



刘硕,廖睿,刘洋,李宗,罗子恒,张钰婕,隋鹏. 玉米大豆间作和条带轮作对辽西褐土地区土壤养分及产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2025,30(10):38-49.
LIU Shuo, LIAO Rui, LIU Yang, LI Zong, LUO Ziheng, ZHANG Yujie, SUI Peng. Impact of maize and soybean intercropping and strip rotation on soil nutrients and yield in the brown soil region of Western Liaoning[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025,30(10):38-49.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.10.04

玉米大豆间作和条带轮作对辽西褐土地区土壤 养分及产量的影响

刘硕¹ 廖睿¹ 刘洋³ 李宗² 罗子恒² 张钰婕¹ 隋鹏^{1*}

(1. 中国农业大学农学院,北京 100193;

2. 沈阳农业大学农学院,沈阳 110866;

3. 辽宁省农业科学院 耕作栽培研究所,沈阳 110866)

摘要 为探明辽西半干旱地区玉米大豆复合种植的最佳模式及其对土壤养分和产量的影响,2023—2024年在辽宁省阜新市褐土地区开展了为期2年的田间定位试验,设置玉米单作(M)、大豆单作(S)、玉米大豆间作(IMS)和玉米大豆条带轮作(IRMS)4种植模式,分别测定2年0—20和>20—40 cm土层的土壤有机碳含量、全氮含量、土壤速效养分含量、微生物量碳氮含量、土壤碳和氮的获取酶活性、土壤质量指数(SQI)及作物产量等指标,系统评估了不同种植模式对土壤养分的影响及其综合效应。结果表明:2023和2024年IRMS的SQI均显著高于M和S($P<0.05$)。在生产力方面,IRMS的玉米经济当量产量为10 363 kg/hm²,土地当量比为1.16,显著优于IMS模式,表现出更高的土地利用效率。2024年,IRMS的0—20 cm土层有机碳含量较M和S模式升高48.59%~66.77%,土壤碳氮比(C/N)为13.06,显著高于其他3种模式($P<0.05$),土壤微生物量碳含量较IMS显著增加。相比于M和S模式,IMS和IRMS均可显著提升0—20 cm土层铵态氮和硝态氮含量,并显著提升氮获取酶活性($P<0.05$)。综上,玉米大豆条带轮作(IRMS)通过优化玉米和大豆的时空配置,实现了土壤肥力和系统生产力双提升的目标,是适宜在辽西半干旱地区推广的可持续复合种植模式。

关键词 玉米大豆间作;条带轮作;碳氮养分;土壤质量;产量

中图分类号 S344.2

文章编号 1007-4333(2025)10-0038-12

文献标志码 A

Impact of maize and soybean intercropping and strip rotation on soil nutrients and yield in the brown soil region of Western Liaoning

LIU Shuo¹, LIAO Rui¹, LIU Yang³, LI Zong², LUO Ziheng², ZHANG Yujie¹, SUI Peng^{1*}

(1. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. College of Agronomy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China;

3. Institute of Crop Cultivation and Farming System, Liaoning Academy of Agricultural Science, Shenyang 110866, China)

Abstract To explore the optimal model of maize and soybean composite cropping and its effects on soil nutrients and yield in the semi-arid region of Western Liaoning. A two-year field experiment was conducted in the brown soil region of Fuxin City, Liaoning Province, from 2023 to 2024. Four cropping systems-maize monoculture (M), soybean monoculture (S), maize/soybean intercropping (IMS), and maize/soybean strip rotation (IRMS), were established. Indicators such as soil organic carbon, total nitrogen, available nutrients, microbial biomass carbon

收稿日期: 2025-06-15

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFD1500600)

第一作者: 刘硕(ORCID:0000-0001-5185-3650),博士研究生,E-mail:B20223010008@cau.edu.cn

通讯作者: 隋鹏(ORCID:0000-0002-8643-4744),教授,主要从事资源协调高效利用的农作制度研究,E-mail:suipeng@cau.edu.cn

and nitrogen, soil carbon and nitrogen acquisition enzyme activities, soil quality index (SQI), and crop yield were systematically evaluated. The results indicated that: The soil quality index (SQI) of the strip rotation treatment (IRMS) was significantly higher than that of maize and soybean monoculture by 12.43% to 14.14% ($P < 0.05$). In terms of productivity, the maize equivalent yield in the strip rotation treatment was 10 363 kg/hm², with a land equivalent ratio of 1.16, which was significantly higher than that in the intercropping treatment (IMS), demonstrating better land use efficiency. By 2024, the surface organic carbon content of the strip rotation treatments was 48.59% to 66.77% higher than that of the maize and soybean monocrops, the soil carbon to nitrogen (C/N) ratio was 13.06, which was significantly higher than that of the other three treatments ($P < 0.05$). Its soil microbial carbon content was significantly higher than that of the intercropping. Compared with maize and soybean monocropping, intercropping and strip rotations simultaneously and significantly ($P < 0.05$) increased ammonium and nitrate N contents in the 0-20 cm soil layer, and significantly ($P < 0.05$) increased nitrogen-acquiring enzyme activities. In conclusion, the maize and soybean strip rotation system, by optimizing the spatio-temporal configuration of maize and soybean, achieves the dual goals of enhancing soil fertility and system productivity. The system is a sustainable composite cropping model suitable for promotion and application in the semi-arid region of Western Liaoning.

Keywords maize and soybean intercropping; strip rotation; carbon and nitrogen nutrients; soil quality; yield

玉米(*Zea mays* L.)与大豆(*Glycine max* L.)是保障全球与中国粮食安全的两大关键作物,其产量的稳定性关系到农业系统的可持续发展^[1]。在中国,大豆相较于玉米存在明显的供需矛盾,产能不足已成为制约其产业发展的瓶颈^[2]。在此背景下,通过进行间作这种能够充分利用土地和环境资源、协调粮豆争地矛盾的种植制度,是提升玉米和大豆产能的重要途径^[3]。因此,探究玉米大豆间作对土壤肥力及生产力的影响规律,对于挖掘粮豆生产中的固碳增产潜力及该模式可持续发展具有重要意义。

相关研究表明,玉米大豆间作是减少氮肥投入、改善土壤养分状况并提高系统可持续性的重要方式,近年来在中国所推广的玉米大豆带状间作技术已经生产了 122 万 t 大豆,将大豆自给率提高了 1.5%^[4-5]。目前,玉米大豆间作模式已推广和应用于中国西南地区、西北地区以及黄淮海地区^[6]。通过不同尺度的研究分别揭示了玉米大豆间作的综合效益,在大尺度层面已有研究多集中于系统评估间作在提高区域产量、进行模型预测提升综合效益方面^[7-8]。对于农田生产方面的研究主要聚焦于作物空间配置与群体结构优化,通过调控密度、带宽与行距可强化种间互补、缓解资源竞争,提升系统稳定性^[9-10]。关于机制调控的相关研究则揭示了间作模式下种间互作对土壤养分循环和微生物群落结构的影响,尤其在促进根际互作、微生物功能提升与养分有效性等方面^[11-12]。

为缓解玉米和大豆连作造成的生态功能退化,在带状间作系统中引入条带轮作,通过增强系统的时间与空间多样化,有效调控进入土壤的有机物数量与质量,进而改善土壤状况^[13-14]。Cong 等^[15]研究发现,玉米蚕豆条带轮作 7 年比 2 种作物单作模式固持了更多的土壤有机碳,而且也固持了更多的土壤有机氮^[15]。对玉米花生条带轮作的研究显示,由于玉米和花生不同秸秆管理方式,进行条带轮作可更有效地提高表层土壤的有机碳,并通过土壤养分的优化提升了土地生产力^[16]。对其他作物条带轮作的研究发现,条带轮作通过影响棉花种内根-冠互作、种间根-根和冠-冠互作重新平衡根冠关系,调控作物产量和品质,提高产量和效益^[17]。也有研究发现,将玉米大豆间作引入黄淮海地区麦玉米轮作系统提高了微生物降解和合成有机物的能力,以及增强微生物代谢、细胞过程和遗传信息处理的能力^[18]。这些结果表明,间作和轮作相结合对于改善作物生长,提高土地资源利用效率和提高生态效益的重要性。

