

DOI:10.11686/cyxb2024229

http://cyxb.magtech.com.cn

张磊, 杜锦涛, 范倩玉, 等. 紫云英生物固氮对土壤肥力及根瘤菌的响应特征. 草业学报, 2025, 34(5): 51-63.

ZHANG Lei, DU Jin-tao, FAN Qian-yu, et al. Response of biological nitrogen fixation by milk vetch to soil fertility and rhizobium inoculation. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(5): 51-63.

紫云英生物固氮对土壤肥力及根瘤菌的响应特征

张磊^{1**}, 杜锦涛^{1**}, 范倩玉¹, 李顺¹, 高嵩涓^{1*}, 曹卫东^{2*}

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 海岸带盐土资源利用与生态保育江苏省重点实验室, 江苏南京 210095; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北方干旱半干旱耕地高效利用全国重点实验室, 北京 100081)

摘要: 紫云英是我国最重要的豆科绿肥作物之一, 高效生物固氮是其典型特征。适宜的环境条件和根瘤菌接种能增强紫云英固氮能力。选取主栽紫云英品种弋江籽、湘紫1号和闽紫7号, 采用¹⁵N同位素示踪技术设置盆栽试验, 研究了两种土壤肥力条件下接种根瘤菌(菌株7563R)后的生物固氮效应与机制。结果表明, 高肥力下的紫云英平均生物量、吸氮量与生物固氮量分别比低肥力下提高了77.5%、52.6%和22.0%。高肥力下紫云英平均固氮效率为44.7%, 相比低肥力下的55.1%降低了10.4%。与不接种根瘤菌相比, 接种根瘤菌下紫云英平均吸氮量和固氮效率分别增加13.5%和4.3%。不同紫云英品种间生物量、固氮效率和固氮量无显著差异, 弋江籽的磷、钾吸收量高于湘紫1号和闽紫7号。随机森林分析结果表明, 土壤速效钾、有效磷、pH对紫云英固氮量具有显著影响, 贡献率分别达到10.03%、9.38%和8.28%。综上, 土壤肥力和根瘤菌对紫云英生物固氮的影响存在显著的互作效应, 在合适的土壤环境中种植紫云英并接种根瘤菌, 是促进紫云英生物固氮作用、提高吸氮量的重要措施。

关键词: 紫云英; 土壤肥力; 根瘤菌; 互作效应; 生物固氮

Response of biological nitrogen fixation by milk vetch to soil fertility and rhizobium inoculation

ZHANG Lei^{1**}, DU Jin-tao^{1**}, FAN Qian-yu¹, LI Shun¹, GAO Song-juan^{1*}, CAO Wei-dong^{2*}

1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Jiangsu Provincial Key Laboratory of Coastal Zone Saline Soil Resource Utilization and Ecological Conservation, Nanjing 210095, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Agricultural Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, National Key Laboratory of Efficient Utilization of Arid and Semi-Arid Cropland in the North, Beijing 100081, China

Abstract: Milk vetch (*Astragalus sinicus*) is one of the most important leguminous green manure crop in China, and high-efficiency biological nitrogen fixation is its key feature. Suitable environmental conditions and rhizobial inoculation can enhance the nitrogen-fixing ability of milk vetch. In this study, we selected three widely used cultivars of milk vetch, Yijiangzi, Xiangzi No. 1, and Minzi No. 7, and conducted pot trials using ¹⁵N-isotope tracing technology to investigate the effects and mechanisms of biological nitrogen fixation after inoculation with rhizobia (strain 7563R) under two soil fertility conditions. The results showed that, under high fertility conditions, the average biomass, nitrogen uptake, and biological nitrogen fixation of milk vetch were increased by 77.5%, 52.6%, and 22.0%, respectively, compared with their values under low fertility conditions. However, the average nitrogen

收稿日期: 2024-06-11; 改回日期: 2024-07-18

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金(绿肥, CARS-22)和国家重点研发计划(2021YFD1700200)资助。

作者简介: 张磊(1997-), 女, 安徽安庆人, 硕士。E-mail: zhanglei_ahnu@163.com; 杜锦涛(2003-), 男, 湖北荆州人, 在读本科。E-mail: 9211310612@stu.njau.edu.cn。 ** 共同第一作者 These authors contributed equally to this work.

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: gaosongjuan@njau.edu.cn; caoweidong@caas.cn

fixation efficiency of milk vetch under high fertility conditions was 44.7%, which was 10.4% lower than that under low fertility conditions (55.1%). Compared with uninoculated milk vetch, the rhizobia-inoculated milk vetch showed higher average nitrogen uptake and nitrogen fixation efficiency (increased by 13.5% and 4.3%, respectively). There were no significant differences in biomass, nitrogen fixation efficiency, and nitrogen fixation among the different cultivars of milk vetch, but phosphorus and potassium uptake were higher in Yijiangzi than in Xiangzi No. 1 and Minzi No. 7. Random forest analysis indicated that soil available potassium, available phosphorus, and pH significantly influenced the nitrogen fixation of milk vetch, with contribution rates of 10.03%, 9.38%, and 8.28%, respectively. In conclusion, our results show that there is a significant interactive effect of soil fertility and rhizobia on the biological nitrogen fixation of milk vetch. The inoculation of milk vetch with rhizobia and its cultivation in suitable soil environments are important measures to promote nitrogen fixation and increase nitrogen uptake.

Key words: milk vetch; soil fertility; rhizobia; interactive effect; biological nitrogen fixation

种植豆科绿肥是提升农田土壤肥力、节肥增效和实现主作物稳产增产的重要措施,在农业绿色发展发挥着重要作用^[1]。豆科作物的生物固氮作用每年可为农田生态系统提供氮素 $4 \times 10^{10} \sim 7 \times 10^{10}$ kg,是农业生态系统中氮素的重要来源之一^[2-3]。不同品种豆科绿肥的生物固氮量有较大差异,毛叶苕子(*Vicia villosa*)生物固氮量高达 $149 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,箭筈豌豆(*Vicia sativa*)和三叶草(*Trifolium repens*)生物固氮量为 $60 \sim 100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[4]。

紫云英(*Astragalus sinicus*)是我国南方稻区最重要的豆科绿肥作物。大量研究表明,紫云英-水稻(*Oryza sativa*)轮作是保障水稻产量、减少化肥施用和培育健康土壤的高效措施^[5-11]。冬种紫云英可以在不减施和减施20%化肥下,显著增加水稻产量,减施40%化肥下保持水稻稳产^[6],且在减肥或不减肥条件下均显著提高氮肥利用率^[7]。稻田冬种紫云英有利于水稻中后期的干物质积累和养分吸收,促进水稻有效穗数、每穗实粒数、千粒重等经济性状的形成,从而提高水稻产量^[12-14]。稻田种植利用紫云英能够培育土壤氮库,改善土壤供氮能力,促进水稻对氮素的吸收利用,同时可减少氮素流失,提高稻田系统的氮素利用效率。

有研究认为盛花期的紫云英植株体内约有59%~85%的氮素源于生物固氮^[15],也有研究指出紫云英体内氮素约78.2%来源于生物固氮,一个生长季内能固定约 $92.87 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 纯氮进入稻田生态系统^[16]。普遍认为,紫云英接种根瘤菌可提高生物固氮能力,为后茬主作物提供更多氮源^[17],但不同土壤肥力下,紫云英的生物固氮能力不同,接种根瘤菌在不同肥力土壤中的效果也有所差异。环境因素、根瘤菌和紫云英品种是影响紫云英共生固氮的关键因素^[18],前人在相关研究中也取得了一些进展^[19-22],但仍缺乏对不同条件下紫云英生物固氮量及固氮效率的系统量化,有必要综合分析土壤肥力及接种根瘤菌对不同品种紫云英生物固氮作用的影响。

本研究设置¹⁵N标记盆栽试验,利用¹⁵N稀释法量化紫云英生物固氮量,研究土壤肥力、根瘤菌接种对不同品种紫云英生物量、生物固氮量及土壤肥力的影响,并综合分析上述因素及土壤性状与紫云英生物固氮量间的关系,以期量化不同条件下的紫云英生物固氮量并解析其主要影响因素,为紫云英的高产栽培和合理利用提供理论指导。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况及试验设计

