



郭星星, 马子惠, 张向前, 李欣艺, 杨芳欣, 戎美仁, 孟天天, 马达灵, 邱虎刚. 玉豆带状间作模式对土壤水热动态变化及大豆产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(12): 175-186.

GUO Xingxing, MA Zihui, ZHANG Xiangqian, LI Xinyi, YANG Fangxin, RONG Meiren, MENG Tiantian, MA Daling, QIU Hugang. Effects of different strip intercropping of soybean on soil hydrothermal dynamics and soybean yield[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(12): 175-186.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.12.15

玉豆带状间作模式对土壤水热动态变化及大豆产量的影响

郭星星^{1,2} 马子惠¹ 张向前^{1,2} 李欣艺¹ 杨芳欣¹ 戎美仁¹ 孟天天^{2,3}
马达灵^{1*} 邱虎刚⁴

(1. 内蒙古农业大学 农学院, 呼和浩特 010019;

2. 内蒙古自治区农牧业科学院 植物保护研究所, 呼和浩特 010031;

3. 河北农业大学 农学院, 河北 保定 071001;

4. 内蒙古烁秋农牧业有限公司, 内蒙古 呼伦贝尔 010010)

摘 要 为明确大兴安岭南麓玉豆不同带状间作模式土壤水热变化特征及作物产量形成差异,以大豆‘东生19号’、玉米‘益农玉12号’为供试品种,2023和2024年连续2年设置大豆2行玉米4行(S_2M_4)、大豆2行玉米6行(S_2M_6)、大豆4行玉米4行(S_4M_4)、大豆4行玉米6行(S_4M_6)、大豆6行玉米6行(S_6M_6)和传统的大豆2行玉米2行(S_2M_2)等6个玉豆带状间作模式,测定土壤含水率、土壤容重、土壤贮水量、土壤温度、产量等指标,分析大豆全生育期土壤水热动态变化与产量的关系。结果表明:2年的带状间作模式中,大豆带的0—10、>10—20、>20—40 cm 3个土层的土壤含水率均随大豆生育时期的推进呈现单峰曲线变化趋势,且3个土层的土壤含水率均随玉米带行数的增加而减少,而大豆带的耗水量则随玉米带行数的增加而增加;大豆带的0—15 cm 土层温度整体上随着生育时期的推进呈现单峰曲线变化趋势,且随着玉米带行数的增加而升高;2023和2024年, S_4M_4 、 S_4M_6 、 S_6M_6 的大豆经济产量分别比 S_2M_2 高出19.86%、42.05%、76.82%和57.15%、13.31%、57.18%,水分利用效率分别高出19.16%、40.34%、76.16%和58.91%、11.13%、54.37%,且大豆带经济产量、生物产量及水分利用效率均随玉米带行数的增加而减少;而2年的群体产量、土地当量比最高值分别出现在 S_2M_2 、 S_4M_4 ,但与其他处理的差异并不显著。综合间作系统作物产量、高产高效以及区域机械化作业水平等多方因素,大豆4行玉米4行(S_4M_4)带状间作模式更适合大兴安岭南麓旱作地区大豆和玉米高效生产。

关键词 玉豆间作; 土壤含水率; 土壤温度; 大豆产量; 水分利用效率

中图分类号 S565.1

文章编号 1007-4333(2025)12-0175-12

文献标志码 A

Effects of different strip intercropping of soybean on soil hydrothermal dynamics and soybean yield

GUO Xingxing^{1,2}, MA Zihui¹, ZHANG Xiangqian^{1,2}, LI Xinyi¹, YANG Fangxin¹,
RONG Meiren¹, MENG Tiantian^{2,3}, MA Daling^{1*}, QIU Hugang⁴

(1. College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019 China;

2. Institute of Plant Protection, Inner Mongolia Autonomous Region Academy of Agricultural and Animal Husbandry Science, Hohhot 010031 China;

3. College of Agronomy, Hebei Agricultural University, Baoding 071001 China;

4. Inner Mongolia Shuoqiu Agriculture and Animal Husbandry Co., LTD, Hulunbuir, 010010 China)

收稿日期: 2025-04-16

基金项目: 内蒙古农牧业创新基金项目(2023CXJN18); 内蒙古自治区科技计划项目(2022YFDZ0071, 2025KYPT0006)

第一作者: 郭星星(ORCID:0009-0006-8560-2044)硕士研究生, E-mail: 15582155809@163.com

通讯作者: 张向前(ORCID:0000-0001-5957-7646), 研究员, 主要从事土壤耕作与农业生态等研究, E-mail: zhangxiangqian_2008@126.com

马达灵(ORCID:0000-0002-1147-2252), 教授, 主要从事寒旱区作物栽培生理生态研究, E-mail: madaling@sina.com

Abstract To clarify the characteristics of soil water and heat changes and the differences in crop yield formation among different strip intercropping patterns of corn and soybean in the southern foot of the Great Khingan Mountains, the varieties tested were soybean ‘Dongsheng 19’ and maize ‘Yinnongyu 12’. Six intercropping patterns of soybeans, 2 rows of soybeans and 4 rows of corn (S_2M_4), 2 rows of soybeans and 6 rows of corn (S_2M_6), 4 rows of soybeans and 4 rows of corn (S_4M_4), 4 rows of soybeans and 6 rows of corn (S_4M_6), 6 rows of soybeans and 6 rows of corn (S_6M_6), (the traditional two rows of soybeans and two rows of corn S_2M_2), were designed in both 2023 and 2024. The influence on the dynamic changes of soil water and heat throughout the entire growth period of soybeans, as well as their yield and water use efficiency were analyzed. The results show that: During 2023 and 2024, the soil moisture content of the three soil layers of 0-10, >10-20, and >20-40 cm in the soybean strip presented a single-peak curve variation trend with the progress of the soybean growth period. Moreover, the soil moisture content in the three soil layers all decreased with the increase of the number of rows in the corn strip, while the water consumption of the soybean strip increased with the increase of the number of rows in the corn strip. The soil temperature in the 0-15 cm soil layer in the soybean zone generally showed a single-peak curve variation trend with the progress of the growth period, and increased with the increase of the number of rows in the corn zone. During the two years, the economic yield and water use efficiency of soybeans in S_4M_4 , S_4M_6 and S_6M_6 were all higher than those in S_2M_2 treatment. The economic yield was 19.86%, 42.05%, 76.82% and 57.15%, 13.31%, 57.18% higher than that in S_2M_2 treatment, respectively. The water use efficiency was 19.16%, 40.34%, 76.16% and 58.91%, 11.13%, 54.37% higher than that of the S_2M_2 treatment, respectively. Moreover, the economic yield, biological yield and water use efficiency of the soybean strip all decreased with the increase of the number of rows in the corn belt. During the two years, the highest values of group yield and land equivalent ratio occurred in S_2M_2 and S_4M_4 , and the differences were not significant. Taking multiple factors such as crop yield, high yield and efficiency, as well as the level of regional mechanized operation in the intercropping system into account the S_4M_4 treatment can be promoted in the southern foot of the Great Khingan Mountains.

Keywords intercropping of jade beans; soil moisture content; soil temperature; soybean output; water use efficiency

随着人口的增长以及生活水平提升的需求,我国粮油需求量不断增大。一方面,我国耕地面积有限,致使我国的粮食产需仍将长期维持紧平衡态势。而玉米和大豆属于粮油饲兼用作物,占粮食和饲料粮需求的49%和95%^[1]。另一方面,我国大豆需求严重依赖进口,对外依存度在80%以上^[2-4],且玉米在2020年也由净出口转为净进口^[2],2种作物产需缺口扩大,加之两者一直存在土地竞争问题^[5]。寻求一种作物多样、经济高效、土地产出率高的农业可持续发展模式对保障中国粮油安全具有重要意义。

带状复合种植是从传统间套作的基础上创新发展而来;不仅能够提高耕地复种指数和养分利用率,而且结合隔年倒茬,能有效缓解农业投入高和环境污染等问题,在现代农业中有很大的发展空间^[6]。玉米和大豆间作属于禾本科和豆科间套作复合种植模式,其生物学特性、时空搭配、资源利用在复合种植时具有显著的互补性^[5]。玉米和大豆以高

