文章编号:1000-7601(2025)06-0120-09 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2025.06.12

土壤灭菌与施氮组合对大豆根系生长、氮素积累及产量的影响

郜全同[1],胥雅馨[1],薛丽华[2],王 聪[1],章建新[1]

(1.新疆农业大学农学院农学院,新疆 乌鲁木齐 830052; 2.新疆农业科学院粮食作物研究所,新疆 乌鲁木齐 830091)

摘 要:为明确大豆共生固氮与大豆产量和品质形成的关系及氮肥的调控效应,于 2023—2024 年以‘东农豆 252’为材料,采用裂区盆栽试验,主区设土壤灭菌(NOR)、对照(R)处理;副区设施氮量:0 g·盆$^{-1}$(N0)、1.04 g·盆$^{-1}$(N1)、2.07 g·盆$^{-1}$(N2)、3.15 g·盆$^{-1}$(N3),系统研究了土壤灭菌与施氮量组合对大豆根系干物质积累量、侧根长及表面积、根瘤数、植株氮素积累、籽粒产量及蛋白含量的影响。结果表明:NOR 处理满粒期 N0、N1、N2、N3 总根干物质量、侧根长及表面积分别较 R 处理降低 8.93%~17.82%、10.02%~20.90%、8.55%~25.58%。NOR 处理均不产生根瘤,NOR 较 R 处理 N2 的氮素积累降低 11.32%~29.67%;NOR 处理 N0、N1、N2、N3 的大豆产量较 R 处理降低 18.83%~24.00%,显著降低籽粒蛋白含量。增施氮肥不能补偿因土壤灭菌失去根瘤固氮能力导致氮素积累量、产量和籽粒蛋白质含量的损失。NOR 和 R 处理随施氮量的增加,根系干重、侧根长和表面积、氮素积累量、产量和氮肥农学利用效率均呈现先增后降的变化趋势,均以 N2 较高。R 处理 N2 氮素积累量中土壤氮、肥料氮、共生固氮分别占 11.58%~21.44%、30.44%~33.82%、48.10%~54.60%。共生固氮促进大豆根系生长,对产量和品质形成的重要作用是氮肥所不能替代的。大豆高产优质高效需要充分发挥共生固氮潜力。

关键词:大豆;共生固氮;氮肥调控;氮积累量;产量;品质

中图分类号:S565.1 **文献标志码**:A

Effects of soil sterilization and nitrogen application on root growth, nitrogen accumulation, and yield of soybean

GAO Quantong[1], XU Yaxin[1], XUE Lihua[2], WANG Cong[1], ZHANG Jianxin[1]

(1. *College of Agriculture*, *Xinjiang Agricultural University*, *Urumqi*, *Xinjiang* 830052, *China*;
2. *Institute of Cereal Crops*, *Xinjiang Academy of Agricultural Sciences*, *Urumqi*, *Xinjiang* 830091, *China*)

Abstract: To clarify the relationship between symbiotic nitrogen fixation in soybeans and their yield and quality formation, as well as the regulatory effect of nitrogen fertilizer, a split-plot pot experiment was conducted from 2023 to 2024 using ‘Dongnongdou 252’ as the material. The main plots were soil sterilization (NOR) and control (R) treatments, while the subplots were nitrogen application rates of 0 g·pot^{-1}(N0), 1.04 g·pot^{-1}(N1), 2.07 g·pot^{-1}(N2), and 3.15 g·pot^{-1}(N3). The experiment systematically investigated the effects of the combinations of soil sterilization and nitrogen application rates on the dry matter accumulation of soybean roots, the length and surface area of lateral roots, the number of nodules, the nitrogen accumulation of plants, grain yield, and protein content. The results showed that in the NOR treatment at the full seed stage, the total dry matter of roots, the length and surface area of lateral roots in N0, N1, N2, and N3 were reduced by 8.93% to 17.82%, 10.02% to 20.90%, and 8.55% to 25.58%, respectively, compared with the R treatment. No nodules were formed in the NOR treatment, and the nitrogen accumulation in the NOR treatment at N2 was reduced by 11.32% to 29.67% compared with the R treatment. The yields of the NOR treatment at N0, N1, N2, and N3 were reduced by 18.83% to 24.00% compared with the R treatment, and the protein content of the grains was significantly reduced.

收稿日期:2025-01-22 **修回日期**:2025-05-19

基金项目:国家自然科学基金项目(32160520);新疆维吾尔自治区重大专项计划项目(2022A02008-2)

作者简介:郜全同(2000-),男,甘肃定西人,硕士研究生,研究方向为作物高产栽培。E-mail:2944315384@qq.com。

通信作者:章建新(1962-),男,四川三台人,教授,主要从事作物高产栽培研究。E-mail:zjxin401@126.com

Increasing nitrogen fertilizer application could not compensate for the loss of nitrogen accumulation, yield, and protein content in grains caused by the loss of symbiotic nitrogen fixation capacity due to soil sterilization. With the increase in nitrogen application rates in both NOR and R treatments, the dry weight of roots, the length and surface area of lateral roots, nitrogen accumulation, yield, and nitrogen fertilizer agronomic efficiency all showed a trend of increasing first and then decreasing, with the highest values at N2. In the R treatment at N2, soil nitrogen, fertilizer nitrogen, and symbiotic nitrogen fixation accounted for 1.58% to 21.44%, 30.44% to 33.82%, and 48.10% to 54.60% of the nitrogen accumulation, respectively. It can be seen that symbiotic nitrogen fixation promotes the growth of soybean roots and plays an important role in yield and quality formation that cannot be replaced by nitrogen fertilizer. To achieve high yield, quality, and efficiency in soybeans, it is necessary to fully utilize the potential of symbiotic nitrogen fixation.