盆栽试验于2021年11月至2022年4月在江苏省南京农业大学温室(32°03' N, 118°51' E)开展,试验地年平均气温15.5℃,降水量819.8 mm,年平均日照时长3.96 h。盆栽土壤取自南京市溧水区,为未种植过紫云英的稻田土,采集同一田块0~20 cm表层土和20~40 cm底层土。底层土的土壤性质:pH为5.47,有机碳和全氮为9.68和 $0.91 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷、速效钾为22.8、112.0 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;表层土的土壤性质:pH为5.20,有机碳和全氮为14.99和 $1.07 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷、速效钾为36.5、175.0 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。依照全国第二次土壤普查分级标准^[23],将表层土和深层土作为高肥力土壤和低肥力土壤。

供试紫云英品种为“湘紫1号”“弋江籽”和“闽紫7号”,供试根瘤菌为湖南省微生物研究院提供的紫云英商业根瘤菌(菌株7563R)。

试验设置2个土壤肥力水平(高肥力和低肥力分别表示为H和L)、根瘤菌接种(接种和不接种根瘤菌分别表示为I和N)和3个紫云英品种(湘紫1号、弋江籽、闽紫7号分别表示为X、Y和M),共3个变量因素,12个处理,以黑麦草(*Lolium perenne*)作为参比,用于计算紫云英生物固氮效率。每个处理设10个重复,其中,5个重复进行 ^{15}N 标记、5个重复不标记。每盆栽5 kg干土,于2021年10月撒播紫云英,在11月中旬,第一片真叶长出后,向每盆土壤中浇施1 mL $\text{OD}_{600}=0.2$ 的菌株7563R根瘤菌液^[24]。间苗时,将1 kg $^{15}\text{N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 尿素融入水中均匀浇施至 ^{15}N 标记处理,不标记处理浇施等量普通尿素。

1.2 样品采集及数据处理

于2022年4月,紫云英盛花期采集植株及土壤样品,紫云英地上部全盆收获后,称取鲜重,105 °C杀青30 min,70 °C条件下烘干至恒重,测定干重,粉碎后测定养分含量及 ^{15}N 丰度。植株全氮含量及 ^{15}N 丰度采用同位素质谱仪(MAT-251 Finnigan,德国)测定,植株样品经 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 联合消煮后,全磷采用连续流动分析仪(AA3, SEAL,德国)测定,全钾采用火焰光度计(AP1302,中国)测定^[24]。

紫云英的氮磷钾吸收量以及固氮效率和固氮量分别采用以下公式计算^[25]:

$$\text{紫云英植株氮磷钾吸收量} [N, (P, K)E_{\text{acc}}] = E_{\text{tcc}} \times N_{\text{abb}} \quad (1)$$

$$\text{紫云英固氮效率} (\%N_{\text{dfa}}) = \frac{\delta^{15}N_{\text{ref}} - \delta^{15}N_{\text{leg}}}{\delta^{15}N_{\text{ref}}} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{紫云英固氮量} (N_{\text{dfa}}) = \%N_{\text{dfa}} \times N_{\text{acc}} \quad (3)$$

式中: E_{tcc} 指紫云英植株元素全量含量; N_{abb} 指紫云英植株地上部生物量; $\delta^{15}N_{\text{ref}}$ 指参比作物黑麦草中 ^{15}N 丰度; $\delta^{15}N_{\text{leg}}$ 指紫云英中 ^{15}N 丰度; $\%N_{\text{dfa}}$ 表示紫云英固氮效率; N_{acc} 指紫云英植株氮积累量。

挑出土壤中的紫云英根系后,混合均匀采集的土壤样品,部分保存于4 °C冰箱用于测定土壤无机氮,另一部分自然风干后研磨过2.000和0.149 mm筛,用于其他土壤理化指标的测定。土壤pH采用2.5:1.0水土比,电位法测定^[24];土壤全氮(total nitrogen, TN)和有机碳(soil organic carbon, SOC)采用元素分析仪(Flash Smart, Thermo Fisher Scientific,美国)测定;土壤无机氮为采用 $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl溶液浸提(土水比1:5),通过连续流动分析仪(AA3, SEAL,德国)测定的铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$);土壤有效磷(soil available P)采用碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法测定^[24];速效钾(available K)采用醋酸铵浸提火焰光度法测定^[24]。

1.3 数据处理

采用SPSS 26.0软件进行方差分析(Duncan法, $P < 0.05$)和相关性分析(Spearman, $P < 0.01$ 或 $P < 0.05$);采用R(v. 4.2.2)中“randomForest”包^[26]评估土壤环境因子、紫云英品种因子和根瘤菌剂因子对紫云英生物固氮量的影响;使用Origin 2023b软件绘图。

2 结果与分析

2.1 紫云英地上部生物量

在接种根瘤菌的条件下,高肥力下的紫云英地上部平均生物量相比低肥力下显著提高了83.2%;在高肥力条件下湘紫1号地上部生物量较弋江籽显著提高了22.49%,低肥力条件下不同品种间无显著差异(图1A)。不接种根瘤菌的条件下,高肥力下的紫云英地上部平均生物量相比低肥力下显著提高了69.0%;在高肥力条件下不同品种间差异不显著;低肥力条件下湘紫1号地上部生物量较闽紫7号显著提高了23.19%(图1B)。综合来看,高肥力处理紫云英地上部平均生物量相比低肥力显著提高77.45%,不同品种紫云英和不同接种根瘤菌处理的地上部生物量无显著差异(图1C~E)。

2.2 不同处理下的紫云英全氮含量及吸氮量

在接种根瘤菌的条件下,不同肥力间的紫云英平均全氮含量差异不显著;高肥力和低肥力水平下,弋江籽的全氮含量较湘紫1号分别显著提高14.78%和25.50%(图2A)。高肥力下的紫云英平均吸氮量相比低肥力下显

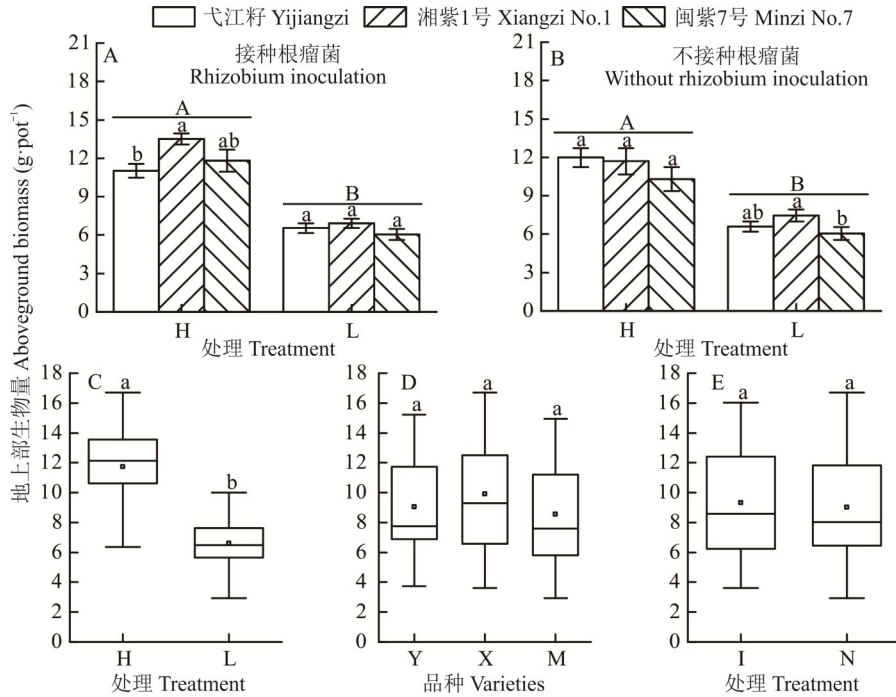


图1 不同处理下的紫云英地上部生物量

Fig. 1 Aboveground biomass of milk vetch under different treatments

Y、X和M分别代表弋江籽、湘紫1号和闽紫7号品种，H和L分别代表高肥力和低肥力土壤，I和N分别代表接种根瘤菌与不接种根瘤菌处理，柱状图中不同小写字母表示相同肥力基础土下不同紫云英品种处理间差异显著($P < 0.05$)，不同大写字母表示不同土壤肥力处理间差异显著($P < 0.05$)，箱型图中不同小写字母表示不同处理组间存在显著差异($P < 0.05$)。下同。Y, X and M represent Yijiangzi, Xiangzi No.1 and Minzi No.7 varieties, respectively; H and L represent high and low fertility soils, respectively; I and N represent rhizobium inoculation and no rhizobium inoculation treatment, respectively; different lowercase letters in the bar graph indicate significant differences among treatments of different milk vetch varieties under the same fertility base soil ($P < 0.05$), and different uppercase letters indicate significant differences between soil fertility treatments ($P < 0.05$), different lowercase letters in the box plots indicate significant differences between treatment groups ($P < 0.05$). The same below.

