

减施氮肥和接种根瘤菌对大豆生理生长与氮素利用效率及产量的影响

向友珍^{1,2} 张威^{1,2} 唐子竣^{1,2} 付骏宇^{1,2} 李志军^{1,2} 张富仓^{1,2}

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 在干旱、半干旱地区农业生产中, 广泛采用接种根瘤菌、施用氮素等措施来促进大豆生长以提高产量, 然而少有研究讨论接种根瘤菌与施用氮素的交互作用对大豆生长和产量的影响规律。本研究通过为期2年的田间试验, 设置4个施氮水平 (N_0 : 0 kg/hm²; N_1 : 60 kg/hm²; N_2 : 120 kg/hm²; N_3 : 180 kg/hm²) 和2种接种水平, 即接种根瘤菌 (R) 和清水拌种。在大豆各生育期测量根瘤数、根瘤干质量、叶面积指数、干物质积累及根系特性等大豆生长指标和叶绿素含量、光合参数、荧光参数等生理指标, 同时还测定氮素吸收量等指标并计算氮素利用效率。结果表明, RN_2 处理下的大豆生长状况最佳, 2年平均最大根瘤数为241.47、最大根瘤干质量为1.30 g、最大根长密度为15.00 cm/cm³、最大叶面积指数为5.44 cm²/cm²、最大干物质积累量为17 530.51 kg/hm²、最大叶绿素含量为53.55、最大净光合速率为32.75 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、最大种子产量为4 659.4 kg/hm²。由此可见减少氮肥施用量 (N_2) 的同时接种根瘤菌 (R) 对于促进关中平原大豆的生理生长、提升对氮素的利用效率、提高大豆产量具有重要意义。本研究可为提高干旱半干旱地区大豆生产水平提供理论支持和实践经验。

关键词: 大豆; 施氮; 接种根瘤菌; 氮肥利用效率; 产量

中图分类号: S565.1; S127

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)03-0340-12

OSID:



Effects of Nitrogen Fertilizer Reduction and Rhizobia Inoculation on Physiological Growth, Nitrogen Use Efficiency and Yield of Soybean

XIANG Youzhen^{1,2} ZHANG Wei^{1,2} TANG Zijun^{1,2} FU Junyu^{1,2} LI Zhijun^{1,2} ZHANG Fucang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas,

Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In agricultural production within arid and semi-arid regions, common practices involve rhizobium bacteria inoculation and nitrogen application to promote soybean growth and increase seed yields. However, there has been limited research on the interaction between rhizobium inoculation and nitrogen application and their impact on soybean growth and yield. This two-year field experiment aimed to address this gap by investigating four nitrogen application levels (N_0 : 0 kg/hm², N_1 : 60 kg/hm², N_2 : 120 kg/hm², N_3 : 180 kg/hm²) and two inoculation levels: rhizobium inoculation (R) and water mixed with no inoculation (unmarked). Various parameters related to soybean growth, including nodule number, nodule dry weight, leaf area index (LAI), biomass accumulation and root characteristics, were measured at different growth stages. Additionally, physiological indicators such as chlorophyll content, photosynthetic parameters, fluorescence parameters and nitrogen uptake, along with nitrogen use efficiency calculations were assessed. The results demonstrated that soybean growth reached its optimum under the RN_2 treatment, with maximum nodule number of 241.47, maximum nodule dry weight of 1.30 g, maximum root length density of 15.00 cm/cm³, maximum LAI of 5.44 cm²/cm², maximum biomass accumulation of 17 530.51 kg/hm², maximum chlorophyll content of 53.55, maximum net photosynthesis rate of 32.75 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, and maximum seed yield of 4 659.4 kg/hm². In conclusion, reducing nitrogen fertilizer application (N_2) while concurrently inoculating with rhizobium (R) was

收稿日期: 2023-08-01 修回日期: 2023-09-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52179045) 和大学生创新性实验项目 (S202210712619)

作者简介: 向友珍 (1973—), 女, 副教授, 博士生导师, 主要从事遥感技术在农业水土工程中应用研究, E-mail: Youzhenxiang@nwsuaf.edu.cn

essential for enhancing the physiological growth of soybeans in the Guanzhong Plain, improving nitrogen use efficiency and increasing soybean yields. The research result can provide both theoretical underpinning and practical experience to elevate soybean production in arid and semi-arid regions.

Key words: soybean; nitrogen application; inoculation of rhizobium; nitrogen use efficiency; yield

0 引言

叶面积指数 (Leaf area index, LAI) 是指单位土地面积上植物叶片总面积占土地面积的倍数^[1], 光合速率 P_n 表示光合作用固定二氧化碳的速度, 实际光化学效率 Φ_{psII} 是指在实际光照条件下光合作用中光能转换为化学能的效率, 表示经光系统 II 的线性电子传递的量子效率, 可用于指代被光系统 II 利用的光化学能量与光系统 II 吸收的全部光能之比, 最大光化学效率 F_v/F_m 反映光系统 II 反应中心内原初光能的转化效率, 反映作物叶片潜在的最大光合能力, 比值越大说明原初光能转换的效率越高^[2], 以上指标是反映大豆生理生长的重要指标。大豆的生长离不开氮素, 除了共生固氮和土壤氮源外, 在大豆生育期施用氮肥可以增产增收。合理施用氮肥可以促进结瘤的形成, 提高大豆叶面积指数和干物质积累, 最终增加大豆产量, 然而当外源氮水平过高时氮肥会产生负面影响。过度施用氮肥会抑制结瘤的形成, 导致结瘤数量显著减少, 抑制大豆生长, 降低氮素利用效率, 从而降低大豆产量^[3]。目前氮肥不合理施用导致的氮素利用效率下降以及引发的环境问题已引起众多学者关注^[4]。

一些研究指出, 经根瘤菌制剂接种的种子可以显著促进大豆根瘤的形成并提高大豆的固氮效率, 从而促进大豆生长并提高种子产量^[5]。侯婷婷等^[6]的研究表明, 施用复合微生物菌剂并配合接种根瘤菌可以明显增加根瘤数, 促进大豆的生长发育与产量的提高; 魏启舜等^[7]通过研究发现, 合理减施氮肥并接种根瘤菌能够保证鲜食大豆生长发育并且增加产量, 即减施氮肥并接种根瘤菌的措施能够降低化肥的投入成本, 减轻当前农业生产中的能源压力 and 环境污染, 还可以达到鲜食大豆栽培的稳产增收; 胥雅馨等^[8]通过设置施氮水平与多种根瘤菌拌种的田间试验发现, 适当施氮可以促进根瘤形成, 而过量氮素会抑制根瘤菌与大豆的结瘤共生。接种高效匹配的根瘤菌剂可以促进大豆的结瘤共生, 同时增加大豆干物质积累, 使大豆产量提高。因此, 合理施用氮肥并有效接种根瘤菌对大豆的结瘤和生长至关重要。

接种根瘤菌与施氮对大豆生长和产量的独立影响已被广泛探索研究^[9-10], 然而目前对氮肥管理和

接种根瘤菌的互作效应对大豆生长、氮素利用和产量影响的研究较少。为明确施氮肥和接种根瘤菌能否显著影响大豆的生长和产量及其内在关系, 本文通过为期 2 年的田间试验, 分析各处理下大豆生长、氮素利用、种子产量及经济效益, 探究干旱半干旱地区接种根瘤菌及施氮量的最佳组合, 以期对干旱半干旱地区的大豆生产管理提供指导。

1 材料与方法

1.1 试验区概况与实验设计

2 年大豆试验于 2021 年和 2022 年在西北农林科技大学旱区节水农业研究院节水灌溉实验站 (34°14'N, 108°10'E, 海拔 521 m) 进行, 试验区概况如图 1 所示。该区属于半湿润易旱区, 多年平均降雨量为 561 mm。试验田中设有自动气象站, 记录了 2 年试验区的气象数据, 见图 2。2021 年 6—10 月的平均最高温度 T_{max} 和平均最低温度 T_{min} 分别为 30.3℃ 和 20.0℃, 2022 年对应温度分别为 31.3℃ 和 21.2℃。2021 年和 2022 年的季度降雨量分别为 433 mm 和 280 mm。