Keywords: soybean; symbiotic nitrogen fixation; nitrogen fertilizer regulation; nitrogen accumulation; yield; quality

大豆生长的氮素来源于土壤氮、肥料氮、共生固氮[1]。随着大豆产量的不断提高,典型高产田氮肥用量大幅度增加[2],氮肥农学利用效率剧降。共生固氮在大豆高产形成中的作用及其与土壤氮和肥料氮的关系尚不清楚。前人研究认为,仅依靠土壤氮和共生固氮无法满足高产大豆对氮素的需求,必需适时补充适量的肥料氮[3]。施入肥料氮将会影响根瘤的形成及固氮酶活性,影响根瘤固氮量,最终影响大豆产量[4]。陈茜等[5]研究表明在大豆间作系统中减少氮肥施用量可以增加氮素通过菌根途径的转移,提高氮素利用率。共生固氮是大豆氮素重要来源之一,与产量形成密切相关[6]。大豆共生固氮量约占其氮素总量的 50%~60%,随着大豆生育进程的后移,土壤氮和肥料氮所占比例逐渐降低,而根瘤固氮所占比例逐渐上升[7]。大豆共生固氮量在开花前很少,花荚期增加,鼓粒期达到峰值[8],成为氮素的主要来源。根系生长状况影响植物地上部分生长发育和产量的形成[9]。大豆根系生长健壮与否直接影响到根瘤形成状况和共生固氮量。大豆根瘤固定空气中的氮素供自身生长[10-11]。李淑贞等[11]研究表明,根瘤固氮作用可以丰富土壤的氮素循环,进而促进根系生长。Leffel 等[12]认为根瘤固氮量越多,大豆的氮素积累也会越多,从而向籽粒中转运的氮增加,最终影响作物的产量和品质。乔云发等[13]研究表明,随着施氮量的增加大豆根系生长呈现出先增加后降低趋势。施氮肥在促进大豆生长和提高产量的同时会抑制共生固氮[14]。邸伟等[15]指出在不同施氮量下大豆氮素积累量呈现先增加后下降的趋势。胥雅馨等[16]通过田间膜下滴灌试验表明,始荚期施适量氮肥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。Herridge 等[17]研究表明,无论根瘤菌的基因型或菌株如何,通过组织提取物中酰脲相对丰度可以评估大豆固氮作用。Pitumpe-Arachchige 等[18]通过校准方程发现酰脲的相对丰度和共生固氮百分比接近统一,酰脲相对丰度可以用来评估大豆植株对共生固氮百分比依赖程度,进而估算出大豆共生固氮量。

以往大豆氮肥试验大多有共生固氮,对根系生长、产量和品质的影响结果是两者的综合效应,未能说明共生固氮对大豆产量和品质形成的独立效应。有关根瘤固氮对大豆根系生长、植株氮素积累及产量的影响缺乏系统研究。本文采用土壤灭菌(去除共生固氮)与施氮量组合处理盆栽试验,系统研究根瘤固氮与大豆根系生长、氮素积累及产量形成的关系,探索大豆共生固氮对大豆产量和品质形成的作用机制。

1　材料与方法

1.1　试验土壤概况

试验于 2023—2024 年 4—10 月在新疆农业大学陆港校区三坪实践基地进行盆栽试验。试验所用土壤采集于试验田 0~20cm 耕层土壤。2023 年 0~20 cm 土层有机质含量为 15.6 g·kg^{-1},碱解氮含量为 48.7 mg·kg^{-1},速效磷 15.1 mg·kg^{-1},速效钾 211.8 mg·kg^{-1},pH 为 8.29。2024 年 0~20 cm 土层有机质含量为 14 900 mg·kg^{-1},碱解氮含量为 51.4 mg·kg^{-1},速效磷 17.5 mg·kg^{-1},速效钾 203.2 mg·kg^{-1},pH 为 8.21。

1.2　试验设计

裂区试验设计的主区为土壤灭菌(NOR)、不灭菌(R)处理;副区为施尿素量处理:0 g·盆$^{-1}$(N0)、1.04 g·盆$^{-1}$(N1)、2.07 g·盆$^{-1}$(N2)、3.15 g·盆$^{-1}$

(N3)。共8个处理,每个处理36盆。氮肥(尿素,含氮46%)在大豆始花期(R1)随灌溉水施入。土壤灭菌方法:将上述过筛后土壤采用甲醛溶液(40%)进行灭菌处理。将按甲醛溶液与土壤重量按1∶50比例混合,将甲醛溶液均匀喷洒在土壤表面,边喷洒边搅拌。然后用篷布包裹密封一周后拆除篷布通风,将灭菌土壤摊开。将灭菌土壤和未灭菌土壤分别装入试验盆(直径27 cm,高31 cm)中,各装144盆。每盆装土15 kg。将装好土壤的试验盆埋入土中,盆口与地面持平。供试大豆品种为'东农豆252'。2023年和2024年均在4月25日播种。二复叶期定苗,每盆留苗2株。在大豆生长期间,各盆栽处理土壤含水量保持在田间持水量80%左右。

1.3 项目测定与方法

1.3.1 *大豆根系干重、根长及根瘤干重的测定* 分别在大豆盛花期(R2期)、盛荚期(R4期)、满粒期(R6期)、成熟期(R8期)取样,每处理选取6盆12株(每2盆4株为1重复)长势具有代表性大豆植株,从地上部分自子叶节处剪断,将盆从土坑中挖出捡取所有根系并去除杂质,带回室内用自来水冲洗(放置一个筛子,防止根系及根瘤被冲走)根系和根瘤上的泥土,之后再用蒸馏水将根系洗净,用滤纸擦干备用。

将已清洗干净的摘除根瘤的侧根试样置于30 cm × 40 cm的树脂玻璃箱中,添加适量水(浸没根样),用镊子把侧根散开,采集扫描图像,通过数字软件WinRHIZ0-2004a分析侧根长、侧根表面积等参数。用水洗净根瘤泥土,统计根瘤数量,放置在80°C下烘干称重。

1.3.2 *植株氮素积累量及相关指标的测定* 将在R2期、R4期、R6期、R8期取的干物质茎、叶、柄、荚等器官粉碎带回室内,然后用$H_2SO_4-H_2O_2$进行消煮,采用奈氏比色法进行氮素测定。相关指标计算公式如下:

