



胥雅馨, 郜全同, 薛丽华, 王聪, 章建新. 施氮量对膜下滴灌春大豆氮素积累量及产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(7): 81-95.
XU Yaxin, GAO Quantong, XUE Lihua, WANG Cong, ZHANG Jianxin. Effects of nitrogen application rate on the nitrogen accumulation and yield of spring soybean under mulched drip irrigation[J]. Journal of China Agricultural University, 2025, 30(7): 81-95.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.07.07

施氮量对膜下滴灌春大豆氮素积累量及产量的影响

胥雅馨¹ 郜全同¹ 薛丽华² 王聪¹ 章建新^{1*}

(1. 新疆农业大学 农学院, 乌鲁木齐 830052;

2. 新疆农业科学院 粮食作物研究所, 乌鲁木齐 830091)

摘 要 为明确施氮量对新疆膜下滴灌春大豆肥料氮、共生固氮和氮素积累的影响及其与产量形成的关系, 2022 和 2023 年采用裂区试验设计, 于始英期(R_3)设置 $0(N_0)$ 、 $120(N_{120})$ 、 $180(N_{180})$ 和 $240 \text{ kg/hm}^2(N_{240})$ 4 个施氮量处理为主区, 副区为‘新大豆 27 号’和‘新农豆 2 号’2 个大豆品种, 测定盛花期(R_2)至成熟期(R_8)大豆根瘤数目、根瘤干重、固氮酶活性、根瘤蔗糖和淀粉含量、共生固氮量(BNF)、肥料氮、氮素积累总量及产量等指标, 并分析施氮量与大豆氮素积累总量、肥料氮吸收量、共生固氮量及产量的关系。结果表明: 在 2 年的试验中, 施氮量对大豆根瘤数目、根瘤干重、共生固氮、氮素积累量和产量均有显著影响($P < 0.05$)。与 N_0 相比, N_{180} 可显著增加‘新大豆 27 号’和‘新农豆 2 号’的根瘤数目、根瘤干重、根瘤蔗糖含量、淀粉含量和蔗糖酶活性, 而固氮酶活性则显著降低($P < 0.05$)。与 N_0 相比, 2022 年 N_{180} 的‘新大豆 27 号’和‘新农豆 2 号’共生固氮量分别增加 14.63% 和 46.51% ($P < 0.05$), 2023 年 N_{180} 分别增加 21.68% 和 31.43% ($P < 0.05$)。‘新大豆 27 号’和‘新农豆 2 号’2 年产量最高的处理均为 N_{180} , 2022 年分别为 $4\,096.68$ 和 $4\,292.54 \text{ kg/hm}^2$, 较 N_0 分别增加 19.23% 和 25.69% ($P < 0.05$); 2023 年产量分别为 $4\,404.47$ 和 $4\,641.50 \text{ kg/hm}^2$, 较 N_0 分别增加 24.91% 和 21.81% ($P < 0.05$)。当施氮量达到 $240 \text{ kg/hm}^2(N_{240})$, 根瘤数量和固氮酶活性、共生固氮量均显著下降($P < 0.05$), 肥料氮吸收量和总氮积累量不再继续增加或只略增, 产量和氮肥农学利用效率则显著下降($P < 0.05$)。综上, 始英期(R_3)施氮量为 180 kg/hm^2 时, 可促进大豆根瘤数目、干重和根瘤碳水化合物含量的增加, 保持大豆较高共生固氮量, 提高氮肥农学利用效率, 有利于新疆膜下滴灌春大豆氮素积累并获得高产。

关键词 春大豆; 施氮量; 根瘤固氮; 氮肥利用效率; 产量

中图分类号 S565.1

文章编号 1007-4333(2025)07-0081-15

文献标志码 A

Effects of nitrogen application rate on the nitrogen accumulation and yield of spring soybean under mulched drip irrigation

XU Yaxin¹, GAO Quantong¹, XUE Lihua², WANG Cong¹, ZHANG Jianxin^{1*}

(1. College of Agricultural, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

2. Crop Research Institute, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China)

Abstract To clarify the effects of nitrogen (N) application rate on fertilizer N, biological nitrogen fixation (BNF), and nitrogen accumulation in soybean under drip irrigation with plastic film mulching in Xinjiang, and their relationships with yield formation, a split-plot experiment was conducted in 2022 and 2023. Four N application

收稿日期: 2024-12-15

基金项目: 国家自然科学基金(32160520); 新疆维吾尔自治区重大科技专项(2022A02008)

第一作者: 胥雅馨(ORCID:0000-0002-7046-8122), 博士研究生, E-mail: xyx082@126.com

通讯作者: 章建新(ORCID:0000-0003-4884-087X), 教授, 主要从事作物高产栽培研究, E-mail: zjxin401@126.com

treatment, 0 (N_0), 120 (N_{120}), 180 (N_{180}) and 240 kg/hm^2 (N_{240}) were applied at the beginning pod stage (R_3) as main plots, with two soybean cultivars ('Xindadou 27' and 'Xinnongdou 2') as subplots. Measurements were taken from the full flowering stage (R_2) to maturity (R_8) for parameters including: The nodule number, nodule dry weight, nitrogenase activity, nodule sucrose and starch content, biological nitrogen fixation (BNF), fertilizer-derived N uptake, total N accumulation, and yield. Relationships between nitrogen application rates and total nitrogen accumulation, fertilizer-derived nitrogen uptake, biological nitrogen fixation, and yield in soybean were analyzed. The results showed that: The nodule number, nodule dry weight, biological nitrogen fixation, nitrogen accumulation, and yield were significantly affected by nitrogen application rates in both experimental years ($P < 0.05$). Compared with N_0 , the N_{180} significantly increased nodule number, nodule dry weight, nodule sucrose content, starch content and sucrose synthase activity, while decreased nitrogenase activity ($P < 0.05$). Compared with N_0 , the biological nitrogen fixation of 'Xindadou 27' and 'Xinnongdou 2' in N_{180} increased by 14.63% and 46.51% in 2022, and by 21.68% and 31.43% in 2023, respectively ($P < 0.05$). The highest yield of 'Xindadou 27' and 'Xinnongdou 2' in both years was N_{180} , which were 4 096.68 and 4 292.54 kg/hm^2 in 2022, respectively, increased by 19.23% and 25.69% compared with N_0 ($P < 0.05$). In 2023, the yield were 4 404.47 and 4 641.50 kg/hm^2 , respectively, with an increase of 24.91% and 21.81% compared with N_0 , respectively ($P < 0.05$). However, when nitrogen application reached 240 kg/hm^2 (N_{240}), the nodule number, nitrogenase activity, and biological nitrogen fixation capacity all decreased significantly ($P < 0.05$). Fertilizer nitrogen uptake and total nitrogen accumulation either plateaued or showed only marginal increases, while both yield and nitrogen agronomic use efficiency exhibited significant declines ($P < 0.05$). In conclusion, applying 180 kg/hm^2 of nitrogen at the beginning pod stage (R_3) promoted the nodule number, dry weight, and carbohydrate content of nodule, sustained high biological nitrogen fixation capacity, improved nitrogen use efficiency, and facilitated nitrogen accumulation and high yield for spring soybean under drip irrigation with plastic film mulching in Xinjiang.

Keywords spring soybean; N application rate; nodule fixation of nitrogen; nitrogen use efficiency; yield

新疆是我国大豆的高产区,但地处干旱区,水资源短缺极大地限制了新疆大豆产业的发展^[1]。新疆要发展大豆产业必须采用高效节水技术^[2]。膜下滴灌是将覆膜和滴灌节水技术相结合的栽培技术,实现了水肥一体化,不仅节水保墒还提高了水肥利用率^[3]。膜下滴灌技术在新疆大豆生产上大面积应用^[4],不断创造了全国春大豆高产纪录^[2]。氮素是维持大豆生长和产量形成的最重要的营养元素之一^[5]。大豆的氮源来自土壤氮素、肥料氮和共生固氮3种途径^[6]。仅依靠土壤氮素和共生固氮无法满足大豆高产对氮素的需求,合理施用氮肥是增加大豆产量的最重要措施之一^[7]。提高大豆共生固氮量将减少氮素化肥施用量,节约生产成本^[8]。而大豆共生固氮量又受施氮量的影响非常大^[9]。因此,协调大豆3种氮素来源的关系,对于大豆实现高产高效十分重要。

Gutiérrez-boem等^[10]研究发现,氮素通过影响大豆植株生长、根瘤形成及固氮等各种生理过程,进而影响产量形成。始花期施入适量的氮肥对大豆根瘤固氮和高产形成至关重要,不施用氮肥会导

致大豆产量降低;氮肥过量施用会影响根瘤共生固氮^[11-13],导致大豆倒伏、徒长、产量下降等^[14]。适时适量地施用氮肥能够促进根瘤形成^[15],保持大豆较高的共生固氮量^[16],提高籽粒产量。已有研究发现,在大豆播种前补充氮肥是不必要的,会影响根瘤菌的侵染过程^[17],减少或减缓根瘤的形成^[18],而且会对生育后期生物固氮能力产生负面影响,导致始粒期(R_5)—满粒期(R_8)共生固氮降低12%~57%^[19-20]。在二节期(V_2)施氮使根瘤数目减少52%,地下部生物量降低19%^[21]。大豆生殖器官建成期以吸收根瘤固氮为主^[22],早期施用氮肥导致肥料氮流失以及根瘤的衰老,生育期间及时补充肥料氮不但可以缓解根瘤衰老,而且还能促进养分向籽粒转运^[23]。在盆栽条件下开花期施用氮肥显著抑制根瘤固氮酶活性和豆血红蛋白,使固氮效率降低^[24]。蔗糖代谢对大豆根瘤发育、共生固氮效率至关重要^[25]。蔗糖从地上部运输到根瘤中,为根瘤提供主要碳源;然后蔗糖在蔗糖合成酶和碱性转化酶催化下,将蔗糖分解为葡萄糖和果糖,供根瘤使用,以支持固氮酶活性^[26]。根瘤蔗糖代谢受氮素影响,