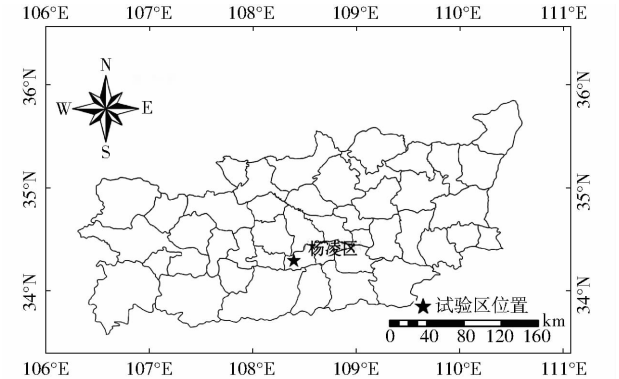


图 1 试验区地理位置

Fig. 1 Geographic location of study area

在试验地设置 24 个试验小区, 每个小区长 6 m, 宽 4 m。试验设置 4 个施氮水平 (参照当地常规施氮量 180 kg/hm²): 0 kg/hm² (N0)、60 kg/hm² (N1)、120 kg/hm² (N2)、180 kg/hm² (N3), 以及 2 种拌种处理: 接种根瘤菌 (R) 和清水拌种处理 (无标记), 如表 1 所示。试验采用完全随机设计, 并设置 3 个重复。为减少试验处理之间的影响, 在相邻小区之间设置宽 2 m 的隔离带。每个试验小区的磷肥和钾肥用量均为 30 kg/hm²。试验所用氮肥为尿素 (46% N), 磷肥为过磷酸钙 (16% P), 钾肥为氯化

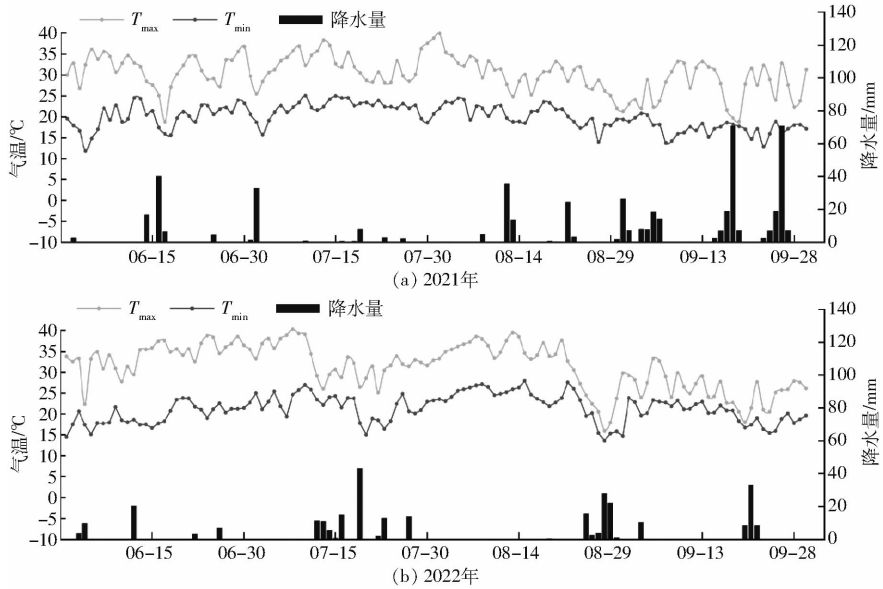


图 2 气象数据
Fig. 2 Meteorological data

表 1 试验设计
Tab.1 Experimental treatment

处理	播种前种子处理	施氮量/(kg·hm ⁻²)
N0	清水拌种	0
N1	清水拌种	60
N2	清水拌种	120
N3	清水拌种	180
RN0	接种根瘤菌	0
RN1	接种根瘤菌	60
RN2	接种根瘤菌	120
RN3	接种根瘤菌	180

钾(62% K)。

采用拌种法接种根瘤菌(符合国家行业标准 GB 20287—2006),拌种处理法为在 500 mL 水中加入 25 g 根瘤菌粉末并搅拌均匀,浸种前充分振荡以保证根瘤菌均匀附着在种子表面。拌种后将种子晾晒,晒干后的种子分别于 2021 年 6 月 18 日和 2022 年 6 月 10 日播种,种植密度为 3 × 10⁵ 株/hm²,行距为 50 cm,株距为 10 cm。大豆分别于 2021 年 9 月 30 日和 2022 年 9 月 20 日收获。

1.2 主要测定项目与方法

1.2.1 叶面积指数、地上部生物量、根瘤参数和根系参数测定

LAI 由 LAI-2000 型植物冠层分析仪测定,分别于大豆四节期(V4)、盛花期(R2)、盛荚期(R4)和鼓粒期(R6)采集样本。每个小区测量 6 次,取其平均值作为 LAI。测完 LAI 后,在每个小区中随机选择 6 株具有代表性的植株,采用传统坑挖法将大豆整个根系全部取出。将大豆的子叶节点剪下,用清水缓慢冲洗后晾干。去除每株根系中的所有根瘤

并统计数量,然后在 75℃ 下干燥至恒定质量,使用电子天平测得大豆根瘤质量,随后将大豆的地上部分在 75℃ 下干燥至恒定质量,使用电子天平测得大豆地上部生物量。

选取完熟期(R8)的根样本,收集方法参考文献[11]。使用EPSON Perfection V700 型扫描仪对根系进行扫描,并使用 WinRhizo Pro Vision 5.0 软件分析图像并获取根系形态参数。计算相应土层的根长密度(Root lenth density, RLD)、根表面积密度(Root surface area density, RSAD)和根体积密度(Root volume density, RVD)。扫描后,根样本干燥至恒定质量。之后计算根冠比,根冠比是指根干质量与地上生物量的比值。

1.2.2 光合参数、荧光参数和叶绿素含量测定

使用便携式光合作用系统(Li-6400 型)测量 V4、R2、R4 和 R6 期各小区最上部完全展开叶片的光合速率(P_n , $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$),测量在晴朗无风的天气条件下进行,时间为 10:30—13:30。

使用便携式叶绿素荧光仪(Handy FluorCam FC 1000-H 型)分别在 V4、R2、R4 和 R6 期测定叶片的叶绿素荧光参数。测量前,将每株大豆转移至暗室中放置 30 min,以测量最大光化学效率 F_v/F_m 、实际光化学效率 Φ_{PSII} 、光化学猝灭系数 q_p 和非光化学猝灭系数(NPQ)。

叶片叶绿素含量使用叶绿素仪(SPAD-502 型)测量。分别于 V4、R2、R4 和 R6 期在每个小区中随机选取 10 株大豆,从主茎顶部到底部依次测量最上方 4 片叶片的 SPAD 值。每片叶片进行 3 次测量,取平均值,将同一小区中所有叶片测量结果的平

均值作为该小区的大豆叶绿素含量^[12]。

1.2.3 大豆产量及其构成因素

于 R8 期在每个小区中采集 5 株植株来测定大豆产量,取 3 次重复,种子产量 (GY) 按照含水率 14% 进行标准化^[13]。同时,选取 30 株具有代表性植株测定植株高度、主茎节数、单株荚数和种子粒数,在 75℃ 下干燥至恒定质量,然后测得百粒质量。

1.2.4 土壤和植株采样与分析

在大豆播种及收获前后,采集 0 ~ 100 cm 土壤剖面 (每 20 cm 间隔) 的土壤样品,使用 AA-Ⅲ 型连续流分析仪分析土壤中硝态氮 (NO₃⁻-N) 的残留水平。此外,对干燥的 R8 期大豆植株样品进一步研磨,并使用 Kjeldahl 法测得植物的总氮吸收量^[14]。

1.2.5 氮利用效率

氮利用效率指标包括氮肥农学利用率 (NAE, kg/kg)、氮肥偏生产力 (NPFP, kg/kg)、氮肥吸收利用率 (NRE, %)、氮素利用效率 (NUE, kg/kg) 和土壤氮素残留量 (kg/hm²),计算公式分别为^[15]

$$NAE = \frac{Y_N - Y_{N0}}{N} \tag{1}$$

$$NPFP = \frac{Y_N}{N} \tag{2}$$

$$NRE = \frac{N_{UN} - N_{UN0}}{N} \times 100\% \tag{3}$$

$$NUE = \frac{Y}{N_{uptake}} \tag{4}$$

$$N_{NO_3-N} = \sum_{i=0}^{100} C_{NO_3-N} h_i \gamma_i \tag{5}$$

式中 Y_N ——施用氮肥后大豆产量,kg/hm²
 Y_{N0} ——未施用氮肥大豆产量,kg/hm²
 N ——大豆吸氮量,kg/hm²
 Y ——大豆产量,kg/hm²
 N_{uptake} ——植株氮素吸收量,kg/hm²
 N_{UN} ——施用氮肥后吸氮量,kg/hm²

N_{UN0} ——未施用氮肥吸氮量,kg/hm²
 C_{NO_3-N} ——土壤中硝酸盐浓度
 h_i ——土壤深度,m
 γ_i ——土壤容重,kg/m³
 N_{NO_3-N} ——土壤氮素残留量,kg/hm²