辽西地区是辽宁省典型的旱作农业区,高投入的种植方式导致该区域农业生产所面临的环境风险也随之升高^[19]。间作是减轻玉米高投入下连作不良影响的重要途径,玉米大豆间作模式已成为该地区主要的间作模式之一^[20-21]。已有研究发现,该地区玉米大豆间作具有产量优势,间作大豆为玉米水分吸收在时间和空间序列上创造了有利条件,在提高玉米水分利用效率的同时也增加了土地生产

力^[22-23]。然而,目前关于玉米大豆条带轮作在辽西旱作农业区对土壤养分和产量影响的研究鲜见报道。本研究通过连续2年的定点试验,以连续单作玉米和连续单作大豆为对照,测定土壤碳氮相关指标、土壤速效养分以及产量等,分析玉米大豆间作和玉米大豆条带轮作模式的土壤特性、土壤质量和生产能力,旨在探明辽西半干旱地区玉米大豆复合种植的最佳模式及其对土壤和产量的影响,以期优化该地区种植模式和提高土地生产力提供参考。

1 材料与方

1.1 试验地概况

2023年开始,在辽宁省阜新市桃李村(42°07' N, 121°43' E, 海拔146 m)进行试验,试验区为褐土,试验前土地均为玉米连作种植,0—20 cm土层容重为1.52 g/cm³,土壤全氮含量为0.78 g/kg,土壤有机碳含量为7.47 g/kg,土壤pH 6.61。该地区属于半干旱气候,为一年一熟区。所用气象数据来自于试验地的气象观测站,记录每日气温、降水量等,见图1。2023和2024年生育期平

均气温分别为20.86和20.40℃,降雨总量分别为350.9和531.9 mm。

1.2 试验材料

玉米品种为紧凑型玉米品种‘东单1331’;大豆品种为耐密植、耐遮荫品种‘辽豆32’。玉米种子购自当地种子公司,大豆种子由辽宁省农业科学院提供。

1.3 试验设计

试验设置玉米单作(M)、大豆单作(S)、玉米大豆间作(IMS)和玉米大豆条带轮作(IRMS)4个处理。单作玉米密度为6.75万株/hm²,间作玉米密度为9.45万株/hm²,单作和间作大豆密度均为22.5万株/hm²,一穴双株。试验均采用完全随机区组试验设计,设置4次重复,小区面积为6 m×8 m。间作种植采用4行玉米与4行大豆间作,行距统一为50 cm,不同种植模式,见图2。耕作方式为旋耕秸秆粉碎还田,玉米、大豆播种和收获的时间分别为2023年5月18日和10月01日,2024年5月11日和9月26日。作物在雨养条件下生长,杂草由人工清除,病虫害管理依照当地农户常规操作。

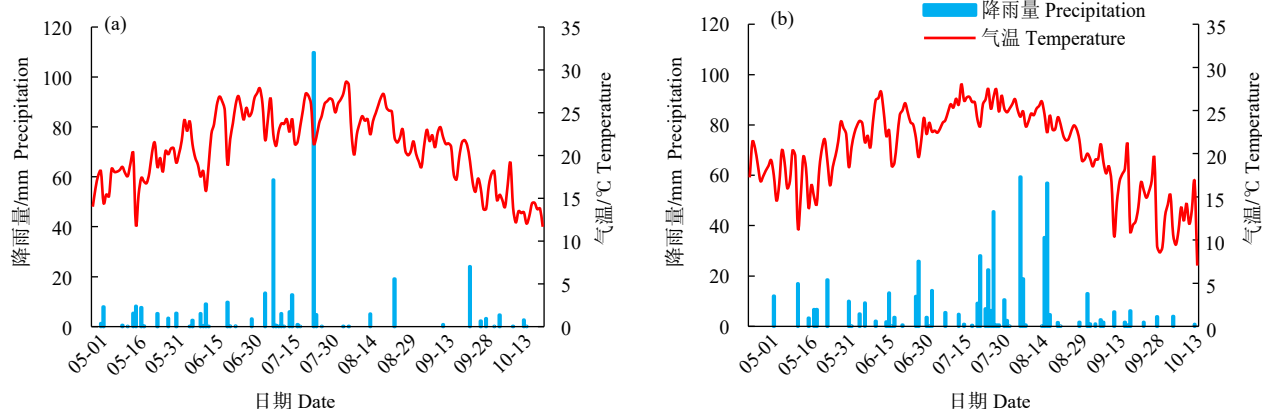


图1 2023(a)和2024年(b)生长季节的每日气温和降水量

Fig. 1 Daily temperature and precipitation for the growing seasons of 2023 (a) and 2024 (b)

在播种前,将尿素(含N 46 g/100 g)、磷酸二铵(含N 15 g/100 g P₂O₅ 42 g/100 g)和硫酸钾(含K₂O 50 g/100 g)作为基肥一次性混合撒施。单作玉米施肥量为:氮素200 kg/hm²、磷素112 kg/hm²、钾素100 kg/hm²;间作玉米施肥量为:氮素280 kg/hm²、磷素157 kg/hm²、钾素140 kg/hm²,间作处理根据密度比例相应增加肥料施用量,以保持与单作玉米单株养分供应一致。大豆单作与间作施肥量一致,分别为氮素60 kg/hm²、磷素

72 kg/hm²、钾素48 kg/hm²。玉米氮肥中40%作基肥,于播种前施用,60%于拔节期人工条施追肥,大豆不追肥。

1.4 指标测定

1.4.1 作物产量

在成熟期采收每小区3 m 4行的所有玉米和大豆后测定籽粒产量,并折算为标准含水率(玉米13%、大豆10%)。

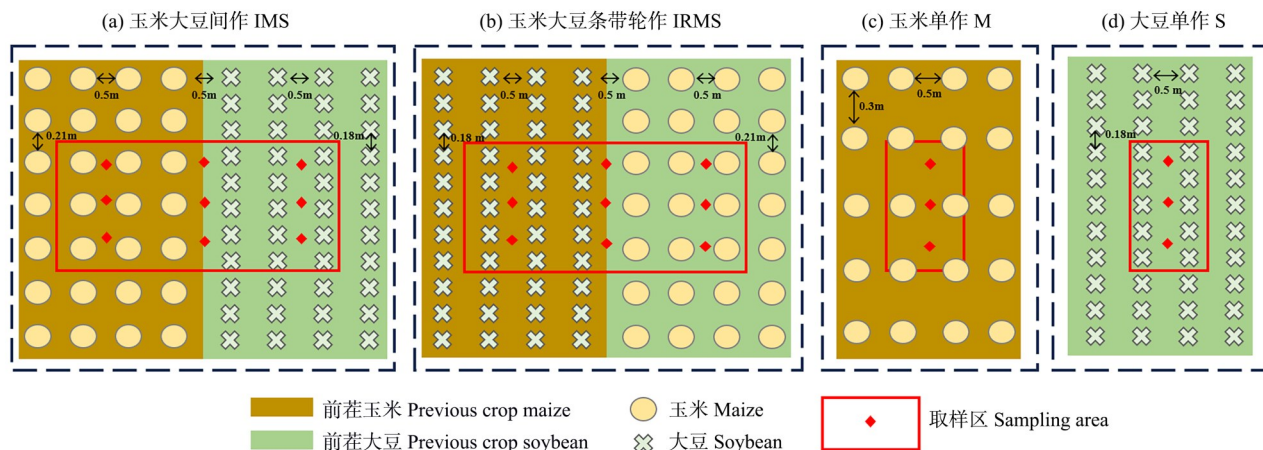


图 2 作物布局模式图

Fig. 2 Crop layout pattern diagram

1.4.2 土壤理化性质

在玉米大豆成熟期,使用直径 4 cm 的土钻取土样,深度为 0~40 cm,每 20 cm 一层于各小区中采集 0—20 和 >20—40 cm 土层样品用于土壤养分测定。取样时在每个小区的作物行间随机取 3 个点,用镊子剔除混匀样品中肉眼可见的小石子、作物根系和凋落物等杂质之后,过 2 mm 筛进行保存。过筛的样品分为两部分,一部分在 4 °C 保存,用于测定铵态氮(NH_4^+-N)、硝态氮(NO_3^--N)、微生物量碳和氮,以及酶的活性;另一部分自然风干后,过 1 mm 的筛子,用于测定土壤 pH、土壤有机碳(SOC)、有效磷(AP)、有效钾(AK)和全氮(TN)含量。