著提高了59.93%；在不同肥力水平下不同品种间差异均不显著(图3A)。不接种根瘤菌的条件下，低肥力下的紫云英平均全氮含量相比于高肥力下显著提高了13.62%；高肥力和低肥力水平下，弋江籽的全氮含量较湘紫1号显著提高18.69%和21.83%(图2B)。高肥力下的紫云英平均吸氮量相比低肥力下显著提高了44.85%；在高肥力条件下弋江籽吸氮量较闽紫7号显著提高37.42%；低肥力条件下不同品种间差异不显著(图3B)。

接种根瘤菌缩小了不同肥力土壤下紫云英的全氮含量差异，弋江籽植株平均全氮含量最高，湘紫1号植株平均全氮含量最低。高肥力处理紫云英平均吸氮量相比低肥力显著提高52.64%，接种根瘤菌处理紫云英平均吸氮量相较于不接种根瘤菌提高13.51%，不同品种紫云英的吸氮量无显著差异(图3C~E)。

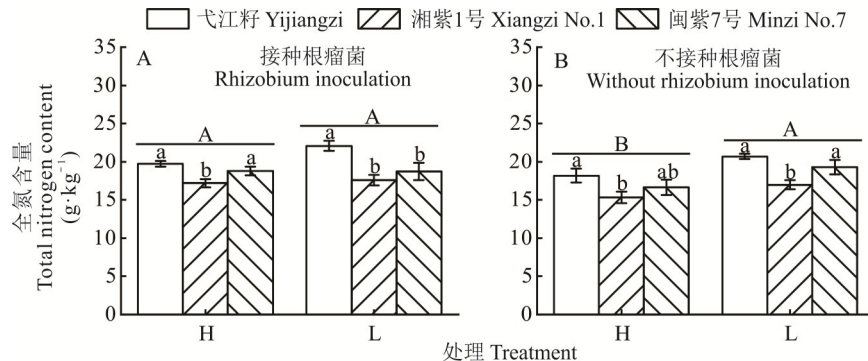


图2 不同处理下的紫云英全氮含量

Fig. 2 Total nitrogen content of milk vetch under different treatments

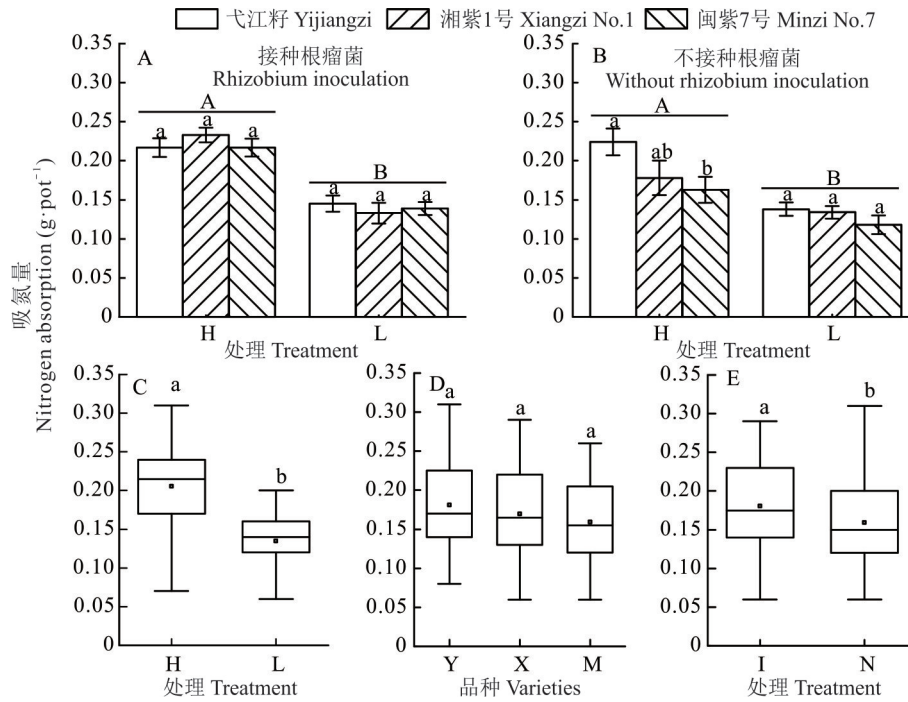


图 3 不同处理下的紫云英吸氮量

Fig. 3 Nitrogen absorption of milk vetch under different treatments

2.3 不同处理下的紫云英固氮效率和固氮量

在接种根瘤菌的条件下,低肥力下的紫云英平均固氮效率为 56.4%,显著高于高肥力下的 47.7%;其中在高肥力条件下闽紫 7 号和湘紫 1 号的固氮效率分别较弋江籽显著提高 9.9% 和 8.1%;低肥力条件下弋江籽固氮效率比闽紫 7 号显著提高 8.4%(图 4A)。高肥力下的紫云英平均固氮量相比低肥力下显著提高 38.43%;在高肥力条件下闽紫 7 号和湘紫 1 号固氮量分别较弋江籽显著提高 55.36% 和 50.00%;低肥力条件下不同品种间差异不

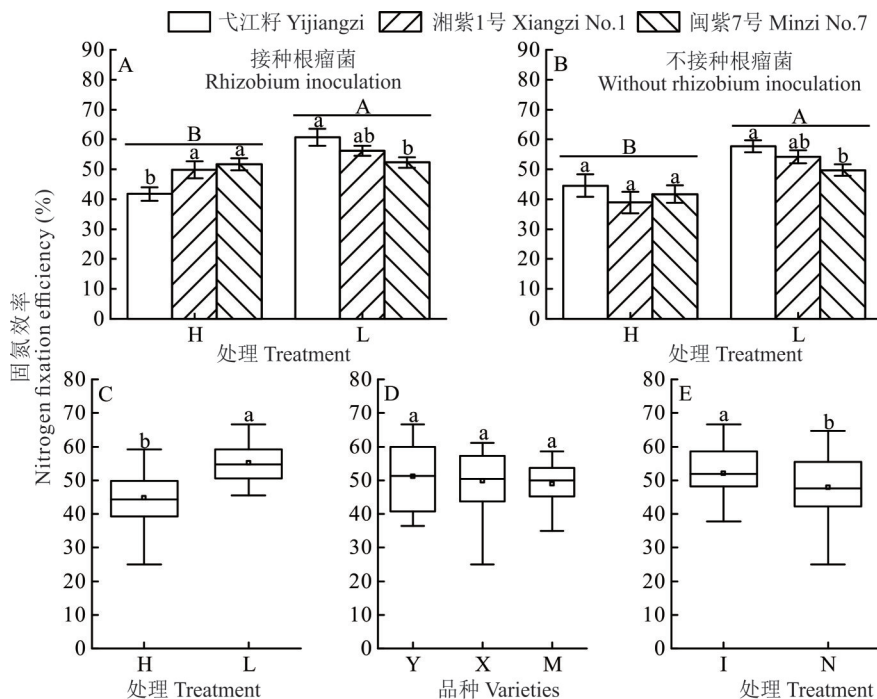


图 4 不同处理下的紫云英固氮效率

Fig. 4 Nitrogen fixation efficiency of milk vetch under different treatments

显著(图5A)。不接种根瘤菌的条件下,低肥力下的紫云英平均固氮效率为53.9%,显著高于高肥力下的41.7%;其中在高肥力条件下不同品种间无显著差异,低肥力条件下弋江籽固氮效率比闽紫7号显著高16.0%(图4B)。不同肥力间的紫云英平均固氮量无显著差异,在高肥力条件下弋江籽固氮量分别较湘紫1号和闽紫7号显著提高92.31%和29.31%;低肥力条件下不同品种间差异不显著(图5B)。