2 结果与分析

2.1 大豆生长指标

2.1.1 根瘤数

不同施氮水平和根瘤菌处理对根瘤数量影响的结果如图 3 (图中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$),下同) 所示,随着生育期的推进,根瘤数不断增加,同时,根瘤数的增长速率先慢后快,并在 R6 期达到峰值。施氮对根瘤数有显著影响 ($P < 0.05$)。在 V4-R2 阶段,根瘤数随着施氮量的增加逐渐减少,在 R4 时期,氮肥对结瘤的抑制作用逐渐增强,根瘤数随着施氮量的增加先增加后减少。RN2 处理下的根瘤数最高,在 R6 期 2 年平均值为 241.47,相较于 RN0、RN1、RN3 处理分别高 92.3%、8.8%、187.6%。与相同氮肥施用条件下相同生长期的对照处理相比,接种根瘤菌的大豆根瘤数平均增加 100% 以上,表明接种根瘤菌能显著促进大豆结瘤 ($P < 0.05$)。

2.1.2 根瘤干质量

不同施氮水平和根瘤菌处理对根瘤干质量影响如图 4 所示,在不同处理下,根瘤干质量随着时间的推移呈现与根瘤数相同的变化趋势。根瘤干质量随着生长进程的推进而逐渐增加,并在 R6 期达到最大值,各生育期施用氮肥对根瘤的干质量均有显著影响 ($P < 0.05$),在 R6 阶段,随着氮肥施用量增加,根瘤干质量先增加后减少。在 RN2 处理下获得最高的根瘤干质量,2 年平均值为 1.30 g。接种根瘤菌的大豆根瘤干质量显著高于清水拌种处理 ($P < 0.05$),这与根瘤数变化趋势相似。

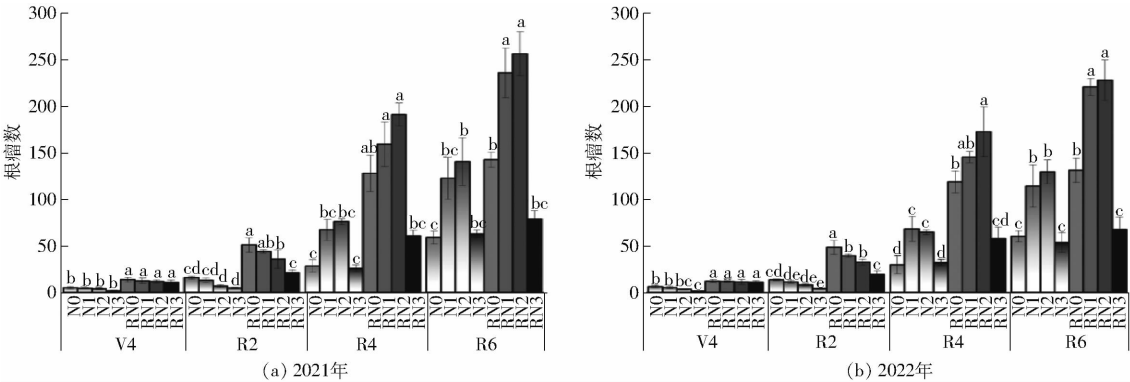


图 3 不同施氮水平和接种根瘤菌对不同生育期大豆根瘤数的影响

Fig. 3 Effects of different nitrogen levels and rhizobium inoculation on number of soybean rhizobium at different growth stages

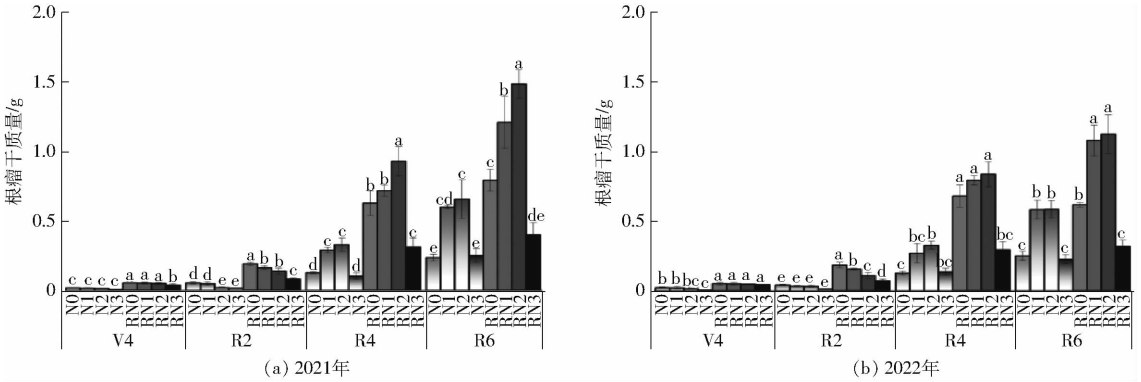


图4 不同施氮水平和接种根瘤菌对不同生育期大豆根瘤干质量的影响

Fig.4 Effects of different nitrogen levels and rhizobium inoculation on dry weight of soybean rhizobium at different growth stages

2.1.3 叶面积指数

不同施氮水平和根瘤菌处理对大豆 LAI 影响的结果如图 5a、5b 所示。在各处理中,大豆 LAI 随时间的推移呈现相同的变化趋势,即先增加后减少,并在 R4 期达到峰值,施氮量与 LAI 呈二次曲线关系,其中 RN2 处理下的 LAI 最高,2 年平均值为 $5.44\text{ cm}^2/\text{cm}^2$,分别比 RN0、RN1、RN3 处理高 62.8%、16.4%、3.2%。在 R4 期,N2 处理下 LAI 分别比 N0、N1、N3 处理高 141.9%、17.1%、29.2% ($P<0.05$),与清水拌种处理相比,根瘤菌处理的 LAI 较高。结果表明,N0、N1、N2、N3 条件下接种根瘤菌的大豆 LAI 分别比清水拌种处理高 16.6%、7.6%、9.5%、12.5%。

2.1.4 干物质积累

不同施氮水平和根瘤菌处理对大豆干物质积累

量的影响如图 5c、5d 所示。在各处理中,干物质积累量随着生育期的推进不断增加,并在 R8 期达到最大值,由图 5c、5d 可知,在施氮量为 $0\sim120\text{ kg}/\text{hm}^2$ (N2) 范围内,增加施氮量可显著促进大豆生长,但当施氮量超过 N2 时,干物质积累显著减少。结果表明,施氮肥可以增加大豆干物质积累量,但过量施氮会降低大豆干物质积累量,在相同施氮量下,接种根瘤菌处理也促进了大豆干物质的积累。2021 年 R8 期 N0、N1、N2 条件下接种根瘤菌处理大豆的干物质积累量分别比清水拌种处理高 15.3%、15.3% 和 33.2%,在 2022 年,对应的值为 11.0%、24.0%、17.6% ($P<0.05$)。RN2 处理下 2 年平均值为 $17\,530.51\text{ kg}/\text{hm}^2$ 。在 2 年期间,N3 氮肥处理下,接种根瘤菌处理与清水拌种处理干物质积累量差异不显著 ($P>0.05$)。

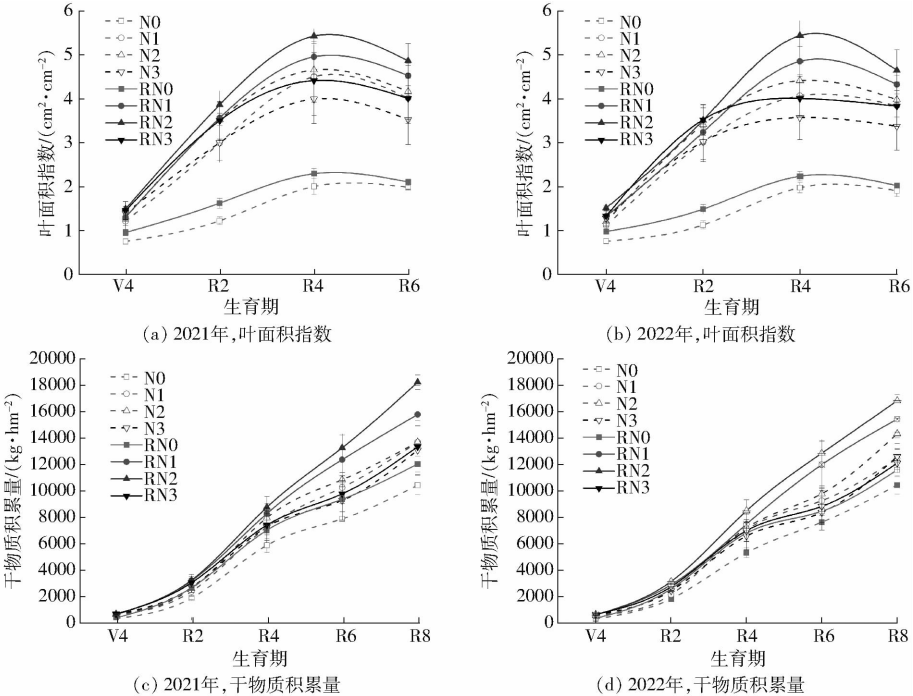


图5 不同施氮水平和接种根瘤菌对大豆不同生育期叶面积指数和干物质积累量的影响

Fig.5 Effects of different nitrogen levels and rhizobia inoculation on LAI and biomass accumulation of soybean at different growth stages