主要生育时期各器官氮素积累量=氮素含量×干物质质量

土壤氮积累量=NOR+N0处理氮素积累量

用比色分析法[20]测定出大豆植株茎秆酰脲含量,然后采用水杨酸法[21]测定出大豆植株中硝酸盐含量。进而计算出酰脲相对丰度(*RAU*)。

$$RAU(\%)=4a/(4a+b) \quad (1)$$

酰脲的相对丰度*RAU*(%)为茎秆提取物中酰脲含量与大部分N溶质的比值。式中,a和b分别代表酰脲和硝酸盐的摩尔浓度。

利用Pitumpe-Arachchige等[18]开发的两种校准模型(为茎秆酰脲含量),用于估算营养/开花阶段(式2)和荚果形成/种子填充阶段(式3、4)的共生固氮百分比(*Ndfa*(%))。

$$Ndfa(\%)=-0.0074RAU^2+1.68RAU+4.36 \quad (2)$$

$$Ndfa(\%)=-0.055RAU^2+1.76RAU-17.87 \quad (RUA\leqslant 95.5) \quad (3)$$

$$Ndfa(\%)=-0.055\times 95.5^2+1.76\times 95.5-17.87 \quad (RUA>95.5) \quad (4)$$

共生固氮量=植株总氮素积累量×*Ndfa*(%)[19-20]

肥料氮积累量=氮素总积累量-(共生固氮量+土壤氮)

共生/土壤/氮肥氮素分配比例=(共生/土壤/氮肥氮素积累量÷氮素总积累量)×100%

氮肥农学利用效率=(施氮区籽粒产量-不施氮区籽粒产量)/施氮量

1.3.3 *蛋白质含量的测定* 采用国际常用方法,基于总氮含量推算蛋白质含量。用$H_2SO_4-H_2O_2$进行消煮,采用奈氏比色法进行氮素测定,计算出大豆总氮含量,然后再乘以蛋白质换算系数6.25,最终计算出籽粒蛋白质含量。

1.3.4 *产量和产量构成因素的测定* 成熟期各处理选取具有代表性15盆30株(每5盆10株为一次重复),统计植株单株荚数、单株粒数,测定百粒重,人工脱粒后晾干,称重,计算每盆产量。

1.4 数据处理分析

用Excel 2013进行数据处理,用SPSS 19.0及DPS 9.01统计软件进行方差分析和显著性检验。

2 结果与分析

2.1 土壤灭菌及施氮量组合处理对大豆根系干物质量和侧根长的影响

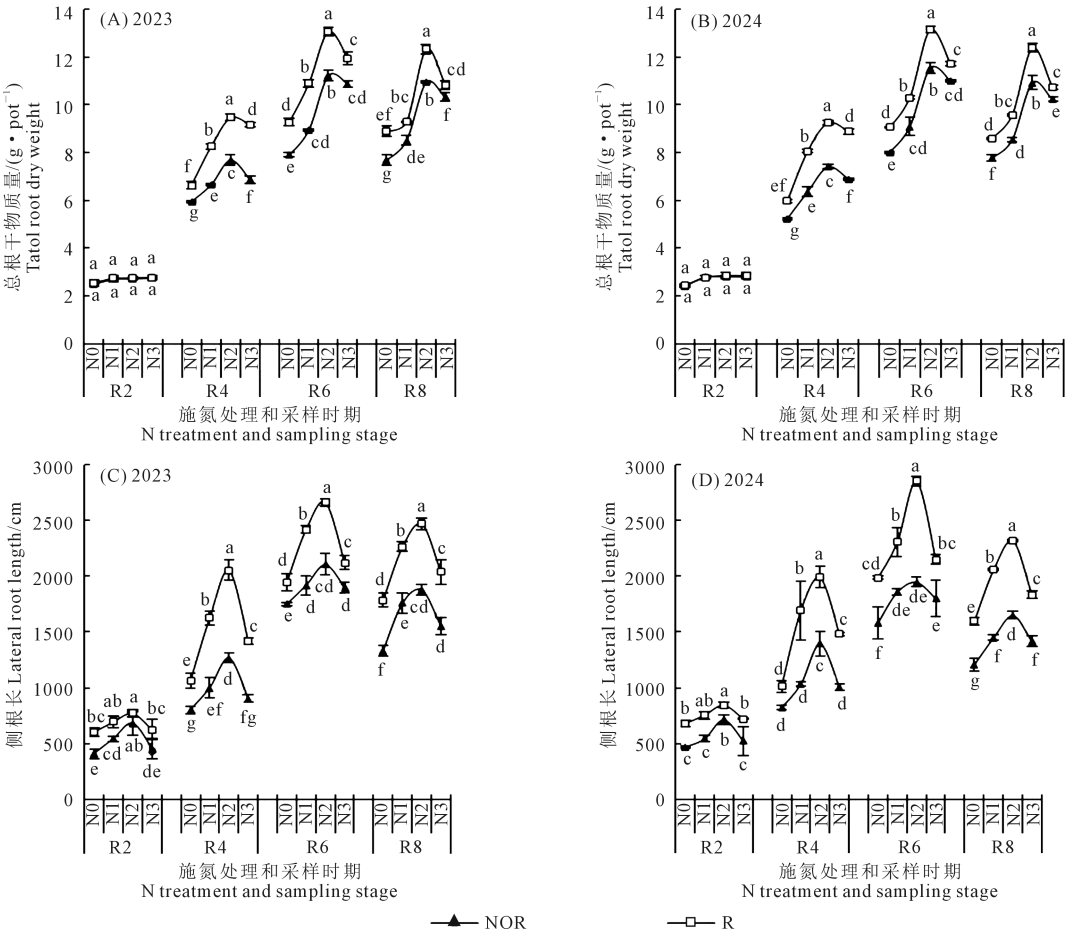
由图1A、B可知,2023—2024年各处理间根系干物质量的差异均达显著水平,R4~R8期均表现为NOR<R。2023年在R6期NOR处理N0、N1、N2、N3总根干物质量分别较R处理降低14.64%、17.82%、14.03%、8.93%;NOR和R处理根系干物质量均随施氮量的增加而增加,在N2达峰值后,继续增加施氮量干物质量开始下降,NOR和R处理R6期N2根系干物质量分别较N0增加42.00%和41.00%。R处理R6期N2根系干物质量较NOR处理N0增加65.1%。2024年结果与2023年一致。土壤灭菌抑制大豆根系干物质量,施氮肥促进根系干物质量,施氮肥不能消除土壤灭菌后对大豆根系干物质量的抑制作用。土壤不灭菌和施氮肥对大豆根系干

