

# 不同禾豆间作模式对作物产量 及水氮利用的影响

付浩川<sup>1</sup>, 李成<sup>4</sup>, 李贺男<sup>1</sup>, 张浩磊<sup>1</sup>, 温家宣<sup>1</sup>, 方妍欣<sup>1</sup>,  
李想<sup>1</sup>, 李锦朝<sup>1</sup>, 董勤各<sup>1,2,3</sup>, 冯浩<sup>1,2,3</sup>

(1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西杨凌 712100; 2.西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西杨凌 712100; 3.西北农林科技大学水土保持科学与工程学院,陕西杨凌 712100; 4.河北工程大学水利水电学院,河北邯郸 056038)

**摘要:**于2023年4—10月设置玉米大豆间作(MS)、高粱大豆间作(BS)、玉米单作(M)、高粱单作(B)、大豆单作(S)共5个处理,测定玉米、高粱、大豆的产量、植株氮积累量、土壤含水量等指标,分析作物产量变化、土地生产力、水分利用效率、氮素利用效率,探究不同禾豆间作模式种间竞争和促进作用。结果表明:(1)同等面积上MS处理的玉米籽粒产量较M处理显著降低21.53%,BS处理的高粱籽粒产量较B处理降低7.17%;与S处理相比,MS、BS处理的大豆籽粒产量分别显著降低53.65%、57.39%,间作高粱在产量上更具优势。(2)BS处理的土地当量比(LEP)和水分当量比(WEP)比MS处理分别提高9.42%和7.75%;间作高粱更具土地和水分利用优势。间作体系的养分优势主要表现为氮积累量增加,玉米大豆间作体系的氮积累量比玉米单作提高15.41%,高粱大豆间作体系的氮积累量比高粱单作提高14.32%;对于氮素吸收效率、籽粒氮利用效率、氮收获指数和氮肥偏生产力,间作玉米与单作玉米相比各项指标降低2.31%~21.52%,间作高粱与单作高粱相比各项指标降低3.00%~7.19%;高粱大豆间作更具氮素利用优势。(3)BS处理中高粱相对于大豆的种间竞争能力( $A_p=0.62$ )小于MS处理中玉米相对于大豆的种间竞争能力( $A_p=1.27$ );BS处理中相对拥挤系数( $K_p=1.30$ )小于MS处理的相对拥挤系数( $K_p=1.77$ );BS处理种间竞争相对和谐。综上可知,两种间作模式均不同程度提高了土地生产力和作物氮素养分积累量,高粱大豆间作体系具有更高的土地生产力和水分利用效率优势,并且种间竞争相对和谐,更适合在陕北地区推广。

**关键词:**玉米;高粱;大豆;间作;产量;水氮利用;种间竞争

**中图分类号:**S513; S514; S565.1 **文献标志码:**A

## Effects of different cereal-legume intercropping systems on crop yield, water usage, and nitrogen utilization

FU Haochuan<sup>1</sup>, LI Cheng<sup>4</sup>, LI Henan<sup>1</sup>, ZHANG Haolei<sup>1</sup>, WEN Jiaxuan<sup>1</sup>,  
FANG Yanxin<sup>1</sup>, LI Xiang<sup>1</sup>, LI Jinchao<sup>1</sup>, DONG Qinge<sup>1,2,3</sup>, FENG Hao<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Agriculture on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. School of Water Resources and Electric Power, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

**Abstract:** The experiment was conducted from April to October 2023. Five treatments were established: maize and soybean intercropping (MS), broomcorn and soybean intercropping (BS), sole cropping maize (M), sole cropping broomcorn (B), and sole cropping soybean (S). The yield, plant nitrogen accumulation and soil water content of corn, broomcorn and soybean were measured. The changes of crop yield, land productivity, water use ef-

efficiency and nitrogen use efficiency were analyzed, and the inter-specific competition and promotion effects of different intercropping modes of grass beans were explored. The results showed that: (1) The grain yield of intercropping maize (MS) was significantly decreased by 21.53% compared with that of mono-cropping maize (M), and the grain yield of intercropping broomcorn (BS) was decreased by 7.17% compared with that of mono-cropping broomcorn (B). Compared with mono-cropped soybean (S), the grain yield of soybean treated with MS and BS was significantly reduced by 53.65% and 57.39%, respectively, and BS treatment was more advantageous in yield. (2) The land equivalent ratio (LER) and water equivalent ratio (WER) of BS treatment were 9.42% and 7.75% higher than that of MS, respectively. BS had more advantages in land and water use. The nutrient benefit of the intercropping system primarily lies in the increased nitrogen accumulation. In the maize and soybean intercropping system, nitrogen accumulation was 15.41% higher than that of mono-cropped maize and 14.32% higher than that of mono-cropped broomcorn. Regarding nitrogen absorption efficiency, grain nitrogen use efficiency, nitrogen harvest index, and nitrogen partial productivity, the values for intercropped maize were 2.31% to 21.52% lower compared to mono-cropped maize, while the values for intercropped broomcorn were 3.00% to 7.19% lower compared to mono-cropped broomcorn. The nitrogen utilization of the broomcorn and soybean intercropping system proved to be more advantageous. (3) The interspecific competitiveness of broomcorn relative to soybean in BS treatment ( $A_p = 0.62$ ) was smaller than that of corn relative to soybean in MS treatment ( $A_p = 1.27$ ). The relative crowding coefficient of BS treatment ( $K_p = 1.30$ ) was smaller than that of MS treatment ( $K_p = 1.77$ ). BS handled interspecific competition relatively harmoniously. In conclusion, both intercropping systems can enhance land productivity and nitrogen accumulation to varying extents. The broomcorn-soybean intercropping system offers higher land productivity, better water use efficiency, and relatively harmonious interspecies competition, making it more suitable for promotion in northern Shaanxi.