2.1.5 根系特性

不同施氮水平和根瘤菌处理对大豆根系指数的影响如图 6 和图 7 所示。随着土壤深度的增加，RLD、RSAD、RVD 和大豆根系逐渐减小。由图 6 可知，超过 55% 的根系分布在浅层（0 ~ 20 cm）。大豆的 RLD、RSAD、RVD、根干质量和根冠比随施氮量的增加先增加后减少，在 N2 氮肥处理下均达

到峰值。2021 年，RN2 处理下的 RLD 分别比 RN0、RN1、RN3 高 108.7%、9.3%、72.3%，2022 年对应的值分别为 100.6%、8.4% 和 68.3%。2 年平均 RLD 为 15.00 cm/cm³。接种根瘤菌处理的 RLD、RSAD、RVD、根干质量和根冠比分别比清水拌种处理提高 18.3%、14.3%、19.2%、20.5%、5.4%。

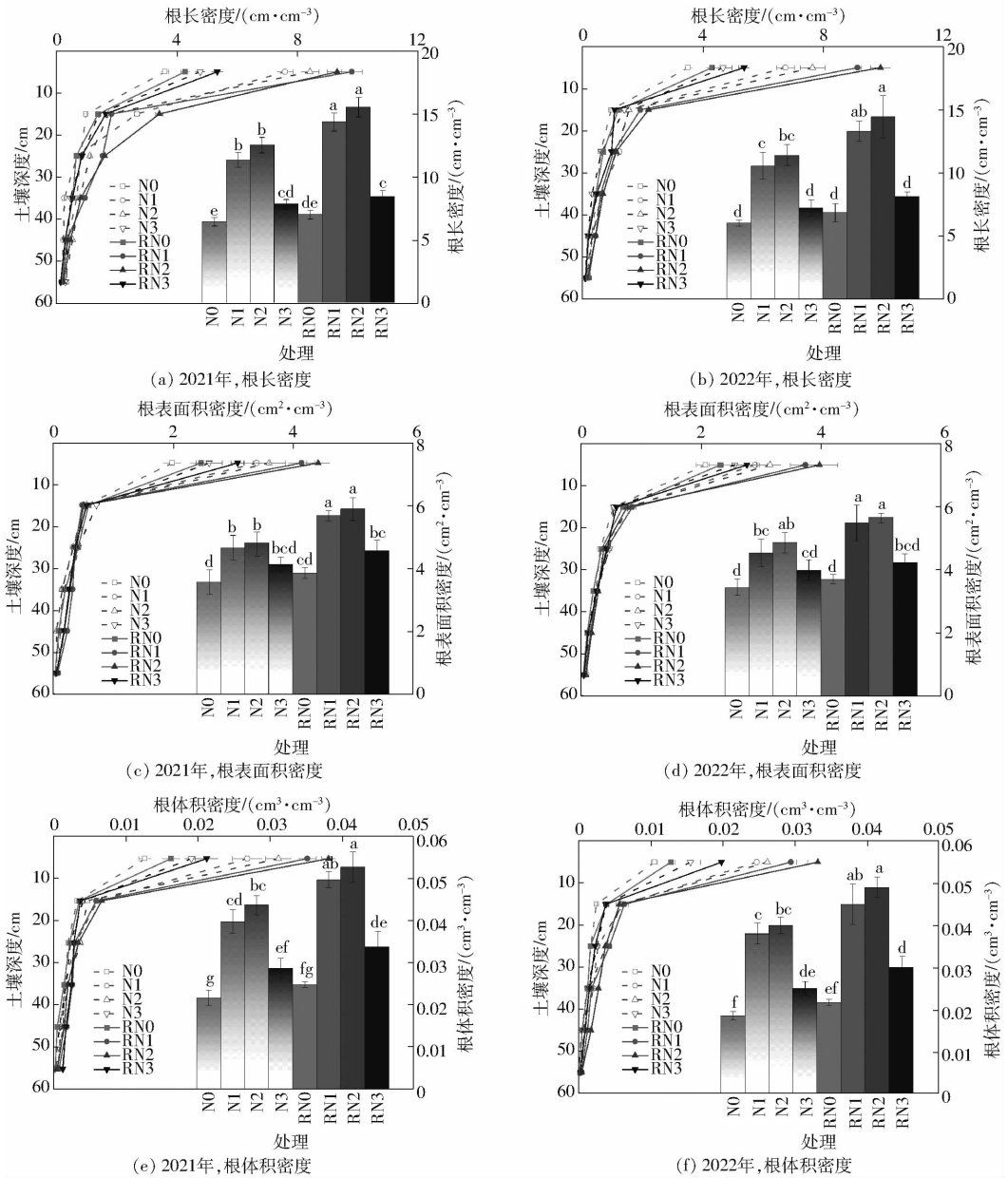


图 6 不同施氮水平和接种根瘤菌对大豆成熟期根长密度、根表面积密度、根体积密度的影响

Fig. 6 Effects of different nitrogen levels and rhizobium inoculation on root length density, root surface area density, root volume density at maturity stage of soybean

2.2 大豆生理指标

2.2.1 叶绿素含量

不同施氮水平和根瘤菌处理对大豆叶片叶绿素含量的影响如表 2 所示。不同处理下，大豆的 SPAD 随时间呈先升高后降低的趋势，在 R4 阶段达到峰值。SPAD 与施氮量呈二次相关，R4 期 N2 处理下

的 SPAD 最大，2 年平均值为 53.55，两年平均值分别比 RN0、RN1、RN3 处理高 20.3%、4.3%、7.4%。接种根瘤菌处理的大豆 SPAD 显著高于清水拌种处理（ $P < 0.05$ ）。

2.2.2 光合参数

不同施氮水平和根瘤菌处理对大豆光合参数的

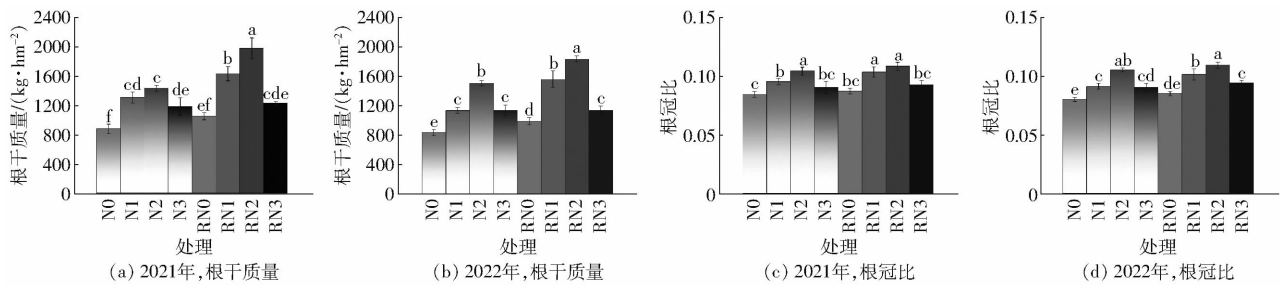


图 7 不同施氮水平和接种根瘤菌对大豆成熟期根干质量和根冠比的影响

Fig.7 Effects of different nitrogen levels and rhizobium inoculation on root dry weight and root-shoot ratio at maturity stage of soybean

