中国农业大学学报 2026,31(12):121-134
Journal of China Agricultural University http://zgnydxxb.ijournals.cn

马智鸣,张金传,张宇轩,冯文豪,曾昭海,臧华栋. 燕麦大豆带状复合种植模式下作物根系形态与氮素吸收特征[J]. 中国农业大学学报,2026,31(12):121-134.
MA Zhiming, ZHANG Jinchuan, ZHANG Yuxuan, FENG Wenhao, ZENG Zhaohai, ZANG Huadong. Root morphology and nitrogen uptake characteristics of crops in the oat-soybean strip intercropping system[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(12): 121-134.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.12.10

燕麦大豆带状复合种植模式下作物根系形态与氮素吸收特征

马智鸣[1,2] 张金传[1,2] 张宇轩[1,2] 冯文豪[1,2] 曾昭海[1,2] 臧华栋[1,2*]

(1. 中国农业大学 农学院/玉米生物育种国家重点实验室, 北京 100193;
2. 农业农村部农作制度重点实验室, 北京 100193)

摘 要 为探究燕麦大豆带状复合种植模式下作物根系形态和根际土壤氮循环酶活性对种间氮素竞争与吸收的影响,基于2019年在河北省张北县建立的田间定位试验,设置燕麦大豆带状间作(IOS)、燕麦单作(MO)和大豆单作(MS)3种种植模式,于2021年燕麦拔节期和灌浆期,测定2种作物的地上部生物量、氮素吸收量、0—20 cm土层根系形态指标(根干重密度、根长密度、根表面积密度、根体积密度),以及根际土壤β-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(NAG)、L-亮氨酸氨基肽酶(LEU)活性,采用单因素方差分析、相关性分析和主成分分析解析2种作物根系形态特征和根际土壤酶活性的变化及其对间作系统氮吸收的驱动作用。结果表明:间作模式下系统的氮当量比(NER)从燕麦拔节期的1.05降至灌浆期的0.86。在燕麦拔节期,间作燕麦根干重密度、根长密度、根表面积密度、根体积密度均与单作相比无显著变化,而氮吸收量较单作增加24.0%($P<0.05$)。间作大豆氮吸收量较单作降低13.8%($P<0.05$),根系呈现"细长化"生长,根长密度较单作增加26.9%($P<0.05$),根干重密度、根表面积密度和根体积密度下降20.9%~41.0%($P<0.05$)。燕麦灌浆期,间作燕麦的氮吸收量较单作增加17.9%($P<0.05$),根干重密度、根长密度、根体积密度分别较单作增加28.2%~63.2%($P<0.05$),根际土壤NAG和LEU活性分别较单作升高17.5%和39.8%($P<0.05$)。尽管间作大豆的根际土壤NAG和LEU活性较单作分别高28.2%和26.1%($P<0.05$),但间作大豆的根干重密度和根体积密度较单作分别下降33.2%和50.4%($P<0.05$),最终氮吸收量较单作降低47.7%($P<0.05$)。综上,燕麦大豆带状复合种植模式在燕麦拔节期具有氮素吸收优势,而在燕麦灌浆期,间作燕麦氮素吸收量的增幅难以弥补大豆氮吸收量的降幅,导致系统氮素吸收优势由强转弱。因此,燕麦大豆带状复合种植模式应重点关注燕麦灌浆期大豆的氮素供给,以维持带状复合种植模式中2种作物全生育期内氮素吸收的平衡和生产力。

关键词 燕麦大豆带状间作; 根系形态; 氮素吸收; 氮素竞争; 氮循环酶活性

中图分类号 S314 **文章编号** 1007-4333(2026)12-0121-14 **文献标志码** A

Root morphology and nitrogen uptake characteristics of crops in the oat-soybean strip intercropping system

MA Zhiming[1,2], ZHANG Jinchuan[1,2], ZHANG Yuxuan[1,2], FENG Wenhao[1,2], ZENG Zhaohai[1,2], ZANG Huadong[1,2*]

(1. College of Agronomy and Biotechnology/State Key Laboratory of Maize Bio-Breeding, China Agricultural University, Beijing 100193, China;
2. Key Laboratory of Farming System of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China)

Abstract To investigate the effects of root morphology and rhizosphere soil nitrogen cycling enzyme activities on interspecific nitrogen (N) competition and uptake in an oat-soybean strip intercropping system, a field experiment was established in Zhangbei County, Hebei Province in 2019. Three cropping patterns were

收稿日期:2026-02-25;接受日期:2026-03-28
基金项目:国家重点研发计划(2022YFD1901100);国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS07-B-5)
第一作者:马智鸣(ORCID:0009-0003-4223-1587),硕士研究生,E-mail:mazhiming@cau.edu.cn
通讯作者:臧华栋(ORCID:0000-0002-2008-143X),教授,主要从事绿色种植制度理论与技术研究,E-mail:zanghuadong@cau.edu.cn

designed: Oat-soybean strip intercropping (IOS), oat monoculture (MO), and soybean monoculture (MS). During the oat jointing and filling stages in 2021, the aboveground biomass, N uptake, root morphological parameters (root dry weight density, root length density, root surface area density and root volume density) in the 0-20 cm soil layer, and rhizosphere soil β-N-acetylglucosaminidase (NAG) and L-leucine aminopeptidase (LEU) activities of both crops were measured. One-way ANOVA, correlation analysis, and principal component analysis were used to examine changes in root morphology and rhizosphere enzyme activities of both crops and their driving effects on N uptake in the intercropping system. The results showed that the N uptake equivalent ratio of the intercropping system decreased from 1.05 at the jointing stage to 0.86 at the filling stage. At the oat jointing stage, intercropped oat showed no significant changes in root dry weight density, root length density, root surface area density, or root volume density compared with monocultured oat, yet N uptake was 24.0% higher than that of monoculture oat. At oat jointing stage, intercropped soybean showed a 13.8% decrease in N uptake compared with monoculture ($P<0.05$). Its roots became thinner and longer, root length density increased by 26.9% ($P<0.05$), while root dry weight density, root surface area density and root volume density decreased by 20.9% to 41.0% ($P<0.05$). At the oat filling stage, intercropped oat increased N uptake by 17.9% ($P<0.05$). Root dry weight density, root length density and root volume density increased by 28.2% to 63.2% ($P<0.05$). Rhizosphere soil NAG and LEU activities increased by 17.5% and 39.8% ($P<0.05$), respectively. Although intercropped soybean showed 28.2% and 26.1% increases in rhizosphere NAG and LEU activities ($P<0.05$), its root dry weight and root volume density decreased by 33.2% and 50.4% ($P<0.05$), and finally its N uptake decreased by 47.7% ($P<0.05$). In conclusion, the oat-soybean intercropping system exhibited an advantage in N uptake at the oat jointing stage, but the increase in N uptake by intercropped oat at the filling stage could not compensate for the decrease in N uptake by intercropped soybean, causing the system's N uptake advantage to shift from strong to weak. Therefore, in oat-soybean strip intercropping systems, special attention should be paid to N supply to soybean at the oat filling stage to maintain the balance of N uptake advantage and productivity of the intercropping system throughout the entire growing season.

Keywords oat-soybean strip intercropping; root morphological characteristics; nitrogen uptake; nitrogen competition; nitrogen cycling enzyme activities

禾本科与豆科作物间作,能够充分发挥不同作物间的生态位互补效应,实现对光照、水分、养分等资源的高效利用,被广泛认为是一种提升系统生产力和养分利用率的种植模式[1-2]。这种优势在很大程度上源于2种作物对根系氮素竞争与互补的利用,这一地下生态过程呈现出鲜明的时空动态性[3]。燕麦(*Avena sativa* L.)作为一种重要的粮饲兼用作物,广泛种植于我国北方的干旱和半干旱地区[4]。大豆(*Glycine max* L.)是重要的油料作物,同时也是典型的固氮作物,能为系统提供额外的氮素输入[5-6]。燕麦大豆带状间作模式在我国北方农牧交错地区表现出显著的产量优势,具有广阔的应用潜力[2]。因此,在全球粮食需求持续增长、氮肥利用率普遍低下的背景下,如何在减少氮肥投入的同时维持或提升作物生产力,已成为构建绿色高效农业体系的核心科学问题[7-8]。解析间作系统中不同生育时期燕麦、大豆的根系形态和对氮素的吸收利用特征对于优化栽培管理具有重要意义。

目前,已有很多关于禾本科与其他作物间作的研究报道。马心灵等[9]研究表明,玉米马铃薯间作模式的氮素吸收量比单作高14.9%。董奇琦等[10]发现玉米花生间作的氮素吸收量显著高于单作。覃潇敏等[11]在玉米大豆间作模式中也观察到类似规律。这表明禾豆间作在促进氮素吸收方面具有优势。在间作系统中,氮素竞争与互补关系随生育进程呈现动态演变。在间作早期,禾本科作物对土壤矿质氮表现强效的吸收,具有氮素竞争的优势[12]。燕麦紫花苜蓿间作可显著提高燕麦对氮素的获取能力[13]。而间作后期,豆科作物的固氮作用增强,固定的氮素可通过豆科作物根际土壤菌丝网络向禾本科作物传递,从而促进禾本科作物对氮素的吸收[14-16]。随着2种间作作物生育进程的推进,系统内氮素利用关系随之发生演变[17]。这一动态过程的方向和强度,很大程度上取决于作物的空间配置和生育时期[18-19]。