位作物和低位作物形成田间通风道,增加群体内空气流量,避免在增加密度的情况下作物出现 CO_2 浓度低于补偿点减弱光合作用的问题^[7]。2种作物对光、水、养分等资源在时间和空间利用上的差异、根系结构差异以及年际间交替轮作种植可避免土壤养分的偏耗,增加了土壤微生物群落的多样性,进一步改善了土壤结构^[8-9]。间作模式中的高耗水作物通过吸收相邻带的土壤水分从而减缓干旱胁迫并提高系统的水分利用效率^[10-11];通过作物带间太阳辐射的遮蔽作用^[12],避免夜间土壤温度快速下降^[13]、高温时段的土壤温度过高等作用^[14],使得土壤温度波动小于单作系统,更具有稳定性。大量研究已表明,大豆玉米间作处理下,土地当量比均>1,较单作更有优势^[15-17]。间作处理中,玉米和大豆均有一定程度的减产,但总产量与经济效益均高于作物单作的处理。其中,间作处理的经济效益较单作玉米增收达到20%~30%,较单作大豆增收达到60%~70%^[18-19]。

虽然对间套作水分利用的研究较多,但不同农业区域土壤、气候条件、资源等存在差异,玉豆间作不同模式间的土壤水热变化也可能存有区别。寇红太等^[20]研究发现在西北旱区 2 行玉米 4 行大豆带状间作处理(M_2S_4)的水分利用效率最大;毛海龙等^[21]研究表明,玉米 4 行大豆 4 行的配置模式为西辽河平原灌区以青贮利用为目的玉米大豆带状间作的最优模式;张亮等^[22]研究发现,玉米大豆 3:5、4:6 行的带状间作为云南省最优配置,被广泛应用。目前,针对于内蒙古东部地区玉米和大豆间作种植体系土壤水热及产量的研究鲜见报道。本试验以玉米大豆间作种植模式为研究对象,在大兴安岭南麓地区设置不同玉豆间作种植模式,分析土壤含水量、耗水量、土壤温度、产量以及水分利用效率等的变化,旨在揭示玉豆不同带状间作模式在大兴安岭

南麓地区的土壤水热动态变化规律,及其对大豆产量和水分利用效率的影响,以期为大兴安岭南麓地区适宜种植模式的筛选提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2023—2024 年在大兴安岭南麓,松嫩平原西北缘,内蒙古自治区呼伦贝尔市阿荣旗市长发村试验地($47^{\circ}56'54''\text{N}$, $122^{\circ}02'30''\text{E}$, 海拔 256 m)进行。试验地气候类型为温带大陆性半湿润气候,全年的日照时数大约在 2 750~2 850 h,年有效积温 2 394.1 $^{\circ}\text{C}$,无霜期为 90~130 d,见图 1。土壤类型为典型黑土,有机质 51.0 g/kg, pH 5.92,全氮 2.8 g/kg,全磷 1.73 g/kg,全钾 26.43 g/kg,碱解氮 27.37 mg/kg,速效磷 7.23 mg/kg,速效钾 463.73 mg/kg。

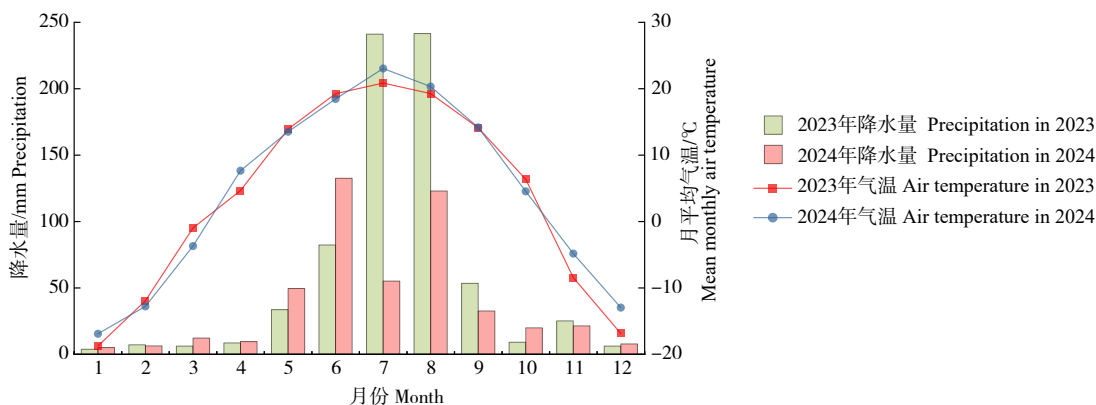


图 1 2023 和 2024 年月平均降水量及月平均温度

Fig. 1 Average monthly precipitation and average monthly temperature in 2023 and 2024

1.2 供试材料

供试玉米品种为‘益农玉 12 号’购自哈尔滨市益农种业有限公司,出苗至成熟生育日数为 116 d 左右,需 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温 2 280 $^{\circ}\text{C}$ 左右;大豆品种为‘东生 19 号’,购自齐齐哈尔市富尔农艺有限公司,亚有限结荚习性,出苗至成熟生育日数为 113 d 左右,需 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温 2 150 $^{\circ}\text{C}$ 左右。

1.3 试验设计

试验采取随机区组试验设计,设大豆玉米带状间作 6 个处理模式:大豆 2 行玉米 4 行(S_2M_4)、大豆 2 行玉米 6 行(S_2M_6)、大豆 4 行玉米 4 行(S_4M_4)、大豆 4 行玉米 6 行(S_4M_6)、大豆 6 行玉米 6 行(S_6M_6)和传统的大豆 2 行玉米 2 行(S_2M_2)为对照,每个处理 3 次重复,见表 1。起垄种植,一垄双行。垄上行距

45 cm,垄间行距 65 cm,垄长 667 m,其他管理方式同大田。

1.4 样品采集及指标测定

1.4.1 土壤含水率

分别于大豆的苗期、分枝期、开花期、结荚期、鼓粒期、成熟期,在行间选 3 个点,每个点取 0—10、>10—20、>20—40 cm 土层土壤,将 3 个点同一土层的土样混合,放入铝盒中用烘干法^[20]测定土壤含水率,每处理重复 3 次。计算公式如下:

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_3} \times 100\%$$

式中: W 为土壤含水率,%; m_1 为湿土加铝盒的质量, g; m_2 为烘干土加铝盒的质量, g; m_3 为铝盒的质量, g。

表 1 各处理的种植规模
Table 1 Planting scale of each treatment

处理 Treatment	行比(豆:玉) Row ratio	规模 Scale	处理 Treatment	行比(豆:玉) Row ratio	规模 Scale
S ₂ M ₂	2:2	带宽 220cm, 垄数×2	S ₄ M ₄	4:4	带宽 440cm, 垄数×4
S ₂ M ₄	2:4	带宽 330cm, 垄数×3	S ₄ M ₆	4:6	带宽 550cm, 垄数×5
S ₂ M ₆	2:6	带宽 440cm, 垄数×4	S ₆ M ₆	6:6	带宽 660cm, 垄数×6

1.4.2 土壤容重

采用环刀法^[20]在大豆播前和成熟期测定 0—10、>10—20、>20—40 cm 3 个土层的土壤容重,取样同上,每次测定重复 3 次。计算公式如下:

$$\rho = \frac{m_4 - m_5}{V}$$

式中:ρ,土壤容重,g/cm³;m₄,土壤和环刀质量之和,g;m₅,环刀质量,g;V,环刀体积,100 cm³。

1.4.3 土壤贮水量

计算播前和收获后 0—40 cm 土层的土壤贮水量。计算公式如下:

$$H = h \times W \times BD \times 10 \tag{1}$$

$$H_N = \sum_1^n H = H_1 + H_2 + \cdots + H_n \tag{2}$$

式中:H_N,各土层的土壤贮水量,mm;H,不同土层的土壤贮水量,mm;h,土层深度,cm;W,土壤含水率,%;BD为土壤容重,g/cm³;10,单位换算系数。

1.4.4 生育期耗水量

采用水分平衡法^[20]计算农田耗水量,计算公式如下:

$$ET = I + Q + U + R + F \pm \Delta W$$

式中:I,该生育时期灌水量,mm;Q,该生育时期降雨量,mm;U,地下水通过毛细管作用上移补给作物的水量,试验地地下水埋藏较深,其补给量可忽略不计,故 U=0,R 为地表径流量,试验地土地平坦,故 R=0,F 为下边界排水量,mm。