物质量健壮生长有协同促进作用。

由图 1C、D 可知,2023—2024 年各处理间侧根长的差异达显著水平,R4~R8 期均表现为 NOR<R。2023 年在 R6 期 NOR 处理 N0、N1、N2、N3 侧根长分别较 R 处理降低 10.02%、20.63%、20.90%、10.48%;NOR 和 R 处理侧根长均随施氮量的增加而增加,在 N2 达峰值后,继续增加施氮量侧根长开始下降,NOR 和 R 处理 R6 期 N2 侧根长分别较 N0 增加 20.19%和 36.72%。R 处理 R6 期 N2 侧根长较 NOR 处理 N0 增加 51.96%。2024 年结果与 2023 年一致。未灭菌土壤施氮肥对根系生长的促进作用显著大于土壤不灭菌不施氮肥处理和灭菌土壤施氮肥处理。土壤灭菌抑制大豆根系生长,施氮肥促进根系生长,施氮肥不能消除土壤灭菌后对大豆根系生长的抑制作用。土壤不灭菌和施氮肥对大豆根系健壮生长有协同促进作用。

2.2　土壤灭菌及施氮量组合处理对大豆侧根表面积的影响

由图 2A、B 可知,2023—2024 年各处理间根系侧根表面积的差异达显著水平,R4~R8 期均表现为 NOR<R。2023 年在 R6 期 NOR 处理 N0、N1、N2、N3 侧根表面积分别较 R 处理降低 7.88%、14.81%、20.37%、7.37%;NOR 和 R 处理侧根表面积均随施氮量的增加而增加,在 N2 达峰值后,继续增加施氮量开始下降,NOR 和 R 处理 R6 期 N2 侧根表面积分别较 N0 增加 30.26%和 50.70%。R 处理 R6 期 N2



注:R2:盛花期;R4:盛荚期;R6:满粒期;R8:完熟期;区组间比较为:在同一生育时期土壤灭菌及土壤不灭菌在不同施氮量下进行比较。相同类型同组数据小写字母表示处理间差异在 5%水平显著。下同。

Note: R2: Full flowering stage; R4: Full pod stage; R6: Full seed stage; R8: Complete maturity stage. The comparisons between blocks were made as follows: comparisons were conducted under different nitrogen application rates when the soil was sterilized and when it was not sterilized at the same growth stage. For data of the same type within the same group, lowercase letters indicate significant differences among treatments at the 5% level. The same below.

图 1　土壤灭菌及施氮量组合处理对大豆总根干物质重和侧根长的影响

Fig.1　Effects of soil sterilization and nitrogen application rate combinations on the total dry matter weight of soybean roots and the length of lateral roots

侧根表面积较 NOR 处理 N0 增加 63.59%。2024 年结果与 2023 年一致。未灭菌土壤施氮肥对根系表面积增加的促进作用显著大于土壤不灭菌不施氮肥处理和灭菌土壤施氮肥处理。土壤灭菌降低侧根表面积,施氮肥增加侧根表面积,却不能消除土壤灭菌后对侧根表面积的降低作用。土壤不灭菌和施氮肥对侧根表面积增加有协同促进作用。

2.3 土壤灭菌及施氮量组合处理对大豆根瘤数量和干重的影响

由图 3A、B 可知,2023—2024 年各处理间根瘤数量的差异均达显著水平,R2~R8 期 NOR 处理均不产生根瘤。2023 年在 R6 期 R 处理 N1、N2、N3 根瘤数量较 N0 分别降低 23.53%、49.64%、63.49%;R 处理根瘤数量随施氮量的增加而降低,表现为 N0>N1>N2>N3,R 处理 R6 期 N2 根瘤数量分别较 N0 降低 98.57%。2024 年结果与 2023 年一致。土壤灭菌处理完全抑制大豆根瘤形成,土壤未灭菌处理根瘤数量随着施氮量的增加呈下降趋势。由图 4A、B 可知,2023—2024 年各处理间根瘤干重差异达显著水平,2023 年在 R6 期 R 处理 N1、N2、N3 根瘤干重较 N0 分别降低 34.65%、51.11%、76.73%。2024 年结果与 2023 年一致。土壤灭菌处理完全抑制大豆根瘤形成,土壤未灭菌随着施氮量的增加对根瘤生长的抑制作用逐渐加重。

2.4 土壤灭菌及施氮量组合处理对大豆氮素积累量及比例的影响

由表 1 可知,2023—2024 年各处理间氮素积累量的差异均达显著水平,表现为 NOR<R。2023 年 NOR 处理 N0、N1、N2、N3 氮素积累量分别较 R 处理降低 58.35%、8.94%、11.32%、11.14%;NOR 和 R 处理氮素积累量均随施氮量的增加而增加,在 N2 达峰值后,继续增加施氮量后氮素积累量开始下降,NOR 和 R 处理 N2 氮素积累量分别较 N0 增加 313.69%和 94.30%。R 处理 N2 氮素积累量较 NOR 处理 N0 增加 366.50%。土壤灭菌处理降低大豆氮素积累量,未灭菌土壤施氮肥对大豆氮素积累增加效应显著大于土壤不灭菌不施氮肥处理和灭菌土壤施氮肥处理。

由表 1 可知,2023—2024 年 NOR 各处理根瘤固氮量均降为 0,其 N1、N2、N3 肥料氮分别较 R 处理增加 66.71%、121.19%、54.06%。土壤灭菌条件下随着施氮量的增加,肥料氮吸收量先增后降。R 处

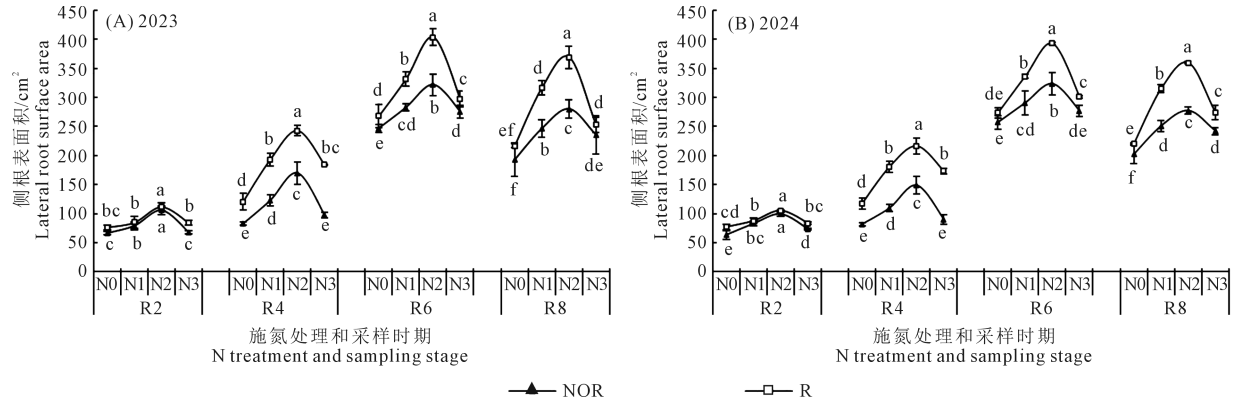


图 2 土壤灭菌及施氮量组合处理对大豆侧根表面积的影响

Fig.2 Effects of soil sterilization and nitrogen application rate combinations on the surface area of lateral roots of soybeans