根系形态可塑性是作物响应种间竞争与资源

可利用性变化的重要适应策略，直接影响作物对氮素的获取能力[20-21]。汪雪等[13]研究表明，燕麦紫花苜蓿间作显著提高了燕麦的总根长、根表面积和根体积，显著提高了间作系统中作物的地上部生物量。此外，通过对小麦蚕豆、玉米大豆等间作模式的研究也发现，间作能够促进作物根系在水平和垂直方向的延伸，从而提高作物对各土层氮素的利用效率[22-23]。土壤酶作为连接土壤养分库与植物需求的枢纽，对指示间作体系中的养分转化过程具有重要意义[24-25]。Tang 等[25]研究发现木薯花生间作可以显著提高土壤脲酶和酸性磷酸酶活性。芦美等[26]研究表明玉米马铃薯间作显著提高了土壤脲酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶的活性。土壤有机氮的矿化主要依赖于β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶（NAG）和L-亮氨酸氨基肽酶（LEU）等氮循环相关酶类[24-25]。然而，以往的研究多集中于脲酶、磷酸酶等参与无机氮磷转化的酶类[27-29]，而对有机氮矿化酶的研究较少。因此，聚焦于NAG和LEU酶活的变化，对于揭示燕麦大豆间作系统土壤有机氮矿化及氮素可利用性的动态变化具有重要意义。

目前，关于燕麦大豆带状复合种植模式下2种作物根系形态和根际土壤氮循环酶活性的种间氮素竞争，以及调控作物氮素吸收的动态机制尚未见报道。本研究依托2019年在河北省张北县建立的田间定位试验，测定燕麦拔节期和灌浆期的燕麦和大豆的地上部生物量、0—20 cm土层作物根系形态特征和根际土壤氮循环酶的活性等指标的变化及其对间作系统氮吸收的驱动作用，旨在从根系形态和根际氮循环酶活性的角度揭示间作系统作物对氮素的竞争和利用的动态变化过程，以期为优化带状复合种植的田间管理提供参考。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

田间定位试验起始于2019年，在河北省张家口市张北燕麦科技小院试验田（41°20′ N，114°54′ E，海拔1 450 m）进行。试验地位于坝上地区，属于温带大陆性季风气候，光、热资源丰富，年均气温6 ℃，无霜期120 d，年均日照时数2 784 h，年平均降水量400 mm左右。试验地土壤类型为栗钙土，试验开始前0—20 cm土层土壤的基本理化性质为：有机质12.93 g/kg，总氮0.97 g/kg，碱解氮2.0 mg/kg，速效磷5.0 mg/kg，pH 8.0。定位试验设立前，试验地常年种植燕麦。

1.2　试验设计

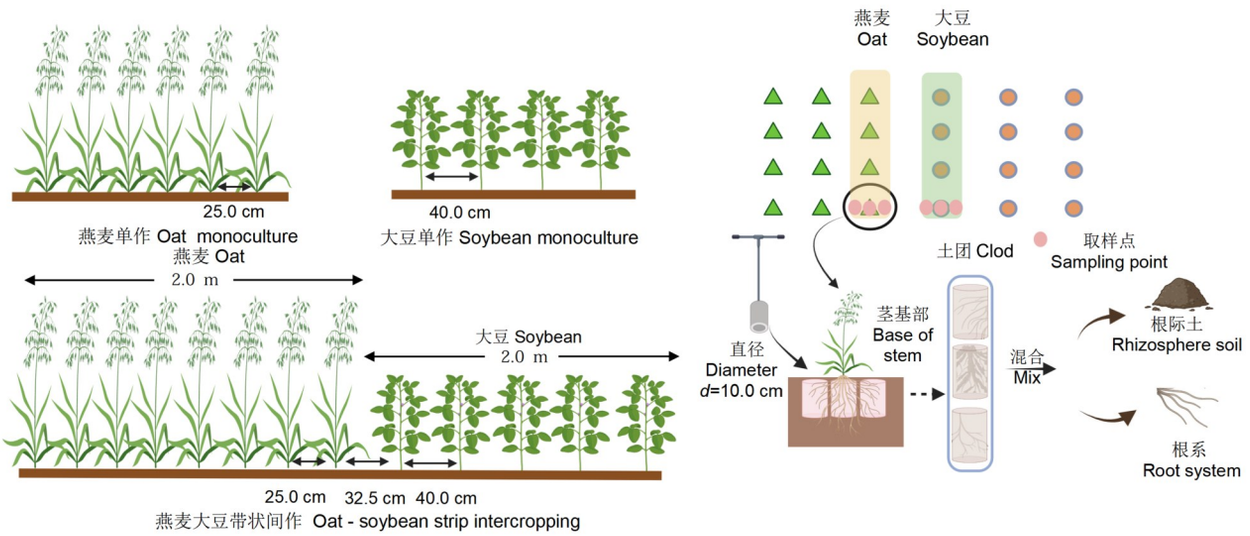
采用随机区组试验设计，设置燕麦大豆带状间作（IOS）、燕麦单作（MO）和大豆单作（MS）3种种植模式，小区面积为60 m^2（12 m×5 m），重复4次（图1）。燕麦大豆带状间作处理中，每个小区种植3个条带，带幅为4 m，燕麦和大豆各2 m。燕麦播种采用人工条播，单作和间作燕麦行距均为25 cm，播量为150 kg/hm^2；大豆播种采用人工点播，单作和间作大豆行距为40 cm，株距为15 cm，播量为75 kg/hm^2。供试燕麦品种为‘坝莜14号’，大豆品种为‘冀张豆2号’。间作和单作的施肥量保持一致，其中燕麦施氮量为90 kg/hm^2、施磷量为60 kg/hm^2、施钾量为30 kg/hm^2；大豆施氮量为60 kg/hm^2、施磷量为15 kg/hm^2、施钾量为30 kg/hm^2。试验所用肥料为尿素（N含量46 g/100 g），磷酸二铵（N含量18 g/100 g，P含量46 g/100 g）和硫酸钾（K_2O 52 g/100 g），均作基肥一次性施入。其他栽培措施与当地常规管理水平保持一致。燕麦和大豆同种同收，本试验于2021年开展，播种和收获时间分别为5月23日和9月16日。

1.3　测定指标及方法

1.3.1　作物生物量和氮含量

于2021年燕麦拔节期和灌浆期，分别采集燕麦和大豆地上部植株样品用于测定地上部生物量。在每个单作小区内随机选取2个长度为2.0 m的样段，将样段内所有植株齐地面（距地表约1—3 cm）切割收获（图1）。间作燕麦按与大豆相邻的边1至边4行（边1行为与大豆最近的一行，相邻燕麦行依次为边2行、边3行和边4行），每行截取2个长度为2.0 m的样段。间作大豆按与燕麦相邻的边1至边3行（边1行为与燕麦最近的一行，相邻大豆行依次为边2行、边3行），每行截取2个长度为2.0 m的样段。单作和间作采样时均避开小区边缘。所有植株样品于田间采集后，立即装入标记好的网袋中，带回实验室。经105 ℃杀青30 min，75 ℃烘干至恒重，称量干重并计算单位面积的地上部生物量。

分析植株氮含量，分别选取烘干后的单作行、以及间作边1行（根系互作最频繁、养分竞争最剧烈）的燕麦和大豆整株植株样品，研磨并过0.15 mm筛。样品H_2SO_4-H_2O_2消煮后，使用中国海能公司的



(a) 不同种植模式示意图
(a) Diagram of different planting patterns

(b) 间作土壤和根系样品采集
(b) Soil and root sampling in the intercropping system

图 1 田间布置和根系取样示意图

Fig. 1 Diagram of field layout and root sampling

全自动凯氏定氮仪(K9860, HAONO),采用凯氏定氮法[30]测定植株氮含量。

1.3.2 作物根际土壤酶活性

2021年燕麦的拔节期和灌浆期,按作物和种植模式分别采集作物根际土壤样品。在单作燕麦和单作大豆取样带、间作燕麦和大豆的边1行取样带随机选取1株,采集地上部植株样品,以每株作物的茎基部为中心,用直径10 cm的根钻(体积为785 cm^3),采集0—20 cm带有根系的土样,然后在其相邻两侧的行间位置各取1份土样,共采集3份土样,作为1个样品(图1);进行4次重复。将采集的土团轻轻抖落松散附着的大块土壤后,用软毛刷收集紧贴根表约1~2 mm内的土粒,过2 mm筛并混匀,即为根际土壤样品。将样品装入无菌袋,置于4 ℃保存,并于1周内完成酶活性测定。

参照Marx等[31]的方法测定土壤β-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(β-N-Acetylglucosaminidase, NAG)和L-亮氨酸氨基肽酶(L-leucine aminopeptidase, LEU)活性,nmol/(g·h)。

1.3.3 作物根系形态特征

将洗净后的根系样品用爱普生(中国)公司的Perfection 4870扫描仪进行图像扫描,再结合加拿大Regent公司的WinRHIZO根系分析系统提取总根长(RL)、根表面积(RSA)和根体积(RV)等参数。根系扫描后,75 ℃烘干至恒重,测定根干重(RDW)。

$$RDWD = \frac{RDW}{V} \quad (1)$$

$$RLD = \frac{RL}{V} \quad (2)$$

$$RSAD = \frac{RSA}{V} \quad (3)$$

$$RVD = \frac{RV}{V} \quad (4)$$

式中:RDWD为根干重密度,g/100 cm^3;RLD为根长密度,cm/100 cm^3;RSAD为根表面积密度,cm^2/100 cm^3;RVD为根体积密度,cm^3/100 cm^3;RDW为根干重,g;RL为根系长度,cm;RSA为根表面积,cm^2;RV为根体积,cm^3;V为根钻体积,cm^3。