当氮水平过高时,会抑制蔗糖合成酶活性,影响碳水化合物向根瘤中的分配^[27]。王田等^[28]研究吉林省大豆(产量水平为 3 100~3 600 kg/hm²)发现,大豆根瘤数目、根瘤鲜重与固氮能力存在显著的正相关。在膜下滴灌条件下,地膜的增温保墒效应极大地改善了大豆根区的温度和水分条件,促进根系生长,有利于大豆形成高产^[29]。目前,对于新疆膜下滴灌区施氮量对春大豆根瘤固氮、氮素吸收的影响规律及其与产量形成的关系尚未见报道。本研究选用‘新大豆 27 号’和‘新农豆 2 号’2 个品种,在始荚期(R₃)设置 4 个施氮量进行田间试验,综合分析不同施氮量下 2 个大豆品种的各项指标,旨在探讨施氮量对膜下滴灌大豆共生固氮、氮素积累及产量的影响,以期新疆膜下滴灌春大豆高效生产提供参考。

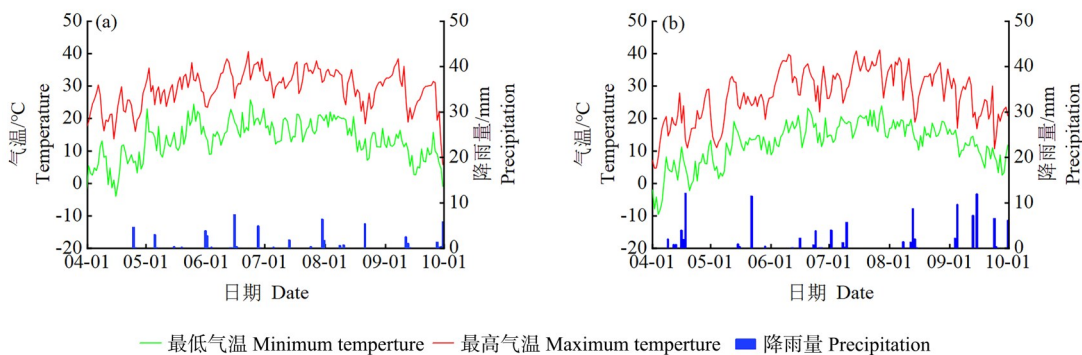


图 1 2022 年 (a) 和 2023 年 (b) 大豆生长季的日最高气温、日最低气温及降水量

Fig. 1 Daily maximum temperature, minimum temperature, and precipitation for the soybean growing seasons of 2022 (a) and 2023 (b)

1.2 试验设计

采用裂区试验设计,主区为施氮量,氮肥为尿素(含氮量 46 g/100 g),设置 0(N₀)、120(N₁₂₀)、180(N₁₈₀)、240 kg/hm²(N₂₄₀)4 个施氮量处理;副区为大豆品种,‘新大豆 27 号’和‘新农豆 2 号’,共 8 个处理。2 个供试品种均为新疆北疆地区主栽品种,且产量较高。小区面积 34 m²(3.4 m×10.0 m),每个处理 3 次重复。整地后人工铺设滴灌带(1 管 2 行),随后铺设宽 1.4 m 的农用黑膜。于 2022-04-27 和 2023-04-28 人工点播。1 膜 4 行,行距为 40 cm,株距为 7.5 cm,理论保苗数为 33×10⁴ 株/hm²。在 R₃(2022-06-27 和 2023-07-07)期随滴灌头滴入尿素。于 2022-09-06 和 2023-09-26 收获。在 R₁期(2022-

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2022 年 4—2023 年 10 月在新疆乌鲁木齐市新疆农业大学三坪农场试验基地进行(43°56′ N, 87°20′ E, 海拔 664 m)。该地区属于温带大陆性干旱气候,年平均温度为 2~12℃,无霜期为 179 d,降水量为 208.4~265.0 mm/年。2022 和 2023 年大豆生长季的日最高气温、最低气温及降水量见图 1。试验地土质为沙壤土,在秋季施基肥前取 0—20 cm 土层土样测定基础肥力参数。2022 和 2023 年试验地土壤肥力参数分别为:有机质含量为 13.5 和 14.6 g/kg,全氮含量为 0.91 和 0.73 g/kg,碱解氮为 60.2 和 53.1 mg/kg,速效磷为 16.2 和 17.4 mg/kg,速效钾为 185.2 和 216.0 mg/kg。翻地前人工撒施重过磷酸钙 300 kg/hm²。第二年春季精细整地后覆膜播种。

06-17 和 2023-06-27)各处理随滴灌头滴入磷酸二氢钾 120 kg/hm²。灌水时期及灌溉量见表 1。在大豆生长期间进行人工除草 2 次。

表 1 2022 和 2023 年大豆灌水日期及灌溉量

Table 1 Irrigation period and irrigation amount of soybean m ³ /hm ²					
年份 Year	灌溉量 Irrigation amount				
	06-17	06-27	07-14	07-26	08-05
2022	600	700	700	700	600
	总量 Total				
	3 300				
年份 Year	灌溉量 Irrigation amount				
	06-27	07-07	07-24	08-06	08-15
2023	600	700	700	700	600
	总量 Total				
	3 300				

1.3 测定指标

1.3.1 根瘤数目和干重

在盛花期(R₂)、盛荚期(R₄)、始粒期(R₅)和满粒期(R₆),每个处理随机选取6株大豆植株,采用传统挖掘法^[30]将大豆根系完整挖出,用自来水清洗根系后,用手术刀从大豆根部切除 $d>1\text{ mm}$ 的根瘤并计数。将3株大豆根瘤在60℃烘箱中干燥至恒定重量,3株大豆根瘤保存于-80℃冰箱中,用于测定根瘤固氮酶活性和根瘤蔗糖合成酶。

1.3.2 根瘤蔗糖和淀粉含量测定

将大豆根瘤粉碎后过100目筛,称取0.1 g干样加入8 mL 80%乙醇水浴30 min后离心20 min,合并上清液备用,用蒽酮比色法测定蔗糖和淀粉含量^[31]。

1.3.3 蔗糖合成酶活性

取1 g新鲜大豆根瘤,在研钵中加3 mL提取缓冲液(100 mmol/L pH 7.2 Tris-HCL, 10 mol/L MgCl₂, 1 mmol/L EDTA-Na₂, 10 mmol/L β-巯基乙醇, 2%(w/V)乙二醇, 1%(w/V)PVPP),研磨呈匀浆。将混合物移至离心管中,在4℃离心机中12 000 r/min离心10 min。取上清液,利用比色法测定蔗糖合成酶的活性^[32]。

1.3.4 固氮酶活性

采用乙炔还原法^[33]测定根瘤固氮酶活性。将1 g新鲜根瘤置于8 mL密封反应瓶中,用无菌注射器抽出1 mL空气,然后注入等体积的乙炔。2 h后,加入0.5 mol/L NaOH终止反应。计算公式为:

$$\text{固氮酶活性} = (C \times V) / (t \times W)$$

式中:固氮酶活性,μmol/(g·h);C,乙烯浓度,μmol/L;V,反应瓶中减少的乙炔体积,L;t为反应时间,h;W,根瘤鲜重,g。

1.3.5 植株氮素吸收量的测定

在成熟期(R₈)进行取样,每个处理取3株具有代表性的大豆。将植物分为根、茎秆和豆荚。器官样品在60℃烘箱内干燥至恒重,研磨通过1 mm筛后备用。采用浓H₂SO₄-H₂O₂对植株各器官进行消煮,采用奈氏比色法^[34]测定植株氮素含量。

1.3.6 共生固氮量(BNF)的估算

1.3.6.1 酰脲相对丰度(RAU)的测定 利用R₈期烘干研磨后的茎秆样本测定酰脲含量和硝酸盐浓度。酰脲含量采用比色分析法^[35]测定,NO₃⁻采用水杨酸法^[36]测定。

利用大豆主茎样品中的酰脲和硝酸盐的浓度来估算酰脲的相对丰度(RAU)^[37]。根据式(1)计算酰脲的相对丰度(RAU),可作为表征共生固氮的参数:

$$\text{RAU} = \frac{4a}{4a+b} \times 100\% \quad (1)$$

式中:RAU为酰脲的相对丰度,%;a和b分别为酰脲和硝酸盐的浓度,μmol/g;酰脲中有4个N原子,NO₃⁻中有1个N原子。

1.3.6.2 预测相对共生固氮量(Ndfa) 通过校准方程^[37],利用大豆主茎的相对酰脲含量来评估大豆生长周期中来自大气氮素的比例(Ndfa)。Ndfa校准方程的建立基于¹⁵N同位素稀释技术,利用不同作物的¹⁵N同位素稀释法^[38]和酰脲估算Ndfa法^[39]进行了交叉验证,2种方法显示出高度的相关性。利用校准方程(2)估算Ndfa。

$$\text{Ndfa} = -0.0074 \text{RAU}^2 + 1.68 \text{RAU} + 4.36 \quad (2)$$

1.3.6.3 共生固氮量(BNF)

$$\text{共生固氮量} = \text{氮素积累总量} \times \text{Ndfa}$$

式中:共生固氮量,kg/hm²。假设各处理土壤氮吸收量不受施氮量的影响,则土壤氮吸收量和肥料氮吸收量计算公式如下:

$$\text{土壤氮吸收量} = \text{氮积累总量}(\text{N}_0) -$$

$$\text{共生固氮量}(\text{N}_0)$$

$$\text{肥料氮吸收量} = \text{氮积累总量} - \text{共生固氮量} -$$

$$\text{土壤氮吸收量}。$$

1.3.7 产量及产量构成因素

于R₈期收获测产,在每个小区剔除边行的大豆,选取10株长势均匀、具有代表性和无病虫害的大豆植株,从子叶节剪取收获整个植株,记录单株荚数、单株粒数和百粒重。各小区取中间4行实收6.4 m²(1.6 m×4.0 m)测产,重复3次,将籽粒晾晒后称重,同时,用种子水分测定仪测定种子含水量,将小区产量折合成标准含水率为13%的产量。