1.4.5 土壤温度

在大豆带插入地温计,对大豆各生育时期土温进行测定。测量时间为 9:00—10:00,测量土层为 0—15 cm,1 个土层,3 次重复。

1.4.6 产量

收获期,2 行种植模式取单垄上 1 m 内大豆植株和单垄上 10 m 内玉米植株,重复 3 次;4 行种植模式

取并行 2 垄 1 m 内大豆植株和并行 2 垄 10 m 内玉米植株,重复 3 次;6 行种植模式取并行 3 垄 1 m 内大豆植株和并行 3 垄 10 m 内大豆植株,重复 3 次,脱粒后测定大豆和玉米的粒重及水分,计算 2 种作物的经济产量。

1.4.7 土地当量比

土地当量比计算公式如下:

$$LER = \frac{Y_{im}}{Y_{sm}} + \frac{Y_{is}}{Y_{ss}}$$

式中:Y_{im}和 Y_{is}分别为间作玉米和大豆的籽粒产量,Y_{sm}和 Y_{ss}分别为单作玉米和大豆的籽粒产量,LER>1.0 为间作优势,LER<1.0 为间作劣势。

1.4.8 水分利用效率

水分利用效率是指单位耗水量下作物的产量,计算公式如下:

$$WUE = \frac{Y}{ET}$$

式中:WUE,水分利用效率,kg/(mm·hm²);Y,大豆产量,kg/hm²;ET,土壤耗水量,mm。

1.5 数据分析

利用 Microsoft Excel、SPSS 27.0 等软件进行数据的处理和统计分析;试验数据使用单因素方差分析检验试验处理间的差异显著性,并用 Origin 2021 制作图表。

2 结果与分析

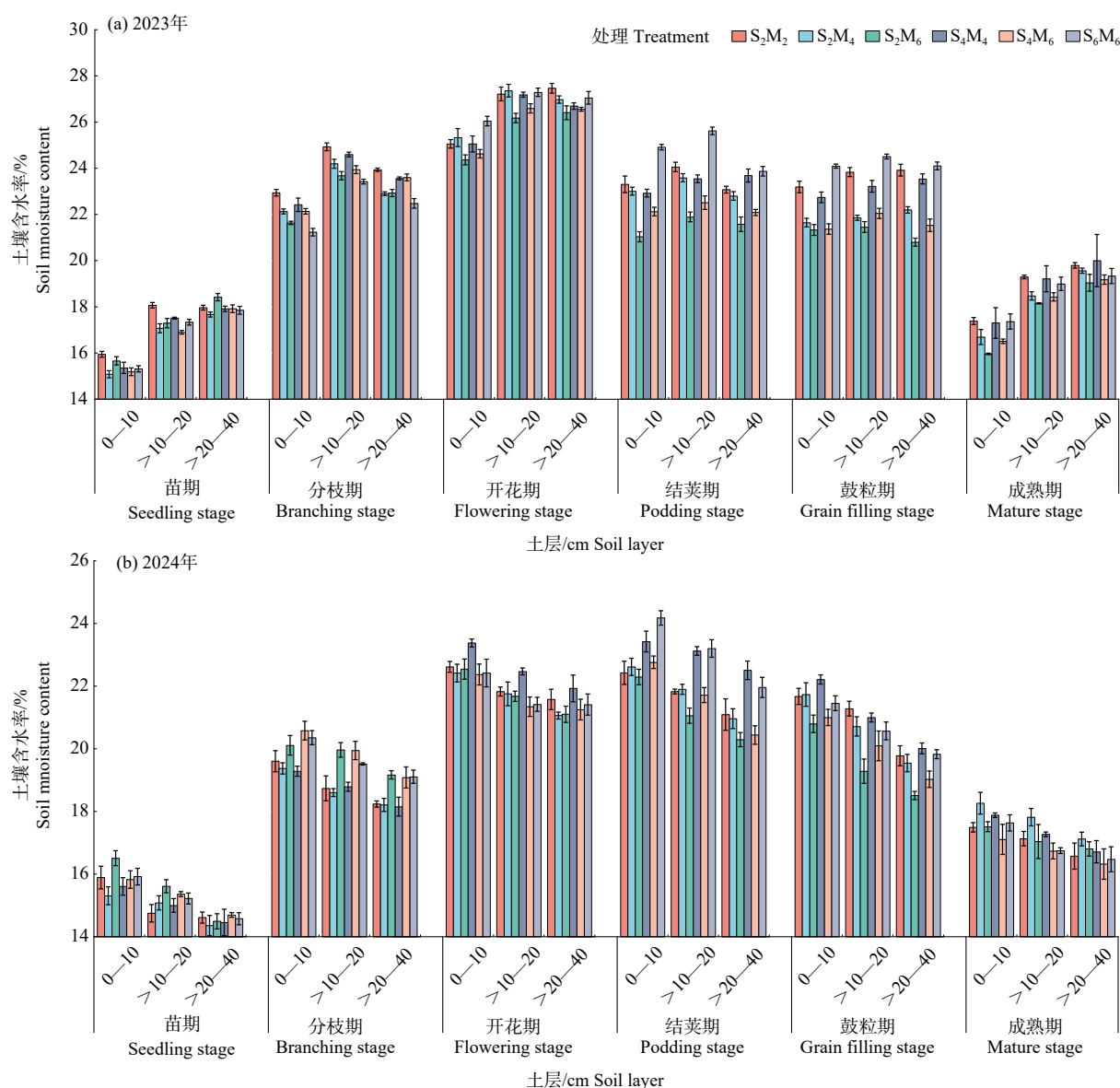
2.1 对土壤水热动态变化的影响

2.1.1 土壤含水率的影响

由图 2 可知,2023、2024 年不同处理 0—40 cm 土层土壤含水率在大豆整个生育期内表现为单峰曲线变化趋势,峰值出现在开花期及结荚期。2023 年,0—10 cm 土层中,苗期 S₂M₄、S₄M₄、S₄M₆、

S_6M_6 的土壤含水率均显著低于传统的 S_2M_2 ($P<0.05$); 分枝期, S_2M_2 的土壤含水率均显著高于其他处理 ($P<0.05$); 在开花期、结荚期、鼓粒期, S_6M_6 的土壤含水率均显著高于其他处理 ($P<0.05$); 除苗期、开花期外, 其余时期均表现出大豆带的土壤含水率随玉米带行数的增加而升高, 且在分枝期、成熟期不同处理的差异均达显著水平 ($P<0.05$)。>10—20 cm 土层中各生育时期各处

理土壤含水率与 0—10 cm 土层情况大体一致。>20—40 cm 土层, 苗期阶段 S_2M_6 的土壤含水率显著高于其余处理 ($P<0.05$); 分枝期和开花期, S_2M_2 的土壤含水率均显著高于其他处理 ($P<0.05$); 结荚期, 各处理土壤含水率由高到低为 $S_6M_6>S_4M_6>S_2M_2>S_2M_4>S_4M_4>S_2M_6$; 在开花期、结荚期、鼓粒期, 大豆带的土壤含水率随玉米带行数的增加而减少, 且在鼓粒期差异显著 ($P<0.05$), S_2M_4 、 S_2M_6 的



S_2M_2 , 大豆 2 行玉米 2 行; S_2M_4 , 大豆 2 行玉米 4 行; S_2M_6 , 大豆 2 行玉米 6 行; S_4M_4 , 大豆 4 行玉米 4 行; S_4M_6 , 大豆 4 行玉米 6 行; S_6M_6 , 大豆 6 行玉米 6 行。下同。

S_2M_2 , two rows of soybean and two rows of corn; S_2M_4 , two rows of soybean and four rows of corn; S_2M_6 , two rows of soybean and six rows of corn; S_4M_4 , four rows of soybean and four rows of corn; S_4M_6 , four rows of soybean and six rows of corn; S_6M_6 , six rows of soybean and six rows of corn, respectively. The same below.