1.3.4 氮素吸收量和氮当量比

氮吸收量(nitrogen uptake, NA)的计算公式为:

$$NA = 地上部干物质积累量 \times N \times 100\% \quad (5)$$

式中:N为植株氮含量,g/kg。

氮当量比(nitrogen equivalent ratio, NER):

$$NER = pNERo + pNERs = \frac{N_{io}}{N_{mo}} + \frac{N_{is}}{N_{ms}} \quad (6)$$

式中:$pNER_o$为燕麦的偏氮素当量比,$pNER_s$为大豆的偏氮素当量比,N_{io}为间作燕麦氮素吸收量,N_{is}为

间作大豆氮素吸收量，N_{mo}为单作燕麦氮素吸收量，N_{ms}为单作大豆氮素吸收量。

1.4　数据处理及分析

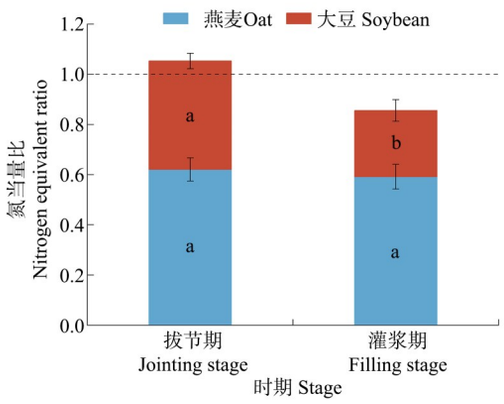
使用 Excel 2021 对数据进行整理。用 Shapiro-Wilk 检验和 Levene 检验进行数据正态性和方差齐性检验，然后使用 IBM SPSS Statistics 26.0 对数据进行单因素方差分析（ANOVA）并用 Duncan 法进行显著性检验（$P<0.05$）。使用 R 4.3.0 的 corrplot 包和 stats 包，基于 Pearson 相关分析方法计算各指标间的相关性，并绘制相关性热图。使用 OriginPro 2021 进行主成分分析（PCA），对原始数据进行了 Z-score 标准化（Z-score normalization）处理后，置信水平设为 95%，并绘制得分图。用 OriginPro 2021 制图。

2　结果与分析

2.1　间作模式下 2 种作物的生物量及氮吸收变化

由图 2 可知，燕麦拔节期，间作系统的氮当量比为 1.05；燕麦灌浆期，间作系统的氮当量比为 0.86，间作的大豆偏氮当量比显著下降（$P<0.05$）。

燕麦拔节期，间作燕麦地上部生物量（图 3）、植株氮含量（图 4）和氮吸收量（图 5）分别比单作增加 13.0%、9.7% 和 24.0%（$P<0.05$）。而间作大豆的氮吸收受到抑制，氮吸收量降低 13.8%（$P<0.05$）。燕麦灌浆期，间作燕麦地上部生物量和氮吸收量分别较单作增加 25.4% 和 17.9%（$P<0.05$）。间作大豆地上部生物量和氮吸收量分别较单作降低 31.6% 和 47.7%（$P<0.05$）。



虚线表示氮当量比（NER）= 1。不同小写字母表示同种作物不同生育时期之间存在显著差异（$P<0.05$）。下同。

The dashed line indicates a nitrogen equivalent ratio (NER) of 1. Different lowercase letters indicate significant differences among growth stages of the same crop species ($P<0.05$). The same below.

图 2　不同生育时期燕麦大豆带状间作系统的氮当量比

Fig. 2　Nitrogen equivalent ratio of the oat-soybean strip intercropping system at different growth stages

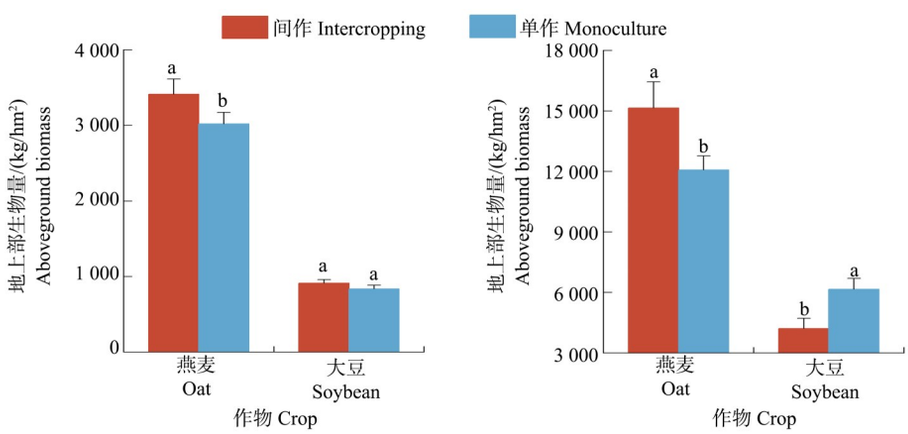


图 3　不同种植模式下燕麦和大豆的地上部生物量

Fig. 3　Aboveground biomass of oat and soybean under different cropping patterns

2.2　间作模式下 0—20 cm 土层的作物根系特征变化

由图 6 可知，燕麦拔节期，间作大豆根系呈现出“细长化”生长的趋势。与单作相比，间作大豆的根长密度增加 26.9%（$P<0.05$），根表面积密度和根体积密度分别降低 20.9% 和 41.0%（$P<0.05$），根干重密度降低 30.6%（$P<0.05$）。然而，间作燕麦的各根系形态指标与单作均无显著差异。

由图 7 可知，燕麦灌浆期，间作燕麦根系扩张，而间作大豆根系生长受抑制程度随生长进程

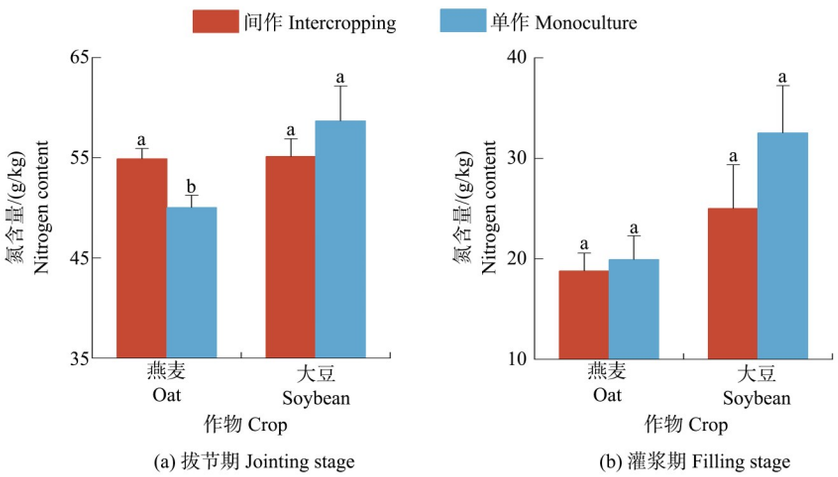


图 4　不同种植模式下燕麦和大豆的氮含量

Fig. 4　Nitrogen content of oat and soybean under different cropping patterns

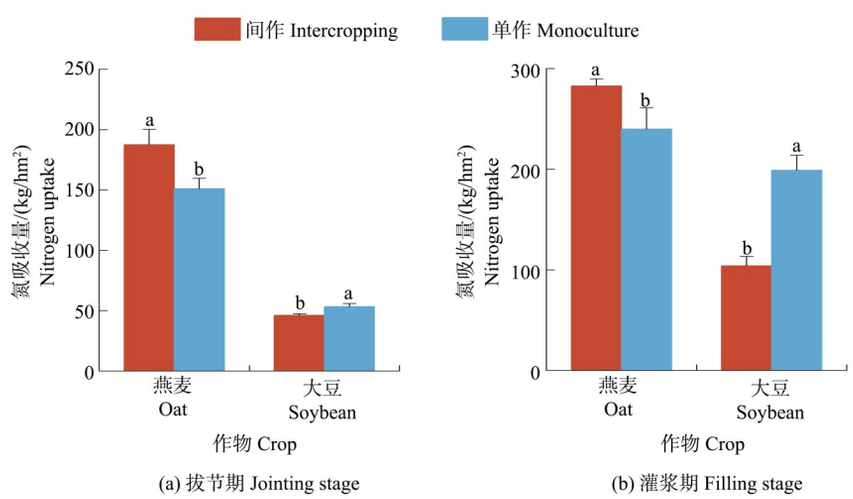


图 5　不同种植模式下燕麦和大豆的氮吸收量

Fig. 5　Nitrogen uptake of oat and soybean under different cropping patterns

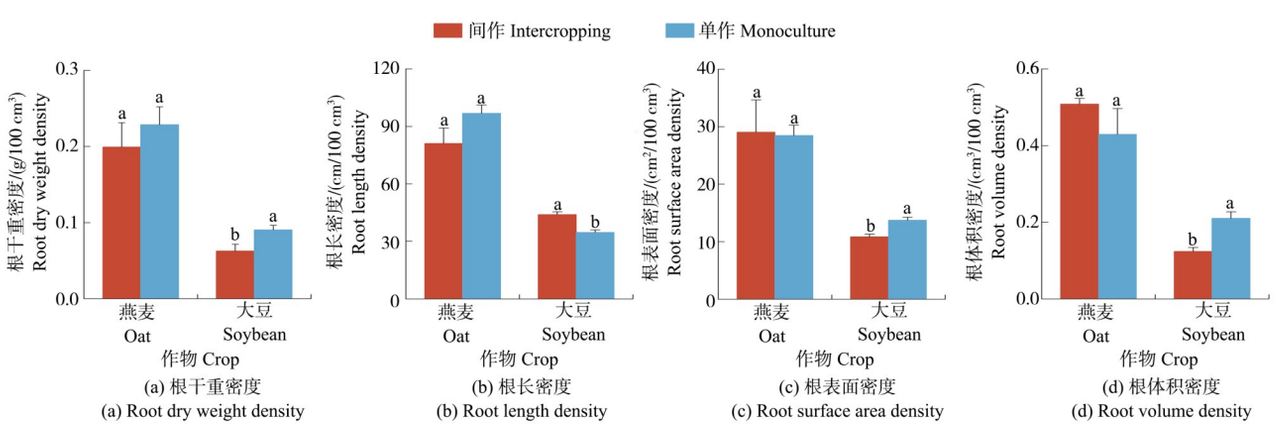


图 6　燕麦拔节期燕麦和大豆 0—20 cm 土层的根系形态特征

Fig. 6　Root morphological characteristics of oat and soybean in the 0-20 cm soil layer at the oat jointing stage