1.3.8 氮肥利用效率相关指标计算

$$\text{氮肥农学利用效率(NUE)} = (\text{施氮处理产量} - \text{不施氮处理产量}) / \text{施氮量}$$

$$\text{氮肥偏生产力(PFP)} = \text{施氮处理产量} / \text{施氮量}$$

1.3.9 统计分析

所有数据采用SPSS 26.0进行分析,采用Tukey's多重比较检验, $P<0.05$ 为显著性阈值。使用Origin 9.0绘图。

2 结果与分析

2.1 施氮量对大豆根瘤数及根瘤干重的影响

由表 2 可知,2022 和 2023 年,2 个品种大豆根瘤数和根瘤干重均随生育进程的推进,表现为 R₂ 期开始增加至 R₅ 期达峰值后下降的变化趋势,均以 R₅ 期最高。2022 年各施氮处理 R₄—R₅ 期根瘤数和根瘤

干重差异均达显著水平,R₅ 期,‘新大豆 27’号和‘新农豆 2 号’N₁₈₀ 根瘤数和根瘤干重最高,较 N₀ 分别增加 85.53%、60.53% 和 71.20%、87.73% ($P<0.05$)。2 年结果一致。施氮量增加至 N₁₈₀,2 个品种的根瘤数和根瘤干重均达峰值,施氮量增加至 N₂₄₀,根瘤数和根瘤干重则大幅度下降。可见,N₁₈₀ 促进根瘤形成的作用最大。

表 2 不同施氮量下大豆根瘤数目和干重的变化
Table 2 Change of nodule number and nodule dry weight of soybean under different nitrogen application rates

年份(Y) Year	品种(C) Cultivar	处理(T) Treatment	根瘤数目/(个/m ²) Nodule number				根瘤干重/(g/m ²) Nodule dry weight			
			盛花期 R ₂	盛荚期 R ₄	始粒期 R ₅	满粒期 R ₆	盛花期 R ₂	盛荚期 R ₄	始粒期 R ₅	满粒期 R ₆
2022	新大豆 27 号 Xindadou 27	N ₀	305.25 ^b	742.50 ^d	1 311.75 ^e	1 039.50 ^c	3.30 ^b	4.02 ^e	12.52 ^d	8.40 ^{bc}
		N ₁₂₀	330.00 ^b	1 064.25 ^{bc}	1 963.50 ^e	1 097.25 ^c	3.89 ^{ab}	8.49 ^{bc}	18.77 ^b	10.24 ^{ab}
		N ₁₈₀	305.25 ^b	1 600.50 ^a	2 433.75 ^b	1 427.25 ^{ab}	3.80 ^{ab}	11.00 ^a	20.06 ^a	12.17 ^a
		N ₂₄₀	305.25 ^b	412.50 ^e	701.25 ^g	478.50 ^c	3.57 ^{ab}	2.78 ^e	3.89 ^g	3.11 ^d
	新农豆 2 号 Xinnongdou 2	N ₀	453.75 ^a	1 014.75 ^c	1 575.75 ^d	1 369.5 ^{ab}	4.05 ^{ab}	6.36 ^d	8.23 ^e	7.28 ^c
		N ₁₂₀	453.75 ^a	1 196.25 ^b	2 128.50 ^c	1 171.5 ^{bc}	4.38 ^a	7.18 ^{cd}	12.18 ^d	8.11 ^{bc}
		N ₁₈₀	445.50 ^a	1 526.25 ^a	2 697.75 ^a	1 476.75 ^a	4.38 ^a	9.72 ^{ab}	15.45 ^c	11.37 ^a
		N ₂₄₀	486.75 ^a	561.00 ^e	899.25 ^f	734.25 ^d	4.24 ^{ab}	3.72 ^e	5.57 ^f	4.13 ^d
2023	新大豆 27 号 Xindadou 27	N ₀	239.25 ^c	1 064.25 ^c	1 369.50 ^d	1 278.70 ^{5c}	2.46 ^a	16.67 ^a	19.42 ^c	18.13 ^b
		N ₁₂₀	264.00 ^{bc}	1 212.75 ^c	2 367.75 ^b	1 460.25 ^{bc}	2.44 ^a	17.24 ^a	22.89 ^b	16.24 ^c
		N ₁₈₀	272.25 ^b	1 765.50 ^a	2 813.25 ^a	1 765.50 ^a	2.47 ^a	15.44 ^a	25.43 ^a	21.06 ^a
		N ₂₄₀	255.75 ^{bc}	511.50 ^e	1 122.00 ^e	95.01 ^d	2.52 ^a	8.99 ^{bc}	11.61 ^e	8.50 ^f
	新农大 2 号 Xinnongdou 2	N ₀	313.50 ^a	1 188.00 ^c	1 617.00 ^c	957.00 ^d	2.10 ^b	7.10 ^{bc}	8.81 ^f	6.99 ^g
		N ₁₂₀	330.00 ^a	1 518.00 ^b	1 493.25 ^{cd}	1 435.50 ^c	2.03 ^b	7.60 ^{bc}	10.14 ^{ef}	10.87 ^e
		N ₁₈₀	330.00 ^a	1 839.75 ^a	2 326.50 ^b	1 650.00 ^{ab}	2.05 ^b	10.44 ^b	15.69 ^d	13.50 ^d
		N ₂₄₀	313.50 ^a	709.50 ^d	1 097.25 ^e	816.75 ^d	2.05 ^b	5.66 ^c	6.29 ^g	4.81 ^h
F		Y	188.79 [*]	37.10	136.95	52.05	2 259.42 [*]	158.41	12.37	5.01
		C	206.64 ^{**}	41.40 [*]	0.06	2.10	1.38	80.73 [*]	719.03 ^{**}	649.81 ^{**}
		T	0.51	201.47 ^{**}	1 084.23 ^{**}	47.65 ^{**}	2.23	60.96 ^{**}	449.58 ^{**}	191.04 ^{**}
		Y×C	53.35 [*]	0.11	224.32 ^{**}	44.46 [*]	14.31	91.88 [*]	91.16 [*]	364.56 ^{**}
		Y×T	0.65	1.97	66.39 ^{**}	4.26	0.79	8.51 [*]	26.77 ^{**}	0.25
		C×T	0.42	6.50 [*]	13.03 ^{**}	2.08	0.76	6.78 [*]	163.35 ^{**}	6.21 [*]

注:不同字母表示差异显著($P<0.05$),相同字母表示差异不显著($P>0.05$)。*和**分别表示 0.05 和 0.01 水平上的显著性。下同。
Note: Different letters represent significant differences ($P<0.05$), while the same letters represent no significant differences ($P>0.05$). * and ** indicate significance at 0.05 and 0.01 levels, respectively. The same below.

2.2 施氮量对根瘤蔗糖及淀粉含量的影响

由图 2 和图 3 可知,2022 和 2023 年 2 个品种大豆的根瘤蔗糖含量均随着生育时期的推进表现出先上升后下降的变化趋势,在 R₅ 期达到峰值。R₄

—R₆ 期,2 个品种大豆各施氮处理的根瘤蔗糖含量差异均达显著水平;2 年 R₄ 期根瘤蔗糖含量均以 N₁₈₀ 最高,‘新大豆 27 号’和‘新农豆 2 号’在 2022 年分别较 N₀、N₁₂₀、N₂₄₀ 增加 36.30%、31.99%、

15.26% 和 28.51%、17.05%、46.82% ($P<0.05$);
2023 年 N_{180} 分别较 N_0 、 N_{120} 、 N_{240} 增加 31.62%、

23.17%、66.92% 和 34.18%、18.59%、66.97%
($P<0.05$)。

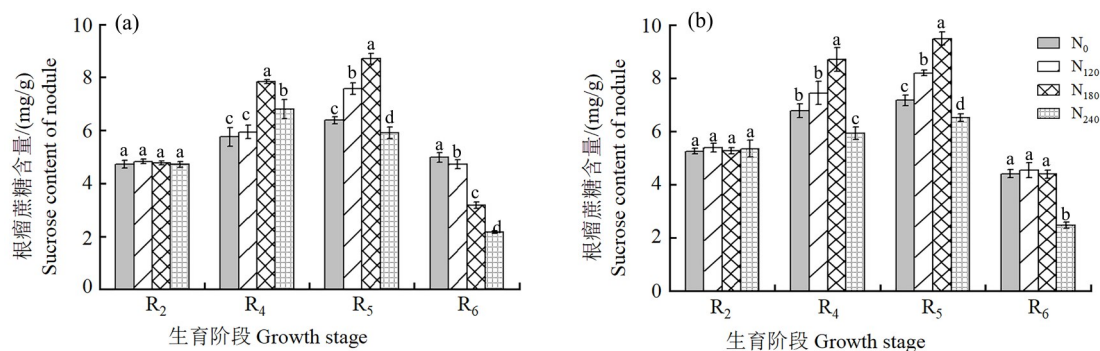


图2 2022年不同施氮量处理‘新大豆27号’(a)和‘新农豆2号’(b)根瘤的蔗糖含量

Fig. 2 Sucrose content in nodules of ‘Xindadou 27’ (a) and ‘Xinnongdou 2’ (b) under different nitrogen application rates in 2022