图 2 2023 和 2024 年大豆带各生育时期的土壤含水率

Fig. 2 Soil water content at different growth stages in soybean strip in 2023 and 2024

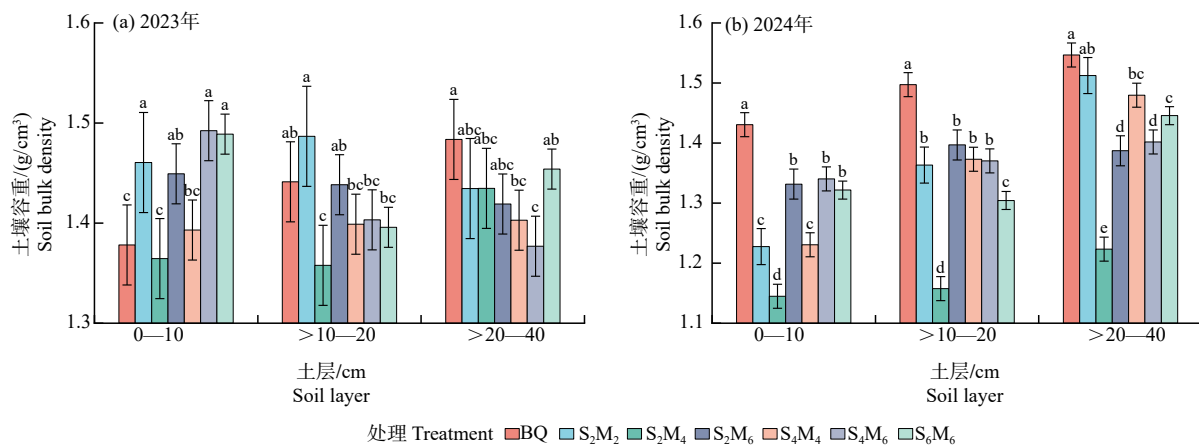
土壤含水率分别比 S_2M_2 降低了 1.73%、3.12%， S_4M_6 的土壤含水率比 S_4M_4 降低了 2.01%。

2024 年,大豆各生育时期 0—10 cm 土层的土壤含水率变化情况与 2023 年基本一致;2024 年,开花期、结荚期、鼓粒期的大豆带 >10—20 cm 土层土壤含水率均随玉米带行比的增加而减少,且在鼓粒期各处理的差异达显著水平 ($P<0.05$), S_2M_4 、 S_2M_6 分别比 S_2M_2 降低了 0.57%、2.00%, S_4M_6 的土壤含水率比 S_4M_4 处理降低了 0.90%。2024 年,开花期、结荚期、鼓粒期的大豆带 >20—40 cm 土层的土壤含水率均随玉米带行数的增加而减少,见图 2(b)。

2.1.2 土壤容重的影响

由图 3 可知,2023 年大豆成熟期, S_2M_2 、 S_2M_6 、

S_4M_6 、 S_6M_6 的 0—10 cm 土层的土壤容重均显著高于播前(BQ)土壤容重 ($P<0.05$); S_2M_4 的 >10—20 cm 土层的土壤容重则显著低于 BQ ($P<0.05$); S_4M_4 、 S_4M_6 的 >20—40 cm 土层的土壤容重均显著低于 BQ ($P<0.05$)。2024 年,大豆成熟期各处理的土壤容重随着土层加深而升高,但均低于 BQ。 S_2M_6 、 S_4M_6 、 S_6M_6 的 0—10 cm 土层的土壤容重分别比 S_2M_2 (对照) 升高 10.4%、11.3%、9.4% ($P<0.05$); S_2M_4 、 S_6M_6 的 >10—20 cm 土层的土壤容重显著低于 S_2M_2 , 分别降低了 20.6%、5.9% ($P<0.05$); >20—40 cm 土层, 各处理土壤容重由高到低为 $S_2M_2>S_4M_4>S_6M_6>S_4M_6>S_2M_6>S_2M_4$, 且 S_2M_2 (对照) 分别比 S_2M_4 、 S_2M_6 、 S_4M_6 、 S_6M_6 高 28.9%、12.5%、11.1%、6.7%。



BQ, 播种前。不同小写字母代表处理间差异达到显著水平 ($P<0.05$)。下同。

BQ, before sowing. Different lowercase letters represent the difference between treatments at $P<0.05$ significant level. The same below.

图3 2023和2024年大豆带播前和成熟期的土壤容重

Fig. 3 Soil bulk density before sowing and at the maturity stage in soybean strip in 2023 and 2024

2.1.3 土壤蓄水量的影响

由图 4 可知,2023 和 2024 年成熟期各处理大豆带 0—40 cm 土层的土壤贮水量均显著低于 BQ ($P<0.05$),且大豆带土壤贮水量均随玉米带行数的增加而减少。2023 年成熟期, >10—20 cm 土层, S_2M_2 的土壤贮水量显著高于其他处理 ($P<0.05$); >20—40 cm 土层, S_2M_6 、 S_4M_6 的土壤贮水量都显著低于 S_2M_2 ($P<0.05$); 0—40 cm 土层, S_2M_4 、 S_2M_6 、 S_4M_6 的土壤贮水量均显著低于 S_2M_2 ($P<0.05$)。2024 年成熟期 0—10 cm 土层, S_2M_4 、 S_6M_6 处理的土壤贮水量显著低于 S_2M_2 处理 ($P<0.05$), 分别减少了 11.4%、5.4%; >10—20 cm 土层, S_2M_2 处理的土壤贮水量最多, S_4M_6 处理次多; >20—40 cm 土层, 各处

理的土壤贮水量由高到低为 $S_2M_2>S_4M_4>S_6M_6>S_4M_6>S_2M_4>S_2M_6$, 且 S_2M_2 处理显著高于其他处理 ($P<0.05$), 分别增加了 4.1%、7.3%、12.6%、19.6%、24.0%; 0—40 cm 土层, S_2M_4 、 S_2M_6 、 S_4M_6 、 S_6M_6 处理的土壤贮水量显著低于 S_2M_2 处理 ($P<0.05$)。

2.2 对土壤温度的影响

由图 5 可知,2023 年,随着生育时期的推进,各处理大豆带 0—15 cm 土壤温度在分枝期达到最高点。在分枝期、开花期、结荚期以及鼓粒期, S_2M_6 、 S_4M_6 的 0—15 cm 土层土壤温度始终高于其他处理,且在结荚期差异显著 ($P<0.05$); 2024 年大豆带 0—15 cm 土层的土壤温度随生育时期的推进呈现单峰

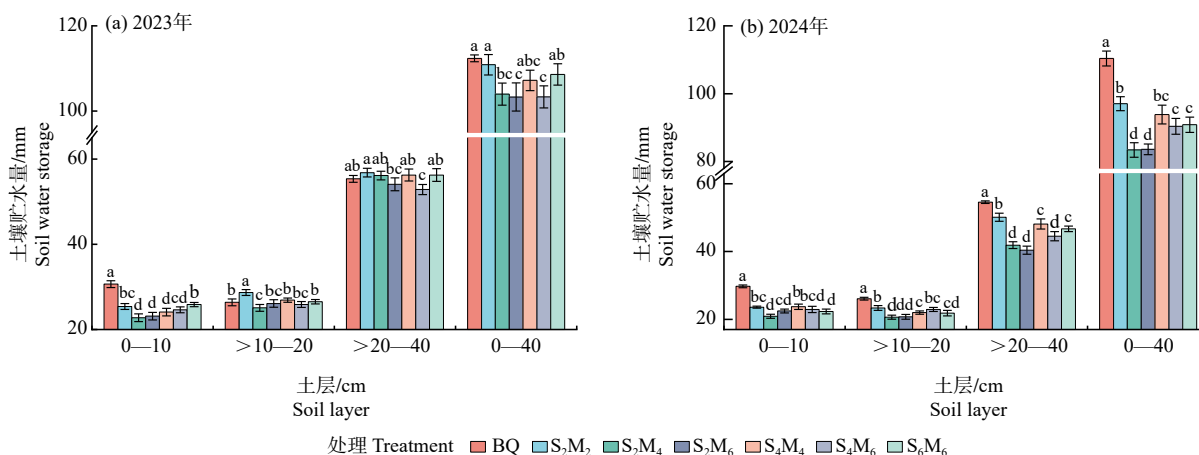


图 4 2023 和 2024 年大豆带播前和成熟期的土壤贮水量

Fig. 4 Soil water storage of different soil layers before sowing and at the maturity stage in soybean strip in 2023 and 2024

变化趋势,且在结荚期达到峰值。在分枝期、开花期、结荚期、鼓粒期, S_2M_6 、 S_4M_6 中 0—15 cm 土层的土壤温度始终高于其余处理,且在结荚期差异显著