土壤 pH 采用电位法测定;土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾外加热法测定;全氮(TN)采用凯氏定氮法测定;土壤碳氮比(C/N)为土壤有机碳含量与全氮含量的比值;铵态氮(NH_4^+-N)与硝态氮(NO_3^--N)采用分光光度法测定;微生物量碳(MBC)与微生物量氮(MBN)采用氯仿熏蒸抽提法测定,微生物量碳的转换系数为 0.45,微生物量氮的转换系数为 0.54^[24]。采用 Marx 等^[25]的方法,测定土壤中碳获取酶(C-acq)和氮获取酶(N-acq)活性,利用式(1)和(2)对属于同一函数的碳获取酶(C-acq)、氮获取酶(N-acq)活性进行归一化处理^[26],计算公式如下:

$$\text{C-acq} = \sqrt[3]{(\beta\text{Glu} \times \text{Cello} \times \text{Xyl})} \quad (1)$$

$$\text{N-acq} = \sqrt[2]{(\text{Nag} \times \text{Leu})} \quad (2)$$

式中: βGlu 、Cello、Xyl、Nag、Leu 分别为 β -1,4-葡萄糖苷酶、 β -纤维二糖水解脱酶、 β -木糖苷酶、 β -1,4N-乙

酰氨基葡萄糖苷酶、L-亮氨酸氨基肽酶的活性。

1.4.3 资源利用效率

土地当量比(LER)计算公式如下:

$$\text{LER} = \frac{Y_m}{M_m} + \frac{Y_s}{M_s} \quad (3)$$

式中: Y_m 和 Y_s 分别为间作玉米和大豆的产量, kg/hm^2 ; M_m 和 M_s 分别为相应的单作产量, kg/hm^2 。

玉米经济当量产量(MEEY)计算公式如下^[27]:

$$\text{MEEY} = Y_s \times \frac{P_s}{P_m} \quad (4)$$

式中: Y_s 表示大豆的籽粒产量, kg/hm^2 ; P_s 和 P_m 分别表示大豆和玉米的价格,元/kg。当地农作物实际买卖价格,2023 年玉米和大豆的平均价格分别为 2.60、4.83 元/kg、2024 年玉米和大豆的平均价格分别为 2.10、4.00 元/kg。

采用全数据集法^[28]对土壤质量指数(SQI)进行评估。数据包括 2023 和 2024 年土壤有机碳、全氮、铵态氮、硝态氮、有效磷、有效钾、微生物量碳、微生物量氮、碳获取酶、氮获取酶、土壤 pH 和土壤容重共 12 个指标。第一步:数据标准化,采用线性比例法对全数据集中所有指标进行数据标准化处理,标准化后的数据视作每个指标的得分^[29];第二步:计算权重,对指标进行主成分分析,得到各个指标的权重;第三步:加权后相加,将每个指标的得分与其对应权重相乘,最后将所有加权后的指标得分相加,即得到 SQI。对于数值越高越有利于土壤质量的土壤指标,例如土壤有机碳、全氮等,采用式(5)进行标准化;对于数值越低越有利于土壤质量的土壤指标,例如土壤容重,采用式(6)进行标准化:

$$S = \frac{X_i}{X_{\max}} \quad (5)$$

$$S = \frac{X_{\min}}{X_i} \quad (6)$$

式中: S 为土壤指标 i 的得分; X_i 为土壤指标 i 的观测值; $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 分别为指标 i 的最高值和最低值。

$$SQI = \sum_{i=1}^n S_i \times W_i \quad (7)$$

式中: S_i 为指标 i 得分; W_i 为指标 i 主成分分析得出的权重因子; n 为指标个数。

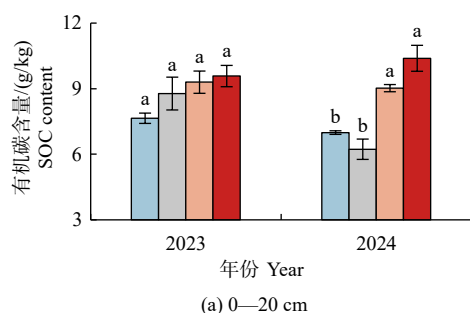
1.5 统计分析

所有数据整理和统计分析均采用Excel 2021和SPSS 27.0。方差分析使用ANOVA检验。使用Excel 2021软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同种植方式对土壤有机碳的影响

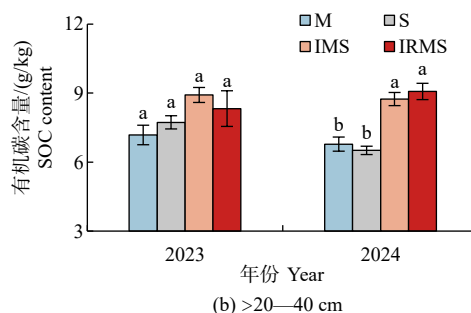
由图3可知,0—20 cm土层中,2023年4个处理的



土壤有机碳(SOC)含量间无显著差异,但玉米大豆间作(IMS)和玉米大豆条带轮作(IRMS)较玉米单作(M)和大豆单作(S)呈现增加的趋势;2024年,IMS和IRMS的SOC均显著高于M和S单作,其中IRMS的SOC含量为 10.39 ± 0.59 g/kg,较M和S分别提升48.59%和66.77%。 >20 —40 cm土层中,在2023年4个处理的SOC含量无显著差异;而2024年4个处理的SOC含量差异显著($P < 0.05$),IRMS的SOC含量较M和S增加33.76%~39.62%($P < 0.05$)。

2.2 不同种植方式对土壤全氮的影响

由图4可知,0—20 cm土层中,2023和2024年4个处理的全氮含量(TN)均无显著差异。2024年M、S、IMS的TN较2023年分别增加了8.46%、11.67%和13.04%,而IRMS未发生显著变化。 >20 —40 cm土层中,2023年4种模式的TN差异不显著,但2024年IRMS的TN显著低于其他3个处理($P < 0.05$)。



M, 玉米单作; S, 大豆单作; IMS, 玉米大豆间作; IRMS, 玉米大豆条带轮作。不同字母表示在同一年不同处理之间差异显著($P < 0.05$)。下同。
M, maize monoculture; S, soybean monoculture; IMS, maize/soybean intercropping; IRMS, maize/soybean strip rotation. Different letters indicate significant differences between treatments within the same year ($P < 0.05$). The same below.