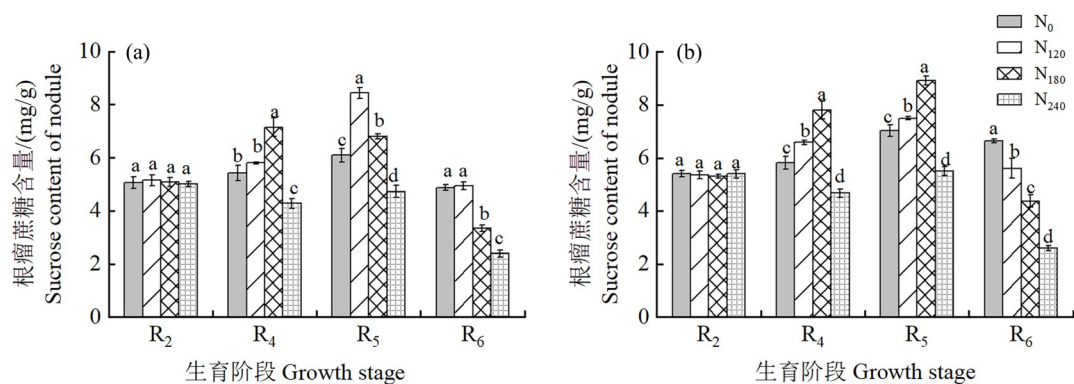


图3 2023年不同施氮量处理‘新大豆27号’(a)和‘新农豆2号’(b)根瘤的蔗糖含量

Fig. 3 Sucrose content in nodules of ‘Xindadou 27’ (a) and ‘Xinnongdou 2’ (b) under different nitrogen application rates in 2023

由图4和图5可知,2年两品种大豆的根瘤淀粉含量均以 R_4 期较高。2个品种大豆 R_4 — R_6 期的根瘤淀粉含量在各施氮处理间均存在显著差异,且均以 N_{180} 最高;

‘新大豆27号’和‘新农豆2号’在2022年 N_{180} 较 N_0 分别增加46.54%和32.37% ($P<0.05$);2023年 N_{180} 较 N_0 分别增加6.62%和6.29%。

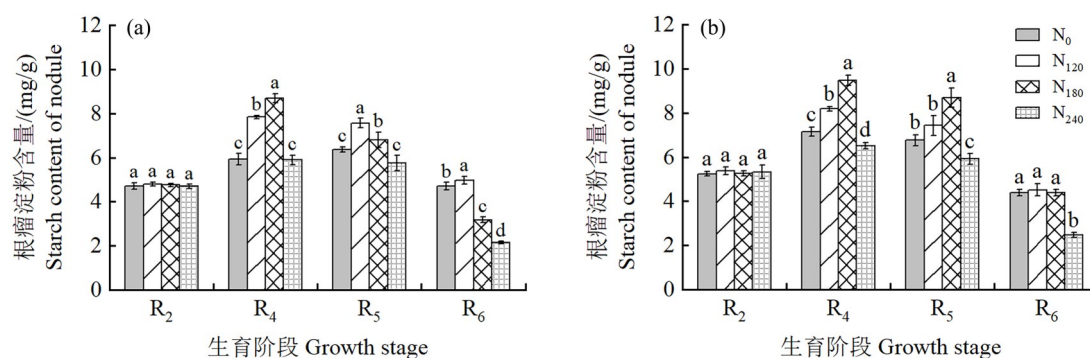


图4 2022年不同施氮量处理下‘新大豆27号’(a)和‘新农豆2号’(b)根瘤的淀粉含量

Fig. 4 Starch content in nodules of ‘Xindadou 27’ (a) and ‘Xinnongdou 2’ (b) under different nitrogen application rates in 2022

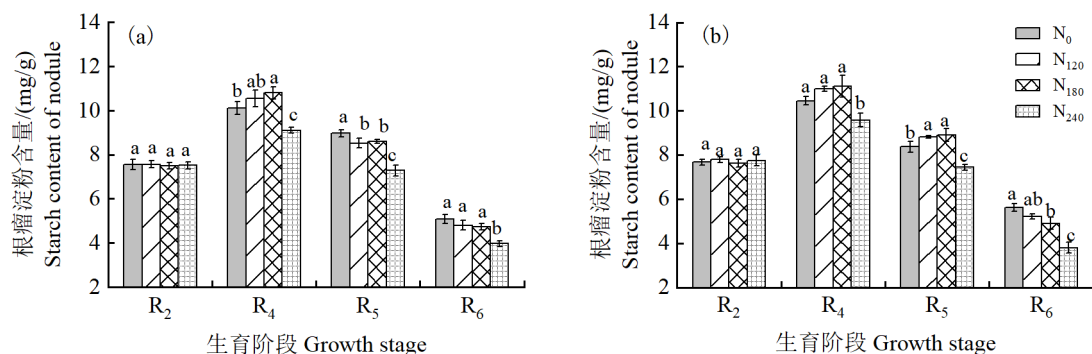


图5 2023年不同施氮量处理下‘新大豆27号’(a)和‘新农豆2号’(b)根瘤的淀粉含量

Fig. 5 Starch content in nodules of ‘Xindadou 27’ (a) and ‘Xinnongdou 2’ (b) under different nitrogen application rate in 2023

2.3 施氮量对根瘤蔗糖合成酶活性的影响

由图6和图7可知,2年2个品种大豆R₄—R₆期根瘤蔗糖合成酶活性在各施氮处理间差异均达显著水平,且均以R₄期最高。‘新大豆27

号’和‘新农豆2号’的N₁₈₀蔗糖合成酶活性在2022年较N₀分别增加48.52%和82.99% ($P < 0.05$); 2023年N₁₈₀分别较N₀增加24.59%和48.34% ($P < 0.05$)。

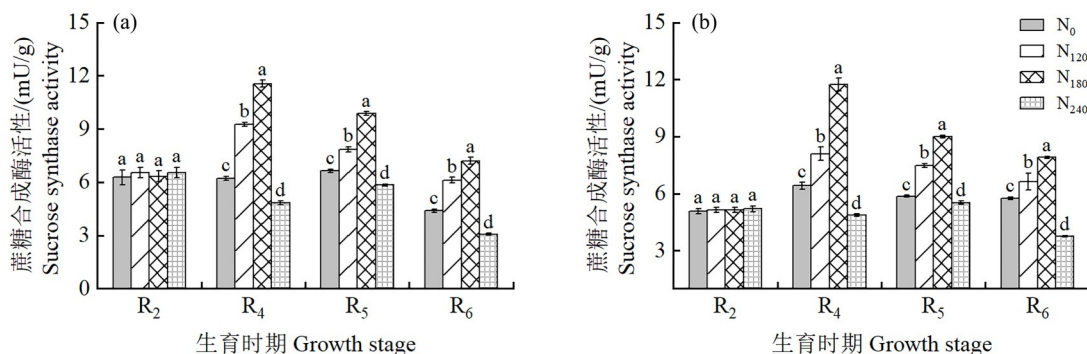


图6 2022年不同施氮量下‘新大豆27号’(a)和‘新农豆2号’(b)根瘤的蔗糖合成酶活性

Fig. 6 Activity of sucrose synthase in nodules of ‘Xindadou 27’ (a) and ‘Xinnongdou 2’ (b) under different nitrogen application rates in 2022

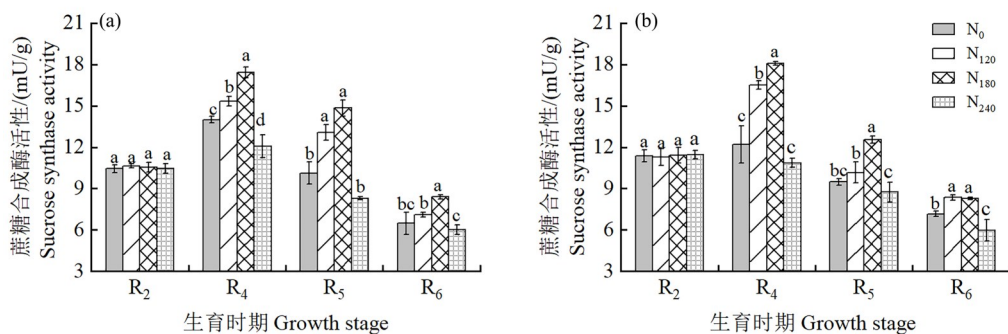


图7 2023年不同施氮量下‘新大豆27号’(a)和‘新农豆2号’(b)根瘤的蔗糖合成酶活性

Fig. 7 Activity of sucrose synthase in nodules of ‘Xindadou 27’ (a) and ‘Xinnongdou 2’ (b) under different nitrogen application rates in 2023

2.4 施氮量对大豆根瘤固氮酶活性的影响

由表3可知,2个品种大豆2年的根瘤固氮酶活

性均随着施氮量的增加逐渐降低,且在R₅期达到最高;2022年,‘新大豆27号’R₅期的N₁₂₀、N₁₈₀、N₂₄₀根

瘤固氮酶活性分别较 N₀ 降低 15.27%、30.65%、79.96% ($P<0.05$), ‘新农豆 2 号’的 N₁₂₀、N₁₈₀、N₂₄₀ 分别较 N₀ 降低 24.9%、55.07%、82.36% ($P<0.05$)。2023 年与 2022 年表现相似。

表 3 不同施氮量下大豆根瘤固氮酶活性的变化
Table 3 Change of nitrogenase activity of soybean root nodules under different nitrogen application rates

年份 (Y) Year	品种 (C) Cultivar	处理 (T) Treatment	时期 Stage			
			R ₂	R ₄	R ₅	R ₆
2022	新大豆 27 号 Xindadou 27	N ₀	3.54 ^{bc}	8.44 ^a	9.43 ^b	6.11 ^b
		N ₁₂₀	3.24 ^c	6.56 ^b	7.99 ^c	7.72 ^a
		N ₁₈₀	3.37 ^c	4.86 ^c	6.54 ^d	4.88 ^c
		N ₂₄₀	3.34 ^c	1.78 ^d	1.89 ^f	1.62 ^d
	新农豆 2 号 Xinnongdou 2	N ₀	3.71 ^{ab}	8.37 ^a	12.13 ^a	5.74 ^b
		N ₁₂₀	3.86 ^a	8.34 ^a	9.11 ^b	6.26 ^b
		N ₁₈₀	3.49 ^{bc}	7.64 ^a	5.45 ^c	5.94 ^b
		N ₂₄₀	3.52 ^{bc}	2.38 ^d	2.14 ^f	1.61 ^d
2023	新大豆 27 号 Xindadou 27	N ₀	4.16 ^a	9.50 ^a	6.94 ^{cd}	5.89 ^a
		N ₁₂₀	3.77 ^{ab}	7.16 ^b	6.63 ^d	5.33 ^a
		N ₁₈₀	3.69 ^b	6.75 ^{bc}	4.97 ^c	4.35 ^b
		N ₂₄₀	3.61 ^b	2.43 ^d	2.14 ^f	1.96 ^c
	新农大 2 号 Xinnongdou 2	N ₀	3.91 ^{ab}	7.47 ^b	10.47 ^a	5.38 ^b
		N ₁₂₀	3.63 ^b	7.68 ^b	8.25 ^b	6.02 ^b
		N ₁₈₀	3.73 ^{ab}	5.78 ^c	7.45 ^c	5.46 ^b
		N ₂₄₀	3.63 ^b	3.43 ^d	1.99 ^f	1.82 ^c
	F	Y	10.08	0.89	7.32	0.98
		C	2.96	3.29	641.75 ^{**}	12.92 [*]
		T	3.42	316.35 ^{**}	1 050.77 ^{**}	133.79 ^{**}
		Y×C	10.75 [*]	10.77 [*]	118.07 ^{**}	5.45
		Y×T	0.62	2.03	27.70 ^{**}	0.69
		C×T	1.72	6.31 ^{**}	33.31 ^{**}	4.40 ^{**}