($P < 0.05$)。2 年数据显示大豆带的 0—15 cm 的土层土壤温度具有随着玉米带行数的增加而升高的趋势。

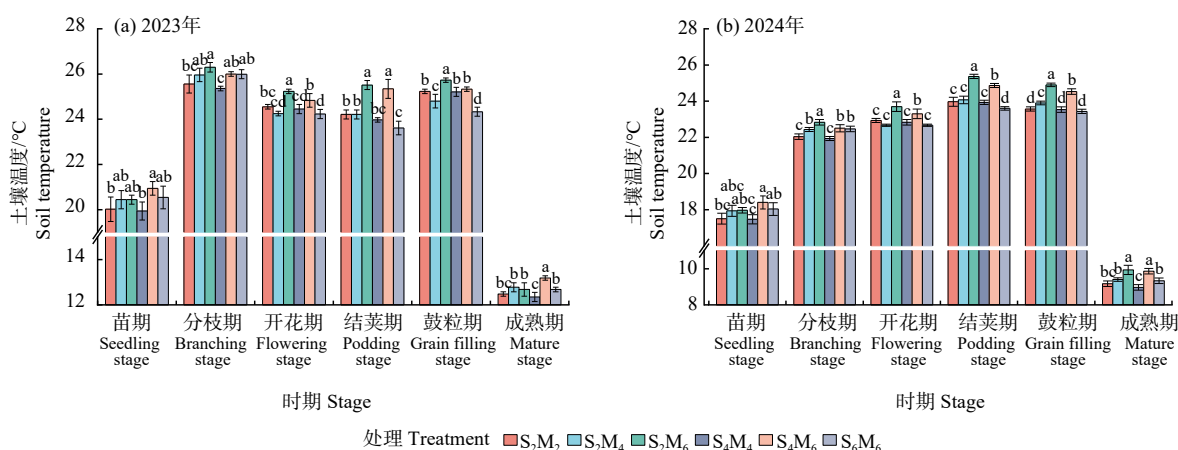


图 5 2023 和 2024 年大豆生育期内 0—15 cm 土层的土壤温度变化

Fig. 5 The change of soil temperature at 0-15 cm during the growth period of soybeans in 2023 and 2024

2.3 对产量的影响

2.3.1 大豆产量

由表 2 可知,2023 年,各处理大豆的经济产量由高到低为 $S_6M_6 > S_4M_6 > S_4M_4 > S_2M_2 > S_2M_4 > S_2M_6$,且各个处理间差异显著, S_6M_6 、 S_4M_6 、 S_4M_4 处理的大豆经济产量较 S_2M_2 处理分别增产 76.82%、42.08%、19.88%;在 2024 年,各处理的经济产量由高到低为 $S_6M_6 > S_4M_4 > S_4M_6 > S_2M_2 > S_2M_4 > S_2M_6$,且各处理间差异显著 ($P < 0.05$), S_6M_6 、 S_4M_6 、 S_4M_4 处理的大豆经济产量较 S_2M_2 处理分别增产 57.18%、13.31%、

57.15%,2 年最高经济产量均出现在 S_6M_6 处理,且大豆的经济产量表现出随玉米带行数的增加而减少。2023 和 2024 年各处理间的生物产量变化趋势与经济产量相似,且 S_6M_6 处理均高于其他处理。2 年数据表明,大豆带 4 行处理的收获指数整体上高于 2 行,而 S_6M_6 、 S_4M_6 、 S_4M_4 处理间及 S_2M_2 、 S_2M_4 、 S_2M_6 处理间均差异不显著。

2.3.2 玉米产量、群体产量和土地当量比

由表 3 可知,2023 年的各处理玉米产量由高到低为 $S_2M_2 > S_2M_4 > S_2M_6 > S_4M_4 > S_4M_6 > S_6M_6$;

表 2 2023 和 2024 年各处理大豆的产量

Table 2 Soybean yield of different treatment in 2023 and 2024

年份 Year	处理 Treatment	籽粒产量/(kg/hm ²) Grain yield	生物产量/(kg/hm ²) Biological yield	收获指数 Harvest index
2023	S ₂ M ₂	1 775.43±237.02 ^d	4 069.16±543.23 ^d	0.44 ^{cd}
	S ₂ M ₄	939.86±67.77 ^c	2 241.72±161.65 ^c	0.42 ^d
	S ₂ M ₆	530.08±97.55 ^f	1 190.98±219.18 ^f	0.43 ^{cd}
	S ₄ M ₄	2 522.59±55.85 ^b	5 373.70±118.98 ^b	0.47 ^b
	S ₄ M ₆	2 128.34±178.93 ^c	4 635.08±389.67 ^c	0.46 ^{bc}
	S ₆ M ₆	3 139.30±134.16 ^a	6 346.41±271.21 ^a	0.49 ^a
2024	S ₂ M ₂	1 569.24±159.60 ^b	3 387.13±344.50 ^b	0.46 ^{bc}
	S ₂ M ₄	1 163.73±318.94 ^c	2 778.28±476.69 ^c	0.45 ^c
	S ₂ M ₆	752.30±68.36 ^d	1 656.09±150.48 ^d	0.45 ^c
	S ₄ M ₄	2 466.08±130.09 ^a	5 019.69±266.74 ^a	0.49 ^{ab}
	S ₄ M ₆	1 778.10±145.67 ^b	3 579.11±293.22 ^b	0.50 ^a
	S ₆ M ₆	2 466.48±76.29 ^a	5 021.22±155.32 ^a	0.49 ^a

2024 年各处理的玉米产量中, S₂M₂ 最高, S₂M₆ 次高。2023 年, 各处理的群体产量中, S₂M₂ 最高, S₄M₄ 次高, 且 S₂M₂ 显著高于其他处理 ($P<0.05$), 分别比 S₂M₄、S₂M₆、S₄M₄、S₄M₆、S₆M₆ 高 10.21%、16.28%、8.34%、14.74%、21.91%; 2024 年各处理的群体产量与 2023 年情况大体一致。2 年试验中, S₂M₂ 和 S₄M₄ 的土地当量比均远远大于其他处理, 且 >1.00 。

表 3 2023 和 2024 年各处理玉米籽粒产量、系统籽粒产量和土地当量比

Table 3 Corn kernel yield, system grain yield and land equivalent ratio of different treatment in 2023 and 2024

年份 Year	处理 Treatment	玉米籽粒产量/(kg/hm ²) Corn kernel yield	系统籽粒产量/(kg/hm ²) System grain yield	土地当量比 Land equivalent ratio
2023	S ₂ M ₂	11 534.66 ^a	1 3310.09 ^a	1.56
	S ₂ M ₄	11 137.63 ^{ab}	12 077.49 ^{bc}	1.39
	S ₂ M ₆	10 916.42 ^b	11 446.50 ^d	1.31
	S ₄ M ₄	10 157.31 ^b	12 285.65 ^b	1.61
	S ₄ M ₆	9 077.41 ^c	11 600.00 ^{cd}	1.41
	S ₆ M ₆	7 778.72 ^d	10 918.02 ^e	1.36
2024	S ₂ M ₂	11 529.00 ^a	13 098.24 ^a	1.53
	S ₂ M ₄	10 481.36 ^b	11 645.09 ^{bc}	1.26
	S ₂ M ₆	11 215.46 ^a	11 967.76 ^b	1.28
	S ₄ M ₄	10 446.48 ^b	12 912.56 ^a	1.60
	S ₄ M ₆	9 402.52 ^c	11 180.62 ^c	1.37
	S ₆ M ₆	8 059.35 ^d	10 525.82 ^d	1.36

2.4 对大豆带耗水量及大豆水分利用效率的影响

由图 6 可知, 大豆玉米间作不同带行数对全生育时期大豆带 0—40 cm 土层的耗水量有显著影响 ($P<0.05$), 2023 年整体上显著高于 2024 年, 且大豆

带的耗水量随玉米带行数的增加而增加。2023 年, S₂M₄、S₂M₆、S₄M₆ 处理的耗水量显著高于传统的 S₂M₂ 处理 ($P<0.05$), 分别增加了 1.13%、1.25%、1.29%; 2024 年, 各处理的土壤耗水量由高到低为 S₆M₆ $>$

$S_2M_4 > S_2M_6 > S_4M_6 > S_2M_2 > S_4M_4$ 。在大豆水分利用效率方面,2024年各处理整体上高于2023年,且大豆的水分利用效率均随玉米带行数的增加而降低。2023年各处理大豆的水分利用效率由高到低为