图3 不同种植方式的土壤有机碳含量(SOC)

Fig. 3 The change of organic carbon content of soil under different cropping practices

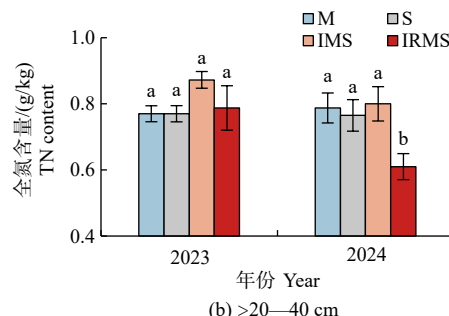
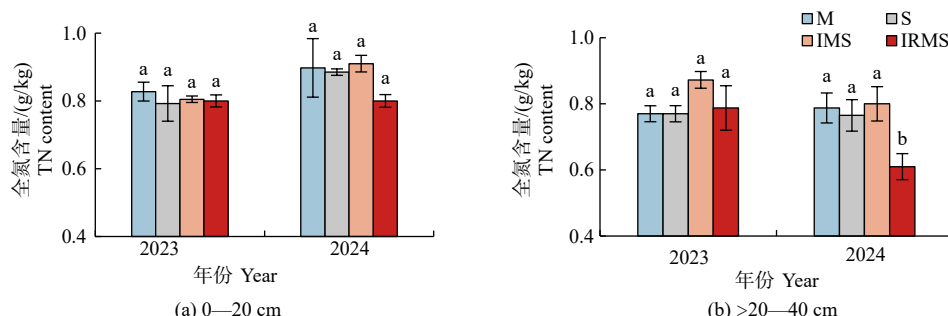


图4 不同种植方式的土壤全氮含量(TN)

Fig. 4 The change of total nitrogen content of soil under different cropping practices

2.3 不同种植方式对土壤碳氮比的影响

由图5可知,0—20 cm土壤中,2023—2024年不

同种植模式的土壤碳氮比(C/N)仅IRMS在2024年较上一年提升8.65%,其他3个处理的C/N均下降。

2024 年 4 个处理的 C/N 存在显著差异,IRMS 的 C/N 为 13.06 ± 0.10 , 显著高于其他 3 个处理。在 $>20\text{—}40$ cm 土层中,2023 年 4 个处理的 C/N 无显著差异,2024

年,各处理的 C/N 差异均达到显著水平,由高到低为条带轮作(IRMS) $>$ 间作(IMS) $>$ 大豆单作(S) $>$ 玉米单作(M)($P<0.05$)。

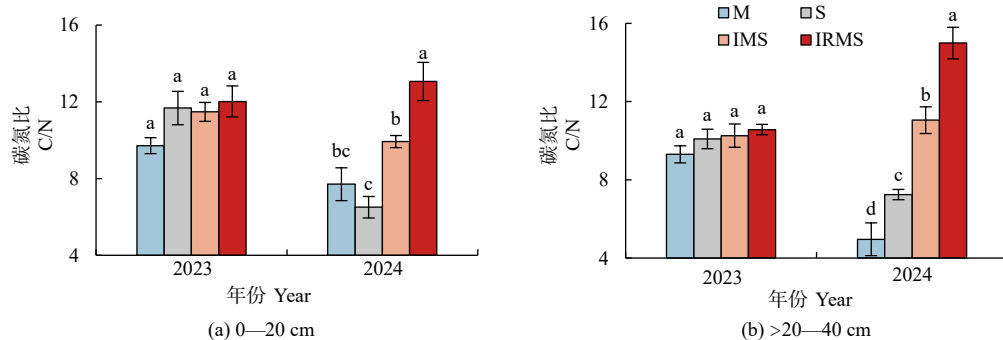


图 5 不同种植方式的土壤碳氮比(C/N)

Fig. 5 The change of carbon to nitrogen ratio of soil under different cropping practices

2.4 不同种植方式对土壤速效养分的影响

由表 1 可知,0—20 cm 土层中,2024 年 IMS 和 IRMS 的铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)含量较 M 和 S 高 38.86%~57.32%。 $>20\text{—}40$ cm 土层中,4 种模式的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量无显著差异。2024 年,IMS 处理中硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)含量在 0—20 和 $>20\text{—}40$ cm 分别

为 14.23 ± 1.47 和 11.35 ± 0.22 mg/kg,均显著高于其他处理($P<0.05$)。土壤有效磷(AP)含量的变化主要体现在 0—20 cm,2023 年 4 个处理间未产生显著差异,2024 年 IMS 和 IRMS 的 AP 比 M 和 S 高 53.22%~104.93%($P<0.05$)。0—20 cm 土层有效钾含量(AK)经过 2 年种植处理后,2024 年 IRMS

表 1 2023 和 2024 年不同处理的土壤速效养分变化

Table 1 Changes in soil quick nutrients in different treatments in 2023 and 2024

mg/kg

土层深度/cm Soil depth	年份 Year	处理 Treatment	铵态氮 $\text{NH}_4^+\text{-N}$	硝态氮 $\text{NO}_3^-\text{-N}$	有效磷 AP	有效钾 AK
0—20	2023	M	3.23 ± 0.64^a	2.87 ± 0.63^a	7.73 ± 3.35^a	139.67 ± 10.64^a
		S	2.22 ± 0.33^a	3.20 ± 0.84^a	10.08 ± 3.24^a	116.59 ± 7.88^a
		IMS	2.71 ± 0.19^a	2.18 ± 0.11^a	7.48 ± 1.17^a	133.61 ± 6.85^a
		IRMS	2.42 ± 0.19^a	2.31 ± 0.13^a	11.20 ± 4.19^a	130.09 ± 6.92^a
	2024	M	1.58 ± 0.12^b	6.08 ± 0.32^b	6.32 ± 0.83^{bc}	110.49 ± 9.97^c
		S	1.57 ± 0.06^b	5.67 ± 0.41^b	5.94 ± 0.76^c	112.78 ± 4.25^c
		IMS	2.47 ± 0.33^a	14.23 ± 1.47^a	12.17 ± 0.99^a	129.98 ± 4.76^b
		IRMS	2.20 ± 0.17^{ab}	6.75 ± 0.56^b	9.68 ± 0.75^{ab}	152.00 ± 3.77^a
$>20\text{—}40$	2023	M	1.94 ± 0.40^a	1.85 ± 0.08^a	6.85 ± 3.36^a	109.93 ± 2.85^a
		S	1.70 ± 0.30^a	2.03 ± 0.17^a	5.66 ± 1.90^a	115.63 ± 5.80^a
		IMS	2.20 ± 0.17^a	1.75 ± 0.03^a	3.79 ± 0.97^a	126.07 ± 6.21^a
		IRMS	2.06 ± 0.15^a	1.80 ± 0.05^a	4.33 ± 0.83^a	126.70 ± 11.06^a
	2024	M	1.55 ± 0.19^a	4.58 ± 0.42^b	8.44 ± 2.86^a	105.93 ± 7.92^b
		S	1.45 ± 0.07^a	4.68 ± 0.36^b	3.00 ± 0.57^b	111.64 ± 3.10^b
		IMS	1.83 ± 0.16^a	11.35 ± 0.22^a	4.31 ± 1.25^{ab}	126.30 ± 3.53^b
		IRMS	1.86 ± 0.07^a	3.86 ± 0.21^b	2.42 ± 0.20^b	164.59 ± 9.28^a

的AK为 152.00 ± 3.77 mg/kg,显著高于其他3个处理。在 $>20-40$ cm土层中,IRMS的AK含量较其他3个处理增加30.31%~55.38%。

2.5 不同种植方式对土壤微生物量碳、氮含量的影响

由图6可知,2023年4个处理0—20和 $>20-40$ cm

土层的微生物量碳(MBC)含量无显著差异,2024年0—20 cm土层中IMS的MBC含量显著低于M和S。2024年 $>20-40$ cm土层IRMS的MBC含量显著高于IMS ($P<0.05$)。第二年玉米大豆换带后,IRMS的MBC含量较IMS在0—20和 $>20-40$ cm分别增加115.69%和93.59%。