**Keywords:** maize; broomcorn; soybean; intercropping; yield; water and nitrogen utilization; species competition

陕北地处黄土高原,年降水量少且分布不均,黄土养分含量低,严重制约黄土高原农业发展。间作是一种有效的资源利用和增产方式<sup>[1]</sup>。间作体系可以通过改善玉米和豆科作物的叶片功能和干物质分配,从而带来产量优势<sup>[2]</sup>。此外谷物与豆科作物间作可以提高土壤中氮素资源的利用程度,减少作物对氮肥的需求<sup>[3]</sup>。Xu等<sup>[4]</sup>研究发现,玉米与大豆间作可提高土地和氮肥利用效率。禾豆间作在我国历史悠久,科学合理的禾豆间作模式可优化资源利用效率,提高土地生产力,增加地面覆盖度,防止水土流失,有效改良中低产地区土壤。因此通过间作种植形成节水高效栽培模式对于陕北地区有重要意义。

有研究表明,相较于单作,玉米与大豆间作可以促使玉米产量提升,而大豆产量则保持稳定或有所下降,氮素总体上提高了种植体系的总产量<sup>[5]</sup>。间作体系不仅调节了作物间的土壤水分环境,而且提高了作物水分利用效率<sup>[6]</sup>。高砚亮等<sup>[7]</sup>研究指出,在玉米和花生间作体系中,通过吸收相邻花生条带的水分,可有效缓解玉米条带水分大量消耗的压力,从而改善了整个体系的水分利用环境,提高

土地和水分生产力。禾本科和豆科间作组合由于其养分获取优势在我国土壤贫瘠地区广泛应用。焦念元等<sup>[8]</sup>研究表明,间作种植模式下花生释放的根系分泌物和氮素残留物可以被玉米吸收利用,从而提高间作玉米茎、叶、籽粒的氮含量,促进氮素向籽粒的分配。党科等<sup>[9]</sup>研究表明,糜子和绿豆间作能提高糜子叶片和籽粒的氮含量以及氮积累量。赵平等<sup>[10]</sup>研究指出,小麦和蚕豆间作显著提高了小麦的氮积累量和吸收率,较单作系统氮积累量增加15.5%~30.4%。玉米大豆间作模式下可以通过减少氮的投入来保持土壤肥力,提高土壤氮的恢复速度<sup>[11]</sup>。在最佳施氮量的情况下,玉米大豆间作可以通过调节氮同化酶提高玉米对氮素的吸收和利用效率<sup>[12]</sup>。Fu等<sup>[13]</sup>研究指出,玉米大豆间作有效提高了玉米籽粒的氮吸收量。

陕西省北部的延安市作物种植主要采用单作模式,肥料投入多且养分、水分利用率较低,因此禾豆间作模式在陕北黄土高原地区有较强的发展潜力。国内外学者对禾豆间作模式已经开展了较多研究<sup>[7-13]</sup>,但是在陕北地区禾豆间作体系对土地生产力和水分利用影响的报道较少。因此本研究通

过分析陕北地区玉米和大豆以及高粱和大豆间作模式下作物生长发育、产量构成、土地生产力、土壤水分及养分利用的变化规律,明确间作优势及其表现的促进和竞争作用,以期为构建符合区域特色的节水、高效的禾豆间作模式提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2023 年 4—10 月在陕西省延安市安塞区的延安市农业科学研究所的试验田 (36°48'N, 109°20'E, 海拔 1 030 m) 进行。该试验区属中温带大陆性半干旱季风气候,日照时数 2 478 h,多年平均降水量 500 mm,降水量年内分布不均,主要集中在 6—9 月,年均气温 9.4℃ (图 1)。该试验区属中温带大陆性半干旱季风气候。供试土壤为黄绵土,土质疏松,0~20 cm 土层土壤 pH 值为 8.7,有机质 6.70 g·kg<sup>-1</sup>、全氮 0.37 g·kg<sup>-1</sup>、速效磷 8.7 mg·kg<sup>-1</sup>、速效钾 109.8 mg·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验材料

供试大豆 (*Glycine max*) 品种为‘齐黄 34’,供试高粱 (*Sorghum bicolor*) 品种为‘晋杂 31’,供试玉米 (*Zea mays*) 品种为‘陕单 650’。

### 1.3 试验设计

试验采用随机区组设计,设置 5 种处理:玉米单作 (M:行距 60 cm,株距 27 cm),大豆单作 (S:行距 50 cm,株距 15 cm),高粱单作 (B:行距 60 cm,株距 17 cm),两行玉米四行大豆间作 (MS:玉米行距 40 cm,玉米与大豆行距 60 cm,大豆行距 30 cm,玉米株距 13 cm,大豆株距 12 cm),两行高粱四行大豆间作 (BS:高粱行距 40 cm,高粱大豆行距 60 cm,大豆行距 30 cm,高粱株距 7.6 cm,大豆株距 12 cm),每个处理种植两个宽带,行长 6 m (图 2),3 次重复,共 15 个小区,各小区外分别设置行宽 1 m 的保护行。

所有作物均于 2023 年 4 月 27 日播种,2023 年

10 月 1 日收获。玉米间作和单作播种密度均为 61 500 株·hm<sup>-2</sup>,高粱间作和单作播种密度均为 105 000 株·hm<sup>-2</sup>,大豆间作和单作播种密度均为 133 320 株·hm<sup>-2</sup>。玉米施纯 N 225 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 90 kg·hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 60 kg·hm<sup>-2</sup>,大豆施纯 N 80 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 90 kg·hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 60 kg·hm<sup>-2</sup>,高粱施纯 N 225 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 90 kg·hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 60 kg·hm<sup>-2</sup>。供试氮、磷、钾肥料分别用尿素 (N 46%)、过磷酸钙 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 16%) 和水溶硫酸钾 (K<sub>2</sub>O 52%)。所有磷肥和钾肥均作为基肥一次性施入,大豆氮肥作为基肥一次性施入;玉米和高粱的氮肥按大豆氮肥量作基肥施入,两作物拔节期分别追加氮肥至施氮量达 225 kg·hm<sup>-2</sup>。所有作物生育时期内不进行灌溉。除草、施肥和其他田间管理按照当地习惯进行。

### 1.4 测定项目与方法

1.4.1 土壤含水量及利用效率 分别于作物播种前、播后 30 d、播后 60 d、播后 90 d、播后 120 d 和成熟后采取土样。间作小区在两种不同作物中间行采样,单作小区在小区中间采样。各小区用土钻以 20 cm 为一层,采集 0~100 cm 土层土壤样本,采用烘干法测定土壤含水量 (SWC, %),土壤贮水量 (SWS, mm)、土壤耗水量 (ET, mm) 和水分利用效率 (WUE, kg·mm<sup>-1</sup>·hm<sup>-2</sup>) 计算公式<sup>[14-15]</sup>如下:

$$SWS = SWC \times H \times \rho \times 10/100 \quad (1)$$

$$\Delta SWS = S - M \quad (2)$$

$$ET = \Delta SWS + P + I - Q \quad (3)$$

$$WUE = Y/ET \quad (4)$$

式中,  $H$  为土壤深度 (cm);  $\rho$  为土壤容重 (g·cm<sup>-3</sup>);  $Y$  为作物产量 (kg·hm<sup>-2</sup>);  $\Delta SWS$  为 0~100 cm 土层土壤贮水量 (mm);  $S$  为播种时土壤含水量 (mm);  $M$  为收获时土壤含水量 (mm);  $P$  为生育时期降水量 (mm);  $I$  为灌水量 (mm); 因为生长季节没有灌溉,  $I = 0$ ;  $Q$  为地表径流 (mm), 因试验地平坦,  $Q$  值可忽略。