$S_6M_6 > S_4M_6 > S_4M_4 > S_2M_2 > S_2M_4 > S_2M_6$, S_2M_6 的大豆水分利用效率最低,仅为 $0.86 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$; 2024年不同处理大豆的水分利用效率由高到低为 $S_4M_4 > S_6M_6 > S_4M_6 > S_2M_2 > S_2M_4 > S_2M_6$ 。

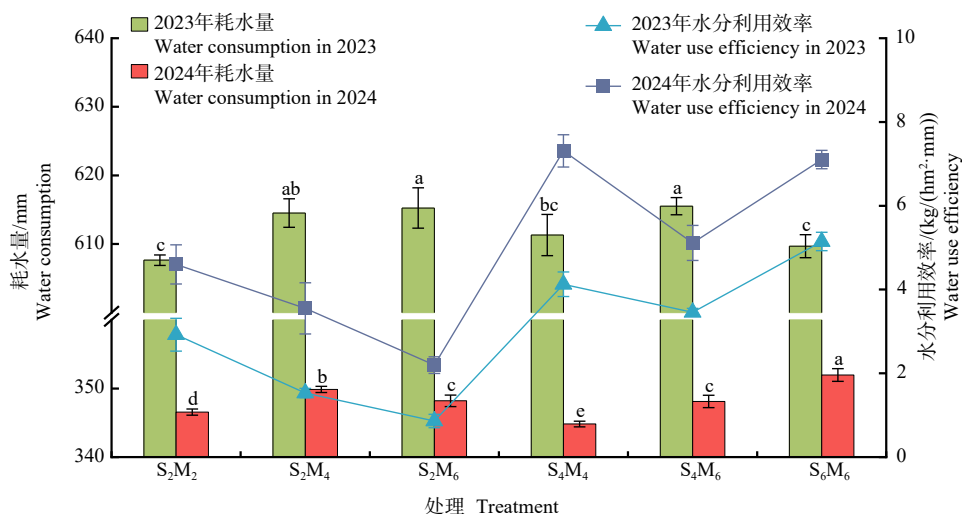


图 6 2023 和 2024 年大豆带 0—40 cm 土层的土壤耗水量及大豆水分利用效率

Fig. 6 Soil water consumption in 0-40 cm soil layer of soybean strip and water use efficiency of soybean in 2023 and 2024

3 讨论

3.1 对土壤水热动态变化的影响

土壤水不仅与地表水、地下水相联系,而且与热量传递关系密切,从而影响作物的生长环境,进一步作用于作物生产力及其形成过程^[23]。间作由于作物群体的多样性以及作物生态位的差异性,对土壤水热产生的影响较单作更复杂。高梦钊等^[24]研究表明,禾本科||豆科间作模式中,豆科作物可增加群体冠层密度,减少蒸发,从而减少土壤水分的流失。由于2023年降水量高于2024年,2023年各土层土壤含水量均高于2024年(图2);本研究中,大豆带的土壤含水量随着生育时期的推进呈现单峰曲线变化趋势,且峰值出现在开花期、结荚期,这和当地降水时期集中在7—8月有直接关联;大豆带的0—10、>10—20、>20—40 cm 3个土层和不同生育时期的土壤含水量都呈现出随玉米带行数的增加而减少的趋势,且在分枝期、结荚期、鼓粒期均较明显,而耗水量呈现出随玉米带行数的增加而增加的趋势,这与王雅梅等^[25]的研究结果类似。土壤容重反映了土壤物理结构的优劣,土壤结构又影响着土壤水、气、热等参数^[20],进一步作用于作物生长发育动态与产量构成。本研究中,各处理土壤容重随

着土层深度的加深而增大,这与刘敏等^[26]的研究结果类似。

间作较单作能够双向调节土壤温度,使作物生长环境更具稳定性^[27],对作物生长发育和产量形成具有积极的影响。在本研究中,大豆带0—15 cm土层的土壤温度随着生育期推进呈现单峰趋势变化(图5),这与该地区气候条件有直接联系。且大豆带0—15 cm土层的土壤温度还随玉米带的带数增加而呈现升高的趋势(图5)。这可能是因为玉米与大豆地上部和地下部生态位的差异,在环境条件如太阳光辐射、土壤水分等方面产生相互作用导致的^[14]。已有对玉米间作、单作处理的研究表明,土壤表层温度由高到低表现为玉米单作>玉米间作>豌豆||大豆||绿肥^[28-30],这说明间作处理中可能存在热量从玉米带向相邻作物带传递的现象。

3.2 对产量及水分利用效率的影响

赵小光等^[31]研究表明,玉米间作模式下增密种植使玉米和大豆均有一定程度减产,且大豆产量下降幅度较大,但总产量均显著高于作物单作产量。并且与玉米单作相比,间作模式的经济产值增加20%左右^[19]。本研究中同带数的大豆产量随着玉米带带数的增加而减少,且大豆4行的带状间作产

量及收获指数整体上高于2行的带状间作,这与李同亮等^[32]、刘席文等^[33]、赵小光等^[34]的研究结果一致。

水分利用效率作为反映作物产量与用水量关系的指标,数值高代表作物对土壤水分利用的高效^[27]。王庆杰等^[35]研究表明,玉米大豆间作处理下水分利用效率要显著高于大豆及玉米单作处理。本研究2年的试验结果显示,随着间作玉米带行数的增加,大豆带的水分利用效率呈现显著下降趋势(图6),这与刘洋等^[36]的研究结果相类似。王晨等^[37]研究发现,在禾豆间作系统中,由于2种作物的水分利用效率在不同土层存在显著差异,使间作系统具有较高的水分利用效率。鲜高结等^[38]研究指出,由于玉米和大豆在水分利用生态位方面存在差异性,使得玉米能够从大豆带获得水分补充,从而导致大豆带耗水量增加,最终导致大豆带水分利用效率降低,与本研究结果一致。

4 结 论

2年的大豆玉米带状间作模式中,大豆带0—10、>10—20、>20—40 cm 3个土层的土壤含水率均随大豆生育时期的推进呈单峰曲线变化趋势,且3个土层的土壤含水率均表现出随玉米带行数的增加而减少。2023年各处理耗水量整体上显著高于2024年,且大豆带耗水量随玉米带行数增加而增加,而大豆带的经济产量、生物产量及水分利用效率均随玉米带行数的增加而减少。2年,大豆带0—15 cm土层的土壤温度整体上随着生育时期的推进呈现单峰曲线变化趋势,且随着玉米带行数增加而升高。2年,不同处理的大豆最高经济产量、最高生物产量均出现在大豆6行玉米6行的带状间作处理(S_6M_6);而系统籽粒产量最高值出现在大豆2行玉米2行处理(S_2M_2),但与大豆4行玉米4行处理(S_4M_4)差异不显著, S_4M_4 分别比其他模式高出8%~22%,且 S_4M_4 土地当量比最高。综上,大豆4行玉米4行带状间作模式(S_4M_4)更适合大兴安岭南麓旱作地区大豆和玉米的高效生产。

参考文献 References

- [1] 杨文钰, 杨峰. 发展玉米带状复合种植, 保障国家粮食安全[J]. 中国农业科学, 2019, 52(21): 3748-3750
Yang W Y, Yang F. Developing maize-soybean strip intercropping for demand security of national food[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52