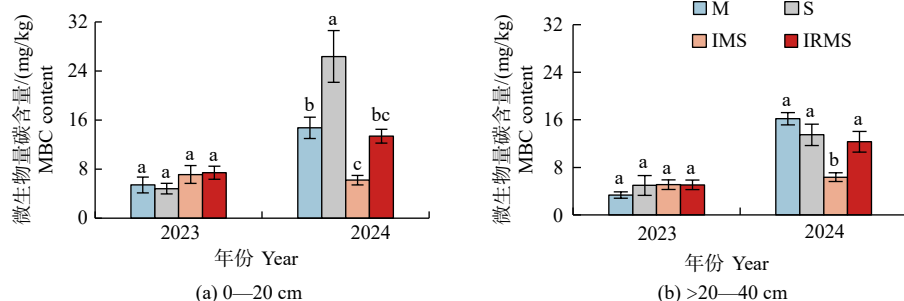


图6 不同种植方式的土壤微生物量碳(MBC)

Fig. 6 The change of microbial biomass carbon of soil under different cropping practices

由图7可知,对于微生物量氮(MBN)含量的分析表明,0—20 cm土层中,2024年4个处理的MBN含量较2023年均有所下降。2023年4个处理的MBN含量

无显著差异,2024年IMS和IRMS的MBN含量均显著低于玉米单作处理(M)。2023和2024年4个处理 $>20-40$ cm土层的MBN含量无显著差异。

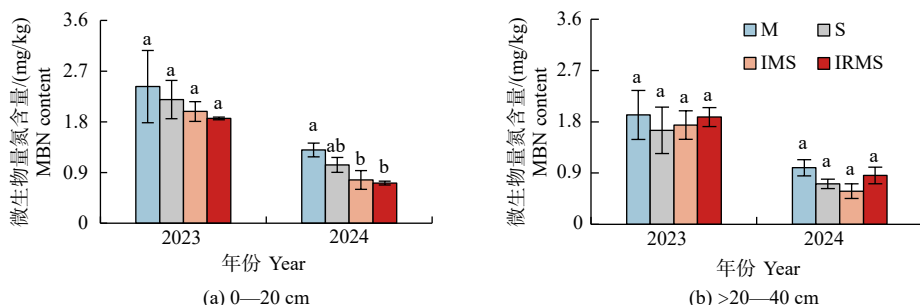


图7 不同种植方式的土壤微生物量氮(MBN)

Fig. 7 The change of microbial biomass nitrogen of soil under different cropping practices

2.6 不同种植方式对土壤碳、氮获取酶活性的影响

由图8可知,0—20 cm土壤中,2023和2024年4种模式的碳获取酶(C-acq)活性无显著差异。 $>20-40$ cm土层中,2023年IRMS的C-acq活性最高,但4个处理间无显著差异;2024年,4个处理间差异显著,S的C-acq活性显著高于M和IRMS ($P<0.05$)。

由图9可知,0—20 cm土壤中,2024年4个处理的氮获取酶(N-acq)活性差异显著,IMS和IRMS的N-acq活性分别为 52.57 ± 2.96 和 50.18 ± 1.58 nmol/(g·h),较M和S分别提升50.52%~

85.60%和43.67%~77.14% ($P<0.05$)。 $>20-40$ cm土层中,2023和2024年4种模式的N-acq活性无显著差异。

2.7 不同种植方式对土壤质量指数的影响

由图10可知,2023年4个处理间土壤质量指数(SQI)无显著差异。2024年4个处理0—20 cm土层的SQI差异显著,其中IMS和IRMS的SQI分别为 0.77 ± 0.02 和 0.72 ± 0.01 ,均显著高于M和S,增幅达12.43%~22.17% ($P<0.05$)。 $>20-40$ cm土层中,4个处理间无显著差异,但IMS和IRMS的SQI表现出增加趋势。

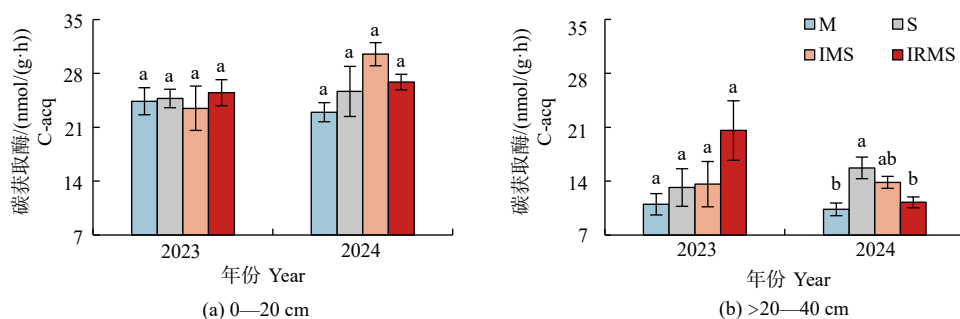


图 8 不同种植方式的土壤碳获取酶的变化活性(C-acq)

Fig. 8 The change of carbon-acquiring enzyme of soil under different cropping practices

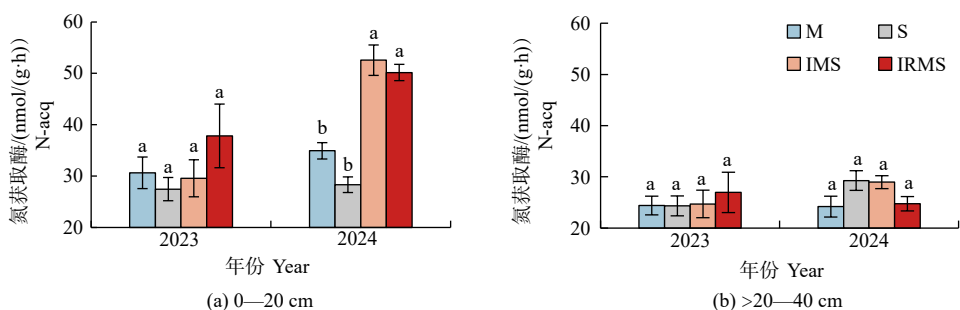


图 9 不同种植方式的土壤氮获取酶的变化活性(N-acq)

Fig. 9 The change of nitrogen-acquiring enzyme of soil under different cropping practices

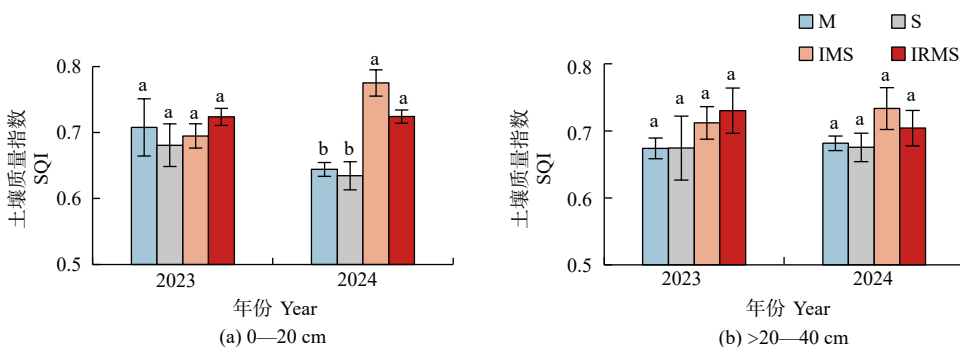


图 10 不同种植方式的土壤质量指数(SQI)

Fig. 10 The change of soil quality index of soil under different cropping practices