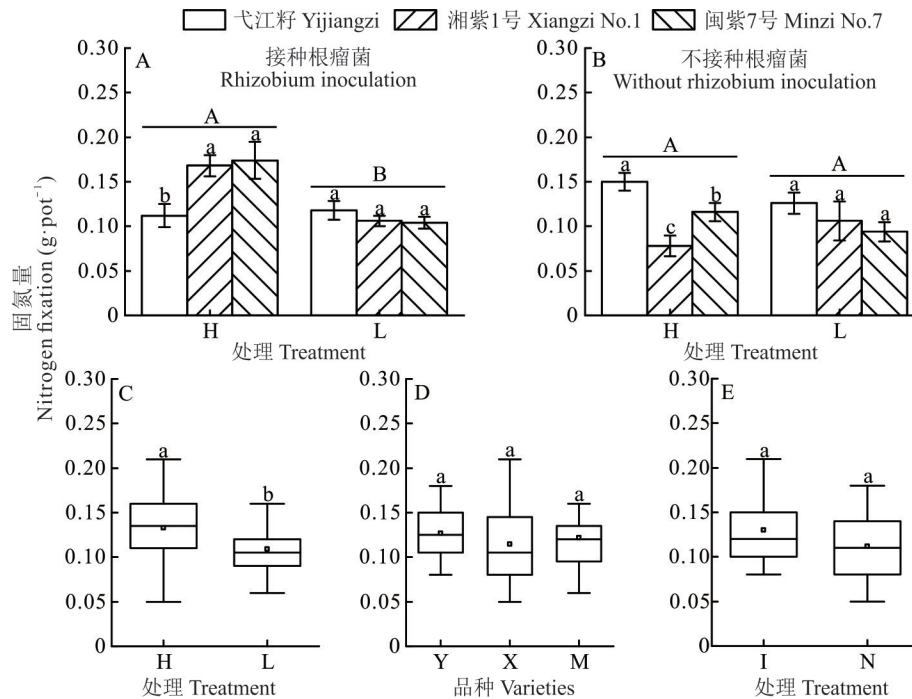


图5 不同处理下的紫云英固氮量

Fig. 5 Nitrogen fixation by milk vetch under different treatments

低肥力条件下紫云英平均固氮效率为55.1%,相比高肥力下的44.7%,显著提高10.4%,接种根瘤菌处理下紫云英平均固氮效率为52.1%,相较于不接种根瘤菌的47.8%,显著提高4.3%,不同品种对紫云英固氮效率无显著影响(图4C~E)。高肥力条件下紫云英平均固氮量相比低肥力显著提高22.0%,不同品种以及是否接种根瘤菌对紫云英固氮量均无显著影响(图5C~E)。多因素方差分析结果表明,紫云英品种和土壤肥力对紫云英固氮效率的影响存在极显著的交互作用($P=0.009$),土壤肥力和根瘤菌对紫云英固氮量的影响存在显著的交互作用($P=0.02$),紫云英品种和根瘤菌对紫云英固氮量的影响存在极显著的交互作用($P=0.001$),紫云英品种、根瘤菌和土壤肥力对紫云英固氮量的影响存在极显著的交互作用($P=0.007$,表1)。

2.4 不同处理下的紫云英植株全磷含量及吸收量

弋江籽在不同处理下的全磷含量和吸收量平均值最高、闽紫7号最低(图6)。在接种根瘤菌的条件下,高肥力下的紫云英植株平均全磷含量相比低肥力下显著提高了8.3%;不同肥力水平下弋江籽植株全磷含量最高,其

表1 不同处理因素对紫云英固氮效率和固氮量的交互影响
Table 1 Interaction effect of different treatment factors on nitrogen fixation efficiency and nitrogen fixation in milk vetch

处理因素 Treatment factors	F	
	固氮效率 Nitrogen fixation efficiency	固氮量 Nitrogen fixation
SF	49.71***	10.23***
MV	0.84ns	0.87ns
RI	8.35**	6.19*
SF×MV	5.24**	2.24ns
SF×RI	1.37ns	5.75*
MV×RI	1.98ns	7.88**
SF×MV×RI	2.49ns	5.49**

SF: 土壤肥力 Soil fertility; MV: 紫云英品种 Milk vetch varieties; RI: 根瘤菌 Rhizobium. ns: 无显著差异 No significant difference; *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$.

中在高肥力条件下分别较湘紫1号和闽紫7号显著提高21.38%和17.46%,低肥力条件下分别较湘紫1号和闽紫7号显著提高24.32%和30.19%(图6A)。高肥力下的紫云英植株平均磷吸收量相比低肥力下显著提高了99.52%;高肥力条件下不同品种间无显著差异;低肥力条件下弋江籽植株磷吸收量较闽紫7号显著提高41.86%(图6C)。不接种根瘤菌的条件下,不同肥力间的紫云英植株平均全磷含量无显著差异,不同肥力水平下均为弋江籽植株全磷含量最高,其中在高肥力条件下较闽紫7号显著提高32.16%,低肥力条件下分别较湘紫1号和闽紫7号显著提高21.32%和24.85%(图6B)。高肥力下的紫云英植株平均磷吸收量相比低肥力下显著提高了74.54%;在不同肥力水平下弋江籽植株磷吸收量均最高,在高肥力和低肥力下较闽紫7号分别显著提高59.51%和33.70%(图6D)。

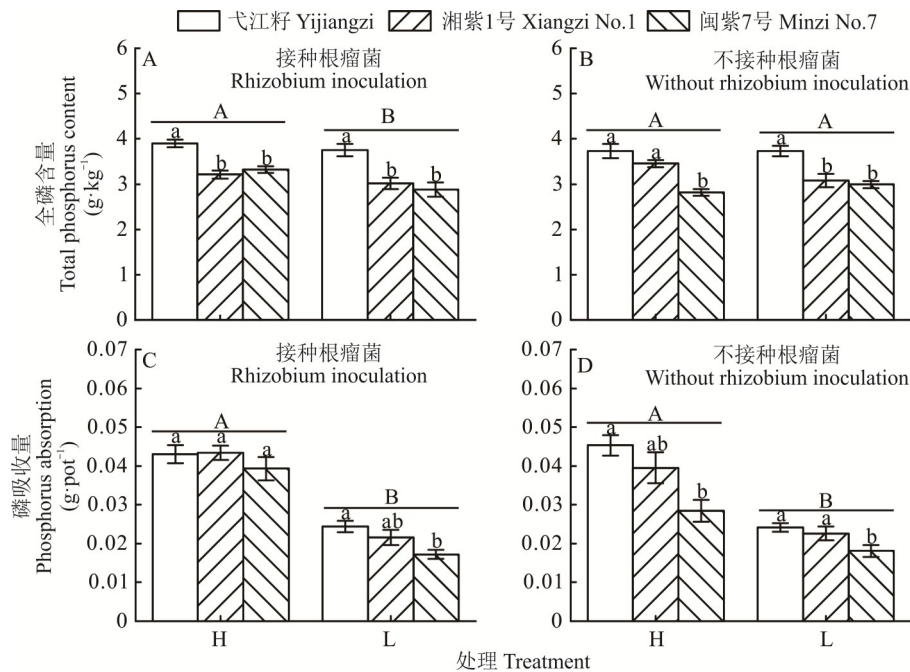


图6 不同处理下的紫云英植株磷含量和吸收量

Fig. 6 Phosphorus content and absorption of milk vetch plants under different treatments

