukhtar N O, Badreidin A M. NPK fertilization of ground-nuts (*Arechis hypogara* L.) under irrigated environment[J]. Sudan Journal of Agricultured Research, 1998, 1(1):21-26.

[14] Marschner H. Mineral nutrition of higher plants[M]. London: Academic Press,1995.

[15] Peoples M B, Brockwell J, Herridge D F,et al. The contributions of nitrogen-fixing crop legumes to the productivity of agricultural systems[J]. Symbiosis,2009,48:1-17.

[16] Hodge A. The plastic plant: Root responses to heterogeneous supplies of nutrients[J]. New Phytologist,2004,162(1):9-24.

[17] 王艳哲,刘秀位,孙宏勇,等. 水氮调控对冬小麦根冠比和水分利用效率的影响研究[J]. 中国生态农业学报,2013,21(3):282-289. (Wang Y Z, Liu X W, Sun H Y, et al. Effects of water and nitrogen on root/shoot ratio and water use efficiency of winter wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(3):282-289)

[18] Lawlor D W. Carbon and nitrogen assimilation in relation to yield: Mechanisms are the key to understanding product ion systems[J]. Journal of Experimental Botany,2002,53(370):773-787.

[19] 刘桃菊,戚昌瀚,唐建军. 水稻根系建成与产量及其构成关系的研究[J]. 中国农业科学,2002,35(11):1416-1419. (Liu T J, Qi C H, Tang J J. Studies on relationship between the character parameters of root and yield formation in rice[J]. Scientia Agricultura Sinica,2002,35(11):1416-1419.)

[20] Zhang H,Xue Y G,Wang Z Q,et al. Morphological and physiological traits of roots and their relationships with shoot growth in super rice[J]. Field Crops Research,2009,113(1):31-40.

[21] 崔红艳,胡发龙,方子森,等. 不同施氮水平对胡麻根系形态和氮素利用的影响[J]. 中国油料作物学报,2015,37(5):694-701. (Cui H Y, Hu F L, Fang Z S, et al. Effect of different nitrogen level on root morphology and nitrogen utilization of oil flax[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2015,37(5):694-701.)

[22] 王艳,米国华,张福锁. 氮对不同基因型玉米根系形态变化的影响研究[J]. 中国生态农业学报,2003,11(3):69-71. (Wang Y, Mi G H, Zhang F S. Effect nitrate levels on dynamic changes of root morphology in different maize inbred lines[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2003,11(3):69-71.)