- (21): 3748-3750 (in Chinese)
- [2] 国家统计局. 中华人民共和国2021年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. [2022-03-01]. https://www.stats.gov.cn/xxgk/sjfb/tjgb2020/202202/t20220228_1827971.html
National Bureau of Statistics. Statistical Bulletin of the People's Republic of China on national economic and social development in 2021. [EB/OL]. [2022-03-01]. https://www.stats.gov.cn/xxgk/sjfb/tjgb2020/202202/t20220228_1827971.html (in Chinese)
- [3] 国家统计局. 中华人民共和国2022年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. [2023-03-01]. https://www.stats.gov.cn/xxgk/sjfb/tjgb2020/202302/t20230228_1919001.html
National Bureau of Statistics. Statistical Bulletin of the People's Republic of China on national economic and social development in 2022 [EB/OL]. [2023-03-01]. https://www.stats.gov.cn/xxgk/sjfb/tjgb2020/202302/t20230228_1919001.html (in Chinese)
- [4] 国家统计局. 中华人民共和国2023年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. [2024-03-01]. https://www.stats.gov.cn/xxgk/sjfb/tjgb2020/202402/t20240229_1947923.html
National Bureau of Statistics. Statistical Bulletin of the People's Republic of China on national economic and social development in 2023 [EB/OL]. [2024-03-01]. https://www.stats.gov.cn/xxgk/sjfb/tjgb2020/202402/t20240229_1947923.html (in Chinese)
- [5] 肖宇, 卢相义, 薛文, 滕霄, 冯璐琦, 刘艳昆. 青贮玉米-全株大豆间作种植模式探究[J/OL]. 草业科学, (2025-02-25). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1069.S.20250225.0947.004.html>
Xiao Y, Lu X Y, Xue W, Teng X, Feng J H, Liu Y K. Study on intercropping model of silage corn and whole plant soybean [J/OL]. *Pratacultural Science*, (2025-02-25). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1069.S.20250225.0947.004.html> (in Chinese)
- [6] 杨文钰, 雍太文, 任万军, 樊高琼, 牟锦毅, 卢学兰. 发展套作大豆, 振兴大豆产业[J]. 大豆科学, 2008, 27(1): 1-7
Yang W Y, Yong T W, Ren W J, Fan G Q, Mu J Y, Lu X L. Develop relay-planting soybean, revitalize soybean industry [J]. *Soybean Science*, 2008, 27(1): 1-7 (in Chinese)
- [7] Olowe V I O, Adeyemo A Y. Enhanced crop productivity and compatibility through intercropping of sesame and sunflower varieties [J]. *Annals of Applied Biology*, 2009, 155(2): 285-291
- [8] 雍太文, 刘小明, 宋春, 周丽, 李星辰, 杨峰, 王小春, 杨文钰. 种植方式对玉米-大豆套作体系中作物产量、养分吸收和种间竞争的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(6): 659-667
Yong T W, Liu X M, Song C, Zhou L, Li X C, Yang F, Wang X C, Yang W Y. Effect of planting patterns on crop yield, nutrients uptake and interspecific competition in maize-soybean relay strip intercropping system [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(6): 659-667 (in Chinese)
- [9] 钱玉平, 宿兵兵, 高吉星, 阮粉花, 李亚伟, 茅林春. 玉米大豆间作对喀斯特区土壤理化性质及微生物碳代谢特征的影响[J]. 作物学报, 2025, 51(1): 273-284
Qian Y P, Su B B, Gao J X, Ruan F H, Li Y W, Mao L C. Effects of maize and soybean intercropping on soil physicochemical properties and microbial carbon metabolism in karst region [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2025, 51(1): 273-284 (in Chinese)
- [10] 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 W, 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)
- [11] 胡静一, 王佳芯, 魏莺, 纪晓玲, 张雄, 王涛, 武慧平, 张盼盼. 黄土塬区膜际玉米大豆间作对玉米光合特性、产量及水分利用效率的影响[J]. 山西农业科学, 2024, 52(5): 1-8
Hu J Y, Wang J X, Wei Q, Ji X L, Zhang X, Wang T, Wu H P, Zhang P

- P. Effects of intermembranous maize and soybean intercropping on photosynthetic characteristics, yield and water use efficiency of maize in Loess Plateau Region[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2024, 52(5):1-8 (in Chinese)
- [12] Ai P R, Ma Y J, Hai Y. Influence of jujube/cotton intercropping on soil temperature and crop evapotranspiration in an arid area[J/OL]. *Agricultural Water Management*, (2021-08-21). DOI: doi. org/10.1016/j. agwat. 2021.107118
- [13] Nyawad S O, Karanja N N, Gachene C K K, Gitari H I, Schulte-Geldermann E, Parker M L Intercropping optimizes soil temperature and increases crop water productivity and radiation use efficiency of rainfed potato[J]. *American Journal of Potato Research*, 2019, 96 (5): 457-471
- [14] 张绪成, 王红丽, 于显枫, 侯慧芝, 方彦杰, 马一凡. 半干旱区全膜覆盖垄沟间作种植马铃薯和豆科作物的水热及产量效应[J]. 中国农业科学, 2016, 49 (3):468-481
Zhang X C, Wang H L, Yu X F, Hou H Z, Fang Y J, Ma Y F. The study on the effect of potato and beans intercropping with whole field plastics mulching and ridge-furrow planting on soil thermal-moisture status and crop yield on semi-arid area[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(3):468-481 (in Chinese)
- [15] 李银水, 黄翔, 罗金华, 吕典, 金晶, 李必钦, 秦璐, 顾焱明, 余常兵. 不同带宽行比对玉米/大豆带状间套作群体产量和氮素效率的影响[J]. 中国油料作物学报, 2024, 46(4):863-871
Li Y S, Huang X, Luo J H, Lyu D, Jin J, Li B Q, Qin L, Gu C M, Yu C B. Effects of different bandwidth and row ratios on yield and nitrogen efficiency of maize/soybean by relay strip intercropping[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2024, 46(4):863-871 (in Chinese)
- [16] 瓮巧云, 黄新军, 许翰林, 刘瑶, 袁晓峰, 马海莲, 袁进成, 刘颖慧. 玉米/大豆间作模式对青贮玉米产量、品质及土壤营养、根际微生物的影响[J]. 核农学报, 2021, 35(2):462-470
Weng Q Y, Huang X J, Xu H L, Liu Y, Yuan X F, Ma H L, Yuan J C, Liu Y H. Effects of corn/soybean intercropping model on yield, quality, soil nutrition and rhizosphere microorganisms of silage corn [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, 35(2):462-470 (in Chinese)
- [17] 宁自力, 王贝贝, 谭先明, 滕一鸣, 杨文钰, 杨峰. 玉米行向配置对带状套作大豆光合特性、叶片结构及产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(7):1038-1052
Ning Z L, Wang B B, Tan X M, Teng Y M, Yang W Y, Yang F. Effect of maize row orientation configurations on the photosynthetic characteristics, leaf structure and yield of soybean in relay strip intercropping systems[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(7):1038-1052 (in Chinese)
- [18] 赵鑫, 张磊, 武俊男, 梁炬赫, 李善龙, 李涛, 李雨桐, 江登宇, 闫寒, 贾立辉, 李海燕, 曹铁华. 不同玉米大豆间作模式对作物生长、产量和经济效益的影响[J]. 玉米科学, 2024, 32(10):48-55
Zhao X, Zhang L, Wu J N, Liang X H, Li S L, Li T, Li Y T, Jiang D Y, Yan H, Jia L H, Li H Y, Cao T H. Effects of different maize-soybean intercropping patterns on crop growth, yield, and economic benefits[J]. *Journal of Maize sciences*, 2024, 32(10):48-55 (in Chinese)
- [19] Fang J, Ma J, Wen T, Niu G Q, Wei S L, Su S F, Yi L X, Cheng Y C, Yuan J, Zhao X Q, Lu Z Y. Cry for help from rhizosphere microbiomes and self-rescue strategies cooperatively alleviate drought stress in spring wheat[J/OL]. *Soil Biology and Biochemistry*, (2025-04-07). DOI: doi. org/10.1016/j. soilbio. 2025.109813
- [20] 寇红太. 行比配置对膜下滴灌玉米-大豆间作系统水氮光利用及产量的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2024
Kou H T. Effects of row ratio configuration on water, nitrogen and light utilization and yield of corn-soybean intercropping system under film drip irrigation[D] Yangling: Northwest A&F University, 2024 (in Chinese)
- [21] 毛海龙, 邵继承, 杨恒山, 张玉芹, 张瑞富, 王真真. 带型配置对青贮玉米-大豆复合种植体层特性、产量和品质的影响[J]. 草业学报, 2025, 34(8):30-42
Mao H L, Tai J C, Yang H S, Zhang Y Q, Zhang R F, Wang Z Z. The influence of belt configuration on the canopy characteristics, yield and quality of Silage corn-Soybean composite plants [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(8):30-42 (in Chinese)
- [22] 张亮, 谢铭洲, 代希茜, 孙淳皓, 单丹丹, 赵银月. 不同大豆/玉米间作模式对大豆农艺性状及群体效益的影响[J]. 安徽农业科学, 2025, 53(10):16-20
Zhang L, Xie R Z, Dai X Q, Sun C H, Shan D D, Zhao Y Y. Effects of different soybean/maize intercropping patterns on soybean agronomic traits and population benefits of soybean [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2025, 53(10):16-20 (in Chinese)
- [23] 刘福明. 玉米大豆间作对作物产量的影响[J]. 特种经济动植物, 2023, 26(8):37-39
Liu F M. Effect of intercropping maize and soybean intercropping on crop yield [J]. *Special Economic Animals and Plants*, 2023, 26(8):37-39 (in Chinese)
- [24] 高梦钊, 王鑫鑫, 陈任强, 高惠娟, 柴春岭, 刘宏权. 禾本-豆科间作水分高效利用研究进展[J]. 节水灌溉, 2024, (6):77-86
Gao M F, Wang X X, Chen R Q, Gao H Y, Chai C L, Liu H Q. Research progress of water efficient use in graminus-legume intercropping[J]. *Water Saving Irrigation*, 2024, (6):77-86 (in Chinese)
- [25] 王雅梅. 玉米-大豆不同宽幅间作对大豆光合特性和水分利用效率的影响[D]. 北京:中国农业科学院, 2020
Wang Y M. Effects of maize and soybean intercropping with different width on photosynthetic characteristics and water use efficiency of soybean[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020 (in Chinese)
- [26] 刘敏, 赵财, 范虹, 殷文, 樊志龙, 胡发龙, 孙亚斌. 长期间作及免耕对土壤物理性状及作物产量的影响[J]. 中国农学通报, 2023, 39(2):28-35
Liu M, Zhao C, Fan H, Yin W, Fan Z L, Hu F L, Sun Y B. Effects of long-term intercropping and no-tillage on soil physical properties and crop yield [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, 39(2):28-35 (in Chinese)
- [27] 杨沛文, 柴红敏, 刘小梦, 李昱儒, 张又天, 张镇企, 陈可莹, 李陆生. 间作对土壤水热温室气体排放及作物的影响综述[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(13):8-13
Yang P W, Chai H M, Liu X M, Li Y R, Zhang Y T, Zhang Z Q, Chen K Y, Li L S. Review on the effects of intercropping on soil moisture and heat and greenhouse gas emissions and crops[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2023, 51(13):8-13 (in Chinese)
- [28] 殷民兴, 赵财, 葛丽丽, 程宝钰. 间作及减量灌溉对农田土壤温室气体排放的互作效应[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(1):214-225
Yin M X, Zhao C, Ge L L, Cheng B Y. Interaction effect of intercropping and reduced irrigation on greenhouse gas emissions from farmland soil[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2024, 42(1):214-225 (in Chinese)
- [29] 陈津赛, 王广帅, 张莹莹, 高阳, 刘坤. 玉米大豆间作对农田土壤 N₂O 排放的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(09):32-40
Chen J S, Wang G S, Zhang Y Y, Gao Y, Liu K. The effects of soybean-maize intercropping on N₂O emission from soil[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(9):32-40 (in Chinese)
- [30] 王琦明. 减氮及间作绿肥对玉米产量和土壤温室气体排放的互作效应[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2019
Wang Q M. Interaction effect of maize yield and soil greenhouse gas emissions under nitrogen reduction and intercropping green fertilizer[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2019 (in Chinese)
- [31] 赵小光, 赵兴忠, 刘颖萌, 肖金平, 张璞, 张雅蕾, 王丽萍. 玉米大豆间作对大豆农艺、品质和产量性状的影响[J]. 农学报, 2023, 13(8):18-24
Zhao X G, Zhao X Z, Liu H M, Xiao J P, Zhang P, Zhang Y L, Wang L P. Effects of maize and soybean intercropping on agronomic, quality and yield traits of soybean[J]. *Chinese Journal of Agriculture*, 2023, 13(8):18-24 (in Chinese)
- [32] 李同亮. 行比配置和带宽对玉米 || 大豆间作群体光截获利用及生产能力的影 响[D]. 雅安:四川农业大学, 2024
Li T L. Effects of row ratio configuration and bandwidth on light interception and utilization and production capacity of maize-soybean intercropping