2.8 不同种植方式下玉米、大豆产量及土地当量比

由表 2 可知, 尽管 IMS 和 IRMS 下玉米和大豆的单位面积产量均显著低于各自的单作产量, 但土地当量比和玉米当量产量均较 2023 年提升。在 2024 年, IRMS 玉米产量均显著高于 IMS, IMS 和 IRMS 处理中大豆产量无显著差异。2024 年 IRMS 的玉米经济当量产量(MEEY)达到 10 363 kg/hm², 与 M 无显著差异, 且显著高于 IMS ($P < 0.05$)。2023 年 IMS 和 IRMS 的土地当量比(LER) ≈ 1.00 , 未表现出优势, 而 2024 年 IRMS 的 LER 提升至 1.16, 显著高于 IMS 处理 ($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 间作和条带轮作对土壤碳、氮含量及碳氮比的影响

在间作系统中, 土壤碳和氮的积累利于土壤肥力和间作系统生产力的提升^[15]。本研究结果表明, 条带轮作处理(IRMS)能显著提升表层土壤的有机碳含量, 较玉米(M)和大豆单作(S)提升 48.59% 和 66.77%, 条带轮作中玉米单位面积种植密度增加, 会导致单位面积秸秆输入量较单作有所提升。同时作物条带转换打破了作物残体输入的重复性, 与连续间作不同,

表2 不同种植方式下玉米、大豆产量和土地当量比
Table 2 Maize and soybean yields and land equivalent ratios under different cropping practices

年份 Year	处理 Treatment	玉米产量/(kg/hm ²) Maize yield	大豆产量/(kg/hm ²) Soybean yield	玉米当量产量/(kg/hm ²) MEEY	土地当量比 LER
2023	M/S	10 825.38±767.48 ^a	3 049.99±70.35 ^a	10 825.38±767.48 ^a	
	IMS	6 117.66±247.57 ^b	1 336.33±24.10 ^b	8 600.14±203.30 ^{bc}	1.00±0.04 ^a
	IRMS	6 062.27±110.49 ^b	1 274.43±35.61 ^b	8 429.77±143.52 ^c	0.98±0.06 ^a
2024	M/S	10 888.87±626.49 ^a	2 914.32±201.91 ^a	10 888.87±626.49 ^a	
	IMS	6 878.25±237.68 ^c	1 257.25±93.19 ^b	9 272.94±350.09 ^b	1.07±0.04 ^b
	IRMS	8 014.76±664.44 ^b	1 233.00±62.62 ^b	10 363.25±661.19 ^a	1.16±0.03 ^a

注:耕地面积产量按整块耕地面积折算的产出,反映田间实际单位土地的综合产出水平。
Note: Cropland area yields are outputs converted to whole cropland area, reflecting the level of combined output per actual unit of land in the field.

条带间的轮作引入了时间维度上的变化,豆科种植可能为土壤微生物提供了恢复和功能优化的窗口,从而更高效地将新的有机物料转化为稳定的土壤有机碳。条带轮作下具有低碳氮比(C/N)的大豆秸秆和具有高C/N的玉米秸秆可能混合分解,大豆秸秆的添加改变了微生物群落结构,促进了玉米秸秆的腐解,也增强了玉米对残余养分的吸收^[30]。本研究中,间作和条带轮作均显著提升了0—20和>20—40 cm土层的土壤有机碳含量(图3)。Wang等^[31]研究发现,间作显著加速了颗粒态有机碳(POC)向矿物结合态有机碳(MAOC)的转化,从而提高了土壤有机碳(SOC)的稳定性。与2023年相比,2024年大豆单作处理的有机碳含量下降,可能是由于2023年大豆上一茬为玉米,土壤秸秆和肥料输入量较大,而2024年在连续种植一季大豆后,对土壤有机碳含量造成的影响。Hall等^[32]研究发现,大豆凋落物比玉米凋落物分解更快,并驱动了大豆碳源相关微生物生物量的增加。土壤全氮(TN)在2年的试验中无显著变化,但2024年条带轮作下的全氮含量在亚表层(>20—40 cm)下降,但结合产量数据推断,该现象可能反映了氮素被作物更高效地吸收利用,而非氮素流失;与Han等^[33]研究发现的间作花生在种植带轮作后会提高吸收氮的有效性结果一致。本研究发现,条带轮作处理显著提升了土壤的C/N,并调节C/N至更加适宜的区间。2024年种植于大豆前茬上的玉米,受益于豆科作物的固氮作用,而种植于玉米前茬上的大豆则有利于前一年玉米残体的分解^[32]。

3.2 间作和条带轮作对土壤速效养分的作用

本研究中,2024年的间作和条带轮作处理均可显著提高表层土壤中的铵态氮和硝态氮含量,这与

Chen等^[34]发现的间作增加土壤氮残留的结论一致,大豆固氮作用、氮素矿化与转化过程的改善对土壤速效氮素的提升和利用有促进作用。条带轮作模式中土壤硝态氮积累显著低于间作(表1),可能是玉米种在大豆茬上,豆科作物残茬加速有机氮矿化,提升了玉米的氮素吸收能力并导致土壤中未被利用的硝态氮含量显著减少^[35]。间作和条带轮作可显著提升有效磷与有效钾含量,其中条带轮作处理的有效钾(AK)含量显著高于单作与间作处理(表1);与宋惠洁等^[36]在红壤地区的玉米大豆间作研究结论一致。有效磷(AP)方面,间作和条带轮作处理在2024年显著高于单作(表1),表明间作条件下作物根际有机酸分泌与微生物活性增强可能促进了磷的活化^[37]。Yang等^[38]从化学计量学角度的研究发现,间作土壤中大多数磷活化相关的功能基因丰度显著高于单作,证明了间作对磷限制的缓解作用。

3.3 间作和条带轮作对土壤微生物的生物量及碳、氮循环相关酶活性的调控

在土壤微生物活性方面,间作和条带轮作处理下微生物量碳和微生物量氮均低于单作(图6和图7)。这可能由于长期玉米连作条件下,土壤微生物群落结构较为均匀,而间作系统中,种间的相互作用对根际土壤中的微生物数量、生物量和种群变化会产生显著影响^[39]。本研究表明在间作模式下的碳、氮获取酶活性表现出积极的响应,特别是间作和条带轮作处理的氮获取酶活性显著高于玉米和大豆单作(图9)。Cui等^[40]研究发现,玉米和大豆土壤酶活性在秸秆还田与间作结合时达到最大。间作种间相互作用通过作物残留物的不同组合促进

了微生物群落的活跃,从而影响了氮的矿化和转化过程,表明间作系统比单作系统能更高效地利用土壤中的氮资源^[41]。Nasar 等^[42]研究发现,玉米大豆间作可通过调控玉米的氮同化酶改善玉米氮素利用效率,从而促进其生长和提高产量。

3.4 基于土壤质量指数、土地利用效率和经济产量的系统综合效益评估

本研究中,间作和条带轮作的土壤质量指数均显著高于单作,但条带轮作和间作之间并未呈现出显著差异(图 10)。IRMS 模式在土地利用效率上展现出优势,在 2024 年的土地当量比为 1.16,意味着与单作相比,该系统实现 16% 的土地节约效益。从经济产出看,条带轮作的玉米经济当量产量为 $10\,363.25 \pm 661.19 \text{ kg/hm}^2$,与玉米单作相比并无显著差异,且显著高于间作模式(表 2)。这表明条带轮作在生态效益和经济效益上实现了增效与稳产的双重目标。由于试验周期为 2 年,且 SQI 是一个整合了物理、化学和生物多方面属性的指标,田间长期试验可为评价 SQI 变化提供更全面的信息^[43]。因此,今后应进一步开展长期定位试验,揭示其提升土壤质量和稳定产量的内在机理,同时将评价维度拓展至更全面的经济与生态系统服务功能,从而为该技术模式的优化与推广提供更坚实的科学依据。