2.5 不同处理下的紫云英植株全钾含量及吸收量

在接种根瘤菌的条件下,高肥力下的紫云英植株平均全钾含量相比低肥力下显著提高了26.3%;在高肥力条件下不同品种间无显著差异,低肥力条件下弋江籽植株全钾含量分别较湘紫1号和闽紫7号显著提高14.87%和25.52%(图7A)。相比低肥力,高肥力下的紫云英植株平均钾吸收量显著提高133.75%;其中在高肥力条件下湘紫1号植株钾吸收量较弋江籽显著提高17.87%;低肥力条件下弋江籽和湘紫1号植株钾吸收量分别较闽紫7号显著提高37.12%和30.60%(图7C)。不接种根瘤菌的条件下,高肥力下的紫云英植株平均全钾含量相比低肥力下显著提高了19.46%;不同肥力水平下均为弋江籽植株全钾含量最高,高肥力条件下分别较湘紫1号和闽紫7号显著提高16.20%和22.77%,低肥力条件下分别较湘紫1号和闽紫7号显著提高19.95%和17.93%(图7B)。高肥力下的紫云英植株平均钾吸收量相比低肥力下显著提高了107.47%,不同肥力水平下平均钾吸收量也均为弋江籽最高,在高肥力和低肥力条件下分别较闽紫7号显著提高47.00%和29.28%(图7D)。综上,根瘤菌接种下高肥力对紫云英植株全钾含量及吸收量的增益效果更显著,弋江籽植株全钾含量及钾吸收量最高。

2.6 不同处理下的土壤性状

高肥力条件下,相较于不接种根瘤菌,根瘤菌接种显著提高土壤平均pH值。在接种根瘤菌的条件下,弋江籽的土壤pH值显著高于闽紫7号和湘紫1号土壤;闽紫7号的土壤有机碳和全氮含量显著高于湘紫1号和弋江籽土

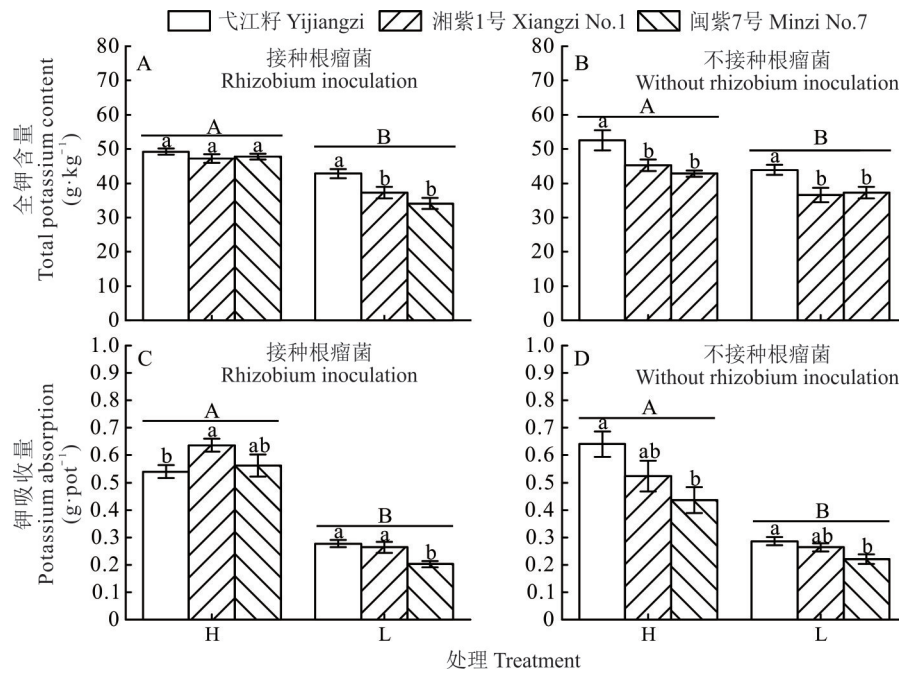


图7 不同处理下的紫云英钾含量和吸收量

Fig. 7 Potassium content and absorption of milk vetch under different treatments

壤;弋江籽的土壤速效钾含量显著高于湘紫1号土壤;弋江籽的土壤铵态氮含量显著低于湘紫1号和闽紫7号土壤;湘紫1号的土壤硝态氮含量显著高于弋江籽土壤。不接种根瘤菌的条件下,湘紫1号的土壤pH显著高于闽紫7号土壤;闽紫7号的土壤有机碳、全氮、有效磷和速效钾含量均最高;其中土壤全碳与全氮含量显著高于弋江籽土壤,而土壤有效磷和速效钾含量显著高于弋江籽和湘紫1号土壤;土壤硝态氮含量显著高于弋江籽土壤(表2)。

低肥力条件下,相比不接种根瘤菌,接种根瘤菌下的土壤速效钾、铵态氮和硝态氮的平均含量均显著提高。在接种根瘤菌的条件下,弋江籽的土壤pH值、硝态氮含量显著高于闽紫7号和湘紫1号土壤;闽紫7号的土壤有效磷含量显著高于湘紫1号和弋江籽土壤。不接种根瘤菌的条件下,弋江籽的土壤pH值显著高于湘紫1号和闽紫7号土壤;闽紫7号的土壤有效磷含量显著高于弋江籽和湘紫1号土壤;闽紫7号的土壤速效钾含量显著低于湘紫1号和弋江籽土壤;弋江籽的土壤硝态氮和铵态氮含量显著高于湘紫1号土壤(表2)。

2.7 不同因素对紫云英生物固氮的贡献

运用随机森林方法分析了不同处理下的土壤性状以及土壤肥力、根瘤菌接种和品种对紫云英地上部生物量、固氮效率和固氮量的相对贡献(图8)。

土壤速效钾、有效磷、pH和全氮含量对紫云英地上部生物量具有显著影响,贡献率分别为15.87%、15.69%、15.25%和11.80%;土壤有机碳、硝态氮和铵态氮含量对紫云英地上部生物量无显著影响。土壤肥力、根瘤菌接种及紫云英品种对紫云英地上部生物量的贡献率依次为土壤肥力、紫云英品种和根瘤菌接种,其中土壤肥力的贡献率最大,为41.82%(图8),根瘤菌接种及紫云英品种对其无显著影响。

土壤速效钾、有效磷、pH和全氮含量对紫云英吸氮量具有显著影响,贡献率分别达到19.98%、13.60%、12.51%和11.87%(图8)。土壤有机碳、硝态氮和铵态氮含量对紫云英吸氮量无显著影响。土壤肥力、根瘤菌接种及紫云英品种对紫云英吸氮量的贡献率依次为土壤肥力、根瘤菌接种和紫云英品种,其中土壤肥力的贡献率为36.07%,根瘤菌接种为12.61%(图8),紫云英品种对其无显著影响。

土壤速效钾、有效磷、pH对紫云英固氮量具有显著影响,贡献率分别达到10.03%、9.38%和8.28%(图8)。土壤有机碳、全氮、硝态氮和铵态氮含量对紫云英固氮量无显著影响。土壤肥力、根瘤菌接种及紫云英品种对

表2 不同处理下的土壤基础肥力性状

Table 2 Soil basic fertility properties of different treatments

处理 Treatment	pH	有机碳 Organic carbon (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N (g·kg ⁻¹)	有效磷 Available P (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg·kg ⁻¹)	铵态氮 Ammonium N (mg·kg ⁻¹)	硝态氮 Nitrate N (mg·kg ⁻¹)
IHY	5.50±0.02a	10.70±0.69b	1.02±0.054b	31.4±3.7a	114.7±9.3a	2.2±0.9b	2.2±0.6b
IHM	5.42±0.06b	12.23±1.24a	1.27±0.014a	33.3±2.7a	111.9±7.2a	3.4±0.8a	2.5±0.4ab
IHX	5.41±0.07b	10.60±0.52b	1.04±0.055b	30.8±1.3a	105.2±4.1b	3.9±1.2a	2.9±0.7a
IH	5.44±0.07A	11.28±1.24A	1.11±0.136A	31.84±2.9A	110.6±8.0A	2.5±0.6A	3.2±1.2A
NHY	5.50±0.04ab	11.03±0.56b	1.04±0.048b	31.7±2.4b	104.3±6.2c	3.0±1.6a	2.2±0.7b
NHM	5.38±0.08b	13.46±3.26a	1.29±0.231a	35.1±1.6a	123.3±8.2a	2.7±0.9a	3.1±0.9a
NHX	5.44±0.05a	11.82±0.40ab	1.25±0.360a	30.9±2.4b	111.6±6.0b	3.2±0.5a	2.6±0.9ab
NH	5.40±0.06B	12.10±2.12A	1.19±0.231A	32.59±2.8A	113.1±11.2A	2.6±1.2A	3.0±1.1A
ILY	6.08±0.04a	8.85±0.39a	0.82±0.038a	14.6±0.4c	81.5±6.2a	2.8±0.5a	2.9±0.4a
ILM	5.74±0.05c	9.19±0.82a	0.82±0.034a	16.8±0.8a	77.2±7.2a	3.0±0.5a	2.0±0.5b
ILX	5.84±0.04b	8.98±0.43a	0.83±0.024a	15.4±0.8b	81.4±5.1a	2.6±0.6a	1.9±0.2b
IL	5.89±0.15A	9.01±0.58A	0.82±0.032A	15.6±1.2A	80.0±6.3A	2.8±0.5A	2.3±0.6A
NLY	5.94±0.02a	8.73±0.38a	0.81±0.039a	14.5±0.6c	79.4±3.6a	2.7±0.4a	2.1±0.5a
NLM	5.76±0.03c	8.80±0.42a	0.79±0.047a	17.7±1.1a	65.4±8.8b	2.6±0.4ab	2.0±0.3ab
NLX	5.81±0.03b	8.82±0.25a	0.82±0.021a	15.7±1.0b	75.7±7.9a	2.3±0.4b	1.7±0.3b
NL	5.84±0.08A	8.78±0.34A	0.81±0.037A	16.0±1.6A	73.5±9.2B	2.5±0.4B	1.9±0.4B