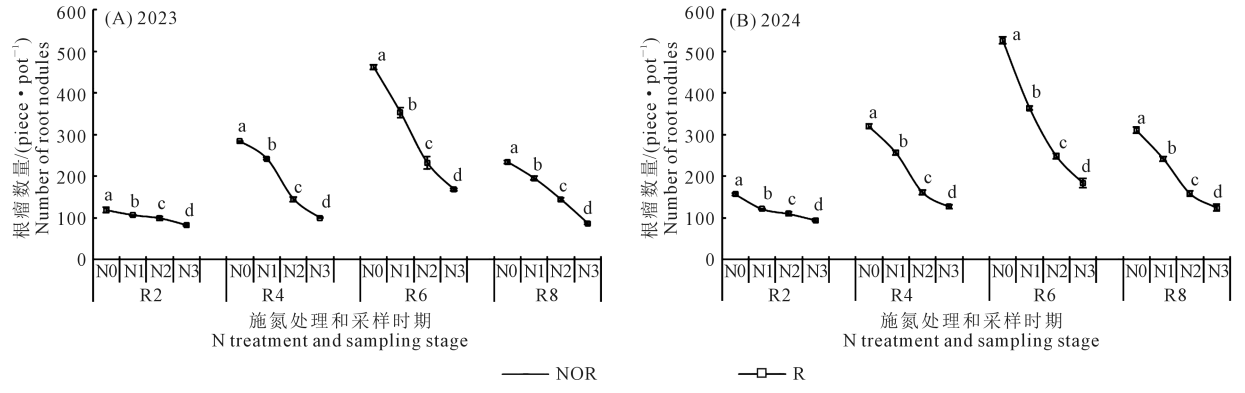


图 3 土壤灭菌及施氮量组合处理对大豆根瘤数量的影响

Fig.3 Effects of soil sterilization and nitrogen application rates on the number of soybean root nodules

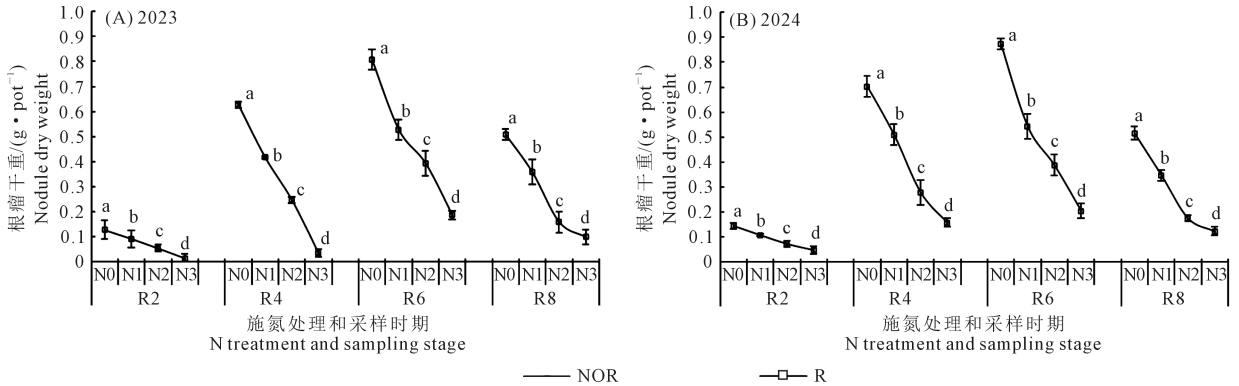


图 4　土壤灭菌及施氮量组合处理对大豆根瘤干重的影响

Fig.4　Effects of soil sterilization and nitrogen application rates on the dry weight of soybean nodules

表 1　土壤灭菌及施氮量组合处理对大豆氮素积累量及比例的影响

Table 1　Effects of combined treatments of soil sterilization and nitrogen application rates on the accumulation amount and proportion of nitrogen in soybeans

年份 Year	处理 Treatment	施氮量 Nitrogen amount	氮素 Nitrogen/(mg·盆⁻¹) 土壤氮 Soil nitrogen	肥料氮 Fertilizer nitrogen	共生固氮 Symbiotic nitrogen fixation	氮素积累总量 Total nitrogen accumulation	氮素比例 Nitrogen ratio/% 土壤氮 Soil nitrogen	肥料氮 Fertilizer nitrogen	共生固氮 Symbiotic nitrogen fixation
2023	NOR	N0	122.82			122.82g	100.00		
	R		122.82		172.06b	294.88f	41.65		58.35
	NOR	N1	122.82	304.92c		427.74e	28.72	71.28	
	R		122.82	182.90e	164.04b	469.76c	26.15	38.93	34.92
	NOR	N2	122.82	385.28a		508.10b	24.17	75.83	
	R		122.82	194.18f	255.96a	572.96a	21.44	30.40	48.16
	NOR	N3	122.82	326.60b		449.42d	27.33	72.67	
	R		122.82	212.00d	170.94b	505.76b	24.28	41.92	33.80
2024	NOR	N0	157.00			157.00h	100.00		
	R		157.00		340.42c	497.42g	31.56		68.44
	NOR	N1	157.00	498.66d		655.66f	23.95	76.05	
	R		157.00	406.36f	360.36b	923.72d	17.00	43.99	39.01
	NOR	N2	157.00	796.70a		953.70c	16.46	83.54	
	R		157.00	458.60e	740.38a	1355.98a	11.58	33.82	54.60
	NOR	N3	157.00	602.56b		759.56e	20.67	79.33	
	R		157.00	593.06bc	340.08c	1090.14b	14.40	54.40	31.20
P	年份 Year(Y)			**		*			
	土壤灭菌 Soil sterilization(T)			*		**			
	施氮量 Nitrogen(N)			**		**			
	Y×T			ns		**			
	Y×N			**		*			
	T×N			*		**			
	Y×T×N			**		**			

注:* 和 ** 分别表示差异显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$),ns 表示差异不显著。下同。

Note: * and ** represents significantly differences at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively. ns represents no significant differences. The same below.