4 结 论

与传统的玉米和大豆单作相比,玉米大豆间作,特别是在间作的基础上进行条带轮作(IRMS),可显著改善辽西褐土区的土壤质量与农田生产力。IRMS 可使土壤有机碳的积累提升 48.59%~66.77% ($P < 0.05$),从而改善了土壤养分与肥力;大豆与玉米的共生、轮换,使氮获取酶活性增加 43.67%~77.14% ($P < 0.05$),促进了养分的有效循环;使土壤质量指数较单作提升 12.43%~14.14%,产量较间作提升 16.52%;同时,条带轮作具有较高的经济当量产量和土地当量比,在提高土地利用效率方面具有显著优势。综上,在辽西地区进行玉米大豆带状轮作,实现了土壤养分积累与产量的协同优化,是可持续的复合种植模式。

参考文献 References

[1] Erenstein O, Jaleta M, Sonder K, Mottaleb K, Prasanna B M. Global maize

production, consumption and trade: Trends and R & D implications[J]. *Food Security*, 2022, 14(5): 1295-1319

[2] 郭顺堂, 徐婧婷. 我国大豆食品产业发展现状及存在的问题[J]. 食品科学技术学报, 2023, 41(3): 1-8

Guo S T, Xu J T. Development status and existing problems of soybean food industry in China[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2023, 41(3): 1-8 (in Chinese)

[3] Li C X, Wang X L, Ji Z X, Li L, Guan X K. Optimizing the use of cultivated land in China's main grain-producing areas from the dual perspective of ecological security and leading-function zoning[J/OL]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, (2022-10-20). DOI:10.3390/ijerph192013630

[4] Liu J, Yang W Y. Soybean maize strip intercropping: A solution for maintaining food security in China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2024, 23(7): 2503-2506

[5] 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/OL]. 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)

[6] 钟宇晖, 汤松, 蒋靖怡, 杨晓琳, 杜太生. 大豆玉米带状复合种植产量、效益及关键因素研究[J/OL]. 中国生态农业学报(中英文), (2025-04-08). <https://link.cnki.net/urlid/13.1432.S.20250408.1420.003>

Zhong Y H, Tang S, Jiang J Y, Yang X L, Du T S. Study on yield, economic benefit, and key impact factors under the strip intercropping system of soybean and maize[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, (2025-04-08). <https://link.cnki.net/urlid/13.1432.S.20250408.1420.003>

[7] Khanal U, Stott K J, Armstrong R, Nuttall J G, Henry F, Christy B P, Mitchell M, Riffkin P A, Wallace A J, McCaskill M, Thayalakumaran T, O'Leary G J. Intercropping: Evaluating the advantages to broadacre systems [J/OL]. *Agriculture*, (2021-05-17). DOI:10.3390/agriculture11050453

[8] Li C J, Hoffland E, Kuyper T W, Yu Y, Li H G, Zhang C C, Zhang F S, van der Werf W. Yield gain, complementarity and competitive dominance in intercropping in China: A meta-analysis of drivers of yield gain using additive partitioning[J/OL]. *European Journal of Agronomy*, (2019-12-05). DOI:10.1016/j.eja.2019.125987

[9] 龚牙会, 杨敏, 林萍, 高超, 杨立达, 朱文雪, 彭新月, 袁晓婷, 李雨泽, 杨文钰, 雍太文. 播期对不同海拔地区带状间作大豆茎叶生长和产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(10): 187-198

Gong Y H, Yang M, Lin P, Gao C, Yang L D, Zhu W X, Peng X Y, Yuan X T, Li Y Z, Yang W Y, Yong T W. Effects of sowing date on the stem and leaf growth and yield of soybean strip intercropping at different altitude areas [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(10): 187-198 (in Chinese)

[10] Yang S Q, Zhao Y X, Xu Y N, Cui J X, Li T, Hu Y M, Qian X, Li Z X, Sui P, Chen Y Q. Yield performance response to field configuration of maize and soybean intercropping in China: A meta-analysis [J/OL]. *Field Crops Research*, (2023-12-29). DOI:10.1016/j.fcr.2023.109235

[11] 柴强, 胡发龙, 陈桂平. 禾豆间作氮素高效利用机理及农艺调控途径研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(1): 19-26

Chai Q, Hu F L, Chen G P. Research advance in the mechanism and agronomic regulation of high-efficient use of nitrogen in cereal-legume intercropping[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(1): 19-26 (in Chinese)

[12] Ma H Y, Surigaogee S, Xu Y, Li Y C, Christie P, Zhang W P, Li L. Responses of soil microbial community diversity and co-occurrence networks