2.5 施氮量对大豆不同氮素吸收的影响

由表 4 可知,2022 和 2023 年,2 个品种大豆总氮积累量在各施氮处理间差异均达显著水平,均以 N₁₈₀ 最高。2022 年 ‘新大豆 27 号’ 和 ‘新农豆 2 号’ 的 N₁₈₀ 较 N₀ 分别增加 63.16% 和 57.76% ($P<0.05$), 2023 年分别增加 59.00% 和 75.59% ($P<0.05$)。2 个品种大豆土壤氮和共生固氮量占比也均随着施氮量的增加呈逐渐下降的趋势。2 个品种大豆共生固氮量在各处理间均存在显著差异,且最高均为 N₁₈₀;2022 年 ‘新大豆 27 号’ 和 ‘新农豆 2 号’ N₁₈₀ 的总共生固氮量较 N₀ 分别增加 24.43% 和 46.47% ($P<0.05$), 2023 年分别增加 21.86%、31.43% ($P<$

0.05)。2022 年 ‘新大豆 27 号’ 和 ‘新农豆 2 号’ N₁₈₀ 肥料氮吸收量及其占比均显著高于 N₁₂₀,2 年表现相似。在 R₆ 期,2 个品种大豆 2 年植株积累的氮素有 22.94%~42.28% 来自于共生固氮,20.00%~39.97% 来自于肥料氮,62.25%~33.77% 来自于土壤氮,土壤氮占比随施氮量的增加而减小,肥料氮占比随着施氮量的增加而增加。随着施氮量的增加,2 个品种的肥料氮吸收量和共生固氮量均呈增加趋势,最终使总氮积累量增加;施氮量增加至 N₂₄₀,植株对肥料氮吸收量不再继续增加,同时共生固氮量却大幅度下降,植株总氮积累量不再增加。

表 4 不同施氮量下大豆 R₈期氮素积累量和共生固氮量变化
Table 4 Change of nitrogen accumulation and symbiotic nitrogen fixation in soybean at R₈ stage under different nitrogen application rates

年份(Y) Year	品种 (C) Cultivar	处理 (T) Treatment	总氮积累量/(kg/hm ²) Total N	土壤氮 Soil N		肥料氮 Fertilizer N		共生固氮量 Total N ₂ fixation	
				含量/(kg/hm ²) Content	比例/% Ratio	施用量/ (kg/hm ²) Application rate	比例/% Ratio	含量/(kg/hm ²) Content	比例/% Ratio
2022	新大豆 27 号 Xindadou 27	N ₀	157.83 ^d	97.95	62.05 ^a			59.89 ^{bc}	37.95 ^a
		N ₁₂₀	203.88 ^c	97.95	48.04 ^b	39.45 ^c	19.34 ^d	66.48 ^b	32.61 ^b
		N ₁₈₀	257.52 ^a	97.95	38.08 ^c	85.06 ^{ab}	33.01 ^{bc}	74.52 ^a	28.92 ^c
		N ₂₄₀	242.15 ^b	97.95	40.58 ^c	82.96 ^{ab}	34.05 ^b	61.24 ^{bc}	25.37 ^d
	新农豆 2 号 Xinnongdou 2	N ₀	162.54 ^d	102.66	63.13 ^a			51.69 ^d	31.80 ^{bc}
		N ₁₂₀	208.52 ^c	102.66	49.24 ^b	45.71 ^c	21.88 ^d	60.15 ^{bc}	28.88 ^c
		N ₁₈₀	256.41 ^{ab}	102.66	40.04 ^c	78.02 ^b	30.43 ^c	75.73 ^a	29.53 ^c
		N ₂₄₀	255.59 ^{ab}	102.66	40.17 ^c	94.27 ^a	36.89 ^a	58.67 ^c	22.94 ^d
2023	新大豆 27 号 Xindadou 27	N ₀	154.10 ^c	89.11	57.72 ^a			64.99 ^b	42.28 ^a
		N ₁₂₀	214.42 ^c	89.11	41.60 ^{bc}	44.46 ^c	20.70 ^d	80.85 ^a	37.70 ^{ab}
		N ₁₈₀	245.01 ^b	89.11	36.39 ^{cd}	76.69 ^b	31.28 ^c	79.20 ^a	32.33 ^{bc}
		N ₂₄₀	263.68 ^a	89.11	33.77 ^d	105.37 ^a	39.96 ^a	69.20 ^b	26.27 ^c
	新农豆 2 号 Xinnongdou 2	N ₀	140.81 ^c	87.60	62.25 ^a			53.20 ^c	37.75 ^{ab}
		N ₁₂₀	190.99 ^d	87.60	45.96 ^b	32.50 ^c	17.09 ^e	70.90 ^b	36.95 ^{ab}
		N ₁₈₀	247.29 ^b	87.60	35.44 ^d	89.77 ^b	36.30 ^b	69.92 ^b	28.25 ^c
		N ₂₄₀	245.25 ^b	87.60	35.72 ^d	90.44 ^b	36.88 ^b	67.20 ^b	27.41 ^c

2.6 施氮对大豆产量及氮肥利用效率的影响

由表5可知,2个品种大豆2年的收获株数在各施氮处理间均无显著差异;各施氮处理的单株荚数和单株粒数均存在显著差异。2022年‘新大豆27号’和‘新农豆2号’的N₁₈₀单株荚数、单株粒数较N₀分别增加48.62%、23.01%和28.14%、25.94%($P<0.05$);2023年分别较N₀增加29.93%、23.96%和26.86%、28.64%($P<0.05$)。2022年,‘新大豆27号’和‘新农豆2号’的百粒重均以N₂₄₀最

高,分别较N₀增加13.80%和20.56%($P<0.05$);2023年分别以N₂₄₀和N₁₈₀最高,分别较N₀增加10.03%和8.56%($P<0.05$)。2年‘新大豆27号’,‘新农豆2号’的产量均以N₁₈₀最高,分别较N₀增加19.32%、25.57%(2022年)和24.92%、21.81%(2023年)($P<0.05$)。2个品种大豆氮肥农学利用效率(NUE)在各处理间均差异显著,‘新大豆27号’和‘新农豆2号’的氮素农学利用效率在2022年均以N₁₈₀最高,分别为3.69和4.86 kg/kg;2023年

表5 不同施氮量下大豆产量及氮肥利用效率变化
Table 5 Change of soybean yield and nitrogen use efficiency under different nitrogen application rates

年份 (Y) Year	品种 (C) Cultivar	处理 (T) Treatment	株数/ (10 ⁴ /hm ²) Number of plant	单株荚数 Pod per plant	单株粒数 Seed per plant	百粒重/g 100-grain weight	产量/ (kg/hm ²) Yield	NUE	PFP
2022	新大豆27号 Xindadou 27	N ₀	29.28 ^a	25.25 ^e	77.85 ^e	18.40 ^c	3 433.36 ^f		
		N ₁₂₀	30.92 ^a	30.40 ^d	85.90 ^{cd}	19.67 ^b	3 721.68 ^e	2.40 ^c	31.01 ^b
		N ₁₈₀	29.50 ^a	37.60 ^b	95.65 ^b	19.87 ^b	4 096.68 ^b	3.69 ^b	22.76 ^d
		N ₂₄₀	30.25 ^a	33.95 ^c	89.45 ^c	20.94 ^a	3 857.54 ^{cd}	1.77 ^d	16.07 ^e
	新农豆2号 Xinnongdou 2	N ₀	29.25 ^a	33.40 ^c	79.40 ^e	15.37 ^c	3 418.34 ^f		
		N ₁₂₀	29.50 ^a	37.80 ^b	89.40 ^c	16.60 ^d	3 827.51 ^d	3.41 ^b	31.90 ^a
		N ₁₈₀	28.92 ^a	42.80 ^a	99.95 ^a	17.17 ^d	4 292.54 ^a	4.86 ^a	23.85 ^c
		N ₂₄₀	28.75 ^a	38.25 ^b	93.35 ^b	18.53 ^c	3 932.52 ^c	2.14 ^{cd}	16.39 ^e
2023	新大豆27号 Xindadou 27	N ₀	28.89 ^{ab}	28.40 ^e	77.85 ^e	18.44 ^c	3 525.94 ^d		
		N ₁₂₀	30.67 ^{ab}	32.95 ^d	85.90 ^{cd}	19.26 ^b	3 881.50 ^c	2.96 ^b	32.35 ^b
		N ₁₈₀	28.89 ^{ab}	36.90 ^c	95.65 ^b	19.87 ^{ab}	4 404.47 ^b	4.88 ^a	24.47 ^d
		N ₂₄₀	31.44 ^a	34.00 ^d	89.45 ^c	20.29 ^a	3 911.13 ^c	1.60 ^b	16.30 ^f
	新农豆2号 Xinnongdou 2	N ₀	27.78 ^b	37.60 ^c	79.40 ^e	16.58 ^c	3 810.39 ^c		
		N ₁₂₀	29.22 ^{ab}	41.80 ^b	89.40 ^c	17.54 ^d	4 396.32 ^b	4.88 ^a	36.64 ^a
		N ₁₈₀	28.44 ^{ab}	47.65 ^a	99.95 ^a	18.00 ^{cd}	4 641.50 ^a	4.62 ^a	25.79 ^c
		N ₂₄₀	30.00 ^{ab}	42.95 ^b	93.35 ^b	17.94 ^{cd}	4 333.35 ^b	2.18 ^b	18.06 ^e
F		Y	0.11	46.98 ^{**}	5.21 [*]	0.69	246.14 ^{**}	0.76	132.95 ^{**}
		C	5.36	395.98 ^{**}	14.95 ^{**}	363.20 ^{**}	112.22 ^{**}	9.31 [*]	158.82 ^{**}
		T	0.56 [*]	115.37 ^{**}	186.51 ^{**}	63.10 ^{**}	157.68 ^{**}	78.65 ^{**}	5 073.44 ^{**}
		Y×C	0.07	16.19 ^{**}	1.12	11.69 ^{**}	40.75 ^{**}	0.04	44.09 ^{**}
		Y×T	2.44	0.94	1.16	5.40 ^{**}	1.56	3.39	21.05 ^{**}
		C×T	0.31	1.06	2.16	0.37	2.29	3.90	9.70 ^{**}