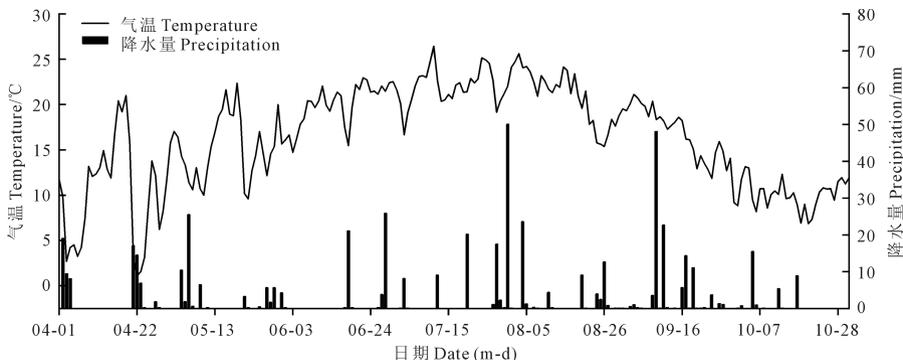


图 1 2023 年作物生育时期日平均温度和日平均降水量

Fig.1 Daily rainfall and mean temperature in growth period in 2023

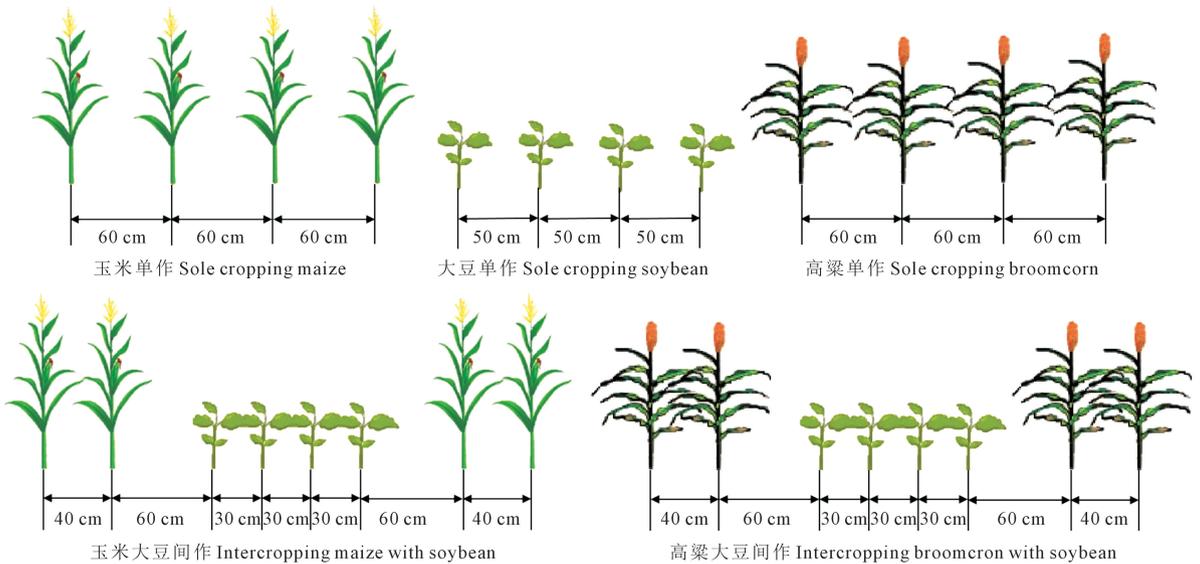


图2 不同处理田间种植图

Fig.2 Field layouts of different treatments

1.4.2 植株养分 于作物成熟期,在单作和间作小区各作物分别收获 10 株植株,植物样于 105℃ 杀青 30 min 而后 75℃ 烘干至恒重,并测定生物量。植株和籽粒分别粉碎后,使用浓  $H_2SO_4-H_2O_2$  消煮,用全自动凯氏定氮仪进行全氮含量测定。植株氮积累量、氮素吸收效率、籽粒氮素利用效率、氮肥偏生产力、氮素收获指数公式如下<sup>[16-17]</sup> :

植株氮积累量 ( $kg \cdot hm^{-2}$ ) = 籽粒产量  $\times$  籽粒氮养分含量 + 成熟期作物秸秆生物量  $\times$  秸秆氮养分含量

氮素吸收效率 ( $kg \cdot kg^{-1}$ ) = 成熟期植株地上部氮积累量 / 施氮量

籽粒氮素利用效率 ( $kg \cdot kg^{-1}$ ) = 籽粒产量 / 成熟期植株地上部氮素积累量

氮肥偏生产力 ( $kg \cdot kg^{-1}$ ) = 籽粒产量 / 施氮量

氮素收获指数 (%) = 籽粒氮素积累量 / 成熟期植株地上部氮素积累量  $\times 100$

1.4.3 产量及产量构成因素 在玉米成熟期每个小区取 10 株,测定玉米穗长、穗粗、穗粒数、百粒重。在高粱成熟期每个小区取 10 株,分别测高粱穗长、千粒质量。在大豆的成熟期每个小区取 20 株,测定大豆的荚粒数、结荚数、百粒质量。每个小区实收测产,按含水量 14% 折算成公顷产量。

1.4.4 系统生产力和种间竞争 土地当量比 (LER) 是用来评价间作优势的指标,其计算公式如下<sup>[18]</sup> :

$$LER = \frac{Y_{ip}}{Y_{sp}} + \frac{Y_{im}}{Y_{sm}} \quad (5)$$

式中,  $Y_{ip}$  代表间作下玉米或高粱的产量;  $Y_{sp}$  代表单

作下玉米或高粱的产量;  $Y_{im}$  和  $Y_{sm}$  分别代表间作和单作的大豆产量。若  $LER > 1$ , 则表示玉米/大豆、高粱/大豆有间作优势; 若  $LER < 1$ , 则表现为间作劣势。