- to interspecific interactions in soybean/maize and peanut/maize intercropping systems[J/OL]. *Applied Soil Ecology*, (2024-09-03). DOI: 10.1016/j.apsoil.2024.105613
- [13] McDaniel M D, Grandy A S, Tiemann L K, Weintraub M N. Crop rotation complexity regulates the decomposition of high and low quality residues[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 78: 243-254
- [14] Surigaogee S, Yang H, Fornara D, Su Y, Du Y H, Ren S X, Zhang W P, Li L. Litter functional dissimilarity accelerates carbon and nitrogen release from the decomposition of straw but not root in maize/legume intercropping[J/OL]. *Plant and Soil*, 2025, 506(1): 487-502
- [15] Cong W F, Hoffland E, Li L, Six J, Sun J H, Bao X G, Zhang F S, van der Werf W. Intercropping enhances soil carbon and nitrogen[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(4): 1715-1726
- [16] Zou X X, Liu Y, Huang M M, Li F, Si T, Wang Y F, Yu X N, Zhang X J, Wang H X, Shi P X. Rotational strip intercropping of maize and peanut enhances productivity by improving crop photosynthetic production and optimizing soil nutrients and bacterial communities[J/OL]. *Field Crops Research*, (2022-11-30). DOI:10.1016/j.fcr.2022.108770
- [17] Lv Q Q, Chi B J, He N, Zhang D M, Dai J L, Zhang Y J, Dong H Z. Cotton-based rotation, intercropping, and alternate intercropping increase yields by improving root - shoot relations[J/OL]. *Agronomy*, 2023, 13(2): 413. DOI: 10.3390/agronomy13020413
- [18] Liu G Y, He A L, Yang Z P, Lv J L, Pan X Y, Zheng N, Du J. Introducing intercropping into rotation system altered the structure, function and network complexity of soil microbial communities in farmlands of the North China Plain[J/OL]. *Applied Soil Ecology*, (2025-04-18). DOI: 10.1016/j.apsoil.2025.106094
- [19] 曹洋. 辽宁地区玉米生产的环境影响及其驱动力研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2024
- Cao Y. Study on environmental impact and driving forces of maize production in Liaoning region[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2024 (in Chinese)
- [20] 高砚亮, 孙占祥, 白伟, 冯良山, 杨宁, 蔡倩, 冯晨, 张哲. 辽西半干旱区玉米与花生间作对土地生产力和水分利用效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(19): 3702-3713
- Gao Y L, Sun Z X, Bai Wei, Feng L S, Yang N, Cai Q, Feng C, Zhang Z. Productivity and water use efficiency of maize-peanut intercropping systems in the semi-arid region of western Liaoning province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(19): 3702-3713 (in Chinese)
- [21] 刘洋, 孙占祥, 白伟, 郑家明, 侯志强, 张莹, 文凤. 玉米大豆间作对辽西地区作物生长和产量的影响[J]. *大豆科学*, 2011, 30(2): 224-228
- Liu Y, Sun Z X, Bai W, Zheng J M, Hou Z Y, Zhang Y, Wen F. Effect of maize and soybean interplanting on crops growth and yield in western Liaoning Province[J]. *Soybean Science*, 2011, 30(2): 224-228 (in Chinese)
- [22] 蔡倩, 孙占祥, 郑家明, 王文斌, 白伟, 冯良山, 杨宁, 向午燕, 张哲, 冯晨. 辽西半干旱区玉米大豆间作模式对作物干物质积累分配、产量及土地生产力的影响[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(5): 909-920
- Cai Q, Sun Z X, Zheng J M, Wang W B, Bai W, Feng L S, Yang N, Xiang W Y, Zhang Z, Feng C. Dry Matter accumulation, allocation, yield and productivity of maize-soybean intercropping systems in the semi-arid region of western Liaoning Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(5): 909-920 (in Chinese)
- [23] Zhang Y, Sun Z, Su Z X, Su Z C, Du G J, Bai W, Wang Q, Wang R N, Nie J Y, Sun T R, Feng C, Zhang Z, Yang N, Zhang X, Evers J B, Van Der Werf W, Zhang L Z. Root plasticity and interspecific complementarity improve yields and water use efficiency of maize/soybean intercropping in a water-limited condition[J/OL]. *Field Crops Research*, (2022-03-24). DOI: 10.1016/j.fcr.2022.108523
- [24] 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)
- [25] 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
- [26] Garcia-Ruiz R, Ochoa V, Hinojosa M B, Carreira J A. Suitability of enzyme activities for the monitoring of soil quality improvement in organic agricultural systems[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(9): 2137-2145
- [27] 王上, 李康利, 聂江文, 杨亚东, 臧华栋, 曾昭海. 华北平原春绿豆-夏玉米种植模式经济效益和碳足迹评价[J/OL]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(6): 910-919
- Wang S, Li K L, Nie J W, Yang Y D, Zang H D, Zeng Z H. Economic benefits and carbon footprint of a spring mung bean-summer maize cropping system in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(6): 910-919 (in Chinese)
- [28] Qi Y B, Darilek J L, Huang B, Zhao Y C, Sun W X, Gu Z Q. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China[J]. *Geoderma*, 2009, 149(3-4): 325-334
- [29] Raiesi F. A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 75: 307-320
- [30] Liu X D, Huo H R, Zhang Y H, Yang H W, Li S M, Meng L B. Promotion of maize straw degradation rate by altering microbial community structure through the addition of soybean straw[J/OL]. *Plant and Soil*, (2024-12-15). <https://doi.org/10.1007/s11104-024-07123-6>
- [31] Wang W, Li M Y, Wen Q H, Ma Y, Zhang Z M, Rehman M M U, Mo F, Tao H Y, Ma B L, Whalen J K, Xiong Y C. Cereal-legume intercropping stimulates straw decomposition and promotes soil organic carbon stability[J]. *Science China Life Sciences*, 2025, 68(5): 1498-1508
- [32] Hall S J, Russell A E, Moore A R. Do corn-soybean rotations enhance decomposition of soil organic matter?[J]. *Plant and Soil*, 2019, 444(1-2): 427-442
- [33] Han F, Guo R, Hussain S, Guo S Q, Cai T, Zhang P, Jia Z K, Naseer M A, Saqib M, Chen X L, Ren X L. Rotation of planting strips and reduction in nitrogen fertilizer application can reduce nitrogen loss and optimize its balance in maize - peanut intercropping[J/OL]. *European Journal of Agronomy*, (2022-11-28). DOI:10.1016/j.eja.2022.126707
- [34] Chen P, Song C, Liu X M, Zhou L, Yang H, Zhang X N, Zhou Y, Du Q, Pang T, Fu Z D, Wang X C, Liu W G, Yang F, Shu K, Du J B, Liu J, Yang W Y, Yong T W. Yield advantage and nitrogen fate in an additive maize-soybean relay intercropping system[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 657: 987-999
- [35] Bichel A, Oelbermann M, Echarte L. Impact of residue addition on soil nitrogen dynamics in intercrop and sole crop agroecosystems[J]. *Geoderma*, 2017, 304: 12-18
- [36] 宋惠洁, 秦文婧, 李桂龙, 刘佳, 胡丹丹, 吴艳, 柳开楼. 红壤丘陵区玉米鲜食大豆间作的丰产增效和土壤培肥效应[J]. *土壤*, 2024, 56(6): 1206-1213
- Song H J, Qin W J, Li J L, Liu J, Hu D D, Wu Y, Liu K L. Effects of corn-edamame intercropping modes on yield, efficiency and soil fertility in red soil hilly areas[J]. *Solus*, 2024, 56(6): 1206-1213 (in Chinese)
- [37] 柏文恋, 郑毅, 肖靖秀. 豆科禾本科间作促进磷高效吸收利用的地下部生物学机制研究进展[J]. *作物杂志*, 2018(4): 20-27
- Bai W L, Zheng Y, Xiao J X. Below-Ground Biotic Mechanisms of

- phosphorus uptake and utilization improved by cereal and legume intercropping: A Review[J]. *Crops*, 2018(4): 20-27 (in Chinese)
- [38] Yang Z Y, Zhang Y P, Luo G W. Regulation of soil C - N - P stoichiometry by intercropping mitigates microbial resource limitations and contributes to maize productivity[J]. *Plant and Soil*, 2024, 498(1): 21-38
- [39] Shu D T, Banerjee S, Mao X Y, Zhang J Q, Cui W L, Zhang W, Zhang B G, Chen S F, Jiao S, Wei G H. Conversion of monocropping to intercropping promotes rhizosphere microbiome functionality and soil nitrogen cycling[J/OL]. *Science of The Total Environment*, (2024-07-26). DOI:10.1016/j.scitotenv.2024.174953
- [40] Cui J J, Li S, Baoyin B T, Feng Y D, Guo D Y, Zhang L Q, Gu Y. Maize/ Soybean intercropping with straw return increases crop yield by influencing the biological characteristics of soil[J/OL]. *Microorganisms*, (2024-05-30). DOI:10.3390/microorganisms12061108
- [41] Regehr A, Oelbermann M, Videla C, Echarte L. Gross nitrogen mineralization and immobilization in temperate maize-soybean intercrops[J]. *Plant and Soil*, 2015, 391(1): 353-365
- [42] Nasar J, Zhao C J, Khan R, Gul H, Gitari H, Shao Z Q, Abbas G, Haider I, Iqbal Z, Ahmed W, Rehman R, Liang Q P, Zhou X B, Yang J. Maize-soybean intercropping at optimal N fertilization increases the N uptake, N yield and N use efficiency of maize crop by regulating the N assimilatory enzymes[J/OL]. *Frontiers in Plant Science*, (2023-01-04). DOI:10.3389/fpls.2022.1077948
- [43] 李嘉. 黄土区旱作半膜覆盖玉米轻简化施肥的农学与环境效应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023
- Li J. Effects of light-simplified fertilization on the agronomic and environmental properties of dry-land spring maize with the banded film-mulched in loess area [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2023 (in Chinese)

责任编辑:吕晓梅



第一作者简介: 刘硕, 中国农业大学作物栽培学与耕作学专业博士研究生。参与国家重点研发计划(2022YFD1500600)。以第一作者身份发表论文4篇, 其中3篇在《南方农业学报》《西南作物学报》《热带作物学报》发表。



通讯作者简介: 隋鹏, 博士, 中国农业大学农学院教授, 博士生导师, 农学院作物生态与农作学系主任。兼任中国农学会耕作制度分会常务理事、中国农学会立体农业分会理事、农业部绿色食品专家咨询委员会委员、河北省农业节水专家组成员。研究方向为资源协调高效利用的农作制度研究, 主要研究方向包括: 节水高效种植制度、粮食节本丰产技术与机制、循环农业原理与技术等。目前主持国家自然科学基金课题、云南省科技计划课题各1项, 参加课题3项。主编教材与著作3部、参与编写著作6部; 累计发表论文100余篇。