理 N2 时氮素积累量较高,为 572.96 mg·盆$^{-1}$,土壤氮、肥料氮、根瘤氮所占的百分比依次为 21.44%、30.40%、48.16%。2024 年变化趋势的结果与 2023 年一致。2024 年各处理的氮素积累量显著高于 2023 年。土壤灭菌将大豆根瘤固氮量降为 0,施氮肥虽然大幅度增加肥料氮的吸收量,但仍不能补偿因土壤灭菌导致的根瘤固氮量的损失。在一定土壤供氮条件下,通过增施适量氮肥增加根瘤固氮量是增加大豆氮素积累量不可或缺的。

2.5　土壤灭菌及施氮量组合处理对大豆产量及结构和籽粒蛋白质含量的影响

由表 2 可知,2023—2024 年各处理间单株荚数、单株粒数、百粒重和产量的差异均达显著水平,均表现为 NOR<R。2023 年 NOR 处理 N0、N1、N2、

N3 产量分别较 R 处理降低 19.35%、17.10%、14.95%、15.85%,产量降低主要是单株粒数减少的结果;NOR 和 R 处理产量随施氮量的增加而增加,在 N2 达峰值后,继续增加施氮量产量开始下降,NOR 和 R 处理 N2 产量分别较 N0 增加 85.40%和 75.80%,R 处理 N2 产量较处理 N0 增加 118.00%,NOR 处理 N2 产量较 R 处理 N2 减少 14.14%。未灭菌土壤种植大豆施氮肥处理的产量显著高于土壤不灭菌不施氮肥处理和灭菌土壤施氮肥处理。

NOR 和 R 处理籽粒蛋白质含量均随施氮量的增加而增加,在 N2 达峰值后,继续增加施氮量籽粒蛋白质开始下降。NOR 各施氮处理的籽粒蛋白含量分别较同一施氮量 R 处理降低 4.12%、5.46%、7.95%、5.52%,NOR 和 R 处理 N2 籽粒蛋白含量分别较对应的 N0 增加 13.33%和 18.05%。NOR 处理较 R 处理籽粒蛋白质含量降低 7.95%。NOR 处理较 R 处理氮肥农学利用效率降低 9.03%~44.77%。未灭菌土壤种植大豆施氮肥处理的籽粒蛋白质含量和氮肥农学利用效率显著高于土壤不灭菌不施氮肥处理和灭菌土壤施氮肥处理。灭菌土壤处理的籽粒蛋白质含量均显著低于不灭菌处理。2024 结果各处理的变化趋势与 2023 年一致,NOR 处理 N2 产量较 R 处理 N2 减少 14.14%,籽粒蛋白质含量降低 7.95%~8.20%,氮肥农学利用效率降低 9.03%~44.77%。2024 年各处理的产量显著高于 2023 年。土壤灭菌处理降低大豆产量,增施氮肥不能补偿因土壤灭菌导致产量和籽粒蛋白含量的损失。根瘤固氮对大豆产量和品质形成的重要作用是氮肥所不能替代的。

3 讨 论

根瘤固氮对大豆植株生长和产量形成具有重要作用[21-22]。大豆高产需要适当的根系生物量和较强的固氮能力,为地上部分提供养分和形成粒重[23]。温世铭等[24]认为根瘤菌与豆科植物共生对根系发育的各个方面具有积极的调节作用,根瘤菌增加了根瘤数量,提高了固氮能力,从而使根系性状发生改变,根瘤固氮是影响大豆植株氮素积累的重要因素[25],共生固氮不能有效为植株提供氮素时,大豆植株不能健壮生长导致产量降低[26]。高阳等[27]施氮肥促进大豆根系生长进而增加产量。适量供应氮肥可促进大豆根系对氮素的吸收,促进根系茁壮生长,增加根冠比和提高产量[28]。Thorburn 等[28]通过田间试验优化外源氮供应来协调大豆共生固氮、氮肥和产量,以最大限度地发挥共生固氮潜力,建立高效的大豆共生固氮系统,并以资源效率实现高产。土壤灭菌及施氮量组合处理的盆栽试验结果表明,土壤灭菌后大豆植株无根瘤产生和

表 2 土壤灭菌及施氮量组合处理对大豆产量及结构和籽粒蛋白质含量的影响

Table 2 Effects of combinations of soil sterilization and nitrogen application rates on soybean yield, yield components, and seed protein content

年份 Year	处理 Treatment	施氮量 Nitrogen amount	单株荚数 Pod per plant	单株粒数 Seed per plant	百粒重 100-seed weight/g	产量 Yield/(g·盆$^{-1}$)	蛋白质含量 Protein content/%	氮肥农学利用效率 Agronomic efficiency of nitrogen fertilizer /(g·盆$^{-1}$)
2023	NOR	N0	14.88f	23.00e	21.74b	10.00g	31.88d	
	R		16.25e	27.63d	22.43b	12.40f	33.25cd	
	NOR	N1	17.25d	30.25c	23.25b	14.06e	33.56c	3.90c
	R		23.00b	34.75b	24.40ab	16.96c	35.50c	4.38a
	NOR	N2	21.13c	31.75c	24.46a	18.54b	36.13b	4.13b
	R		24.38a	41.75a	24.92a	21.80a	39.25a	4.54a
	NOR	N3	18.00d	31.13c	24.23ab	15.08d	34.19c	1.61d
	R		20.13c	36.25b	24.73a	17.92c	36.20b	1.75e
2024	NOR	N0	32.21f	79.80e	23.92b	31.46f	32.13d	
	R		35.83e	95.00d	24.77ab	33.10d	33.06d	
	NOR	N1	37.21e	81.60e	24.35ab	33.06e	33.88c	1.54e
	R		44.60bc	93.81d	24.89ab	36.54c	36.31b	3.31b
	NOR	N2	44.00c	102.80c	24.81ab	36.92c	37.41b	2.64c
	R		50.20a	123.63a	25.23a	43.00a	40.75a	4.78a
	NOR	N3	39.60d	94.80d	24.71ab	35.34c	34.44c	1.23f
	R		46.60b	108.41b	25.18a	40.08b	37.44b	2.22d
P	年份 Year(Y)		**	**	**	**	ns	**
	土壤灭菌 Soil sterilization(T)		**	**	**	**	**	ns
	施氮量 Nitrogen(N)		**	**	ns	**	**	**
	Y×T		ns	*	**	ns	ns	*
	Y×N		*	**	**	*	ns	**
	T×N		ns	ns	*	ns	**	**
	Y×T×N		ns	ns	*	ns	ns	**