种间竞争力 ( $A_p$ ) 是分析间作系统中一种作物 (玉米、高粱) 相对另一种作物 (大豆) 竞争力的指标,其计算公式如下<sup>[19]</sup> :

$$A_p = \frac{Y_{ip}}{Y_{sp} \times Z_p} - \frac{Y_{im}}{Y_{sm} \times Z_m} \quad (6)$$

式中,  $A_p$  表示玉米或高粱对大豆的竞争力;  $Z_p$  表示间作系统中玉米或高粱所占比例;  $Z_m$  表示间作系统中大豆所占比例。若  $A_p > 0$ , 表明间作系统中玉米或高粱竞争力高于大豆;  $A_p < 0$  则表明大豆竞争力大于玉米或高粱。

相对拥挤系数 ( $K_p$ ) 是间作系统中根据植物竞争理论衡量种间相对竞争能力的指标,本研究用来评价间作体系中玉米或高粱相对于大豆的竞争能力,其计算公式如下<sup>[20]</sup> :

$$K_p = \frac{Y_{ip} \times Z_m}{(Y_{sp} - Y_{ip}) \times Z_p} / \frac{Y_{im} \times Z_p}{(Y_{sm} - Y_{im}) \times Z_m} \quad (7)$$

式中,若  $K_p > 1$ , 表示玉米、高粱的竞争力大于大豆,反之则表示玉米、高粱的竞争力低于大豆。

水分当量比 (WER) 是分析间作系统水分利用优势的指标,其计算公式如下<sup>[21]</sup> :

$$WER = \frac{WUE_{ip}}{WUE_{sp}} + \frac{WUE_{im}}{WUE_{sm}} \quad (8)$$

式中,  $WUE_{ip}$  代表间作玉米或高粱的水分利用效率;  $WUE_{sp}$  代表单作玉米或高粱的水分利用效率;  $WUE_{im}$

和  $WUE_{sm}$  分别代表间作和单作大豆水分利用效率。当  $WER > 1$ , 表明间作体系相对于单作提升了农田水分利用效率, 反之则说明间作体系不具备水分利用优势。

### 1.5 数据分析

用 Microsoft Excel 2016 处理数据, 用 Origin Pro 2024 软件绘图, 用 SPSS 26.0 软件对数据进行方差分析、相关性分析和显著性检验, 分析不同禾豆间作模式对土壤含水量、作物氮积累量和产量的影响。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同禾豆间作模式对土壤水分利用的影响

2.1.1 不同禾豆间作模式下作物生育时期土壤水分变化 由图 3 可知, 各处理播种前土壤含水量较高, 随着生育时期进程推进, 土壤含水量逐渐下降, 到收获后又略有提高。播种前各处理 0~100 cm 土层平均土壤含水量表现为  $M > S > MS > B > BS$ 。玉米单作 (M) 处理 0~100 cm 土层平均土壤含水量比大豆单作 (S) 提高 1.91%, 比玉米大豆间作 (MS) 提高 2.21%, 比高粱单作 (B) 提高 6.92%, 比高粱大豆间作 (BS) 提高 7.45% (图 3a)。播后 60 d~收获, 玉

米、高粱、大豆在各生育时期的需水量不同, 平均土壤含水量表现为  $S > M > B > BS > MS$ 。收获后, 0~100 cm 土层土壤含水量表现为  $S > M > B > BS > MS$ 。其中大豆单作 (S) 土壤含水量最高, 其 0~100 cm 土层平均土壤含水量比玉米单作 (M) 提高 4.83%, 比高粱单作 (B) 提高 26.71%, 比高粱大豆间作 (BS) 提高 27.54%, 比玉米大豆间作 (MS) 高 38.93% (图 3f)。综合分析可知, 玉米单作可较高粱单作保持更高土壤含水量, 高粱大豆间作体系可较玉米大豆间作体系保持更高的土壤含水量。

2.1.2 不同禾豆间作模式对水分利用效率和水分当量比的影响 由表 1 可知, 两种间作模式的  $WUE$  均显著低于单作。与 M 处理相比, MS 处理的  $WUE$  降低 22.02%; 与 B 处理相比, BS 处理的  $WUE$  降低 10.65%。与 MS 处理相比, BS 处理的  $WUE$  提高 35.23%; MS 处理和 BS 处理下大豆的  $WUE$  分别比 S 处理显著降低 58.99% 和 59.39%。MS 和 BS 处理间大豆的  $WUE$  无明显差异。水分当量比 ( $WER$ ) 可以用来比较间作群体水分利用效率的差异<sup>[7]</sup>。BS 较 MS 处理的  $WER$  提高 7.75%。两种间作模式的  $WER$