分别以 N_{180} 和 N_{120} 最高, 均为 4.88 kg/kg 。2 个品种大豆 2 年的氮肥偏生产力 (PFP) 均随着施氮量的增加呈逐渐下降趋势, 处理间差异均达显著水平。可见, 随着施肥氮量的增加, 大豆籽粒产量和氮素利用效率均呈现增加趋势, 达峰值后, 再继续增加施氮肥量, 大豆产量呈现下降趋势, 导致氮肥农学利用效率大幅度下降。

2.7 施氮量与氮素积累总量、肥料氮、共生固氮量及产量的关系

由图 8 可知, 2 个品种大豆 2 年的 R_8 期氮素积累总量随着施氮量的增加均呈现逐渐增加的趋势, 在 N_{180} 达到峰值, N_{240} 趋于稳定。‘新大豆 27 号’和‘新农豆 2 号’的施氮量与氮素积累总量的拟合曲线方程分别为 $y_1 = -8.08x^2 + 0.62x + 154.58$ ($R^2 = 0.966$) 和 $y_2 =$

$-5.95x^2 + 0.59x + 149.7$ ($R^2 = 0.937$)。2 个大豆品种 2 年的植株肥料氮含量随着施氮量的增加均呈逐渐上升趋势, N_{240} 的肥料氮含量最高。2 个品种大豆的产量和共生固氮量随施氮量的增加均呈现单峰曲线变化, 当施氮量达 130.57 和 156.83 kg/hm^2 , 最大共生固氮量分别为 75.86 和 68.16 kg/hm^2 。‘新大豆 27 号’和‘新农豆 2 号’的施氮量与产量的拟合曲线方程分别为 $y_1 = -0.022x^2 + 7.97x + 3320.09$ ($R^2 = 0.817$) 和 $y_2 = -0.024x^2 + 8.2x + 3593.62$ ($R^2 = 0.872$); 当施氮量达 181.14 、 170.83 kg/hm^2 , 产量最高分别为 4041.92 、 4294.04 kg/hm^2 。‘新大豆 27 号’和‘新农豆 2 号’依靠肥料氮增加的产量分别占总产量的 $7.75\% \sim 20.37\%$ 、 $9.16\% \sim 17.91\%$, 较 N_0 分别增产 $8.40\% \sim 25.57\%$ 、 $10.08\% \sim 24.92\%$ 。

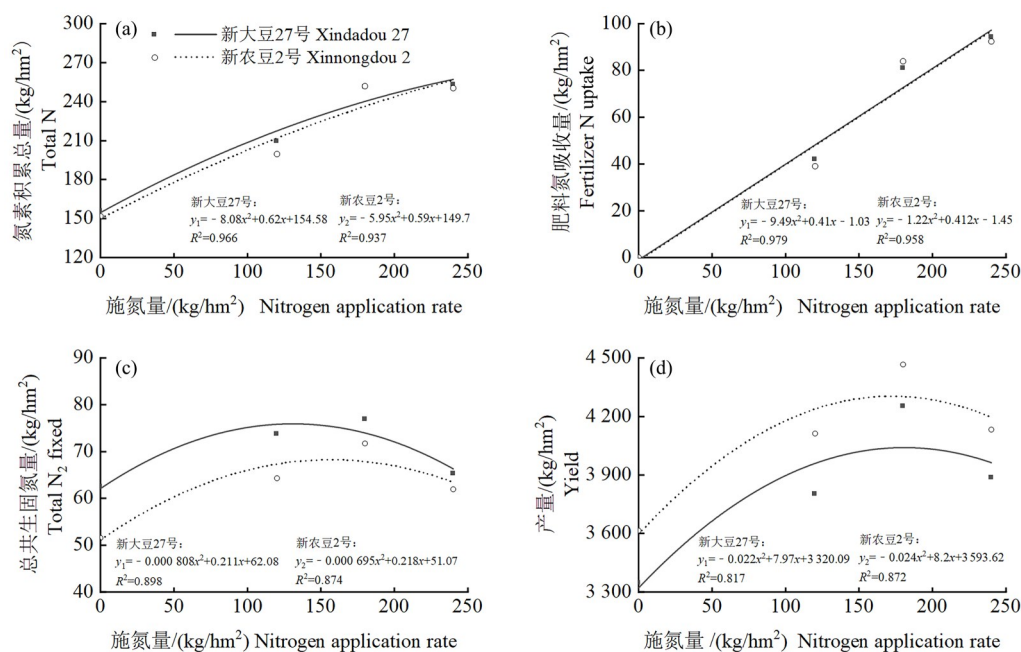


图 8 施氮量与氮素积累总量(a)、肥料氮吸收量(b)、共生固氮量(c)及产量(d)的关系

Fig. 8 The relationship between N application rate and total N accumulation (a), fertilizer N uptake (b), total N_2 fixation (c), and yield (d)

3 讨论

3.1 施氮量对大豆根瘤形成及共生固氮量的影响

矿物质氮素通过减少单位面积根瘤数量和质量、抑制固氮酶活性, 以及加速根瘤的衰老或崩解来减少共生固氮量^[26,40]。当土壤氮素较低时, 增施肥料氮会促进大豆根瘤形成和共生固氮作用。而当土壤氮素浓度较高时, 再施入氮肥, 导致土壤微

生物群落发生改变, 固氮菌落和根瘤菌的生长受到抑制, 从而影响根瘤形成^[41]; 但是, 能促进根系生长、根系对氮素的吸收和向地上部分的转运^[42]。施氮抑制了根瘤的形成或固氮酶的活性, 从而导致大豆共生固氮降低^[43]。在缺乏氮素或在低浓度氮素的情况下, 大豆植株能产生更多的根瘤和更高的固氮作用^[13]。本试验结果表明, 在 R_3 期施氮量为 120 (N_{120}) $\sim 180 \text{ kg/hm}^2$ (N_{180}) 的条件下, 能显著增加根

瘤数目和根瘤质量(表2),促进了根系和地上部健壮生长^[44],使根瘤中可溶性糖和淀粉含量同步升高^[45];但施用氮肥降低了根瘤固氮酶活性(表3),这是由于 NO_3^- 导致根瘤中氧扩散屏障的渗透性降低,根瘤氧气供应受阻的缘故^[46];说明根瘤的固氮酶活性对氮肥响应比根瘤形成更敏感。当施氮量增至 $240\text{ kg/hm}^2(\text{N}_{240})$,根瘤数和根瘤干重显著降低,固氮酶活性、根瘤固氮量和氮肥农学利用效率剧降,从而导致产量下降。这可能是过量氮肥导致大豆茎叶徒长或发生倒伏,根系生长受阻的缘故^[47]。因此, R_3 期适量施用氮肥可显著促进大豆的根瘤形成和碳水化合物合成。

3.2 施氮量对大豆氮素吸收及产量形成的关系

大豆产量的高低取决于植株氮素的总积累量^[48]。大豆植株氮素吸收来源于土壤氮、肥料氮和共生固氮^[9]。土壤氮是基础氮,是苗期氮素的最主要来源,在很大程度上影响大豆追施氮肥前的植株健壮程度和根瘤形成数量和质量^[49]。肥料氮是在大豆进入快速生长期(花荚期)前施入,可满足高产植株健壮生长的需要^[50]。共生固氮是在土壤氮和肥料氮的共同作用下,形成的根瘤主要在大豆结荚、鼓粒期固定空气中的氮素^[51]。土壤氮和肥料氮主要分配在营养器官中,共生固氮主要向籽粒分配^[52]。可见,在大豆不同生育阶段,因主要氮素来源各不相同,对大豆产量形成的作用也各不相同。在本研究中,适宜的施氮量可显著影响大豆对氮素的吸收和分配,不施氮处理(N_0)大豆植株吸收的氮 $57.72\%\sim 63.13\%$ 来自土壤氮,随着施氮量的增加大豆吸收肥料氮的占比逐渐增加,共生固氮量所占比例不断降低(表4)。在我国东北地区(产量水平为 $2\,510.10\sim 3\,192.45\text{ kg/hm}^2$)接种根瘤菌且不施氮条件下,共生固氮量为 $108.0\sim 150.2\text{ kg/hm}^2$,共生固氮占氮素积累总量的百分比为 $47.8\%\sim 70.0\%$ ^[53]。在阿根廷对86个试验点大豆(均接种根瘤菌且未施氮,产量水平为 $2\,200\sim 3\,600\text{ kg/hm}^2$)进行共生固氮的评估,共生固氮量为 $65\sim 165\text{ kg/hm}^2$,共生固氮所占比例为 $43\%\sim 60\%$,氮素吸收量为 $175\sim 256\text{ kg/hm}^2$ ^[54]。在本研究条件下, N_0 的产量为 $3\,433.36\sim 3\,810.39\text{ kg/hm}^2$,共生固氮量为 $53.20\sim 64.99\text{ kg/hm}^2$,共生固氮占总氮比例为 $31.80\%\sim 42.28\%$ (表4)。本研究产量均高于东北地区和阿根廷,但是共生固氮和共生固氮率相对较低。可能