共生固氮,根系生长受到严重抑制,表现为根系干重、侧根长和侧根表面积均较不灭菌处理显著下降,最终导致植株氮素积累量和产量也显著降低。可见灭菌土壤种植大豆根系生长受抑制、植株氮素积累量和产量下降与失去共生固氮能力有密切关系。特别是在施入氮肥之前,共生固氮显著地丰富了大豆氮素来源,促进了根系健壮生长,这与 Limpens 等[26]的研究结果一致。当然也不排除这是土壤灭菌的同时杀死了其它有益微生物的综合效应。邸伟等[15]利用沙培和^{15}N 标记的方法研究表明,共生固氮对大豆氮素积累量及产量增加显著大于肥料氮,高氮会抑制根瘤固氮量,降低根瘤氮比例。本试验在土壤灭菌下施氮量为 N2 时大豆氮素积累量高于沙培方法,这可能是由于盆栽土壤下养分更充分,这表明土壤氮在大豆共生固氮中发挥着不可忽视的作用。Lyu 等[30]表明施用适量氮肥可使大豆氮素含量增高,促进营养元素向大豆籽粒中转移,进而显著提高大豆籽粒产量。本研究表明,灭菌土壤和不灭菌土壤处理随着施氮量的增加,大豆根系干重、侧根长度、侧根表面积、氮素积累量、产量均表现为先增后降的变化趋势。在同一施氮量条件下,灭菌土壤处理根系生长状况、氮素积累量、籽粒产量和蛋白含量、氮肥农学利用效率均较不灭菌土壤显著下降。灭菌土壤处理植株大豆籽粒蛋白质含量下降是由于共生固氮主要在鼓粒期提供氮源,鼓粒期共生固氮量达到峰值时向籽粒中转运,可显著提高大豆产量和籽粒蛋白质含量[31],这与杜震宇等[32]的结果一致。共生固氮对提高大豆籽粒蛋白质含量也起重要作用。可见,增施氮肥不能补偿土壤灭菌导致的产量和蛋白含量的损失。氮肥不能替代共生固氮对大豆产量和品质形成中的重要作用。在本试验中,2023 年各处理的氮素积累量和产量明显低于 2024 年,这是由于 2023 年 7 月 15—18 日气温骤增,水分蒸发迅速而未及时浇水补充,植株因缺水生长受到抑制,未能达到应有的生长状态,最终导致 2023 年氮素积累量和产量均低于 2024 年,然而处理间两年变化趋势仍然一致。土壤氮、肥料氮、共生固氮在大豆不同生育时期各自发挥不同的作用,大豆高产优质高效需要它们协同发挥作用,肥料氮起着重要的调控作用。共生固氮在大豆产量品质形成中的重要作用有待进一步深入研究。

4　结　论

灭菌土壤种植大豆根系生长受到严重抑制,无根瘤,显著降低氮素积累量、产量和籽粒蛋白质含量。施氮肥促进大豆根系健壮生长、增加植株氮素积累量,提高产量和籽粒蛋白质含量,是由于大幅度增加肥料氮吸收量的同时,增加了共生固氮量和氮素积累量,最终提高产量和籽粒蛋白质含量。增施氮肥不能解除土壤灭菌对大豆根系生长的抑制作用,补偿氮素积累量及产量和品质的损失。共生固氮促进大豆根系生长,对氮素积累、产量和品质形成的作用是增施氮肥所不能替代的。

参 考 文 献:

[1] 夏玄, 龚振平. 氮素与豆科作物固氮关系研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2017, 48(1): 79-88.
XIA X, GONG Z P. Research advance on the relationship between nitrogen and leguminous nitrogen fixation [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2017, 48(1): 79-88.

[2] 曾凯, 战勇, 张恒斌, 等. 新疆春大豆膜下滴灌高产栽培技术[J]. 新疆农垦科技, 2023, 46(5): 16-17.
ZENG K, ZHAN Y, ZHANG H B, et al. High-yield cultivation technology of spring soybean under film drip irrigation in Xinjiang[J]. Xinjiang Farm Research of Science and Technology, 2023, 46(5): 16-17.

[3] 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.
NI L, ZHANG J X, JIN J W, et al. Effect of nitrogen on root system, dry matter accumulation and yield of high yield soybean[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2004, 27(2): 36-39.

[4] 丁娇, 韩晓增, 邹文秀, 等. 长期施肥对大豆生长状况及产量的影响[J]. 大豆科学, 2012, 31(5): 778-783.
DING J, HAN X Z, ZOU W X, et al. Effect of long-term fertilization on growth and yield of soybean [J]. Soybean Science, 2012, 31(5): 778-783.

[5] 陈茜, 郑彩霞, 闫敏, 等. 水氮耦合对间作大豆根系生长, 产量及水氮利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2025, 43(2): 161-172.
CHEN X, ZHENG C X, YAN M, et al. Effects of water and nitrogen coupling on root growth, yield and water and nitrogen use efficiency of intercropped soybeans [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2025, 43(2): 161-172.

[6] 邹狮, 严君, 高瑞敏, 等. 高油大豆结瘤固氮和籽粒产质量对氮肥的响应[J]. 中国油料作物学报, 2023, 45(4): 836-844.
ZOU S, YAN J, GAO R,et al. Responses of nitrogen fixation nodulation and grain yield quality of high-oil soybeans to nitrogen fertilizer application[J]. Chinese Journal of Oil Crops, 2023, 45(4): 836-844.

[6] 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.

[7] 张宗祥, 王军, 赵强, 等. 不同类型土壤接种根瘤菌对大豆共生固氮和根际氮转化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(10): 1883-1897.
ZHANG Z X, WANG J, ZHAO Q, et al. Effects of rhizobial inoculation on soybean nodule N fixation and rhizospheric N transformation in different soil types[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2024, 30(10): 1883-1897.