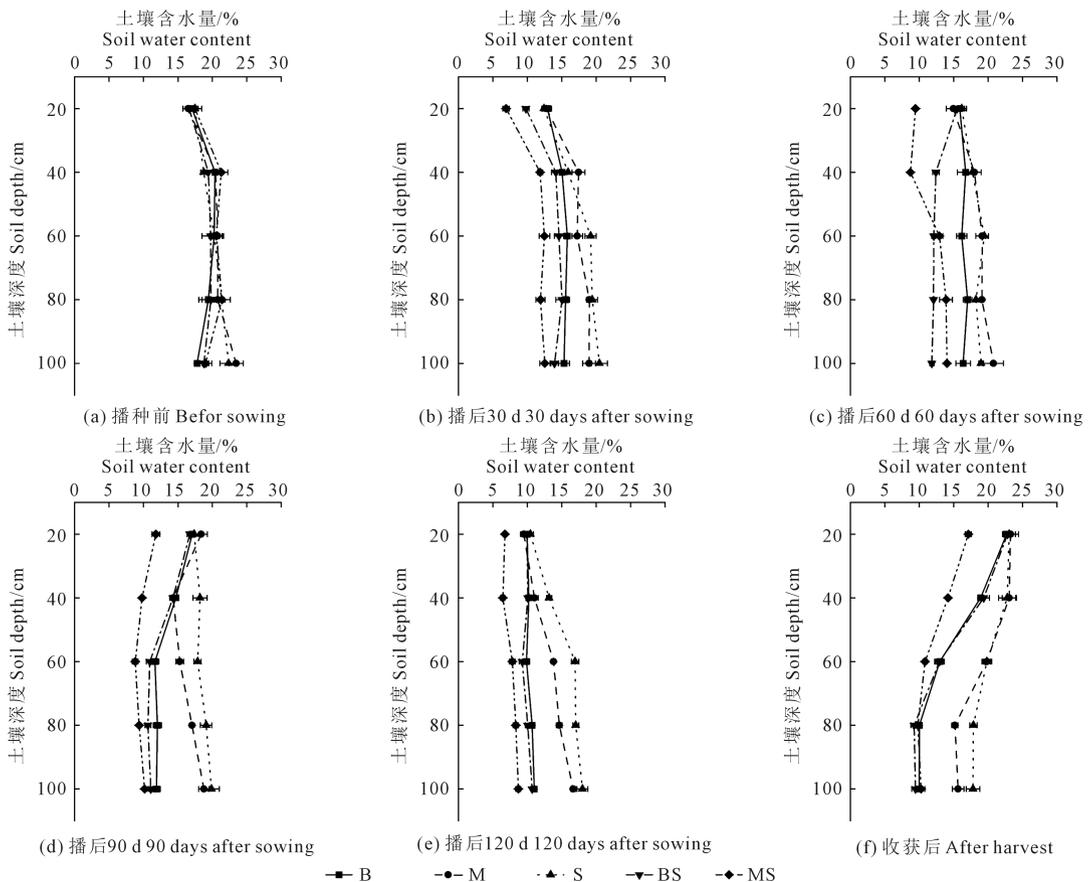


图 3 不同处理 0~100 cm 土层土壤含水量

Fig.3 Soil water content in 0~100 cm soil layer under different treatments

均大于1,说明两种间作模式较单作均提高了农田水分利用效率,水分利用最有优势的种植模式为BS处理。

## 2.2 不同禾豆间作模式对作物氮积累量以及氮素利用效率的影响

2.2.1 不同禾豆间作模式对作物氮积累量的影响 由表2可知,与相应的单作作物相比,间作不同程度降低了玉米、高粱、大豆的地上部氮积累量。与M处理相比,MS处理的作物地上部氮积累量平均降低 $35.97 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,降幅为19.75%;与B处理相比,BS处理的作物地上部氮积累量平均降低 $13.34 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,降幅为4.37%;与S处理相比,MS处理大豆地上部氮积累量平均降低 $62.92 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,降幅为47.65%,BS处理大豆地上部氮积累量平均降低 $67.76 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,降幅为51.33%。玉米大豆间作体系的总氮积累量较单作玉米提高15.41%,高粱大豆间作体系的总氮积累量较单作高粱提高14.32%,玉米大豆间作和高粱大豆间作体系的总氮积累量分别比单作大豆提高38.57%和62.87%。

2.2.2 不同禾豆间作模式对作物氮素利用效率的影响 由表2可知,与相应的单作作物相比,间作模式下各作物的氮素吸收效率、籽粒氮素利用效率、氮收获指数、氮肥偏生产力均有下降。与M处理相比,MS处理下玉米的氮素吸收效率、籽粒氮素利用效率、氮收获指数、氮肥偏生产力分别降低20.99%、2.31%、8.52%、21.52%,间作玉米和单作玉米间仅氮肥偏生产力差异显著;与B处理相比,BS处理下高粱的氮素吸收效率、籽粒氮素利用效率、氮收获指数、氮肥偏生产力分别降低4.44%、3.00%、9.05%、7.19%,间作高粱和单作高粱的各项指标差异不显著。高粱大豆间作比玉米大豆间作在氮素利用方面更有优势。

单作大豆与两种间作模式之间大豆的氮素吸

收效率、氮肥偏生产力差异显著,籽粒氮素利用效率和氮收获指数无显著差异。与S处理相比,玉米大豆间作处理(MS)下大豆的氮素吸收效率、籽粒氮素利用效率、氮收获指数、氮肥偏生产力分别降低47.88%、10.23%、10.20%、53.64%;高粱大豆间作处理(BS)下大豆的氮素吸收效率、籽粒氮素利用效率、氮收获指数、氮肥偏生产力分别降低51.52%、6.29%、11.57%、54.83%。玉米间作下的大豆与单作大豆相比各项数据降幅为10.20%~53.64%,高粱间作下的大豆与单作大豆相比各项数据降幅为6.29%~54.83%,综合比较发现高粱大豆间作模式所受影响较小。

## 2.3 不同禾豆间作模式对作物产量及其构成因素和种间竞争的影响

2.3.1 不同禾豆间作模式对作物产量及其构成因素的影响 由表3可知,间作处理下玉米穗长、穗粗、穗粒数与单作玉米无显著差异,百粒质量和籽粒产量较单作玉米显著降低。与M处理相比,MS处理玉米穗长降低3.65%,穗粗降低4.10%,穗粒数

表1 不同处理对水分利用效率和水分当量比的影响

Table 1 Effects of different treatments on water use efficiency and water equivalent ratio

处理 Treatment	水分利用效率 $WUE/( \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1} )$			水分当量比 WER
	玉米 Maize	高粱 Broomcorn	大豆 Soybean	
B		23.46±0.93a		
BS		20.66±0.19b	2.01±0.02b	1.29±0.12a
M	17.16±0.63c			
MS	13.38±0.90d		2.03±0.02b	1.19±0.20a
S			4.95±0.30a	

注:同列不同小写字母代表处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column represent significant differences between treatments ( $P<0.05$ ). The same below.

表2 不同处理对作物氮积累量和氮素利用效率的影响

Table 2 Effects of different treatments on nitrogen accumulation and nitrogen utilization efficiency of crops

作物 Crop	处理 Treatment	地上部氮积累量 Above-ground nitrogen accumulation $/( \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} )$	氮素吸收效率 N uptake efficiency $/( \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} )$	籽粒氮素利用效率 Grain N use efficiency $/( \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} )$	氮收获指数 N harvest index /%	氮肥偏生产力 N partial factor productivity $/( \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} )$
高粱 Broomcorn	B	304.63±12.36a	1.35±0.05a	32.30±1.75a	56.49±2.72a	43.56±0.98a
	BS	291.29±12.49a	1.29±0.06a	31.33±1.25a	51.38±2.41a	40.43±0.42a
玉米 Maize	M	181.80±7.39a	0.81±0.03a	42.03±2.53a	69.83±1.73a	33.83±1.27a
	MS	145.83±11.79b	0.64±0.05a	41.06±1.07a	63.88±2.86a	26.55±1.82b
大豆 Soybean	S	132.03±5.36a	1.65±0.07a	14.47±0.40a	85.13±1.45a	24.44±1.49a
	MS	64.26±4.54b	0.86±0.06b	15.83±1.06a	76.45±3.08a	11.33±0.14b
	BS	69.11±4.94b	0.80±0.06b	15.50±0.87a	75.28±1.16a	11.04±0.08b

注:同列不同小写字母表示相同作物下不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments in the same stage ( $P<0.05$ ).