而加剧。与单作相比，间作的燕麦根干重密度、根长密度和根体积密度分别增加63.2%、28.2%和61.2%（$P<0.05$）。间作大豆的根干重密度和根体积密度分别降低33.2%和50.4%（$P<0.05$），根长密度和根表面积密度则无显著变化（$P>0.05$）。

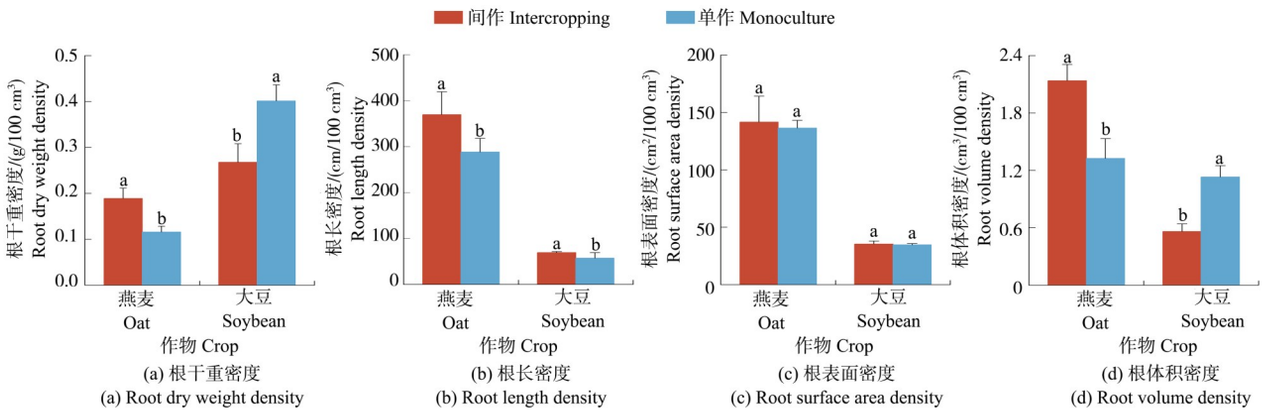


图7　燕麦灌浆期燕麦和大豆0—20 cm土层的根系形态特征

Fig. 7　Root morphological characteristics of oat and soybean in the 0-20 cm soil layer at the oat filling stage

2.3　间作模式下作物根际土壤氮循环酶活性的变化

由图8可知，燕麦拔节期，间作大豆的根际NAG活性较单作降低了14.0%（$P<0.05$），间作燕麦根际NAG的活性与单作无显著差异（$P>0.05$）。间作燕麦的根际土壤LEU活性较单作高15.3%（$P<0.05$），间作大豆根际的LEU活性与单作无显著差异（$P>0.05$）。

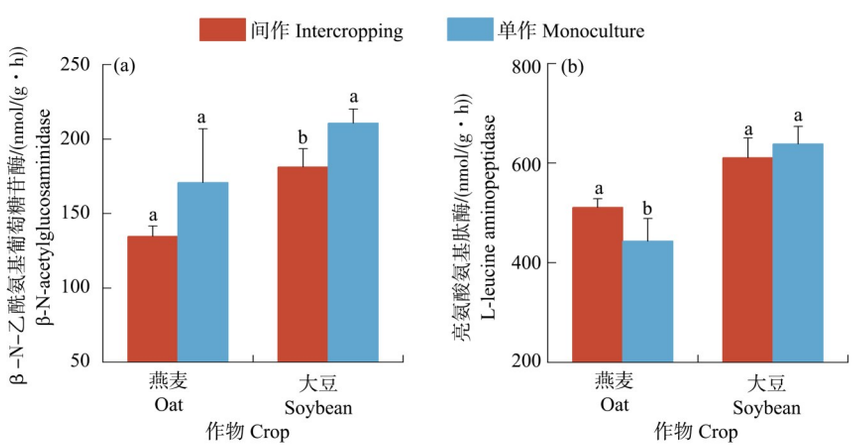


图8　燕麦拔节期β-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶（NAG）（a）和L-亮氨酸氨基肽酶（LEU）（b）的活性

Fig. 8　Activities of β-N-acetylglucosaminidase (NAG) (a) and L-leucine aminopeptidase (LEU) (b) at the oat jointing stage

由图9可知，燕麦灌浆期，间作对2种作物的根际土壤NAG、LEU活性均有显著促进作用。间作燕麦和间作大豆根际土壤NAG活性分别较单作高17.5%和28.2%（$P<0.05$），间作燕麦和间作大豆根际土壤的LEU活性分别较单作高39.8%和26.1%（$P<0.05$）。

2.4　2种作物氮素吸收的影响因素

2.4.1　燕麦氮吸收的影响因素

由图10可知，燕麦拔节期，燕麦的氮含量与地上部生物量呈显著负相关，氮吸收量与根体积密度呈显著正相关。PC_1方差贡献率为58.7%。氮含量（载荷－0.426）、氮吸收量（载荷－0.384）与根体

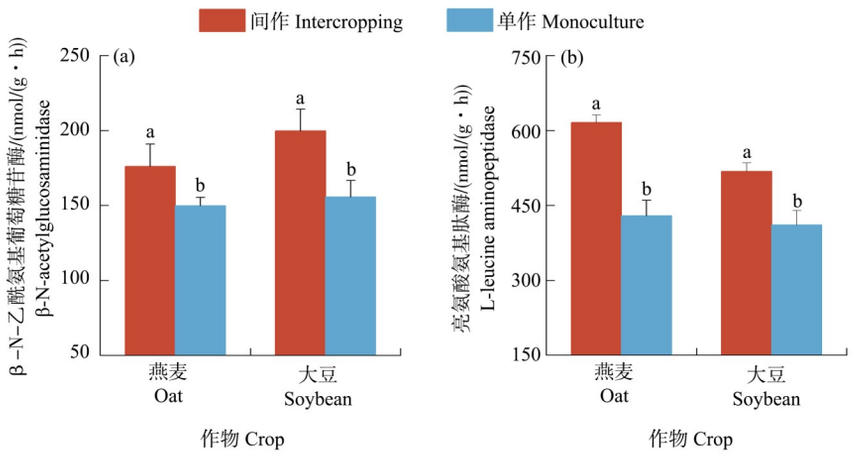
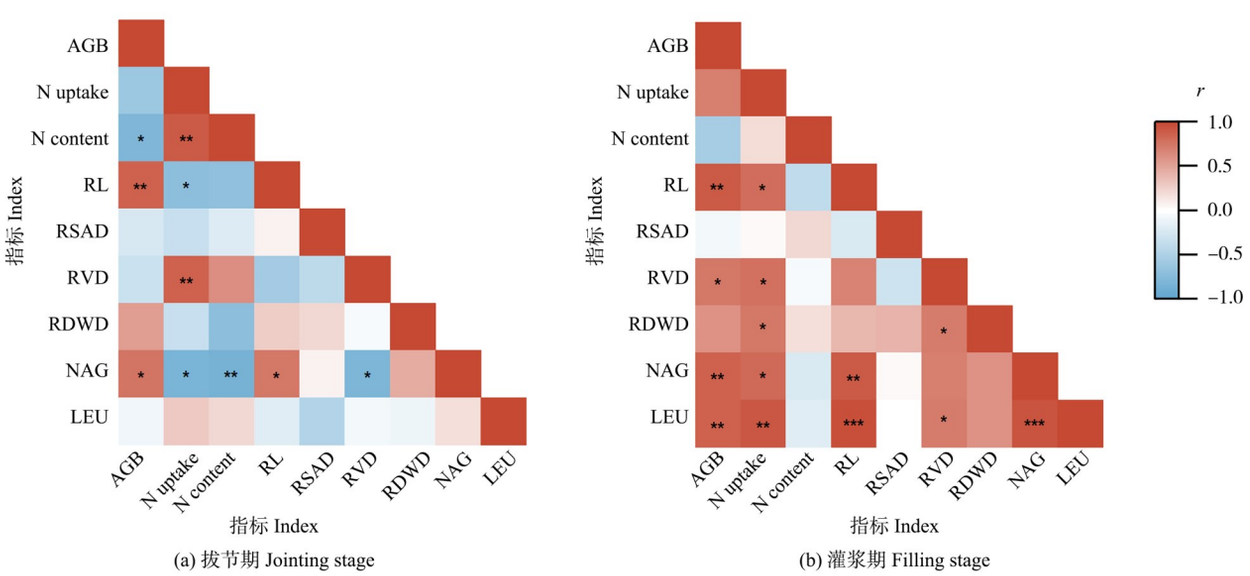