[8] 高阳, 楚光红, 傅积海, 等. 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, et al. 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.

[9] UDVARDI M, POOLE P S. Transport and metabolism in legume-rhizobia symbioses[J]. Annual Review of Plant Biology, 2013, 64: 781-805.

[10] 董守坤, 龚振平, 祖伟. 氮素营养水平对大豆氮素积累及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 65-70.
DONG S K, GONG Z P, ZU W. Effects of nitrogen nutrition levels on N-accumulation and yields of soybean[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2010, 16(1): 65-70.

[11] 李淑贞, 丁希明. 大豆根瘤的固氮特性与氮肥肥效[J]. 黑龙江农业科学, 1979, (5): 36-39.
LI S Z, DING X M. Nitrogen fixation characteristics of soybean root nodules and nitrogen fertilizer efficiency[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 1979, (5): 36-39.

[12] LEFFEL R C, CREGAN P B, BOLGIANO A P, et al. Nitrogen metabolism of normal and high-seed-protein soybean[J]. Crop Science, 1992, 32(3): 747-750.

[13] 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.
QIAO Y F, MIAO S J, HAN X Z. Effects of nitrogen forms on the root morphology and proton extrusion in soybean[J]. Soybean Science, 2006, 25(3): 265-269.

[14] 马春梅, 王晶, 夏玄, 等. 基于^{15}N示踪法的双根大豆系统氮素吸收和分配特性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(11): 1909-1919.
MA C M, WANG J, XIA X, et al. Study on absorption and distribution characteristics of nitrogen in soybeans with dual root systems based on^{15}N tracing technique[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2019, 25(11): 1909-1919.

[15] 邸伟, 金喜军, 马春梅, 等. 施氮水平对大豆氮素积累与产量影响的研究[J]. 核农学报, 2010, 24(3): 612-617.
DI W, JIN X J, MA C M, et al. Effects or nitrogen applocation on yield and nitrogen accumulation in soybean[J]. Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 2010, 24(3): 612-617.

[16] 胥雅馨, 郜全同, 薛丽华, 等. 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 Y X, GAO Q T, XUE L H, et al. 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.

[17] 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.

[18] PITUMPE ARACHCHIGE P S, ROSSO L H M, HANSEL F D, et al. Temporal biological nitrogen fixation pattern in soybean inoculated with *Bradyrhizobium*[J]. Agrosystems, Geosciences & Environment, 2020, 3(1): e20079.

[19] 董守坤, 马春梅, 李姚, 等. 大豆植株中酰脲含量变化动态研究[J]. 东北农业大学学报, 2005, 36(5): 549-552.
DONG S K, MA C M, LI Y, et al. Study on the change of ureides content in soybean plant[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2005, 36(5): 549-552.

[20] 谢红伟. 水杨酸比色法测定水中硝酸盐氮的含量[J]. 贵州农业科学, 1999, 27(3): 40-41.
XIE H W. Determination of nitrogen content in nitrate by salicylic acid colorimetry in water[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 1999, 27(3): 40-41.

[21] 陈晓辉, 徐开未, 唐义琴, 等. 麦/玉/豆周年套作体系氮素积累分配及转运[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1127-1138.
CHEN X H, XU K W, TANG Y Q, et al. Nitrogen accumulation, allocation and translocation in wheat/maize/soybean relay intercropping system[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2014, 20(5): 1127-1138.

[22] 关大伟, 李力, 岳现录, 等. 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, et al. Study on potential of biological nitrogen fixation of soybean in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2014, 20(6): 1497-1504.

[23] 姜妍, 王清泉, 李远明, 等. 施氮水平对7S亚基缺失大豆根系形态和结瘤固氮的影响[J]. 大豆科学, 2017, 36(2): 267-273.
JIANG Y, WANG Q Q, LI Y M, et al. Effect of different nitrogen application levels on the root morphology, nodulation and nitrogen fixation in 7S subunit lacked soybean[J]. Soybean Science, 2017, 36(2): 267-273.

[24] 温世铭. 根瘤菌内源 H_2S 调控大豆宿主根系性状及响应铁缺乏适应性的微生物学机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
WEN S M. Endogenous H_2S regulation of soybean host root traits and microbial mechanism of adaptation to iron deficiency response in rhizobia[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2023.

[25] ZHANG Y Y, ZHAO F Y, SUN Z X, et al. Effects of maize/peanut intercropping on yield and nitrogen uptake and utilization under different nitrogen application rates[J]. Agriculture, 2024, 14(6): 893-894.

[26] LIMPENS E, MIRABELLA R, FEDOROVA E, et al. Formation of organelle-like N2-fixing symbiosomes in legume root nodules is controlled by DMI2[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2005, 102(29): 10375-10380.

[27] 高阳, 章建新, 楚光红, 等. 不同施氮量下春大豆根系生长与花荚形成的关系[J]. 吉林农业大学学报, 2018, 40(3): 258-263.
GAO Y, ZHANG J X, CHU G H, et al. Relationship between spring soybean root growth and flower pod formation under different nitrogen application rates[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2018, 40(3): 258-263.

[28] THORBURN P J, BIGGS J S, PUNTEL L A, et al. The nitrogen fertilizer conundrum: why is yield a poor determinant of crops´ nitrogen fertilizer requirements? [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2024, 44(7): 593-595.

[29] 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.

[30] LYU X C, LI M, LI X, et al. Assessing the systematic effects of the concentration of nitrogen supplied to dual-root systems of soybean plants on nodulation and nitrogen fixation[J]. Agronomy, 2020, 10(6): 763.

[31] 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): 443-448.
LUO X Y, DONG Y M, LIU Z Y, et al. Nitrogen accumulation, distribution and yield of soybean as affected bystarter-N plus topdressed N[J]. Soybean Science, 2012, 31(3): 443-448.

[32] 杜震宇, 童淑媛, 徐文东, 等. 氮肥减施对高蛋白大豆产量与品质的影响[J]. 农业科技通讯, 2023, (8): 103-105.
DU Z Y, TONG S Y, XU W D, et al. Effects of reduced application of nitrogen fertilizer on yield and quality of high-protein soybeans[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2023, (8): 103-105.