减少 8.65%, 百粒质量减少 13.94%, 籽粒产量降低 21.53%。可见, 玉米大豆间作主要通过影响玉米百粒质量, 导致间作玉米籽粒产量较单作玉米下降明显。

由表 4 可知, 间作处理下高粱的穗长、千粒质量与单作高粱差异不显著, 籽粒产量较单作高粱显著降低。与 B 处理相比, BS 处理高粱穗长增加 0.26%, 千粒质量减少 1.72%, 籽粒产量显著降低 7.17%。

由表 5 可知, 高粱大豆间作下大豆的有效荚数、荚粒数、百粒质量和籽粒产量与玉米大豆间作下的大豆无明显差异; 与 MS 处理相比, BS 处理下大豆的有效荚数减少 13.3%, 荚粒数减少 3.12%, 但百粒质量提高 1.57%, 籽粒产量减少 2.53%。两种间作模式下大豆的有效荚数、荚粒数、百粒质量和籽粒产量与单作大豆差异显著。与 S 处理相比, BS、MS 处理下大豆有效荚数分别减少 63.89%、58.33%, 荚粒数分别减少 61.73%、60.49%, 百粒质量分别减少 7.44%、8.90%, 籽粒产量分别减少 57.39%、53.65%。间作大豆不同程度降低了大豆的有效荚数, 故而影响大豆产量。

玉米大豆间作系统的籽粒总产量为  $6\ 878\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 达到玉米单作的 90.37%; 高粱大豆间作系统的籽粒总产量为  $9\ 979\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 达到高粱单作的 101.84%。与各自对应单作相比, 高粱大豆间作模式较玉米大豆间作更具产量优势。

**2.3.2 不同禾豆间作模式的种间竞争** 由表 6 可知, MS 和 BS 处理的土地当量比  $LER$  分别为 1.25 和 1.38, 均大于 1, 且两种间作模式无显著差异。MS 和 BS 处理的攻击力  $A_p$  值分别为 1.27 和 0.62, 说明两种间作模式中玉米、高粱为优势种。两种间作模式

的相对拥挤系数  $K_p$  值分别为 1.77 和 1.30, 说明高粱和大豆种间竞争更弱。

### 3 讨论

#### 3.1 不同禾豆间作模式对产量和种间竞争的影响

本研究发现, 玉米大豆间作和高粱大豆间作模式的土地当量比 ( $LER$ ) 均大于 1, 表明间作在土地利用效率方面上有更大的优势。在谷类/豆科作物种植系统中, 当一种作物有利于另一种作物生长时, 表现为促进作用; 当一种作物限制另一种作物生长时, 就会发生种间竞争<sup>[22-23]</sup>。本试验中, 玉米大豆间作和高粱大豆间作在共生期均表现出较强的种间竞争, 玉米和高粱相对于大豆的种间竞争力指数 ( $A_p$ ) 值分别为 1.27 和 0.62, 均大于 0, 表明玉米和高粱为优势作物。此外, 本研究中玉米相对大豆和高粱相对大豆的相对拥挤系数 ( $K_p$ ) 值分别为 1.77 和 1.30, 均大于 1, 可能是由于玉米和高粱在生态位上高于大豆, 这与 Raza 等<sup>[24]</sup>的研究结果相同, 即在禾豆作物共生期, 谷物能够获取更多资源, 成为优势作物。

本试验中, 受系统资源和种间竞争等因素影响, 间作玉米、间作高粱和间作大豆的籽粒产量均较单作有所下降, MS 模式下间作玉米和间作大豆的平均产量分别达到相应单作的 78.47% 和 46.34%, BS 模式下间作高粱和间作大豆的平均产量分别达到相对应单作的 92.83% 和 45.17%。这和高砚亮等<sup>[7]</sup>、梁晓红等<sup>[16]</sup>、郭安等<sup>[25]</sup>的研究结果一致。由于种间竞争作用, 两种间作模式中玉米和高粱为优势作物。一方面, 可能是地下根系的竞争机制激活

表 3 不同处理对玉米产量及其构成因素的影响

Table 3 Effects of different treatments on yield and yield components of maize

处理 Treatment	穗长 Ear length /cm	穗粗 Ear diameter /mm	穗粒数 Kernels per spike	百粒质量 100-kernel weight/g	籽粒产量 Grain yield /( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )
M	16.98±0.51a	44.39±1.44a	543±15a	24.96±0.34a	7611±284a
MS	16.36±0.44a	42.57±2.42a	496±9a	21.48±0.15b	5972±410b

表 5 不同处理对大豆产量及其构成因素的影响

Table 5 Effects of different treatments on yield and yield components of soybean

处理 Treatment	有效荚数 Effective pod number	荚粒数 Grains per pod	百粒质量 100-grain weight/g	籽粒产量 Grain yield /( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )
S	36±2a	81±4a	26.05±0.25a	1955±119a
BS	13±1b	31±1b	24.11±0.39b	883±6b
MS	15±1b	32±1b	23.73±0.03b	906±11b

表 4 不同处理对高粱产量及其构成因素的影响

Table 4 Effects of different treatments on yield and yield components of broomcorn

处理 Treatment	穗长 Ear length /cm	千粒质量 1000-kernel weight/g	籽粒产量 Grain yield /( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )
B	30.65±0.76a	34.87±1.00a	9799±219a
BS	30.73±1.23a	34.27±0.16a	9096±93b

表 6 间作模式对土地当量比、攻击力和相对拥挤系数的影响

Table 6 Effects of intercropping patterns on land equivalent ratio, attack force and relative crowding coefficient

处理 Treatment	土地当量比 $LER$ Land equivalent ratio	攻击力 $A_p$ Aggressivity	相对拥挤系数 $K_p$ Relative crowding coefficient
MS	1.25±0.06a	1.27±0.13a	1.77±0.18a
BS	1.38±0.04a	0.62±0.03b	1.30±0.06a