图 9 燕麦灌浆期 β-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(NAG)(a)和 L-亮氨酸氨基肽酶(LEU)(b)的活性

Fig. 9 Activities of β-N-acetylglucosaminidase (NAG) (a) and L-leucine aminopeptidase (LEU) (b) activities at the oat filling stage

积密度(载荷−0.316)均位于载荷负端,而根长(载荷 0.412)、NAG(载荷 0.424)载荷分布方向相反(图 11(a))。燕麦灌浆期,燕麦的氮吸收量、地上部生物量均与根长密度、根体积密度、NAG、LEU 活性呈显著正相关(图 10(b))。PC_1方差贡献率为 65.8%,根体积密度(载荷 0.393)、NAG(载荷 0.353)、LEU(载荷 0.407)与氮吸收量(载荷 0.348)均位于载荷正端(图 11(b))。表明燕麦灌浆期的根系扩展与酶活性共同促进了燕麦对氮素的吸收。

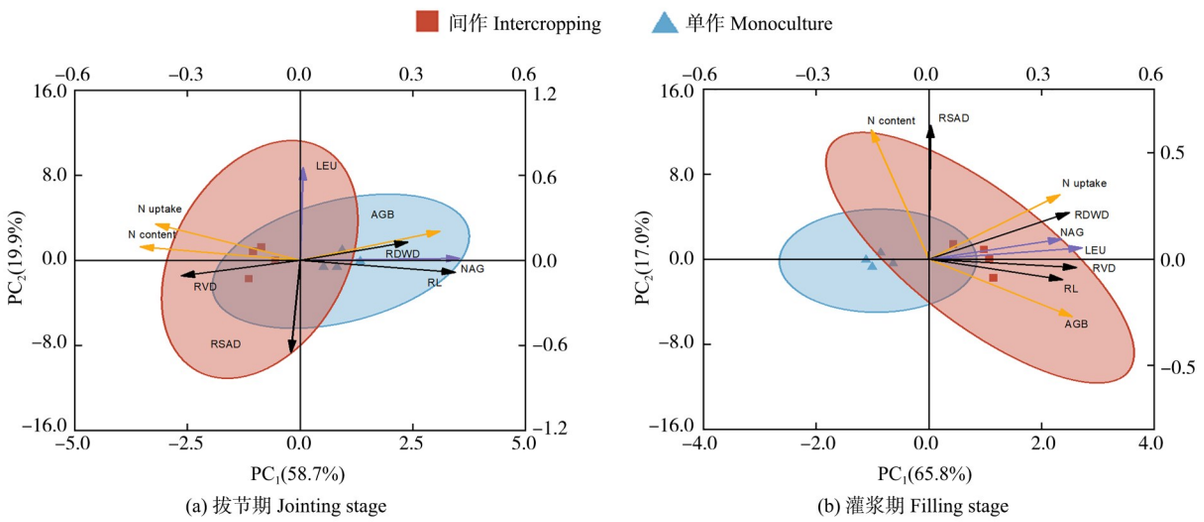


AGB,地上部生物量;N uptake,氮吸收量;N content,氮含量;RL,根长密度;RSAD,根表面积密度;RVD,根体积密度;RDWD,根干重密度;NAG,N-乙酰氨基葡萄糖苷酶;LEU,L-亮氨酸氨基肽酶。*、**和***分别表示在 $P<0.05$、$P<0.01$ 和 $P<0.001$ 水平上差异显著。下同。

AGB, aboveground biomass; N uptake, nitrogen uptake; N content, nitrogen content; RL, root length density; RSAD, root surface area density; RVD, root volume density; RDWD, root dry weight density; NAG, β-N-acetylglucosaminidase; LEU, L-leucine aminopeptidase. *, **, and *** denote significance at 0.05, 0.01, and 0.001, respectively. The same below.

图 10 带状间作模式下燕麦的氮素吸收与根系形态指标、土壤根际酶活性的相关分析

Fig. 10 Correlation analysis of oat nitrogen uptake-related indicators, root morphological traits, and rhizosphere soil enzyme activities in strip intercropping system



(a) 拔节期 Jointing stage　　(b) 灌浆期 Filling stage

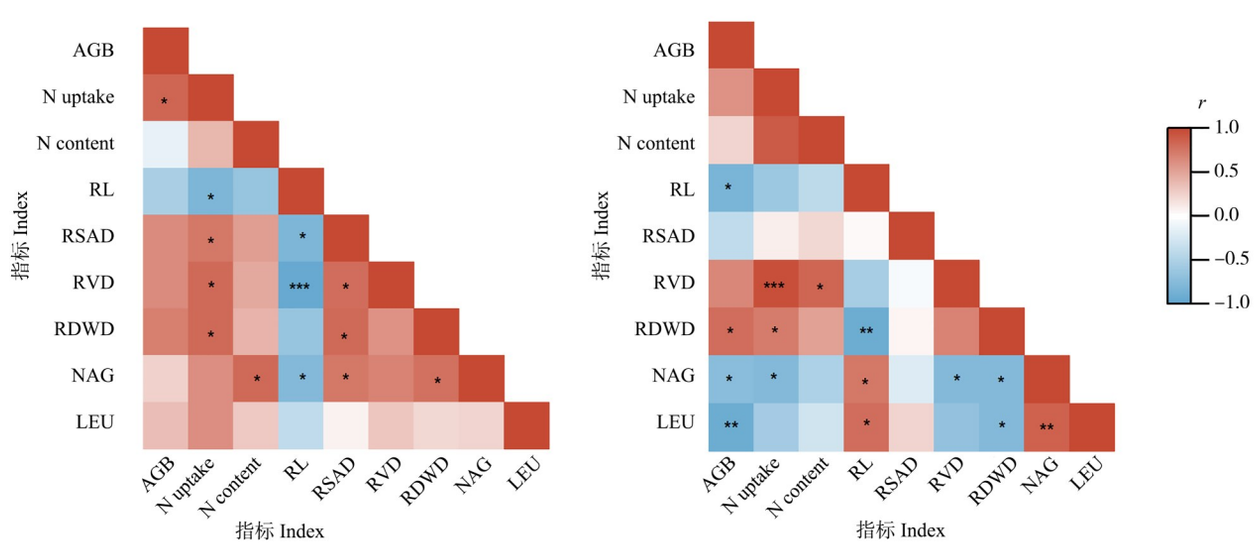
图 11　带状间作模式下燕麦的氮素吸收、根系形态和土壤根际酶活性指标的 PCA 分析

Fig. 11　Principal component analysis (PCA) of oat nitrogen uptake, root morphological traits, and rhizosphere soil enzyme activities in strip intercropping system

2.4.2　大豆氮吸收的影响因素

由图 12 可知，在燕麦拔节期，大豆的氮吸收量与根干重密度、根表面积密度、根体积密度均呈显著正相关。PC_1 方差贡献率为 70.0%，氮吸收量（载荷 0.381）与根体积密度（载荷 0.382）、根表面积密度（载荷 0.378）、根干重密度（载荷 0.356）均位于正端载荷。根长密度位于负端载荷（载荷 −0.386），与氮吸收量的载荷方向相反（图 13（a））。表明在燕麦拔节期，大豆的氮吸收量主要依赖于根体积密度、根表面积密度和根干重密度的增加。

燕麦灌浆期，大豆的氮吸收量与根体积密度、根干重均呈显著正相关，而与 NAG、LEU 均呈显著负相关（图 12(b)）。PC_1 方差贡献率为 68.9%，根体积密度（载荷 0.373）、根干重密度（载荷 0.368）与氮吸收量（载荷 0.383）同向均位于正端载荷，但 NAG



(a) 拔节期 Jointing stage　　(b) 灌浆期 Filling stage

图 12　带状间作模式下大豆的氮素吸收相关指标与根系形态指标、土壤根际酶活性的相关分析

Fig. 12　Correlation analysis of soybean nitrogen uptake-related indicators, root morphological traits, and rhizosphere soil enzyme in strip intercropping system

（载荷－0.371）、LEU（载荷－0.390）转为负端载荷，与根长（－0.283）同向，与氮吸收量载荷方向相反（图 13（b））。表明灌浆期大豆氮吸收同样主要依赖于根干重密度和根体积密度的增加。