表 2 不同施氮水平和接种根瘤菌对不同生育期大豆叶绿素相对含量 (SPAD) 的影响

Tab.2 Effects of different nitrogen levels and rhizobia inoculation on chlorophyll relative content (SPAD) of soybean in different growth stages										
试验处理	2021 年生育期					2022 年生育期				
	V4	R2	R4	R6	R8	V4	R2	R4	R6	R8
N0	25.4 ^e	33.4 ^f	42.2 ^e	39.8 ^f	29.4 ^f	26.5 ^e	32.5 ^d	42.1 ^d	40.1 ^d	29.5 ^d
N1	30.5 ^c	39.2 ^{cd}	48.8 ^b	44.3 ^{bc}	34.9 ^{cd}	30.2 ^{cd}	38.3 ^b	48.5 ^{bc}	44.0 ^{bc}	34.3 ^{bc}
N2	32.3 ^b	40.0 ^{bc}	50.3 ^b	45.5 ^b	36.2 ^{bc}	32.0 ^{bc}	38.8 ^b	51.5 ^{abc}	45.1 ^{bc}	35.4 ^b
N3	30.2 ^c	38.3 ^d	46.8 ^c	42.1 ^{de}	34.3 ^d	31.5 ^{bcd}	38.0 ^{bc}	47.8 ^c	40.2 ^d	34.8 ^{bc}
RN0	28.8 ^d	35.5 ^e	44.3 ^d	40.5 ^{ef}	32.2 ^e	29.4 ^d	35.4 ^c	43.2 ^d	42.5 ^{cd}	32.4 ^c
RN1	33.4 ^b	40.4 ^{bc}	52.5 ^a	47.8 ^a	36.9 ^b	33.2 ^{ab}	40.5 ^b	52.2 ^{ab}	46.8 ^{ab}	36.9 ^{ab}
RN2	35.5 ^a	44.5 ^a	54.0 ^a	48.5 ^a	39.5 ^a	35.1 ^a	43.4 ^a	53.1 ^a	48.4 ^a	39.3 ^a
RN3	32.5 ^b	41.5 ^b	50.5 ^b	43.2 ^{cd}	37.0 ^b	32.4 ^{bc}	40.9 ^{ab}	48.8 ^{bc}	42.3 ^{cd}	36.7 ^{ab}
N	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
F R	**	**	**	**	**	**	**	*	**	**
N × R		*								

注: * 表示在 0.05 水平下显著, ** 表示在 0.01 水平下显著。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

影响如表 3 所示。随着大豆的生长,净光合速率先升高后降低,并在 R4 时期达到最大值。同时,施用氮肥可以显著提高大豆叶片的净光合速率,但高施氮量抑制了大豆生长,从而导致大豆净光合速率

不同程度下降。当施氮量为 N2 时,大豆净光合速率最大,2 年平均值为 $32.75 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。施氮对大豆光合作用的影响在 2 年各生育期均达到显著水平 ($P < 0.05$),在 2 年各生育期相同施氮量下,接种根瘤菌处理的大豆叶片净光合速率高于清水拌种,且差异显著 ($P < 0.05$)。在 2 年的大部分生育期,施氮与接种根瘤菌的交互作用对大豆净光合速率有显著影响 ($P < 0.05$)。

2.2.3 荧光参数

试验处理	2021 年生育期				2022 年生育期			
	V4	R2	R4	R6	V4	R2	R4	R6
N0	10.3 ^e	16.5 ^f	21.4 ^f	13.5 ^e	10.5 ^e	16.4 ^d	21.1 ^f	12.9 ^g
N1	13.1 ^{cd}	20.3 ^{de}	25.5 ^{cd}	17.0 ^d	12.8 ^{cd}	18.8 ^c	24.4 ^{de}	16.5 ^{de}
N2	14.2 ^b	22.4 ^{bc}	28.8 ^b	17.6 ^{cd}	13.8 ^{bc}	19.1 ^c	27.6 ^c	17.5 ^{cd}
N3	14.0 ^{bc}	21.2 ^{cd}	24.3 ^{de}	16.5 ^d	13.5 ^{bc}	18.8 ^c	23.4 ^e	16.2 ^e
RN0	12.5 ^d	18.8 ^e	22.5 ^{ef}	14.3 ^e	12.4 ^d	18.2 ^c	21.2 ^f	14.4 ^f
RN1	14.4 ^b	23.8 ^b	30.4 ^b	19.8 ^b	14.5 ^{ab}	24.3 ^a	30.2 ^b	19.5 ^{ab}
RN2	15.5 ^a	25.5 ^a	32.5 ^a	21.4 ^a	15.4 ^a	25.0 ^a	33.0 ^a	20.2 ^a
RN3	14.1 ^{bc}	22.5 ^{bc}	26.4 ^c	18.8 ^{bc}	13.8 ^{bc}	22.4 ^b	26.0 ^{cd}	18.3 ^{bc}
N	**	**	**	**	**	**	**	**
F R	**	**	**	**	**	**	**	**
N × R	*	*	*	*	*	*	*	*

不同施氮水平和根瘤菌处理对大豆荧光参数的影响如图 8 所示,不同处理下,2 年最大光化学效率 F_v/F_m 在 0.75 ~ 0.85 之间;实际光化学效率 Φ_{PSII} 在 0.15 ~ 0.45 之间;光化学猝灭系数 q_p 范围为 0.40 ~ 0.70,并且随着生育期的推进先增大后减小。 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 和 q_p 在 R4 处达到最大值。在 2 年同生育期施氮处理下,大豆的 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 和 q_p 有一定程度的增加,但当施氮量高于 N2 时,大豆的 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 和 q_p 有所降低 ($P < 0.05$)。2 年各生育期相同施氮量下接种根瘤菌处理的大豆 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 和 q_p 均高于清水拌种处理,且差异显著 ($P < 0.05$)。NPQ 的变化与 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 和 q_p 表现出相反的趋势。

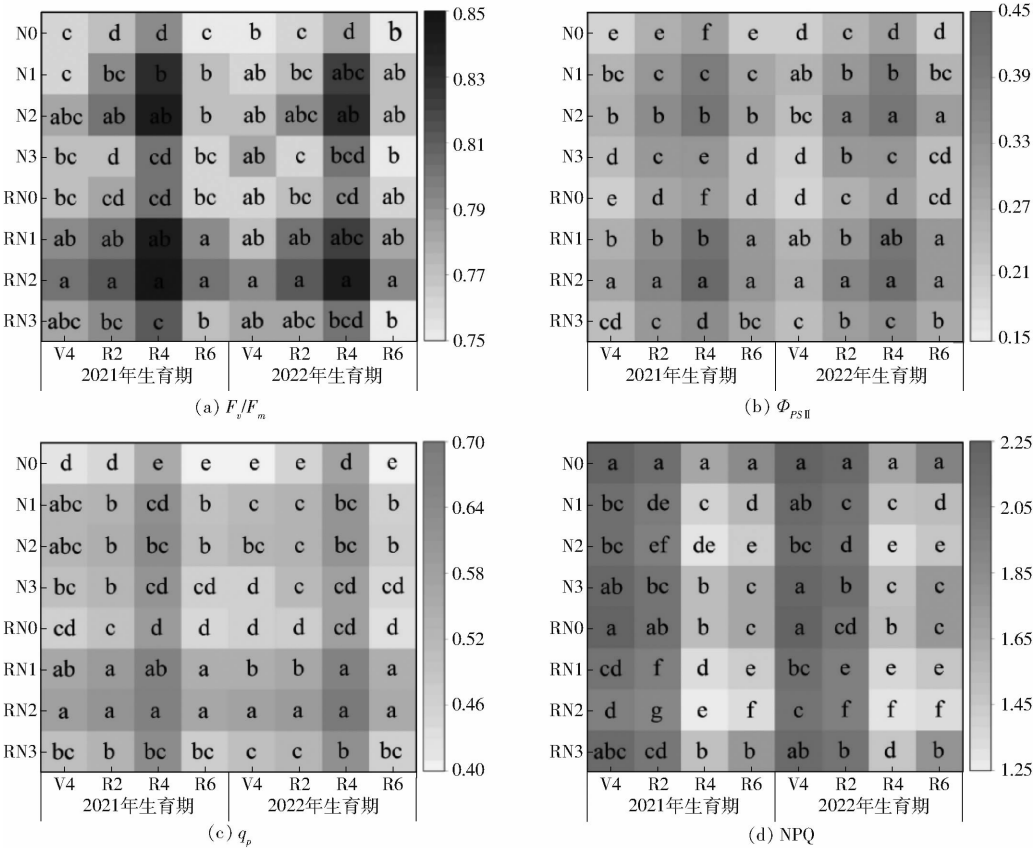


图 8 不同施氮水平和接种根瘤菌对大豆不同生育期的最大光化学效率、实际光化学效率、光化学猝灭系数和非光化学猝灭系数的影响

Fig.8 Effects of different nitrogen levels and rhizobium inoculation on maximum photochemical efficiency, actual photochemical efficiency, photochemical quenching coefficient and non-photochemical quenching coefficient of soybean at different growth stages

势,在 2 年试验中,NPQ 在 R4 处达到最小值,在 V4 处达到最大值。其他条件相同时,各生育期 NPQ 由大到小顺序为 N0、N3、N1、N2,施氮量为 N0 时 NPQ 最大。2 年不同生育期相同施氮量下,清水拌种的 NPQ 显著高于接种根瘤菌($P < 0.05$)。