了玉米和高粱的生长潜力,对大豆生长产生抑制作用<sup>[26]</sup>;另一方面,从空间角度来看,玉米和高粱为高秆植物,其冠层对低矮的大豆有严重的遮荫效果,导致两种间作模式下的豆产量显著降低,这与吕越等<sup>[27]</sup>、王钰云等<sup>[28]</sup>、陈伟<sup>[29]</sup>的研究结果一致,即高位作物玉米、谷子影响低位作物大豆和花生的光截留和利用效率,限制了大豆和花生的生长,导致其生物量降低,进而造成减产。本研究还发现,玉米产量受间作模式影响较大,这与胡静一等<sup>[30]</sup>的研究结果类似;高粱产量受间作模式影响较小,即高粱大豆间作模式存在种间弱竞争作用,可能是因为高粱抗旱性较强且能在严重干旱条件下保持较高产量水平<sup>[31]</sup>。

本试验条件下,间作玉米的穗长、穗粗、穗粒数与单作玉米差异不显著,百粒质量显著低于单作玉米;间作高粱的穗长和千粒质量与单作高粱差异不显著。间作玉米的百粒质量下降可能是由于大豆竞争玉米部分营养所致。对于大豆而言,其增产机制在于如何提高间作有效荚数和荚粒数。本试验中,大豆的生长关键阶段(开花期~结荚期)恰好对应玉米的十二叶期~籽粒建成期,以及高粱的旗叶可见期~抽穗期,这段时期作物间的资源竞争尤为激烈,是作物间竞争的关键期<sup>[32]</sup>。未来将进一步深入探究此阶段的种间相互作用,这对于促进资源高效利用、缓解竞争压力,进而实现间作系统中各作物产量同步提升具有重要意义。

### 3.2 不同禾豆间作模式对作物水氮利用的影响

本研究发现,两种不同间作模式下播后 30 d~收获期的 0~100 cm 土层土壤含水量均低于相应的单作模式。这可能归因于高矮作物组合构建的 V 型冠层结构,该结构有效优化了套作体系内的气流分布,提高了土壤表层水分的蒸发效率<sup>[33]</sup>。此外,间作种植模式种植密度较高,显著增加了作物生物量,消耗了大量土壤水分和养分,从而导致间作系统中土壤含水量降低<sup>[26]</sup>。在雨养农业条件下,农田土壤耗水有益于调节和优化水分利用效率,对水资源的有效管理具有积极影响<sup>[22]</sup>。本研究中玉米间作体系和高粱大豆间作体系的平均水分当量比  $WER$  为 1.19 和 1.29,均大于 1,表明这两种间作模式均提高了农田水分生产力,促进作物对水分的吸收,在降水分布不均的环境下具有优势。

多数研究表明,禾豆间作模式可以多方面地影响农田生态系统,如调节田间气候、改变根系分泌物、增强土壤酶活性、改变微生物群落结构和细菌群落分布等,这些综合效应提升了作物对氮素的吸

收与利用效率,促进了间作土壤中养分的有效利用,最终实现了作物产量的增加<sup>[9,34]</sup>。本研究发现,与相应的单作作物相比,间作模式下各作物的氮素吸收效率、籽粒氮素利用效率、氮收获指数、氮肥偏生产力有所下降,但间作系统的总氮积累量较相应单作处理提高,高粱大豆间作体系 and 玉米大豆间作体系的总氮积累量分别比相应单作高粱和单作玉米体系提高 14.32% 和 15.41%。梁晓红等<sup>[16]</sup>研究也表明,高粱大豆间作体系较单作的优势主要体现在氮积累量上。间作模式下作物氮素吸收量减少可能是在间作体系中两种作物对土壤养分的竞争主要在于氮和磷,豆科作物一定程度上抢夺了氮素资源,导致禾本科作物氮素需求无法被满足<sup>[16,35]</sup>。

## 4 结 论

(1) 玉米大豆间作系统的籽粒总产量为 6 878 kg · hm<sup>-2</sup>, 达到玉米单作的 90.37%; 高粱大豆间作系统的籽粒总产量为 9 979 kg · hm<sup>-2</sup>, 达到高粱单作的 101.84%; 高粱大豆间作较玉米大豆间作系统的土地当量比和水分当量比分别提高 9.42% 和 7.75%。高粱大豆间作体系的产量更高且对土地和水分利用效率的提升效果更佳。

(2) 与相应单作处理相比,玉米大豆间作系统中玉米和大豆氮素指标(氮素吸收效率、籽粒氮利用效率、氮收获指数和氮肥偏生产力)降幅分别为 2.31%~21.52% 和 10.20%~53.64%,高粱大豆间作系统中高粱和大豆氮素指标的降幅分别为 3.00%~7.19% 和 6.29%~54.83%,高粱大豆间作模式受影响较小。

(3) 玉米大豆间作模式的种间竞争力 ( $A_p = 1.27$ ) 和相对拥挤系数 ( $K_p = 1.77$ ) 均高于高粱大豆体系的种间竞争力 ( $A_p = 0.62$ ) 和相对拥挤系数 ( $K_p = 1.30$ ),高粱大豆间作呈现弱竞争模式。

(4) 间作模式的总氮积累量高于单作模式,且间作模式提高了农田土地和水分生产力。高粱大豆间作体系 and 玉米大豆间作体系的总氮积累量分别比相应单作高粱和单作玉米体系提高 14.32% 和 15.41%,两种间作模式的土地当量比和水分当量比均大于 1。

综上所述,相较于单作,间作优势体现在其对于作物总氮积累量和系统水分生产力、土地生产力的提高。高粱大豆间作较玉米大豆间作具有产量、土地和水分利用优势,在氮素利用效率方面受影响较小,且高粱大豆间作种间呈弱竞争模式,该模式可在陕北地区适当发展,在确保产量稳定的同时实现对资源的高效利用。