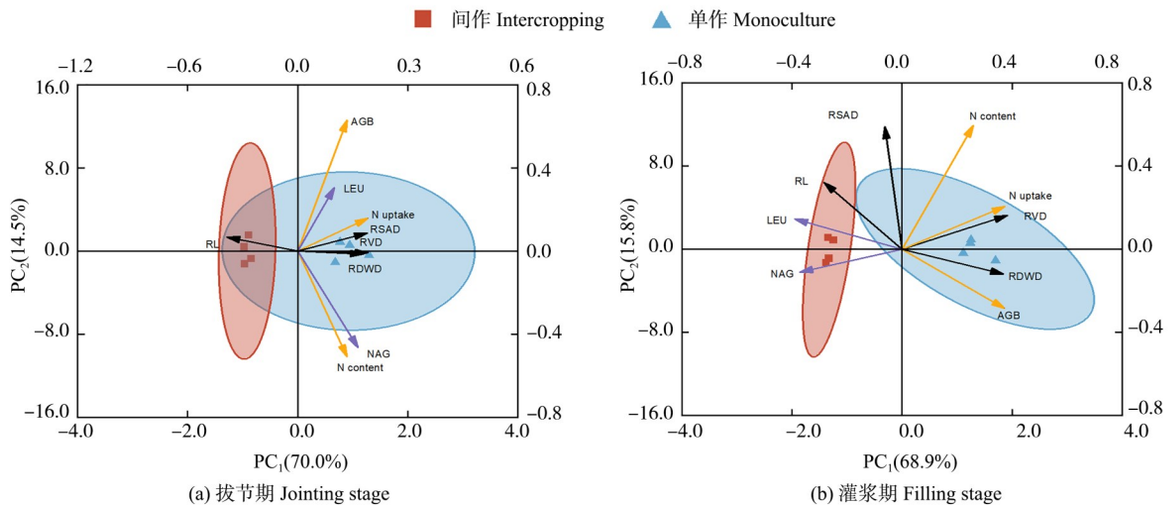


图 13 带状间作模式下大豆的氮素吸收、根系形态和土壤根际酶活性指标的 PCA 分析

Fig. 13 Principal component analysis (PCA) of soybean nitrogen uptake, root morphological traits, and rhizosphere soil enzyme activities in strip intercropping system

3 讨 论

3.1 燕麦大豆复合种植模式对作物氮素吸收及生物量积累的影响

间作系统的作物氮素利用效率取决于不同作物间竞争与互补的平衡[32]。带状间作模式下，间作系统氮当量比从拔节期的 1.05 下降至灌浆期的 0.86（图 2）。这种动态变化体现了禾本科与豆科作物对氮素竞争的时空不对称性[32]。燕麦在种间竞争过程中始终占据优势，这可能归因于间作模式下禾本科作物的“资源前占”策略[14]。在生育前期，禾本科群体建成和冠层发育速度较快，地上部在光资源竞争中占据主动，生物量迅速积累[33]。这种早期确立的光合优势，为后期根系扩展和氮素获取奠定了基础[34-35]。本研究发现，在燕麦拔节期，间作大豆的氮吸收量已显著下降，但其地上部生物量尚未受影响（图 3 和图 5）。这一现象表明，地下竞争先于地上竞争发生。进入灌浆期，燕麦的生长优势进一步扩大，其冠层荫蔽效应加剧，进而可能对大豆的光合作用和生物量积累产生不利影响[36]，导致向地下部分配的光合碳少，根系生长受到抑制。燕麦的地下部通过根系扩张和根际酶活性增强，持续强化对土壤氮素的获取能力[35]，形成“地上-地下协同竞争”的优势格局。本研究中燕麦灌浆期的间作系统的氮当量比（NER）低于冯晓敏等[35]报道的水平，原因可能在于生育期选择的差异[34-35]。已有研究多以燕麦成熟期为测定节点，此时燕麦氮素吸收已趋于稳定，种间竞争强度有所下降[16]。而本研究聚焦于燕麦灌浆期，该时期是燕麦氮素吸收的高峰期，同时也是大豆生长的关键期，种间氮素竞争最为激烈[37]，因此导致 NER 处于更低水平。此外，本研究仅基于 1 年田间试验数据，年际间气候波动（如降水、温度）可能影响作物生长节奏和竞争强度，未来可通过增加研究年限和采样频率，更精准地监测间作作物间的氮素竞争动态。

3.2 燕麦大豆带状复合种植模式中作物根系形态的可塑性对氮素吸收的影响

作物根系的可塑性是决定种间竞争格局的关键，这种可塑性表现出显著的生育期差异和物种特异性[20-21]。本研究发现，燕麦拔节期的作物根系形态响应已逐渐呈现分化；间作燕麦根系形态虽未显著改变，但其植株氮含量已显著提高（图 4 和图 6）。这可能是燕麦通过提高根系的氮吸收效率，或是利用大豆根系分泌物激发的“根际激发效应”，维持氮素吸收优势[38-39]。进入灌浆期，燕麦通过根长与根体积密度的协同增加，极大地扩展了土壤生态位

（图 7）。燕麦在资源竞争加剧时，可能更倾向于投入更多光合产物扩展根系，这不仅能提升自身氮素获取能力，还可能通过根系物理穿插侵入大豆根际区域，吸收更多的氮素资源[13,40]。在燕麦拔节期，间作大豆的根体积和根干重已显著下降（图 6）。这表明地下部空间竞争发生较早，大豆根系呈现出“细长化”生长趋势，向土壤深层或竞争较弱的区域迁移，导致其在土壤表层富氮区的吸收下降[40-41]。在燕麦灌浆期，大豆根系受抑制程度加剧，根体积与根干重显著降低，直接限制了根系的有效氮素吸收面积（图 7）。这可能是由于大豆受限于地上部遮荫，碳同化不足，根系生长受抑制，最终导致其在氮素竞争中处于被动地位[13]。

3.3　燕麦大豆带状复合种植模式下根际土壤酶活性及氮素获取的响应机制

根际酶活性是连接“植物-土壤-微生物”的关键枢纽，土壤氮循环酶（NAG、LEU）直接调控有机氮的矿化和供应，其活性变化可反映土壤氮素供应潜力及作物氮素获取能力[24-25]。本研究发现，间作系统中 2 种作物的根际氮循环酶活性虽有提升，但其对氮素获取的贡献呈显著的物种偏向性。这与已有研究结果一致，证实了间作系统的根系互作是酶活性变化的主要驱动因素，且土壤酶活性对植物氮获取的贡献存在显著差异[42-44]。在燕麦灌浆期，燕麦通过根系扩展与土壤酶活性的协同效应显著增加了氮素吸收量，间作燕麦根际氮循环酶活性与根系形态指标、氮吸收量均呈显著正相关（图 10）。这可能是由于燕麦根系分泌的有机酸和糖类物质刺激了根际微生物增殖与土壤酶活性的提升，促进难溶性有机氮向无机氮转化[45]。同时，根系扩展增加了与土壤的接触面积，进一步提高了无机氮的截获效率，从而满足作物旺盛生长的氮素需求[46]。然而，间作大豆根际土壤氮循环酶活性虽有所升高，但与大豆的氮吸收量呈显著负相关（图 12）。这种酶活性提升并非获取氮素的有效策略，而是大豆对氮素匮乏的响应[47]，导致大豆通过增强有机氮矿化能力来获取氮素。但此时大豆根系与土壤的接触面积大幅减少，即便土壤潜在供氮能力有所提升，大豆也无法有效截获矿化的氮素[14,48]。此外，大豆根际被活化的无机氮易通过扩散进入邻近燕麦的根际区域，被生长旺盛的燕麦优先吸收，进一步加剧了种间氮素获取的不平衡[49-50]。这也反映了间作系统中种间互补与竞争的复杂平衡关系[51]。

4　结　论

在本研究条件下，燕麦大豆带状复合种植模式的 2 种作物根系形态特征和氮素吸收具有显著的生育期动态特征和种间差异。燕麦拔节期，间作模式可促进燕麦氮素吸收，并诱导大豆根系伸长，使间作系统表现出显著的氮素吸收优势。燕麦灌浆期，间作显著促进了燕麦根系扩张和根际土壤氮循环酶的活性，进而提高了燕麦的氮素吸收量，但间作抑制了大豆的根系发育，显著降低了大豆的氮素吸收量。带状间作模式下，燕麦氮素吸收量的增幅难以弥补大豆的降幅，导致燕麦灌浆期间作系统整体的氮素吸收优势显著弱化。因此，燕麦大豆带状复合种植模式应重点关注燕麦灌浆期大豆的氮素供给，通过优化水肥管理缓解生育后期大豆受到的氮素竞争胁迫，以维持间作系统中 2 种作物全生育期内氮素吸收的平衡和系统生产力。

参考文献　References

[1] Brooker R W, Bennett A E, Cong W F, Daniell T J, George T S, Hallett P D, Hawes C, Iannetta P P M, Jones H G, Karley A J, Li L, McKenzie B M, Pakeman R J, Paterson E, Schöb C, Shen J B, Squire G, Watson C A, Zhang C C, Zhang F S, Zhang J L, White P J. Improving intercropping: A synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology[J]. *New Phytologist*, 2015, 206(1): 107-117

[2] 李隆. 间套作强化农田生态系统服务功能的研究进展与应用展望[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(4): 403-415
Li L. Intercropping enhances agroecosystem services and functioning: Current knowledge and perspectives[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(4): 403-415 (in Chinese)

[3] Li C J, Dong Y, Li H G, Shen J B, Zhang F S. The dynamic process of interspecific interactions of competitive nitrogen capture between intercropped wheat (*Triticum aestivum* L) and faba bean (*Vicia faba* L)[J/OL]. *PloS One*, (2014-12-26). DOI: 10.1371/journal.pone.0119659

[4] 冯文豪, 佟越强, 杨亚东, 葛军勇, 臧华栋, 曾昭海. 全球燕麦生产时空演变规律及对中国的启示[J]. 麦类作物学报, 2022, 42(7): 902-910
Feng W H, Tong Y Q, Yang Y D, Ge J Y, Zang H D, Zeng Z H. Spatial-temporal evolution characteristics of global oat production and its enlightment to China[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022, 42(7): 902-910 (in Chinese)