2.2.4 大豆产量及其构成

不同施氮水平和根瘤菌处理对大豆产量的影响如表 4 所示,施氮与接种根瘤菌及其交互作用均对大豆产量及产量构成有显著影响($P < 0.05$)。大豆产量随施氮量的增加先增后减,并且在 RN2 下达到最大值,2 年均值为 4 659.4 kg/hm²,分别比 RN0、RN1、RN3 条件下增产 38.3%、7.2%、22.1%。结果表明,2 年试验中,接种根瘤菌的大豆产量均高于清水拌种处理,N0 ~ N3 条件下分别比清水拌种处理增产 10.7%、19.8%、16.8%、1.8%。施氮和接种根瘤菌对主茎茎数、单株结荚数、单株种粒数和百粒质量的影响与种子产量基本一致,均在 RN2 处理下达到峰值。

2.2.5 土壤氮素残留量及氮素利用效率

不同施氮水平和根瘤菌处理对土壤氮素残留量及氮素利用率的影响如表 5 所示。施氮量对大豆氮

表 4 不同施氮水平和接种根瘤菌对大豆产量及其构成的影响

Tab.4 Effects of different nitrogen levels and rhizobia inoculation on soybean yield and its components						
年份	试验处理	主节茎数	单株荚数	单株粒数	百粒质量/g	种子产量/(kg·hm ⁻²)
2021	N0	11.0 ^d	38.5 ^f	82.7 ^f	18.1 ^c	2 998.4 ^f
	N1	12.5 ^{ab}	50.4 ^d	121.2 ^c	21.0 ^b	3 743.1 ^{cd}
	N2	12.5 ^{ab}	56.2 ^c	121.8 ^c	21.7 ^{ab}	3 941.4 ^c
	N3	11.8 ^{bcd}	44.8 ^e	97.3 ^e	18.6 ^c	3 600.4 ^{de}
	RN0	11.5 ^{cd}	43.2 ^e	92.7 ^e	18.3 ^c	3 403.9 ^e
	RN1	12.5 ^{ab}	65.3 ^b	140.2 ^b	22.8 ^a	4 333.8 ^b
	RN2	13.3 ^a	74.2 ^a	159.2 ^a	23.0 ^a	4 715.3 ^a
	RN3	12.3 ^{bc}	46.8 ^{de}	108.1 ^d	18.8 ^c	3 650.9 ^{de}
	N	**	**	**	**	**
2022	F	*	**	**	*	**
	R	*	**	**	*	**
	N × R	*	**	**	*	*
	N0	10.9 ^c	37.7 ^e	79.9 ^f	17.7 ^c	2 938.4 ^e
	N1	12.0 ^{ab}	56.2 ^{bc}	118.2 ^c	21.7 ^{ab}	3 600.4 ^c
	N2	12.0 ^{ab}	58.5 ^b	121.4 ^c	21.9 ^{ab}	4 036.1 ^b
	N3	11.5 ^{abc}	48.3 ^d	99.5 ^{de}	20.7 ^b	3 420.6 ^{cd}
	RN0	11.2 ^{bc}	45.5 ^d	88.51 ^{ef}	17.7 ^{4c}	3 167.5 ^{de}
	RN1	12.3 ^a	66.8 ^a	133.9 ^b	22.3 ^{ab}	4 461.0 ^a
	RN2	12.3 ^a	67.0 ^a	150.5 ^a	22.4 ^a	4 603.5 ^a
	RN3	11.8 ^{ab}	53.9 ^c	105.6 ^d	21.2 ^{ab}	3 496.4 ^c
	N	**	**	**	**	**
	F	*	**	**	*	**
	R	*	**	**	*	**
	N × R	*	*	*	*	*

表 5 不同施氮水平和接种根瘤菌对大豆氮素利用效率及其成分的影响

Tab.5 Effects of different nitrogen levels and rhizobia inoculation on nitrogen use efficiency and its components of soybean							
年份	试验处理	吸氮量/ (kg·hm ⁻²)	氮素利用效率/ (kg·kg ⁻¹)	氮肥农学利用率/ (kg·kg ⁻¹)	氮肥偏生产力/ (kg·kg ⁻¹)	氮素吸收利 用率/%	土壤氮素残留量/ (kg·hm ⁻²)
2021	N0	68.8 ^e					25.9 ^d
	N1	83.0 ^d	45.1 ^b	12.4 ^c	62.4 ^b	0.2 ^d	27.3 ^d
	N2	108.2 ^c	36.4 ^d	7.9 ^d	32.9 ^d	0.3 ^b	32.8 ^b
	N3	121.4 ^b	29.7 ^e	3.3 ^e	20.0 ^e	0.3 ^c	47.5 ^a
	RN0	80.7 ^d					22.1 ^e
	RN1	86.2 ^d	50.3 ^a	22.3 ^a	72.2 ^a	0.3 ^c	21.4 ^e
	RN2	118.9 ^b	39.7 ^c	14.3 ^b	39.3 ^c	0.4 ^a	30.5 ^c
	RN3	129.2 ^a	28.3 ^e	3.6 ^e	20.3 ^e	0.3 ^b	45.2 ^a
	N	**	**	**	**	**	**
	R		**	**	**	**	**
2022	N × R	**	**	**	**	**	**
	N0	68.8 ^e					27.8 ^c
	N1	78.4 ^d	45.9 ^b	11.0 ^c	60.0 ^b	0.2 ^f	26.7 ^{cd}
	N2	101.4 ^c	39.8 ^c	9.2 ^d	33.6 ^d	0.3 ^c	37.8 ^c
	N3	110.2 ^b	31.1 ^d	2.7 ^e	19.0 ^e	0.2 ^d	55.6 ^a
	RN0	77.8 ^d					24.4 ^f
	RN1	81.1 ^d	55.0 ^a	25.4 ^a	74.4 ^a	0.2 ^e	24.8 ^f
	RN2	113.5 ^b	40.6 ^c	13.9 ^b	38.4 ^c	0.4 ^a	32.3 ^d
	RN3	124.4 ^a	28.1 ^e	3.1 ^e	19.4 ^e	0.3 ^b	48.4 ^b
	N	**	**	**	**	**	**
	R	*	*	**	**	**	**
	N × R	**	**	**	**	**	*

素吸收和土壤氮素残留有显著影响 ($P < 0.05$), 接种根瘤菌对土壤氮素残留有显著影响 ($P < 0.05$), 施氮与接种根瘤菌存在交互作用也对土壤氮素残留的影响显著 ($P < 0.05$)。

接种根瘤菌处理的土壤氮素残留量显著低于清水拌种处理, N0、N1、N2、N3 条件下的土壤氮素残留量分别比清水拌种处理降低 15.5%、16.8%、12.6%、10.2%。施氮肥、拌种及其交互作用对养分利用效率 (NUE)、氮肥农学利用率 (NAE)、氮肥偏生产力 (NPFP) 和氮肥吸收利用率 (NRE) 均产生显著影响 ($P < 0.05$)。施氮肥对大豆氮素吸收的影响高于接种根瘤菌, 大豆氮素吸收量随着施氮量的增加而增加, 并且在 RN3 处理下达到最大值, 分别比 RN0、RN1、RN2 条件下高 63.9%、47.6%、9.8%。同时, 在相同施氮量下, 接种根瘤菌的大豆氮素吸收量大于清水拌种处理。大豆土壤氮素残留量随施氮量的增加而增加, 并在 RN3 处理下达到峰值, 分别比 RN0、RN1、RN2 处理高 96.3%、96.5%、47.5%。2 年中 NUE、NAE 和 NPFP 最高值均出现在 RN1 处理下, 而 NRE 最高值出现在 RN2 处理下。接种根瘤菌处理的 NUE、NAE、NPFP 和 NRE 均高于清水拌种处理。