注: 同列小写字母表示相同肥力基础土壤与相同根瘤菌处理下不同紫云英品种间差异显著($n=10, P<0.05$), 不同大写字母表示在相同肥力基础土壤处理下不同根瘤菌接种处理组均值间差异显著($n=30, P<0.05$)。IHY: 接种根瘤菌+高肥力+弋江籽; IHM: 接种根瘤菌+高肥力+闽紫7号; IHX: 接种根瘤菌+高肥力+湘紫1号; IH: 接种根瘤菌+高肥力处理均值; NHY: 不接种根瘤菌+高肥力+弋江籽; NHM: 不接种根瘤菌+高肥力+闽紫7号; NHX: 不接种根瘤菌+高肥力+湘紫1号; NH: 不接种根瘤菌+高肥力处理均值; ILY: 接种根瘤菌+低肥力+弋江籽; ILM: 接种根瘤菌+低肥力+闽紫7号; ILX: 接种根瘤菌+低肥力+湘紫1号; IL: 接种根瘤菌+低肥力处理均值; NLY: 不接种根瘤菌+低肥力+弋江籽; NLM: 不接种根瘤菌+低肥力+闽紫7号; NLX: 不接种根瘤菌+低肥力+湘紫1号; NL: 不接种根瘤菌+低肥力处理均值。

Note: Lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments of different milk vetch varieties with the same fertility basal soil and the same rhizobium treatment ($n=10, P<0.05$), and different capital letters indicate significant differences between the means of different rhizobium inoculation treatment groups under the same fertility base soil treatment ($n=30, P<0.05$). IHY: Rhizobium inoculation+high fertility+Yijiangzi; IHM: Rhizobium inoculation+high fertility+Minzi No. 7; IHX: Rhizobium inoculation+high fertility+Xiangzi No. 1; IH: Mean value of rhizobium inoculation+high fertility; NHY: Without rhizobium inoculation+high fertility+Yijiangzi; NHM: Without rhizobium inoculation+high fertility+Minzi No. 7; NHX: Without rhizobium inoculation+high fertility+Xiangzi No. 1; NH: Mean value of without rhizobium inoculation+high fertility; ILY: Rhizobium inoculation+low fertility+Yijiangzi; ILM: Rhizobium inoculation+low fertility+Minzi No. 7; ILX: Rhizobium inoculation+low fertility+Xiangzi No. 1; IL: Mean value of rhizobium inoculation+low fertility; NLY: Without rhizobium inoculation+low fertility+Yijiangzi; NLM: Without rhizobium inoculation+low fertility+Minzi No. 7; NLX: Without rhizobium inoculation+low fertility+Xiangzi No. 1; NL: Mean value of without rhizobium inoculation+low fertility.

紫云英固氮量的贡献率依次为土壤肥力、根瘤菌接种和紫云英品种, 贡献率分别为17.16%、16.71%和12.72%(图8)。

3 讨论

3.1 土壤肥力和根瘤菌接种对紫云英生长、养分吸收和生物固氮的影响

土壤肥力是影响紫云英生长的重要因素^[27]。本研究中, 紫云英生物量和氮吸收对土壤肥力有不同响应, 高肥力下紫云英吸氮量更高, 但低肥力下植株氮含量更高, 可能是由于较低的土壤肥力促进了紫云英的生物固氮, 进而提高植株氮含量^[28-30], 而由于生物固氮的“氮阻遏”现象^[31], 从而抑制了高肥力条件下紫云英的生物固氮作用。接种根瘤菌能够促进紫云英根瘤的形成, 提高根瘤数量和活性, 提升紫云英的固氮效率和氮吸收量^[21]。李友国等^[32]的研究指出, 豆科植物苗期施用少量氮肥, 可以加强植株光合作用、促进根系生长, 为根瘤菌感染和结瘤创造

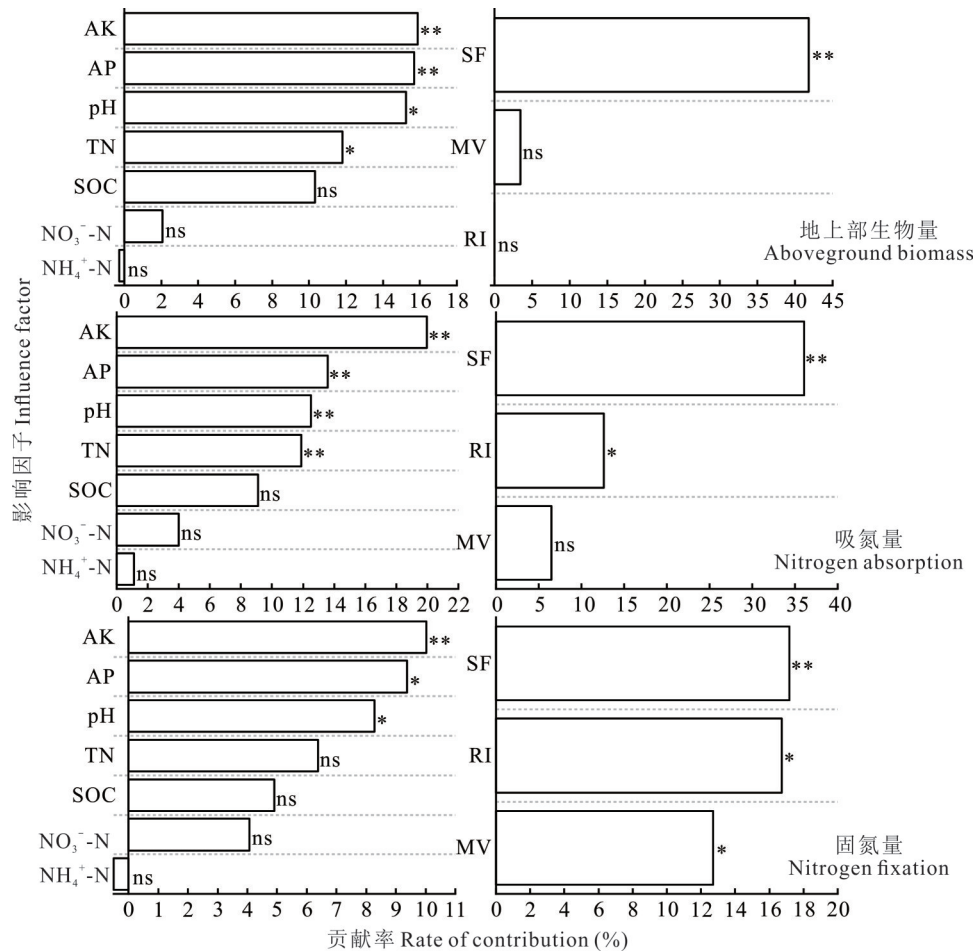


图8 土壤性状和不同处理因素对地上部生物量、吸氮量和固氮量的贡献

Fig. 8 Contribution of soil properties and different treatment factors to aboveground biomass, nitrogen absorption and nitrogen fixation

SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; pH: 土壤 pH Soil pH; TN: 土壤全氮 Soil total nitrogen; AK: 土壤速效钾 Soil available K; AP: 土壤有效磷 Soil available P; NO₃⁻-N: 土壤硝态氮 Soil nitrate N; NH₄⁺-N: 土壤铵态氮 Soil ammonium N; SF: 土壤肥力 Soil fertility; MV: 紫云英品种 Milk vetch varieties; RI: 根瘤菌 Rhizobium. ns: 无显著差异 No significant difference; *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

较好条件。本研究紫云英品种、土壤肥力和根瘤菌对紫云英固氮量的影响有显著交互作用,根瘤菌接种能有效促进高肥力条件下的紫云英生物固氮,说明根瘤菌不仅和紫云英品种之间存在联系^[8],同时与土壤肥力之间也存在显著的相互作用,高肥力条件能够通过为根瘤菌感染和结瘤创造环境来加强根瘤菌的接种效果,而根瘤菌接种同样能够有效促进高肥力对紫云英地上部生物量、植株吸氮量和固氮量的增益效果。

3.2 土壤理化性质对紫云英生长和固氮的影响

稻田冬种紫云英可有效培肥土壤,增加土壤养分含量,提高土壤酶活性^[9]。土壤是根瘤菌和豆科植物构建共生体系的主要场所,土壤理化性质是影响固氮微生物活性和生物固氮的重要因素^[33]。土壤全氮含量提高时,可以改善土壤供氮能力,促进植物对氮素的吸收和生物量提高^[34-35]。本研究中,土壤速效养分显著影响紫云英生物量、固氮量及磷、钾养分吸收量,说明土壤中速效养分含量充足可促进紫云英生长、固氮和养分吸收,与前人研究结果相似^[32,36]。有研究表明适宜的磷、钾肥配比能够改善紫云英的生长性状并提高生物量和养分截获量^[37]。土壤有效磷含量提高可以增加紫云英的生物量,并对氮素的吸收和利用有协同作用。磷肥能够促进紫云英体内铵态氮和硝态氮的同化,进而提高紫云英对氮素的吸收和利用,同时磷肥还能通过促进根瘤菌的结瘤性和根瘤中血红蛋白的含量,增加有效根瘤,从而固定更多的氮素,实现以磷增氮^[38]。良好的土壤理化条件,为紫云英生长提供充足的磷钾养分,从而获得较高生物量,提高紫云英的养分截获能力,翻压还田后能够释放更多养分供后茬作

物利用。

土壤pH对紫云英吸氮量同样具有极显著影响,在pH较低的土壤中,紫云英残体分解释放的氮多数以铵态氮形态存在,而在pH较高的土壤中,则主要以硝态氮形态存在^[39]。土壤pH值会直接影响固氮酶的活性,进而影响生物固氮的效率^[40]。本研究结果显示,和基础土相比,种植紫云英后土壤pH值显著提高,尤其是接种根瘤菌处理组的土壤pH值提升幅度更为明显,可能是接种根瘤菌促进根瘤早形成,并分泌碱性物质,从而导致土壤pH值提高^[41]。土壤pH对紫云英固氮量具有极显著影响,与前人的研究结果相似^[42]。

4 结论

紫云英生物固氮作用对土壤肥力和接种根瘤菌有不同响应。高肥力土壤能显著提高紫云英的生物量、吸氮量与固氮量,但低肥力条件下的紫云英固氮效率更高。接种根瘤菌能够有效促进紫云英生物固氮作用。土壤肥力与接种根瘤菌对紫云英生物固氮的影响存在显著互作效应,土壤速效钾和有效磷含量是影响紫云英固氮量的主要因素。本研究是在盆栽条件下开展的,所得到的紫云英固氮效率相比田间试验偏低,后期将进一步开展田间试验验证。

参考文献 References:

- [1] Galloway J N, Townsend A R, Erismann J W, *et al.* Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 2008, 320(5878): 889—892.
- [2] Voisin A S, Guéguen J, Huyghe C, *et al.* Legumes for feed, food, biomaterials and bioenergy in Europe: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2014, 34(2): 361—380.
- [3] Mueller T, Thorup-Kristensen K. N-fixation of selected green manure plants in an organic crop rotation. *Biological Agriculture & Horticulture*, 2001, 18(4): 345—363.
- [4] Cao W D, Gao S J. Chinese green manure development strategy by 2025. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023, 44(12): 1—9.
曹卫东, 高嵩涓. 到2025年中国绿肥发展策略. *中国农业资源与区划*, 2023, 44(12): 1—9.
- [5] Gao J S, Cao W D, Li D C, *et al.* Effects of long-term double-rice and green manure rotation on rice yield and soil organic matter in paddy field. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(16): 4542—4548.
高菊生, 曹卫东, 李冬初, 等. 长期双季稻绿肥轮作对水稻产量及稻田土壤有机质的影响. *生态学报*, 2011, 31(16): 4542—4548.
- [6] Chen J R, Qin W J, Wang S X, *et al.* Effects of reduced chemical fertilizer combined with Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) incorporation on rice yield and nitrogen use efficiency in double-rice cropping system. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(6): 280—287.
陈静蕊, 秦文婧, 王少先, 等. 化肥减量配合紫云英还田对双季稻产量及氮肥利用率的影响. *水土保持学报*, 2019, 33(6): 280—287.
- [7] Li J M, Huang Q H, Yuan T Y, *et al.* Effects of long-term green manure application on rice yield and soil nutrients in paddy soil. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2011, 17(3): 563—570.
李继明, 黄庆海, 袁天佑, 等. 长期施用绿肥对红壤稻田水稻产量和土壤养分的影响. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(3): 563—570.
- [8] Chang D N, Ma X T, Zhou G P, *et al.* Symbiotic compatibility of different rhizobia strains with important Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus*) cultivars. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(12): 171—180.
常单娜, 马晓彤, 周国朋, 等. 不同根瘤菌与紫云英主栽品种的共生匹配性. *草业学报*, 2022, 31(12): 171—180.
- [9] Gao S J, Zhou G P, Cao W D. Effects of milk vetch (*Astragalus sinicus*) as winter green manure on rice yield and rate of fertilizer application in rice paddies in south China. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(12): 2115—2126.
高嵩涓, 周国朋, 曹卫东. 南方稻田紫云英作冬绿肥的增产节肥效应与机制. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(12): 2115—2126.
- [10] Gao S J, Zhou G P, Chang D N, *et al.* Southern China can produce more high-quality rice with less N by green manuring. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 196: 107025.
- [11] Zhang J L, Nie J, Cao W D, *et al.* Long-term green manuring to substitute partial chemical fertilizer simultaneously improving