是由于东北地区和阿根廷在播种前大豆均接种根瘤菌的结果,而本试验未接种根瘤菌。本试验区大豆根瘤固氮潜力有待挖掘。龚振平等^[55]利用 ^{15}N -硫酸铵(150 kg/hm^2)同位素稀释法测定东北盆栽春大豆吸收共生固氮率为 59.0% ,土壤氮所占比例为 39.8% ,肥料氮所占比例为 1.2% 。本试验在新疆北疆膜下滴灌条件下,利用相对酰脲法估算施氮量为 $180\text{ kg/hm}^2(\text{N}_{180})$,大豆吸收共生固氮所占比例为 $28.25\%\sim 32.30\%$,土壤氮所占比例为 $35.44\%\sim 40.04\%$,肥料氮所占比例为 $30.43\%\sim 36.30\%$ (表4)。 N_{180} 的产量较高($4\,096.68\sim 4\,641.50\text{ kg/hm}^2$),依靠施氮增加的产量占总产量的 $16.19\%\sim 20.37\%$ (较 N_0 增产 $19.32\%\sim 25.57\%$)(表5),与高阳等^[29]的研究结果一致。依靠增施氮肥不能进一步提高大豆产量是因为过量施氮导致大豆植株地上部徒长,根系和根瘤生长受严重抑制,减少了共生固氮量的缘故^[56]。因此,3种氮源缺一不可,且关系协调是大豆植株健壮生长、实现高产高效的基础。

在本试验条件下,虽然未考虑追施肥料氮后对土壤氮吸收的影响,但并不影响对各处理根瘤固氮量估算结果。大豆氮素的3个来源比率受到土壤肥力条件、氮肥施用方法及根瘤固氮活性等影响,最终导致氮素积累总量和产量差异。在一定土壤条件下,如何通过肥料氮协调大豆3个氮源的关系,在充分发挥大豆固氮潜力的同时,增加大豆产量和氮肥利用效率,是需要进一步深入研究的问题。

4 结 论

在膜下滴灌条件下, R_3 期施适量氮肥(180 kg/hm^2)可显著增加大豆根瘤数目、根瘤干重(分别可达 $1\,965.56\text{ 个/m}^2$ 和 19.16 g/m^2),显著增加根瘤中碳水化合物含量、共生固氮量、肥料氮吸收量和氮素积累总量,并显著提高大豆产量以及氮肥农学利用效率,产量高达 $4\,096.68\sim 4\,641.50\text{ kg/hm}^2$ 。因此,在新疆北疆膜下滴灌条件下,施氮量为 180 kg/hm^2 可促进大豆植株对肥料氮和共生固氮的吸收利用,最终实现高产。

参考文献 References

- [1] 姚俊强. 新疆空中水资源和地表水资源变化特征研究[J]. 干旱区研究, 2024, 41(2): 181-190
Yao J Q. Change in atmospheric and surface water resource in Xinjiang

- [J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(2): 181-190 (in Chinese)
- [2] 曾凯, 赵靓, 张恒斌, 罗庚彤, 战勇, 刘涛. 新疆春大豆膜下滴灌超高产栽培模式创建[J]. 大豆科学, 2021, 40(1): 28-38
Zeng K, Zhao J, Zhang H B, Luo G T, Zhan Y, Liu T. Establishment of super high yield cultivation mode of spring soybean under film drip irrigation in Xinjiang [J]. *Soybean Science*, 2021, 40(1): 28-38 (in Chinese)
- [3] 苏君伟, 王慧新, 吴占鹏, 蔡立夫, 汪仁, 王海新, 陈尔冉, 陆岩. 辽西半干旱区膜下滴灌条件下对花生田土壤微生物量碳、产量及 WUE 的影响[J]. 花生学报, 2012, 41(4): 37-41
Su J W, Wang H X, Wu Z P, Cai L F, Wang R, Wang H X, Chen E R, Lu Y. Effect of drip irrigation under mulch on microbial biomass carbon of soil, peanut yield and WUE in the sandy and windy semi-drought area [J]. *Journal of Peanut Science*, 2012, 41(4): 37-41 (in Chinese)
- [4] 翟超, 张娜, 肖杨, 周和平, 肖重华, 孟雨尘. 新疆主要粮食作物滴灌条件下作物系数及水分生产率试验研究[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(3): 162-167
Zhai C, Zhang N, Xiao Y, Zhou H P, Xiao C H, Meng Y C. Experiment on crop coefficient and water productivity of main grain crops under drip irrigation in Xinjiang [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, 35(3): 162-167 (in Chinese)
- [5] Qiang B B, Zhou W X, Zhong X J, Fu C Y, Cao L, Zhang Y X, Jin X J. Effect of nitrogen application levels on photosynthetic nitrogen distribution and use efficiency in soybean seedling leaves[J/OL]. *Journal of Plant Physiology*, (2023-07-09). DOI: doi. org/10. 1016/j. jplph. 2023. 154051
- [6] Ohyama T, Isaka M, Saito A, Higuchi K. Effects of nodulation on metabolite concentrations in xylem sap and in the organs of soybean plants supplied with different N forms[J/OL]. *Metabolites*, (2023-02-21). DOI: doi. org/10. 3390/metabo13030319
- [7] Kinugasa T, Sato T, Oikawa S, Hirose T. Demand and supply of N in seed production of soybean (*Glycine max*) at different N fertilization levels after flowering [J]. *Journal of Plant Research*, 2012, 125(2): 275-281.
- [8] Donahue J M, Donahue J M, Bai H, Almtarfi H, Zakeri H, Fritsch F B. The quantity of nitrogen derived from symbiotic N fixation but not the relative contribution of N fixation to total N uptake increased with breeding for greater soybean yields [J/OL]. *Field Crops Research*, (2020-10-21). DOI: doi. org/10. 1016/j. fcr. 2020. 10794
- [9] Dai H X, Wei S J, Li J Q, Kong W L, Wang B, Pei J M, Wu J H. Fertilization effects on symbiotic and free-living biological nitrogen fixations: Similar effects but different mechanisms[J/OL]. *Applied Soil Ecology*, (2024-08-11). DOI: doi. org/10. 1016/j. apsoil. 2024. 105590
- [10] Gutiérrez-boem F H, Scheiner J D, Rimski-Korsakov H, Lavado R S. Late season nitrogen fertilization of soybeans: effects on leaf senescence, yield and environment[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, 68(2): 109-115
- [11] Sachs J L, Quides K W, Wendlandt C E. Legumes versus rhizobia: A model for ongoing conflict in symbiosis[J]. *New Phytologist*, 2018, 219(4): 1199-1206
- [12] Fujikake H, Yamazaki A, Ohtake N, Sueyoshi K, Matsuhashi S, Ito T, Mizuniwa C, Kume T, Hashimoto S, Ishioka N S, Watanabe S, Osa A, Sekine T, Uchida H, Tsuji A, Ohyama T. Quick and reversible inhibition of soybean root nodule growth by nitrate involves a decrease in sucrose supply to nodules[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2003, 54(386): 1379-1388
- [13] Jnior A M, Campos F G, Barzotto G R, Pagassini J A V, Vieira M A R, Boaro F. Metabolic adjustment of *Glycine max* (L.) merrill in the presence of nitrate and bradyrhizobium *japonicum* [J/OL]. *Agronomy*, (2021-07-29). DOI: 10. 3390/agronomy11081518
- [14] Gan Y B, Stulen I, van Keulen H, Kuiper P J C. Low concentrations of nitrate and ammonium stimulate nodulation and N₂ fixation while inhibiting specific nodulation (nodule DW g⁻¹ root dry weight) and specific N₂ fixation (N₂ fixed g⁻¹ root dry weight) in soybean[J]. *Plant and Soil*, 2004, 258(1): 281-292
- [15] Zhong X B, Wang J, Shi X L, Bai M Y, Yuan C C, Cai C L, Wang N, Zhu X M, Kuang H Q, Wang X, Su J Q, He X, Liu X, Yang W Q, Yang C Y, Kong F J, Wang E T, Guan Y F. Genetically optimizing soybean nodulation improves yield and protein content[J]. *Nature Plants*, 2024, 10(5): 736-742
- [16] Lu M Z, Carter A M, Tegeder M. Altering ureide transport in nodulated soybean results in whole-plant adjustments of metabolism, assimilate partitioning, and sink strength [J/OL]. *Journal of Plant Physiology* (2021-12-28). DOI: doi. org/10. 1016/j. jplph. 2021. 153613
- [17] Mendes L W. Influence of resistance breeding in common bean on rhizosphere microbiome composition and function [J]. *The ISME Journal*, 2018, 12(1): 212-224
- [18] Salvaggiotti F, Cassman K G, Specht J E, Walters D T, Weiss A, Dobermann A. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review[J]. *Field Crops Research*, 2008, 108(1): 1-13
- [19] Osborne S L, Riedell W E. Starter nitrogen fertilizer impact on soybean yield and quality in the northern great plains [J]. *Agronomy Journal*, 2006, 98(6): 1569-1574
- [20] Ray J D, Heatherly L G, Fritsch F B. Influence of large amounts of nitrogen on nonirrigated and irrigated soybean [J]. *Crop Science*, 2006, 46(1): 52-60
- [21] McCoy J M, Kaur G, Golden B R, Orlowski J M, Cook D, Bond J A, Cox M S. Nitrogen fertilization of soybean in Mississippi increases seed yield but not profitability[J]. *Agronomy Journal*, 2018, 110(4): 1505-1512
- [22] Moro Rosso L H, Tamagno S, da Silva A L, Torres A R, Schwalbert R A, Ciampitti I A. Relative abundance of ureides differs among plant fractions in soybean[J/OL]. *European Journal of Agronomy*, (2021-06-15). DOI: 10. 3389/fpls. 2021. 675410
- [23] Santachiara G, Salvaggiotti F, Rotundo J L. Nutritional and environmental effects on biological nitrogen fixation in soybean A meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2019, 240: 106-115
- [24] 王树起, 韩晓增, 乔云发, 严君, 李晓慧. 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, Yan J, Li X H. 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 (in Chinese)
- [25] Schwember A R, Schulze J, Del P A, Cabeza R A. Regulation of symbiotic nitrogen fixation in legume root nodules[J/OL]. *Plants*, (2019-09-06). DOI: 10. 3390/plants8090333
- [26] Liu A, Contador C A, Fan K J, Lam H M. Interaction and regulation of carbon, nitrogen, and phosphorus metabolisms in root nodules of legumes [J/OL]. *Frontiers in Plant Science*, (2018-12-18). DOI: 10. 3389/fpls. 2018. 01860
- [27] Li S, Wu C B, Liu H, Lyu X C, Xiao F S, Zhao S H, Ma C M, Yan C, Liu Z L, Li H Y, Wang X L, Gong Z P. Systemic regulation of nodule