3 讨论

3.1 减施氮肥和接种根瘤菌对根瘤和根系生长的影响

研究表明豆科植物主要通过根瘤从空气中吸收

氮素^[16]。本研究中, 随着生育期的推进, 结瘤数量和根瘤干质量逐渐增加, 并在 R6 期达到最大值。这可能是由于根瘤的形成受到外源性氮的影响较大^[17], 处于不同生育期的大豆所需要的氮素不同, 而根瘤的生长速率也随之变化。本研究中, 由于大豆在生长早期需要依赖营养物质, 因此在 V4 和 R2 阶段未施加氮素处理的结瘤数量和根瘤干质量高于施氮处理。在无氮处理下, 大豆通过增加空气的固氮比来获取所需的营养物质, 因此在生长早期需要更好的根瘤。在 R4 和 R6 期, 随着施氮量的增加, 根瘤数和根瘤干质量先增加后降低, 说明一定的施氮量有利于根瘤的生长和形成, 但过量的氮素反而会抑制根瘤的形成, 这与王树起等^[18]的研究结果一致。这可归因于缺氮条件下大豆无法正常生长, 而生长中后期根瘤发育减缓, 因此减氮条件下大豆在生殖生长阶段需要大量的营养物质^[19]。此外, 除了从土壤中吸收养分外, 根系还需要增大空气中的固氮作用, 从而在一定程度上促进根瘤的生长。然而, 高浓度氮处理下大豆根瘤的生长和形成受到限制, 因为高浓度氮抑制了根瘤对大豆根毛的侵染, 减少了在根瘤形成初期的根瘤数量, 这不利于根瘤的氮固定效率^[20]。多项研究结果表明, 接种根瘤菌可以显著改善豆科作物的生长性能, 增加根瘤干质量和大豆根瘤数量, 提高共生固氮能力^[21], 这与本研究的结果一致。

根系是作物吸收矿质元素最重要的器官, 大豆

的生长主要依靠根系的生长发育。本研究中,RLD、RSAD 和 RVD 均随土层深度的增加而显著减小,这可归因于氮肥在浅层土壤的施用,浅层养分能够在很大程度上满足大豆生长的需求,因此大部分根分布在浅层。同时可以观察到,N0 处理的浅根系分配比例小于施氮处理,这是由于养分供应不足造成的,该处理根系必须向深层延伸才能获得地上部生长的养分需求,这与 JIA 等^[22]的研究结果相似。随着氮素施用量的增加,大豆的 RLD、RSAD、RVD 和根冠比先增加后减少,且在 N2 处理达到峰值,这可以归因于适宜的氮素施用能够促进根系的发育,而过量施氮会导致土壤渗透压失衡,从而抑制大豆根系的生长,这与邹海洋等^[23]的研究结果相似。此外,根系的生长与根瘤的生长密切相关。ZHENG 等^[24]的研究结果表明,豆科植物的结瘤数量与根系指数成正比,因此增加结瘤数量可以在一定程度上促进根系的生长,这与本研究结果相似,即在相同施氮量下,接种根瘤菌的大豆根系指标高于清水拌种处理。

3.2 减施氮肥和接种根瘤菌对叶片生理生长的影响

LAI 是反映植物群体生长状态的重要指标,其大小直接与最终产量相关,增加 LAI 是增加总光合面积的决定性因素^[25]。本研究中,大豆 LAI 随着生育期的推进先增加后减少,且在 R4 达到峰值,这可归因于 R6 时叶片黄化脱落导致 LAI 降低。在各生育时期,N1、N2 处理的 LAI 均显著高于 N0、N3 处理,这可以归因于氮素缺乏引起叶片发育受到抑制和早期叶片的衰老,而过量施用氮肥将导致根系对氮素的摄取受限进而影响叶片生长^[26]。在相同施氮量下,接种根瘤菌的大豆 LAI 优于清水拌种,这是因为接种根瘤菌能够促进大豆的固氮作用,增加氮素供应。氮素缺乏会影响叶绿素的合成,使叶片变黄。在前人的研究中,作物的 LAI 被认为与叶绿素密切相关^[27]。本研究中,叶绿素和 LAI 在各处理之间和各生育时期具有相同的变化趋势,即均在 RN2 处理下和 R4 生育时期达到峰值,叶绿素随施氮量和时间的变化也可归因于养分的供应,减施氮肥和接种根瘤菌能更好地促进大豆叶片叶绿素的合成。大豆进入开花期后需氮量高,但施氮量过高时,植株倾向于优先吸收外部氮,从而减少对根瘤菌的依赖,导致根瘤菌的固氮效率下降,进而影响氮肥和根瘤菌的协同作用,影响大豆生长^[28]。

光合作用将太阳能转换为化学能,可用于生命过程中有机物质合成。减施氮肥可以降低氮过剩引起的氮饱和效应,有助于维持叶绿体的健康状态,提高大豆对光能的利用效率,进而提高 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 q_p 以及 NPQ,接种根瘤菌可以额外为大豆提供生长

所需的氮源,帮助植物更有效地利用光能,有利于维持叶绿体的正常功能,从而提高 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 q_p 以及 NPQ^[29]。本研究中,表征大豆光合速率和光合性能的 P_n 、 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 和 q_p 均随着大豆叶片叶绿素含量的变化而变化,并都在 RN2 处理的 R4 生长阶段达到峰值,这可归因于高等植物的光合作用需要由体内的叶绿素驱动,负责光合色素的吸收和传递以及光能的转换^[30]。叶绿素是光合作用的必要条件,光合作用不能在缺少叶绿素的情况下进行,因此,在相同条件下,叶绿素含量可以用来判断作物光合速率的快慢和光学指标的高低。

尹豪杰等^[31]的研究表明,叶绿素含量与 NPQ 呈显著的负线性关系,因此,营养胁迫(缺氮)可以反映在 NPQ 上,这可以解释本研究中各处理的 NPQ 在 V4 期最高,而 N0 的 NPQ 高于其他施氮处理。

3.3 减施氮肥和接种根瘤菌对大豆干物质积累、产量及氮肥利用率的影响

作物产量取决于干物质积累量,而干物质积累来自光合作用^[32]。本研究中,RN2 处理在干物质积累、种子产量及其构成因素方面表现最优,这可能与 RN2 处理改善了大豆根系生长,提高了养分吸收有关。减施氮肥可导致植株外部氮素供应缺少,但能刺激根瘤菌的活性,促进根瘤菌的生长和固氮效率,从而更有效地提供氮源给植物,有助于改善植物的养分利用效率,增强植株对土壤中其他养分的利用,以满足生长需求^[33]。

根据作物氮素吸收的过程和机制,可以采取有效的施肥措施来调节作物的生长发育,从而增加作物产量和氮素利用效率。本研究中,减少氮肥施用和接种根瘤菌显著提高了大豆的氮素吸收,产生了较高的种子产量并增加了氮肥利用效率。对于大豆来说,过量的氮素施用会导致营养过度,从而降低氮素利用效率,而减氮结合接种根瘤菌可以避免这种风险,具体而言,减氮结合接种根瘤菌可以在一定程度上减少土壤中氮素残留的同时提高总吸氮量和氮肥利用率,这可以归因于大豆更好的根系生长、光合作用和其他能力,促进了大豆更有效地吸收氮素。

4 结束语

减氮条件下接种根瘤菌(RN2 处理)可以提高根瘤数、根瘤干质量、根系指标、LAI、光合速率、叶绿素含量和叶绿素荧光参数,因此该处理下可以最大程度地增加干物质积累并促进种子产量的形成。2 年平均最大根瘤数为 241.47、最大根瘤干质量为 1.30 g、最大根长密度为 15.00 cm/cm³、最大叶面积

指数为 5.44 cm²/cm²、最大干物质积累量为 17 530.51 kg/hm²、最大叶绿素含量为 53.55、最大净光合速率为 32.75 μmol/(m²·s)、最大种子产量为 4 659.4 kg/hm²,因此,在我国黄土高原,减氮条件下接种根瘤菌是应对大豆可持续发展和经济效益挑战的有效作物管理策略。

参 考 文 献

[1] LIU Yang, AN Lulu, WANG Nan, et al. Leaf area index estimation under wheat powdery mildew stress by integrating UAV based spectral, textural and structural features[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2023,213: 108169.

[2] 钱创建,张微,张红雪,等. 龙葵砧木嫁接马铃薯对嫁接植株光合作用和叶绿素荧光特性影响[J]. 农业与技术,2023, 43(16):22-26.

QIAN Chuangjian, ZHANG Wei, ZHANG Hongxue, et al. Effects of *Solanum nigrum* rootstock grafting potato on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics of grafted plants[J]. Agriculture and Technology, 2023, 43(16):22-26. (in Chinese)

[3] 刘丽君,孙聪姝,刘艳,等. 氮肥对大豆结瘤及叶片氮素积累的影响[J]. 东北农业大学学报, 2005,36(2): 133-137.

LIU Lijun, SUN Congshu, LIU Yan, et al. Effects of nitrogen on nodule-forming and nitrogen concentration in soybean leaves [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2005,36(2): 133-137. (in Chinese)

[4] 刘丹. 西北地区制种玉米氮素调控及环境减排途径研究[D]. 重庆: 西南大学, 2022.

LIU Dan. Study on nitrogen regulation and environmental emission reduction approaches of seed production maize in northwest China[D]. Chongqing: Southwest University, 2022. (in Chinese)

[5] HE Chunmei, GAO Hui, WANG Haijiao, et al. GSK3-mediated stress signaling inhibits legume-rhizobium symbiosis by phosphorylating GmNSP1 in soybean[J]. Molecular Plant, 2020, 14(3): 488-502.