- crop productivity and soil quality in a double-rice cropping system. *European Journal of Agronomy*, 2023, 142: 126641.
- [12] Yang B J, Huang G Q, Chen H J, *et al.* Optimum combination of winter green manure plowed and nitrogen application levels for high nitrogen uptake and utilization in rice. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(5): 1187–1195.
杨滨娟, 黄国勤, 陈洪俊, 等. 利于水稻氮素吸收的绿肥翻压量和施氮水平研究. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(5): 1187–1195.
- [13] Qian C C, Wang S B, Yang B J, *et al.* Effect of combined application of Chinese milk vetch and nitrogen fertilizer on nitrogen uptake, utilization and dry matter accumulation in early rice. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(4): 563–571.
钱晨晨, 王淑彬, 杨滨娟, 等. 紫云英与氮肥配施对早稻干物质生产及氮素吸收利用的影响. *中国生态农业学报*, 2017, 25(4): 563–571.
- [14] Wang J H, Cao K, Zhang X. Effects of incorporation amounts of Chinese milk vetch on nutrient uptake and yield of single cropping late rice. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(1): 156–163.
王建红, 曹凯, 张贤. 紫云英翻压量对单季晚稻养分吸收和产量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(1): 156–163.
- [15] Yang L, Nie J, Xu C X, *et al.* Biological nitrogen fixation of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) as affected by exogenous carbon and nitrogen input. *Symbiosis*, 2021, 85(1): 69–77.
- [16] Cai S Y, Pittelkow C M, Zhao X, *et al.* Winter legume-rice rotations can reduce nitrogen pollution and carbon footprint while maintaining net ecosystem economic benefits. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 195: 289–300.
- [17] Gao P, Yang Z C, Gao J S, *et al.* Study on the efficiency of inoculating rhizobia into *Astragalus sinicus* L. *Hunan Agricultural Sciences*, 2020(3): 20–22.
高鹏, 杨志长, 高菊生, 等. 紫云英接种根瘤菌效果研究. *湖南农业科学*, 2020(3): 20–22.
- [18] Lin D H, Gu R S. *Milk vetch in China*. Fuzhou: Fujian Science and Technology Press, 2000: 52–67.
林多胡, 顾荣申. *中国紫云英*. 福州: 福建科学技术出版社, 2000: 52–67.
- [19] Pan F X, Lu J W, Li X K, *et al.* Effect of fertilizer amount on yield and nutrient accumulation of green manures. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(2): 158–162.
潘福霞, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 不同施肥量对绿肥产量和养分积累的影响. *中国生态农业学报*, 2012, 20(2): 158–162.
- [20] Zhang M, Shi P F, Li B Y, *et al.* Phenotypic diversity and podding characteristics of 70 Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus*) germplasm lines cultivated in Southern Henan. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(3): 168–180.
张梦, 史鹏飞, 李本银, 等. 70份紫云英种质资源表型多样性及其在豫南地区的结实特征. *草业学报*, 2022, 31(3): 168–180.
- [21] Zhong S J, Lin C, Li W X, *et al.* Effect of matching *Astragalus sinicus* L. with rhizobium on nodule formation and nitrogen fixation. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 29(7): 691–697.
钟少杰, 林诚, 李文霞, 等. 不同紫云英品种与根瘤菌匹配对结瘤固氮的影响. *福建农业学报*, 2014, 29(7): 691–697.
- [22] Lin X J, Cao W D, Wu Y Q, *et al.* Advance in *Astragalus sinicus* research. *Pratacultural Science*, 2011, 28(1): 135–140.
林新坚, 曹卫东, 吴一群, 等. 紫云英研究进展. *草业科学*, 2011, 28(1): 135–140.
- [23] The Office of National Soil Survey. *China soil*. Beijing: China Agriculture Press, 1998.
全国土壤普查办公室. *中国土壤*. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [24] Chen S Y, Xu C, Zhang W J, *et al.* Combined application of biochar and nitrogen fertilizers reducing heavy metals contents in potted rice planted in contaminated soil. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(14): 189–197.
陈少毅, 许超, 张文静, 等. 生物质炭与氮肥配施降低水稻重金属含量的盆栽试验. *农业工程学报*, 2014, 30(14): 189–197.
- [25] Peoples M B, Chalk P M, Unkovich M J, *et al.* Can differences in ¹⁵N natural abundance be used to quantify the transfer of nitrogen from legumes to neighbouring non-legume plant species? *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 87: 97–109.
- [26] Zhen C, Wang H Y, Lei X D, *et al.* Digital mapping of soil total nitrogen in Wangyedian experimental forest farm based on random forest model. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2024, 43(3): 249–257.
甄诚, 王海燕, 雷相东, 等. 基于随机森林模型的旺业甸实验林场土壤全氮数字制图. *华中农业大学学报*, 2024, 43(3): 249–257.
- [27] Yuan M M, Liu Q, Zhang S L, *et al.* Effects of biological nitrogen fixation and plow-down of green manure crop on rice yield and soil nitrogen in paddy field. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(4): 797–803.
袁慢慢, 刘勤, 张少磊, 等. 太湖地区稻田绿肥固氮量及绿肥还田对水稻产量和稻田土壤氮素特征的影响. *土壤学报*,

- 2011, 48(4): 797–803.
- [28] Hu F L, Zhao C, Feng F X, *et al.* Improving N management through intercropping alleviates the inhibitory effect of mineral N on nodulation in pea. *Plant and Soil*, 2017, 412(1): 235–251.
- [29] Cai D T. A study of the nutritional character and its green manure value of *Astragalus sinicus*. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1987(1): 57–61.
蔡大同. 紫云英营养特性、栽培要点和肥效. *南京农业大学学报*, 1987(1): 57–61.
- [30] Zhang S H, Zhang Y, Ma X Y, *et al.* Mechanisms underlying loss of plant biodiversity by atmospheric nitrogen deposition in grasslands. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(4): 1252–1261.
张世虎, 张悦, 马晓玉, 等. 大气氮沉降影响草地植物物种多样性机制研究综述. *生态学报*, 2022, 42(4): 1252–1261.
- [31] Salvagiotti F, Cassman K G, Specht J E, *et al.* Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. *Field Crops Research*, 2008, 108(1): 1–13.
- [32] Li Y G, Zhou J C. Main factors affecting symbiotic nitrogen fixation efficiency of rhizobia and genetic modification. *Microbiology of Bulletin*, 2002(6): 86–89.
李友国, 周俊初. 影响根瘤菌共生固氮效率的主要因素及遗传改造. *微生物学通报*, 2002(6): 86–89.
- [33] Yu F M, Lin J N, Xie D Y, *et al.* Soil properties and heavy metal concentrations affect the composition and diversity of the diazotrophs communities associated with different land use types in a mining area. *Applied Soil Ecology*, 2020, 155: 103669.
- [34] Chang D N, Wang H, Zhou G P, *et al.* Yield and nitrogen uptake of rice and soil nitrogen supply capacity under fertilizer reduction in a rice–rice–Chinese milk vetch rotation system, northern Jiangxi Province, China. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(8): 1449–1460.
常单娜, 王慧, 周国朋, 等. 赣北地区稻—稻—紫云英轮作体系减施化肥对水稻产量、氮素吸收及土壤供氮能力的影响. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(8): 1449–1460.
- [35] Qi Y, Huang Y M, Wang Y, *et al.* Biomass and its allocation of four grassland species under different nitrogen levels. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(18): 5121–5129.
祁瑜, 黄永梅, 王艳, 等. 施氮对几种草地植物生物量及其分配的影响. *生态学报*, 2011, 31(18): 5121–5129.
- [36] Yan J, Han X Z, Ding J, *et al.* Responses of growth, nodulation and yield of soybean to different nitrogen and phosphorus fertilization management. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(2): 318–325.
严君, 韩晓增, 丁娇, 等. 东北黑土区大豆生长、结瘤及产量对氮、磷的响应. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(2): 318–325.
- [37] Wang F, Liu C L, He C M, *et al.* Appropriate ratios of phosphate and potassium fertilizers and 50% return of rice straw enhanced yield and nutrient capture of Chinese milk vetch. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(12): 81–89.
王飞, 刘彩玲, 何春梅, 等. 适宜磷、钾肥配比及稻秆半量还田提高紫云英产量与养分截获. *草业学报*, 2021, 30(12): 81–89.
- [38] Wang Y T, Cao W D, Zou C M, *et al.* Effects of phosphorus and potassium on the growth and soil properties of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.). *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(1): 54–62.
王雨婷, 曹卫东, 邹长明, 等. 磷钾对紫云英(*Astragalus sinicus* L.)生长和土壤性状的影响. *中国土壤与肥料*, 2022(1): 54–62.
- [39] Wang L N, Yu Y Q, Lu D X, *et al.* Soil pH modulates nitrogen transfer from nitrogen-fixing plants to non-nitrogen-fixing plants. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2022, 46(1): 1–17.
- [40] Chen J, Luo T S, Zhou Z, *et al.* Research advances in nitrogen deposition effects on microbial processes involved in soil nitrogen cycling in tropical and subtropical forests. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(23): 8528–8538.
陈洁, 骆士寿, 周璋, 等. 氮沉降对热带亚热带森林土壤氮循环微生物过程的影响研究进展. *生态学报*, 2020, 40(23): 8528–8538.
- [41] Zhu D. Influence of beneficial microorganisms on rhizosphere micro-ecology with aciduric kudzu, rhizobium meliloti and highland barley as examples. Chongqing: Southwest University, 2014.
朱丹. 有益微生物对根际微生态的影响——以耐酸葛藤、苜蓿根瘤菌和秦青稞菌肥为例. 重庆: 西南大学, 2014.
- [42] Ibekwe A M, Angle J S, Chaney R L, *et al.* Enumeration and N₂ fixation potential of *Rhizobium leguminosarum* biovar *trifolii* grown in soil with varying pH values and heavy metal concentrations. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1997, 61(2): 103–111.