- structure and assimilated carbon distribution by nitrate in soybean [J/OL]. *Frontiers in Plant Science*, (2023-01-06). DOI: 10.3389/fpls.2023.1101074
- [28] 王田, 王志杰, 张云鹤, 叶岩, 郭明旻, 陈展宇, 张治安. 大豆根瘤豆血红蛋白含量与产量关系研究[J]. 大豆科学, 2020, 39(1): 45-51
Wang T, Wang Z J, Zhang Y H, Ye Y, Guo M Y, Chen Z Y, Zhang Z A. Study on relationship between soybean leghemoglobin content and yield[J]. *Soybean Science*, 2020, 39(1): 45-51 (in Chinese)
- [29] 高阳, 楚光红, 傅积海, 张艳伟, 章建新. 施氮量对滴灌高产春大豆根系生长及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(4): 46-52
Gao Y, Chu G H, Fu J H, Zhang Y W, Zhang J X. Effect of nitrogen fertilizer amount on root growth and yield of spring soybean in drip irrigation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(4): 46-52 (in Chinese)
- [30] 楚光红, 章建新, 王聪, 赵占营. 幼苗期不同节位摘心对高产春大豆根系生长和产量的影响[J]. 作物杂志, 2021(3): 195-201
Chu G H, Zhang J X, Wang C, Zhao Z Y. Effects of topping at different nodes at seedling stage on root growth and yield of high-yield spring soybean[J]. *Crops*, 2021(3): 195-201 (in Chinese)
- [31] Clegg K M. The application of the anthrone reagent to the estimation of starch in cereals[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1956, 7(1): 40-44
- [32] Du Y L, Zhao Q, Chen L R, Yao X D, Zhang W, Zhang B, Xie F T. Effect of drought stress on sugar metabolism in leaves and roots of soybean seedlings[J/OL]. *Plant Physiology and Biochemistry*, (2020-01-20). DOI:10.3390/agronomy10020302
- [33] David K A V, Apte S K, Banerji A, Thomas J. Acetylene reduction assay for nitrogenase activity: Gas chromatographic determination of ethylene per sample in less than one minute [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1980, 39(5): 1078-1080
- [34] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000
Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [35] Van Der Drift C, De Windt F E, Vogels G D. Allantoate hydrolysis by allantoate amidohydrolase[J]. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 1970, 136(1): 273-279
- [36] Cataldo D A, Maroon M, Schrader L E, Youngs V L. Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1975, 6(1): 71-80
- [37] Herridge D F, Peoples M B. Ureide assay for measuring nitrogen fixation by nodulated soybean calibrated by ^{15}N methods[J]. *Plant Physiology*, 1990, 93(2): 495-503
- [38] Peoples M B, Palmer B, Lilley D M, Duc L M, Herridge D F. Application of ^{15}N and xylem ureide methods for assessing N_2 fixation of three shrub legumes periodically pruned for forage[J]. *Plant and Soil*, 1996, 182(1): 125-137
- [39] Alves B J de P, Rezende C, Resende A S, Macedo R, Tarré R M, Urquiaga S, Boddey R M. Estimation of N_2 fixation in *Desmodium ovalifolium* from the relative ureide abundance of stem solutes: Comparison with the ^{15}N -dilution and an in situ soil core technique[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 56(2): 177-193
- [40] Tamagno S, Sadras V O, Haeghele J W, Armstrong P R, Ciampitti I A. Interplay between nitrogen fertilizer and biological nitrogen fixation in soybean: Implications on seed yield and biomass allocation[J]. *Scientific Reports*, (2018-11-30). DOI: 10.1038/s41598-018-35672-1
- [41] Wang C B, Zheng Y M, Shen P, Zheng Y P, Wu Z F, Sun X W, Yu T Y, Feng H. Determining N supplied sources and N use efficiency for peanut under applications of four forms of N fertilizers labeled by isotope ^{15}N [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(2): 432-439
- [42] Daba S, Haile M. Effects of Rhizobial inoculant and nitrogen fertilizer on yield and nodulation of common bean [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2000, 23(5): 581-591
- [43] Luciński R, Polcyn W, Ratajczak L. Nitrate reduction and nitrogen fixation in symbiotic association *Rhizobium-legumes*[J]. *Acta Biochimica Polonica*, 2002, 49(2): 537-546
- [44] Wu Z S, Xu C L, Li R D, Xu Y F, Hua J X, Sun S, Han T F, Song W W, Wu C X. Full-field straw mulching and fertilizer application improved the soybean seed yield through optimization of the root and canopy structure: A study case in Huang-Huai-Hai region [J/OL]. *European Journal of Agronomy*, (2024-07-18). DOI: doi. org/10.1016/j.eja.2024.127280
- [45] Gordon A J, Skot L, James C L, Minchin F R. Short-term metabolic responses of soybean root nodules to nitrate[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53(368): 423-428
- [46] Streeter J, Wong P P. Inhibition of legume nodule formation and N_2 fixation by nitrate[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 1988, 7(1): 1-23
- [47] Konotop Y, Mészáros P, Spieß N, Mistriková V, Pířelová B, Libantová J, Moravčíková J, Taran N, Hauptvogel P, Matušiková I. Defense responses of soybean roots during exposure to cadmium, excess of nitrogen supply and combinations of these stressors [J]. *Molecular Biology Reports*, 2012, 39(12): 10077-10087
- [48] Cafaro La Menza N, Monzon J P, Specht J E, Lindquist J L, Arkebauer T J, Graef G, Grassini P. Nitrogen limitation in high-yield soybean: Seed yield, N accumulation, and N-use efficiency [J]. *Field Crops Research*, 2019, 237: 74-81
- [49] Zhu F G, Deng J, Chen H, Liu P, Zheng L H, Ye Q Y, Li R, Rui L, Brault M, Wen J Q, Frugier F, Dong J J, Wang T. A cep peptide receptor-like kinase regulates auxin biosynthesis and ethylene signaling to coordinate root growth and symbiotic nodulation in *Medicago truncatula* [J]. *The Plant Cell*, 2020, 32: 2855-5877
- [50] Gan Y B, Stulen I, Posthumus F, van Keulen H, Kuiper P J. Effects of N management on growth, N_2 fixation and yield of soybean[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 62(2): 163-174
- [51] Zapata F, Danso S K A, Hardarson G, Fried M. Time course of nitrogen fixation in field-grown soybean using nitrogen-15 methodology [J]. *Agronomy Journal*, 1987, 79(1): 172-176
- [52] Mastrodomenico A T, Purcell L C. Soybean nitrogen fixation and nitrogen remobilization during reproductive development [J]. *Crop Science*, 2012, 52(3): 1281-1289
- [53] 关大伟, 李力, 岳现录, 马鸣超, 张武, 李俊. 我国大豆的生物固氮潜力研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6): 1497-1504
Guan D W, Li L, Yue X L, Ma M C, Zhang W, Li J. Study on potential of biological nitrogen fixation of soybean in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(6): 1497-1504 (in Chinese)
- [54] Collino D J, Salvagiotti F, Peticari A, Piccinetti C, Ovando G, Urquiaga S, Racca R W. Biological nitrogen fixation in soybean in Argentina: Relationships with crop, soil, and meteorological factors[J]. *Plant and Soil*, 2015, 392(1): 239-252
- [55] 龚振平, 金喜军, 马春梅, 张磊. 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, Zhang L. Study on the absorption and utilization of various source nitrogen by spring [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(5): 1138-1141 (in Chinese)

response to application of mineral nitrogen and bradyrhizobia on Nitisols of Teppi, Southwest Ethiopia [J/OL]. *Heliyon*, (2024-04-30). DOI: doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30540

[56] Amante G, Wedajo M, Temteme S. Soybean (*Glycine max* (L.) Merr)

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 胥雅馨, 新疆农业大学农学院作物栽培学与耕作学博士研究生。曾参与国家自然科学基金项目(32160520)、新疆维吾尔自治区重大科技专项(2022A02008)。2022—2023年, 连续2年获得新疆农业大学研究生二等学业奖学金。



通讯作者简介: 章建新, 博士, 新疆农业大学农学院教授, 博士生导师, 主要从事大豆高产高效栽培生理方面的研究。主讲作物栽培学、科技论文写作、高级作物生理学、作物高产理论等课程。曾任新疆维吾尔自治区农学会理事。主持国家自然科学基金项目6项, 新疆维吾尔自治区项目5项。获批大豆原原种扩繁基地建设项目。在核心期刊上发表研究论文50余篇。培养硕士研究生30余人, 博士研究生5人。出版专著1部, 参编教材3部。育成菜用大豆品种‘新鲜豆1号’和‘新鲜豆2号’, 中早熟大豆品种‘新大豆27号’。曾获新疆维吾尔自治区科技进步一等奖(第八)。