- population[D]. Yaan:Sichuan Agricultural University, 2024 (in Chinese)
- [33] 刘席文, 马淑梅, 余常兵, 王淑彬, 魏亚凤, 王小春, 杨文钰. 长江流域田间配置对玉米-大豆带状复合种植群体产量和气候资源利用效率的影响[J]. 四川农业大学学报, 2024, 42(4):724-734
- Liu X W, Ma S M, Yu C B, Wang S B, Wei Y F, Wang X C, Yang W Y. Effects of field configuration on yield and climate resource utilization efficiency of maize-soybean strip intercropping in the Yangtze River Basin [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2024, 42(4):724-734 (in Chinese)
- [34] 李斌, 邓浩亮, 潘小番, 王玉锦, 杨平峰, 王丽晶. 河西绿洲灌区玉米与大豆间作行比对产量的影响[J]. 现代农业科技, 2024 (21):19-21, 25
- Li B, Deng H L, Pan X F, Wang Y J, Yang P F, Wang L J. Effect of intercropping row ratio of maize and soybean on yield in Hexi oasis irrigation area[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2024 (21):19-21, 25 (in Chinese)
- [35] 王庆杰, 李洪文, 何进, 李问盈, 刘安东. 大垄宽窄行免耕种植对土壤水分和玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 39-43
- Wang Q J, Li H W, He J, Li W Y, Liu A D. Effects of wide-ridge and narrow-row no-till cultivation on soil water and maize yield [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(8): 39-43 (in Chinese)
- [36] 刘洋, 董智, 董俊, 苏建党, 张晓鹏, 孙继军, 蔡广兴, 侯志研. 辽西半干旱区不同玉米间作花生模式对作物产量和水分利用效率的影响[J]. 辽宁农业科学, 2022 (1):8-12
- Liu Y, Dong Z, Dong J, Su J D, Zhang X P, Sun J J, Cai G X, Hou Z Y. Effects of different maize and peanut intercropping patterns on crop yield and water use efficiency in the semi-arid area of western Liaoning[J]. *Liaoning Agricultural Sciences*, 2022 (1):8-12 (in Chinese)
- [37] 王晨, 齐广平, 姜渊博, 张荣, 芦强, 高亚林. 间作水分高效利用及调控策略研究进展[J]. 水利规划与设计, 2024, (12):64-68, 76
- Wang C, Qi G P, Jiang Y B, Zhang R, Lu Q, Gao Y L. Research progress on efficient utilization and regulation strategies of intercropping water[J]. *Water Resources Planning and Design*, 2024, (12):64-68, 76 (in Chinese)
- [38] 鲜高结. 西北半干旱地区水分调控措施对玉米大豆带状间作水分利用效率的影响[D]. 雅安:四川农业大学, 2024
- Xian G J. Effect of water control measures on water use efficiency of maize-soybean strip intercropping in semi-arid area of northwest China[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2024 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 郭星星, 内蒙古农业大学农学院农艺与种业专业硕士研究生。曾参与鄂尔多斯市“揭榜挂帅”项目(JBGS-2021-001)、内蒙古自治区科技计划项目(2022YFDZ0071)以及中央引导地方科技发展基金(2022ZY0216)等多个省部级项目。



通讯作者简介: 张向前, 博士, 内蒙古自治区农牧业科学院研究员, 硕士生导师, 中国农业工程学会山区分会理事, 中国农学会耕作制度分会委员, 国家盐碱地创新联盟理事。主要从事土壤耕作、农业生态、农田污染治理等方面的研究工作。主持、参与国家科技支撑、内蒙古科技重点研发计划、国家自然科学基金以及内蒙古自治区科技计划重大专项等国家及省部级项目30余项。获内蒙古科技进步奖二等奖1项, 内蒙古科技进步奖一等奖1项, 内蒙古科技进步奖特等奖1项, 国家科技进步奖二等奖1项, 中华农业科技奖一等奖3项, 全国农牧渔业丰收奖一等奖1项, 农牧业丰收奖一等奖2项, 内蒙古自治区职工科技成果一等奖1项, 获草原英才、“321”工程人才、内蒙古自治区青年创新人才等荣誉称号。授权专利104件, 登记软件著作权39项, 制定地方标准40余项; 发表论文90余篇, 参编著作10部; 研发科技成果10项; 审认定品种6个。



通讯作者简介: 马达灵, 博士, 内蒙古农业大学农学院教授, 博士生导师。主要开展作物高产栽培生理生态研究, 主持、参与国家重点研发计划、国家自然科学基金、内蒙古自治区科技计划重点专项等国家及省部级科研项目10余项。以第一作者、通讯作者发表学术论文30余篇; 主编、参编教材3部, 参编专著4部; 获内蒙古自治区科技进步奖二等奖1项。