## 参考文献:

- [1] 代希茜, 詹和明, 赵银月, 等. 玉/豆间作模式下幅宽和玉米密度配置优化研究[J]. 西南农业学报, 2018, 31(1): 39-43.  
DAI X Q, ZHAN H M, ZHAO Y Y, et al. Research of optimization for planting width and density in maize/soybean intercropping model [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2018, 31(1): 39-43.
- [2] FU Z D, CHEN P, ZHANG X N, et al. Maize-legume intercropping achieves yield advantages by improving leaf functions and dry matter partition[J]. BMC Plant Biology, 2023, 23(1): 438.
- [3] JENSEN E S, CARLSSON G, HAUGGAARD-NIELSEN H. Intercropping of grain legumes and cereals improves the use of soil N resources and reduces the requirement for synthetic fertilizer N: a global-scale analysis[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2020, 40(1): 5.
- [4] XU Z, LI C J, ZHANG C C, et al. Intercropping maize and soybean increases efficiency of land and fertilizer nitrogen use; a meta-analysis[J]. Field Crops Research, 2020, 246: 107661.
- [5] 高阳, 段爱旺, 刘祖贵, 等. 间作种植模式对玉米和大豆干物质积累与产量组成的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(2): 214-221.  
GAO Y, DUAN A W, LIU Z G, et al. Effect of intercropping patterns on dry matter accumulation and yield components of maize and soybean[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(2): 214-221.
- [6] 柴强, 殷文. 间作系统的水分竞争互补机理[J]. 生态学杂志, 2017, 36(1): 233-239.  
CHAI Q, YIN W. Research advances in water competition and complementary interaction of intercropping agroecosystems[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(1): 233-239.
- [7] 高砚亮, 孙占祥, 白伟, 等. 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, et al. 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.
- [8] 焦念元, 李吉明, 汪江涛, 等. 氮磷对玉米花生间作蛋白质与氮代谢特点的影响[J]. 作物杂志, 2014, (6): 99-105.  
JIAO N Y, LI J M, WANG J T, et al. Effects of nitrogen and phosphorus on protein and nitrogen metabolism characteristics in maize peanut intercropping system[J]. Crops, 2014, (6): 99-105.
- [9] 党科, 宫香伟, 陈光华, 等. 糜子绿豆带状间作糜子的氮素积累、代谢及产量变化[J]. 作物学报, 2019, 45(12): 1880-1890.  
DANG K, GONG X W, CHEN G H, et al. Nitrogen accumulation, metabolism, and yield of proso millet in proso millet-mung bean intercropping systems[J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(12): 1880-1890.
- [10] 赵平, 郑毅, 汤利, 等. 小麦蚕豆间作施氮对小麦氮素吸收、累积的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(4): 742-747.  
ZHAO P, ZHENG Y, TANG L, et al. Effect of N supply and wheat/faba bean intercropping on N uptake and accumulation of wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(4): 742-747.
- [11] DU Q, ZHOU L, CHEN P, et al. Relay-intercropping soybean with maize maintains soil fertility and increases nitrogen recovery efficiency by reducing nitrogen input[J]. The Crop Journal, 2020, 8(1): 140-152.
- [12] NASAR J, ZHAO C J, KHAN R, et al. 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]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 1077948.
- [13] FU Z D, ZHOU L, CHEN P, et al. Effects of maize-soybean relay intercropping on crop nutrient uptake and soil bacterial community [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(9): 2006-2018.
- [14] REN Y Y, WANG X L, ZHANG S Q, et al. Influence of spatial arrangement in maize-soybean intercropping on root growth and water use efficiency[J]. Plant and Soil, 2017, 415(1): 131-144.
- [15] SUN T, LI Z Z, WU Q, et al. Effects of alfalfa intercropping on crop yield, water use efficiency, and overall economic benefit in the corn belt of northeast China[J]. Field Crops Research, 2018, 216: 109-119.
- [16] 梁晓红, 曹雄, 张瑞栋, 等. 不同高粱大豆间作模式对产量及水分养分利用的影响[J]. 华北农学报, 2021, 36(3): 174-184.  
LIANG X H, CAO X, ZHANG R D, et al. Effects of different sorghum and soybean intercropping patterns on yield, water and nutrient use efficiency[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2021, 36(3): 174-184.
- [17] 王庆源, 于振文, 石玉, 等. 隔两年深松配合条旋耕显著提升冬小麦的氮素吸收利用效率和产量[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(5): 863-872.  
WANG Q Y, YU Z W, SHI Y, et al. Strip rotary tillage combining with every two-year subsoiling increases the nitrogen use efficiency and yield of winter wheat[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2024, 30(5): 863-872.
- [18] LI L, YANG S C, LI X L, et al. Interspecific complementary and competitive interactions between intercropped maize and faba bean [J]. Plant and Soil, 1999, 212(2): 105-114.
- [19] WILLEY R W, RAO M R. A competitive ratio for quantifying competition between intercrops [J]. Experimental Agriculture, 1980, 16: 117-125.
- [20] DHIMA K V, LITHOURGIDIS A S, VASILAKOGLU I B, et al. Competition indices of common vetch and cereal intercrops in two seeding ratio[J]. Field Crops Research, 2007, 100(2/3): 249-256.
- [21] YANG F, LIAO D P, WU X L, et al. Effect of aboveground and belowground interactions on the intercrop yields in maize-soybean relay intercropping systems[J]. Field Crops Research, 2017, 203: 16-23.
- [22] GONG X, FERDINAND U, DANG K, et al. Boosting proso millet yield by altering canopy light distribution in proso millet/mung bean intercropping systems[J]. The Crop Journal, 2020, 8(2): 365-377.
- [23] WANG Z, ZHAO X, WU P, et al. Border row effects on light interception in wheat/maize strip intercropping systems [J]. Field Crops Research, 2017, 214: 1-13.
- [24] RAZA M A, FENG L Y, VAN DER WERF W, et al. Optimum leaf defoliation; a new agronomic approach for increasing nutrient uptake and land equivalent ratio of maize soybean relay intercropping system [J]. Field Crops Research, 2019, 244: 107647.
- [25] 郭安, 张晓春, 皮竟, 等. 多样性种植模式对糯高粱生长及高粱炭疽病发生的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(32): 12-18.  
GUO A, ZHANG X C, PI J, et al. Diversity planting pattern: effect on waxy sorghum growth and sorghum anthracnose [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(32): 12-18.
- [26] 肖特, 崔阔涛, 黄文娟, 等. 玉米/大豆带状套作种间根系互作效应与水分利用效率[J]. 西南农业学报, 2022, 35(12): 2758-2771.  
XIAO T, CUI K S, HUANG W J, et al. Interspecific root interactions and water use efficiency of maize/soybean by relay strip intercropping [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2022, 35(12): 2758-2771.
- [27] 吕越, 吴普特, 陈小莉, 等. 玉米/大豆间作系统的作物资源竞争 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(1): 139-146.  
LV Y, WU P T, CHEN X L, et al. Resource competition in maize / soybean intercropping system [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(1): 139-146.
- [28] 王钰云, 王宏富, 李智, 等. 间作遮阴对花生生长发育及产量的影响[J]. 山西农业科学, 2020, 48(2): 218-221.