[5] Salvagiotti 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

[6] Guo S B, Guo E J, Zhang Z T, Dong M Q, Wang X, Fu Z Z, Guan K X, Zhang W M, Zhang W J, Zhao J, Liu Z J, Zhao C, Yang X G. Impacts of mean climate and extreme climate indices on soybean yield and yield

components in Northeast China[J]. *Science of the Total Environment*, (2022-05-28). DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.156284

[7] Spiertz J H J. Nitrogen, sustainable agriculture and food security. A review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2010, 30(1): 43-55

[8] Cassman K G, Dobermann A, Walters D T. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management[J]. *Ambio*, 2002, 31(2): 132-140

[9] 马心灵, 朱启林, 耿川雄, 鲁泽刚, 龙光强, 汤利. 不同氮水平下作物养分吸收与利用对玉米马铃薯间作产量优势的贡献[J]. 应用生态学报, 2017, 28(4): 1265-1273
Ma X L, Zhu Q L, Geng C X, Lu Z G, Long G Q, Tang L. Contribution of nutrient uptake and utilization on yield advantage in maize and potato intercropping under different nitrogen application rates[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(4): 1265-1273 (in Chinese)

[10] 董奇琦, 袁洋, 杜琪, 刘振华, 史晓龙, 张克朝, 周东英, 杨旭, 王晓光, 蒋春姬, 刘喜波, 郭峰, 赵新华, 于海秋. 玉米花生带状间作对植株氮吸收和土壤微生物群落的影响[J]. 中国油料作物学报, 2022, 44(6): 1296-1306
Dong Q Q, Yuan Y, Du Q, Liu Z H, Shi X L, Zhang K C, Zhou D Y, Yang X, Wang X G, Jiang C J, Liu X B, Guo F, Zhao X H, Yu H Q. Effects of strip intercropping of maize and peanut on nitrogen uptake and soil microbial community diversity[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2022, 44(6): 1296-1306 (in Chinese)

[11] 覃潇敏, 潘浩男, 肖靖秀, 汤利, 郑毅. 施磷水平对玉米大豆间作系统氮素吸收与分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(7): 1173-1184
Qin X M, Pan H N, Xiao J X, Tang L, Zheng Y. Effects of phosphorus application rate on N uptake and distribution in maize and soybean intercropping system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(7): 1173-1184 (in Chinese)

[12] Homulle Z, George T S, Karley A J. Root traits with team benefits: Understanding belowground interactions in intercropping systems[J]. *Plant and Soil*, 2022, 471(1): 1-26

[13] 汪雪, 刘晓静, 王静, 吴勇, 童长春. 连续间作下的紫花苜蓿/燕麦根系与碳氮代谢特性研究[J]. 草业学报, 2024, 33(3): 85-96
Wang X, Liu X J, Wang J, Wu Y, Tong C C. Root and carbon-nitrogen metabolism characteristics of alfalfa-oat mixed stands under continuous intercropping[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(3): 85-96 (in Chinese)

[14] 王新宇, 高英志. 禾本科/豆科间作促进豆科共生固氮机理研究进展[J]. 科学通报, 2020, 65(2): 142-149.
Wang X Y, Gao Y Z. Advances in the mechanism of cereal/legume intercropping promotion of symbiotic nitrogen fixation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(2): 142-149 (in Chinese)

[15] Picone R, Pietramellara G, Guggenberger G, Pathan S I, Gentsch N. The contemporary plant-soil feedback in legume-cereal intercropping systems: A review of carbon, nutrient, and microbial dynamics[J/OL]. *Plant and Soil*, (2025-08-01). DOI: 10.1007/s11104-025-07723-w

[16] Shao Z Q, Zheng C C, Postma J A, Lu W L, Gao Q, Gao Y Z, Zhang J J. Nitrogen acquisition, fixation and transfer in maize/alfalfa intercrops are increased through root contact and morphological responses to interspecies competition[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 20(8): 2240-2254

[17] Yu R P, Yang H, Xing Y, Zhang W P, Lambers H, Li L. Belowground processes and sustainability in agroecosystems with intercropping[J]. *Plant and Soil*, 2022, 476(1): 263-288

[18] Hu F L, Tan Y, Yu A Z, Zhao C, Fan Z L, Yin W, Chai Q, Cao W D. Strip width ratio expansion with lowered N fertilizer rate enhances N complementary use between intercropped pea and maize[J/OL]. *Scientific Reports*, (2020-09-17). DOI:10.1038/s41598-020-76815-7

[19] 鲍根生, 李媛, 冯晓云, 张鹏, 孟思宇. 高寒区氮添加和间作种植互作对燕麦和豌豆根系构型影响的研究[J]. 草业学报, 2024, 33(3): 73-84
Bao G S, Li Y, Feng X Y, Zhang P, Meng S Y. Interactive effects of intercropping patterns and nitrogen addition on root architectural characteristics of oat and pea in an alpine region[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(3): 73-84 (in Chinese)

[20] Wang C, Yang Q N, Zhang C, Zhou B, Li X D, Zhang X L, Chen J, Liu K X. Soil organic nitrogen components and N-cycling enzyme activities following vegetation restoration of cropland in Danxia degraded region[J/OL]. *Forests*, (2022-09-15). DOI: 10.3390/f13111917

[21] Dong Q Q, Zhao X H, Sun Y X, Zhou D Y, Lan G H, Pu J Y, Feng C, Zhang H, Shi X L, Liu X B, Zhang J, Sun Z X, Yu H Q. Border row effects improved the spatial distributions of maize and peanut roots in an intercropping system, associated with improved yield[J/OL]. *Frontiers in Plant Science*, (2024-06-26). DOI: 10.3389/fpls.2024.1414844

[22] 吴鑫雨, 刘振洋, 李海叶, 郑毅, 汤利, 肖靖秀. 施氮和间作对蚕豆根瘤形成及氮素吸收累积的影响[J]. 作物杂志, 2021(5): 120-127
Wu X Y, Liu Z Y, Li H Y, Zheng Y, Tang L, Xiao J X. Effects of nitrogen application and intercropping on nodule formation and nitrogen uptake and accumulation in faba bean[J]. *Crops*, 2021(5): 120-127 (in Chinese)

[23] 覃潇敏, 潘浩男, 肖靖秀, 汤利, 郑毅. 低磷条件下玉米大豆间作对大豆根瘤生长、固氮功能的影响[J]. 作物学报, 2021, 47(11): 2268-2277
Qin X M, Pan H N, Xiao J X, Tang L, Zheng Y. Effects of maize and soybean intercropping on nodule growth, nitrogen fixation of soybean under low phosphorus condition[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(11): 2268-2277 (in Chinese)

[24] Lai H L, Gao F Y, Su H, Zheng P, Li Y Y, Yao H Y. Nitrogen distribution and soil microbial community characteristics in a legume-cereal intercropping system: A review [J/OL]. *Agronomy*, (2022-08-13). DOI: 10.3390/agronomy12081900

[25] Tang X M, Zhong R C, Jiang J, He L Q, Huang Z P, Shi G Y, Wu H N, Liu J, Xiong F Q, Han Z Q, Tang R H, He L F. Cassava/peanut intercropping improves soil quality via rhizospheric microbes increased available nitrogen contents[J/OL]. *BMC Biotechnology*, (2020-02-28). DOI: 10.1186/s12896-020-00606-1

[26] 芦美, 赵吉霞, 李永梅, 王自林, 范茂攀. 玉米间作马铃薯对根际土壤酶活性及团聚体稳定性的影响. 水土保持研究, 2023, 30(6): 123-132
Lu M, Zhao J X, Li Y M, Wang Z L, Fan M P. Effects of intercropping of maize and potato intercropping on rhizosphere soil enzyme activity and aggregate stability[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(06): 123-132 (in Chinese)

[27] 乔月静, 郭来春, 葛军勇, 刘琪, 杨珍平, 高志强. 燕麦与豆科作物间作对土壤酶活和微生物量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2020, 55(3): 54-61
Qiao Y J, Guo L C, Ge J Y, Liu Q, Yang Z P, Gao Z Q. Effects of oat-legume intercropping on soil enzyme activities and abundance of soil microbe [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2020, 55(3): 54-61 (in

Chinese）

[28] 王爱萍，姜彧宸，冯月，池田，温强，董琦．施氮与种植方式对北方旱作农田土壤酶活力及养分含量的影响[J]．华北农学报，2023，38(3)：130-138
Wang A P，Jiang Y C，Feng Y，Chi T，Wen Q，Dong Q. Effects of nitrogen application and planting patterns on soil enzyme activity and nutrient content of dryland in Northern China[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*，2023，38(3)：130-138（in Chinese）

[29] Liu R，Yang L，Zhang J D，Zhou G P，Chang D N，Chai Q，Cao W D. Maize and legume intercropping enhanced crop growth and soil carbon and nutrient cycling through regulating soil enzyme activities[J/OL]. *European Journal of Agronomy*，（2024-06-17）. DOI：10. 1016/j. eja. 2024. 127237

[30] 鲍士旦．土壤农化分析[M]．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）

[31] Marx M C，Wood M，Jarvis S C. A microplate fluorimetric assay for the study of enzyme diversity in soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*，2001，33(12-13)：1633-1640

[32] Singh A.，Schöb C.，Iannetta P. P. M. Nitrogen fixation by common beans in crop mixtures is influenced by growth rate of associated species[J/OL]. *BMC Plant Biology*，（2023-05-15）. DOI:10. 1186/s12870-023-04204-z