[6] 侯婷婷,于德水,何鑫,等. 复合微生物菌剂对大豆生长发育、结瘤和产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(10): 65-72.

HOU Tingting, YU Deshui, HE Xin, et al. Effects of compound microorganisms on growth, nodulation and yield of soybean [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(10): 65-72. (in Chinese)

[7] 魏启舜,郭东森,王琳,等. 不同施肥条件下接种根瘤菌对鲜食大豆结瘤和产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(23): 77-82.

WEI Qishun, GUO Dongsan, WANG Lin, et al. Impacts of rhizobia inoculating on root nodule and yield of vegetable soybean under different fertilizer treatments[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(23): 77-82. (in Chinese)

[8] 胥雅馨,徐玥,李玲,等. 氮肥与根瘤菌配施对南疆春大豆结瘤和生长的影响[J]. 大豆科学, 2021, 40(2): 241-248.

XU Yaxin, XU Yue, LI Ling, et al. Effect of nitrogen fertilizer and rhizobium inoculation on nodulation and growth of southern Xinjiang spring soybean[J]. Soybean Science, 2021, 40(2): 241-248. (in Chinese)

[9] 张雪艳,杨冬艳,田蕾,等. 大豆接种根瘤菌对设施连作土壤氮素高效利用的机制研究[Z]. 2017.

ZHANG Xueyan, YANG Dongyan, TIAN Lei, et al. Study on the mechanism of efficient utilization of soil nitrogen in facility continuous cropping by inoculating rhizobium with soybean[Z]. 2017. (in Chinese)

[10] 郝青南,杨芳,汪媛媛,等. 氮肥与复硝酚钠复配对南方大豆光合特性和产量及品质的影响[J]. 中国油料作学报, 2022, 44(3): 610-620.

HAO Qingnan, YANG Fang, WANG Yuanyuan, et al. Effects of nitrogen fertilizer and sodium nitratol on photosynthetic characteristics and yield quality in southern soybean[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2022, 44(3): 610-620. (in Chinese)

[11] 周永刚,王骐,刘伟灿,等. 大豆 Pre-miRNAs 作为内参基因在盐碱胁迫下的表达稳定性分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(1): 61-67.

ZHOU Yonggang, WANG Qi, LIU Weican, et al. Stability of Pre-miRNAs in soybean as reference genes for quantitative polymerase chain reaction under salt and alkali stresses[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2016, 44(1): 61-67. (in Chinese)

[12] 丁凯鑫. DTA-6 和 S3307 对三种豆类作物生长和碳氮代谢及产量的影响[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2021.

DING Kaixin. Effects of DTA-6 and S3307 on growth, carbon and nitrogen metabolism and yield of three legume crops[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2021. (in Chinese)

[13] ZHANG Y, XU Z, LI J, et al. Optimum planting density improves resource use efficiency and yield stability of rainfed maize in semiarid climate[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 752606.

[14] ISLAM M, ISHIDA M, ANDO S, et al. A method for determination of nitrogen in ruminant feedstuffs and products[J]. Asian Australasian Journal of Animal Sciences, 2003, 16(10):1438-1442.

[15] LAI Z, FAN J, YANG R, et al. Interactive effects of plant density and nitrogen rate on grain yield, economic benefit, water productivity and nitrogen use efficiency of drip-fertigated maize in Northwest China [J]. Agricultural Water Management, 2022, 263(1): 107453.

[16] ZHENG J,SUN L, WANG D, et al. Roles of a CCR4-NOT complex component GmNOT4-1 in regulating soybean

nodulation[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1172354.

[17] BAILEY D. Influence of single strains and a commercial mixture of *Bradyrhizobium japonicum* on growth, nitrogen accumulation and nodulation of two early-maturing soybean cultivars[J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 1988, 68(2): 411 – 418.

[18] 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 Shuiqi, HAN Xiaozeng, QIAO Yunfa, 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. (in Chinese)

[19] 田艺心,高凤菊,曹鹏鹏,等. 减氮接种根瘤菌剂对黄淮海地区高蛋白夏大豆生长发育产量和经济效益的影响[J]. *河北农业科学*, 2022, 26(6): 72 – 77, 82.

TIAN Yixin, GAO Fengju, CAO Pengpeng, et al. Effects of nitrogen reducing and inoculation with rhizobium agents on the growth, yield and economic benefit of high protein summer soybean in Huang – Huai – Hai region[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2022, 26(6): 72 – 77, 82. (in Chinese)

[20] MARIO A, FELIPPE R, OKLA K, et al. Understanding the contribution of soybean crop residues inoculated with *Bradyrhizobium* spp. and not harvested on nitrogen supply in off-season corn cultivars [J]. *PloS One*, 2022, 17(6): e0269799.

[21] 梁春清,张玉红,张英武,等. 接种高效根瘤菌对大豆氮素营养及产量的影响[J]. *现代化农业*, 1991(2): 18 – 20.

LIANG Chunqing, ZHANG Yuhong, ZHANG Yingwu, et al. Effects of high efficient rhizobium inoculation on nitrogen nutrition and yield of soybean[J]. *Modernizing Agriculture*, 1991(2): 18 – 20. (in Chinese)

[22] JIA Q, YANG L, AN H, et al. Nitrogen fertilization and planting models regulate maize productivity, nitrate and root distributions in semi-arid regions[J]. *Soil & Tillage Research*, 2020, 200: 104636.

[23] 邹海洋,张富仓,张雨新,等. 适宜滴灌施肥量促进河西春玉米根系生长提高产量[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(21): 145 – 155.

ZOU Haiyang, ZHANG Fucang, ZHANG Yuxin, et al. Optimal drip irrigation and fertilization amount enhancing root growth and yield of spring maize in Hexi region of China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(21): 145 – 155. (in Chinese)

[24] ZHENG B, ZHOU Y, CHEN P, et al. Maize-legume intercropping promote N uptake through changing the root spatial distribution, legume nodulation capacity, and soil N availability[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2022, 21(6): 1755 – 1771.

[25] KOICHI N, MASASHI I, YUSUKE K, et al. Estimation of the optimal leaf area index (LAI) of an eggplant canopy based on the relationship between the nighttime respiration and daytime photosynthesis of the lowermost leaves [J]. *Scientia Horticulturae*, 2023, 307(3): 111525.

[26] 夏玄. 氮素水平对大豆结瘤、氮素积累及产量的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014.

XIA Xuan. Effects of nitrogen level on nodulation, nitrogen accumulation and yield of soybean [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2014. (in Chinese)

[27] RANGAPPA M, SANGAMESH A, SULTAN B, et al. Shade tolerance response of legumes in terms of biomass accumulation, leaf photosynthesis, and chlorophyll pigment under reduced sunlight[J]. *Crop Science*, 2022, 63(1): 278 – 292.

[28] 郑浩宇,黄炳林,王孟雪,等. 氮肥减施与接种根瘤菌对大豆光合与产量的影响[J]. *大豆科学*, 2019, 38(3): 413 – 420.

ZHENG Haoyu, HUANG Binlin, WANG Mengxue, et al. The effect of nitrogen fertilizer reduction and rhizobium inoculation on soybean photosynthesis and yield[J]. *Soybean Science*, 2019, 38(3): 413 – 420. (in Chinese)

[29] ZHOU X, LIANG Y, CHEN H, et al. Effects of rhizobia inoculation and nitrogen fertilization on photosynthetic physiology of soybean[J]. *Photosynthetica: International Journal for Photosynthesis Research*, 2006, 44(4): 530 – 535.

[30] HAMISCHFEGER G, ZENK G. Regulation of light energy distribution between photosynthetic pigment systems; a possible role of leaf anatomy[J]. *Zeitschrift für Naturforschung C*, 2015, 38(7 – 8): 600 – 603.

[31] 尹豪杰,王荣荣,蒋桂英,等. 春小麦光合生理和产量对干旱-复水的响应[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(6): 134 – 144.

YIN Haojie, WANG Rongrong, JIANG Guiying, et al. Response of photosynthetic physiology and yield of spring wheat to drought – rewatering[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(6): 134 – 144. (in Chinese)

[32] ZHANG H, WANG Y, YU S, et al. Plant photosynthesis and dry matter accumulation response of sweet pepper to water-nitrogen coupling in cold and arid environment[J]. *Water*, 2023, 15(11): 2134.

[33] 郑浩宇. 减施氮肥条件下接种根瘤菌对大豆生长和产量的影响[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2018.

ZHENG Haoyu. Effects of rhizobium inoculation on growth and yield of soybean under reduced nitrogen fertilizer[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2018. (in Chinese)