[33] Jaskulska I，Jaskulski D，Galezewski L. Peas and barley grown in the strip-till one pass technology as row intercropping components in sustainable crop production [J/OL]. *Agriculture*，（2022-02-04）. DOI：10. 3390/agriculture12020229

[34] Pampana S，Arduini I，Andreuccetti V，Mariotti M. Fine-tuning N fertilization for forage and grain production of barley-field bean intercropping in Mediterranean environments[J/OL]. *Agronomy*，（2022-02-08）. DOI：10. 3390/agronomy12020418

[35] 冯晓敏，高翔，臧华栋，胡跃高，任长忠，郝志萍，吕慧卿，曾昭海．燕麦-绿豆间作效应及氮素转移特性[J]．植物学报，2023，58(01)：122-131
Feng X M，Gao X，Zang H D，Hu Y G，Ren C Z，Hao Z P，Lyu H Q，Zeng Z H. Intercropping effect and nitrogen transfer characteristics of oat-mungbean intercrop[J]. *Chinese Bulletin of Botany*，2023，58(1)：122-131（in Chinese）

[36] 鲁兆宏，谭婷婷，滕一鸣，杨文钰，杨峰．大豆和花生表型及光合特性对荫蔽的响应[J]．浙江大学学报:农业与生命科学版，2023，49(4)：526-534
Lu Z H，Tan T T，Teng Y M，Yang W Y，Yang F. Phenotypes and photosynthetic characteristics of soybeans and peanuts in response to shading [J]. *Journal of Zhejiang University:Agriculture and Life Sciences*，2023，49(04)：526 - 534（in Chinese）

[37] 杨亚东，冯晓敏，任长忠，胡跃高，张卫建，曾昭海．燕麦‖大豆、燕麦‖绿豆系统种间互作对氮素吸收与结瘤固氮的影响[J]．中国农业科学，2015，48（S1）：32-39
Yang Y D，Feng X M，Ren C Z，Hu Y G，Zhang W J，Zeng Z H. Effects of interspecific interactions on nitrogen uptake and nodulation nitrogen fixation in oat ‖ soybean and oat ‖ mung bean intercropping systems[J]. *Scientia Agricultura Sinica*，2015，48(S1)：32-39（in Chinese）

[38] Hu H Y，Li H.，Hao M M，Ren Y N，Zhang M K，Liu R Y，Zhang Y，Li G，Chen J S，Ning T Y，Kuzyakov Y. Nitrogen fixation and crop productivity enhancements co-driven by intercrop root exudates and key rhizosphere bacteria[J]. *Journal of Applied Ecology*，2021，58(10)：2243-2255

[39] Dong Q Q，Zhao X H，Zhou D Y，Liu Z H，Shi X L，Yuan Y，Jia P Y，Liu Y Y，Song P H，Wang X G，Jiang C J，Liu X B，Zhang H，Zhong C，Guo F，Wan S B，Yu H Q，Zhang Z. Maize and peanut intercropping improves the nitrogen accumulation and yield per plant of maize by promoting the secretion of flavonoids and abundance of Bradyrhizobium in rhizosphere[J/OL]. *Frontiers in Plant Science*，（2022-08-04）. DOI：doi. org/10. 3389/fpls. 2022. 957336

[40] Wei W W，Liu T T，Shen L，Wang X Y，Zhang S，Zhang W. Effect of maize（*Zeal mays*）and soybean（*Glycine max*）intercropping on yield and root development in Xinjiang，China[J/OL]. *Agriculture*，（2022-07-10）. DOI：doi. org/10. 3390/agriculture12070996

[41] Wang L，Zhou T，Cheng B，Du Y L，Qin S S，Gao Y，Xu M，Lu J J，Liu T，Li S X，Liu W G，Yang W Y. Variable light condition improves root distribution shallowness and P uptake of soybean in maize/soybean relay strip intercropping system[J/OL]. *Plants*，（2020-09-15）. DOI：doi. org/10. 3390/plants9091204

[42] 张辰煜，葛军勇，褚俊聪，王星宇，赵宝平，杨亚东，臧华栋，曾昭海．燕麦红芸豆带状间作的产量效应及根系形态与土壤酶活性[J]．作物学报，2025，51(2)：459-469
Zhang C Y，Ge J Y，Chu J C，Wang X Y，Zhao B P，Yang Y D，Zang H D，Zeng Z H. Yield effect and its root and soil enzyme characteristics of oat and red kidney bean strip intercropping[J]. *Acta Agronomica Sinica*，2025，51(2)：459-469（in Chinese）

[43] Farooq T H，Kumar U，Mo J，Shakoor A，Wang J，Rashid M H U，Tufail M A，Chen X Y，Yan W D. Intercropping of peanut-tea enhances soil enzymatic activity and soil nutrient status at different soil profiles in subtropical Southern China[J/OL]. *Plants*，（2021-04-27）. DOI：doi. org/10. 3390/plants10050881

[44] Jing B，Shi W J，Wang H，Lin F M. 15N labeling technology reveals enhancement of nitrogen uptake and transfer by root interaction in cotton/soybean intercropping[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*，2023，103(13)：6307-6316

[45] 王一帆，刘华清，赵西宁，高晓东．禾豆间作系统水分和根系分隔对牧草氮素吸收利用及转移的影响[J]．水土保持学报，2024，38(4)：279-287
Wang Y F，Liu H Q，Zhao X N，Gao X D. Effects of water and root separation on nitrogen uptake，utilization and transfer in a Gramineae-legume intercropping system[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*，2024，38(4)：279-287（in Chinese）

[46] Ali A，Jabeen N，Farruhbek R，Chachar Z，Laghari A A，Chachar S，Ahmed N，Ahmed S，Yang Z P. Enhancing nitrogen use efficiency in agriculture by integrating agronomic practices and genetic advances[J/OL]. *Frontiers in Plant Science*，（2025-03-11）. DOI：doi. org/10. 3389/fpls. 2025. 1543714

[47] Liu Y L，Fan Y Y，Kuzyakov Y，Dai J，Zhang C C，Li C J. Effects of maize/soybean intercropping on nitrogen mineralization and fungal communities in soil[J/OL]. *Plant and Soil*，（2025-08-13）. DOI：10. 1007/s11104-025-07824-6

[48] Massa A，Gil-Martinez M，Michelsen A，Dresbøll D B，Kjøller R. Lupin-barley intercropping：Root to root interactions drive nitrogen transfer from legume to cereal[J/OL]. *Applied Soil Ecology*，（2025-04-11）. DOI：doi. org/10. 1016/j. apsoil. 2025. 106069

[49] Ma H Y，Zhou J，Ge J Y，Zamanian K，Wang X Y，Yang Y D，Zeng Z H，

Zhao B P, Hu Y G, Zang H D. Oat/soybean intercropping reshape the soil bacterial community for enhanced nutrient cycling[J]. *Land Degradation & Development*, 2024, 35(17): 5200-5209

[50] 冯晓敏, 杨永, 臧华栋, 钱欣, 胡跃高, 宋振伟, 张卫建, 曾昭海. 燕麦花生间作系统作物氮素累积与转移规律[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(3): 617-624
Feng X M, Yang Y, Zang H D, Qian X, Hu Y G, Song Z W, Zhang W J, Zeng Z H. Characteristics of crop nitrogen accumulation and nitrogen transfer in oat and peanut intercropping system [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(3): 617-624 (in Chinese)

[51] Yu X, Xiao S H, Yan T X, Chen Z P, Zhou Q, Pan Y Z, Yang W T, Lu M J. Interspecific competition as affected by nitrogen application in sweet corn-soybean intercropping system[J/OL]. *Agronomy*, (2023-08-29). DOI: doi.org/10.3390/agronomy13092268

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 马智鸣,中国农业大学农学院作物栽培学与耕作学硕士研究生。本科毕业于四川农业大学农学院农学专业,以第一作者身份在《四川农业大学学报》发表论文1篇,曾获2023年国家励志奖学金、四川农业大学校级优秀本科毕业生等多项荣誉。



通讯作者简介: 臧华栋,中国农业大学农学院教授,博士生导师。入选国家级青年人才、唐氏康奈尔-中国学者、中国科协青年人才托举工程,神农中华农作制度创新团队核心成员。中国农学会耕作制度分会理事,中国植物营养与肥料学会养分循环专业委员会委员,中国土壤学会青年工作委员会委员。主持国家重点研发计划青年科学家项目、国家自然科学基金等省部级以上项目6项,参与国家产业技术体系等项目2项。主要研究方向为绿色种植制度理论与技术,结合区域数据整合、稳定同位素示踪、微生物学等研究手段、重点关注生态高效种植制度构建与优化、农田地力培肥、作物-土壤-微生物互作等。主持制定地方标准5项,参编《中国燕麦学》《耕作学》等教材和专著5部,获得省部级奖励2项。以第一作者或通讯作者在 *Nature Food*、*Nature Communications*、*One Earth*、*Global Change Biology* 等发表论文50余篇,其中ESI 1% 高被引论文11篇,2023年以来连续入选全球前2%顶尖科学家榜单。担任 *Land Degradation & Development* 共同主编、*Farming System* 编委、*Frontiers of Agricultural Science and Engineering* 和《土壤通报》青年编委,以及 *Plant and Soil* 和 *Agriculture Ecosystems & Environment* 客座编辑等。