

doi:10.3969/j.issn.1002-2481.2024.05.02

谷子大豆间作下群体光合特性及产量效益分析

李媛¹, 纪晓玲^{1,2}, 彭涛^{1,2}, 王小林^{1,2}, 陈乐¹, 曹宇媛¹, 商志盈¹, 张雄^{1,2}

(1. 榆林学院 生命科学学院, 陕西 榆林 719000; 2. 陕西省陕北旱区作物节水工程技术研究中心, 陕西 榆林 719000)

摘要:为探索黄土丘陵沟壑区谷子大豆间作增产增效机制, 设置谷子单作(SG)、大豆单作(SD)、谷子大豆行比2:2(I22)、2:4(I24)、4:2(I42)共5个处理, 综合分析不同间作处理对群体光合特性、农艺性状及产量效益的影响。结果表明, 谷子净光合速率、蒸腾速率和气孔导度总体表现为间作高于单作, 胞间CO₂浓度单作高于间作。其中, 间作I24处理谷子灌浆期的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度显著高于I22和I42处理; 大豆的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度总体表现为单作高于间作。谷子全生育期株高、茎粗和干物质积累量平均值间作大于单作, 其中, 成熟期谷子株高I24处理显著高于SG和I22处理, 茎粗显著高于SG和I42处理, 干物质积累量显著高于SG处理; 大豆平均株高间作高于单作, 茎粗和干物质积累量间作低于单作, 其中, I24处理农艺性状优于I22和I42处理。谷子产量间作大于单作, 其中, I24处理较SG、I22、I42处理分别提高45.17%、13.14%、25.66%; 大豆产量间作略小于单作, 但无显著差异; 间作总产量高于单作谷子和单作大豆, 具有间作优势, 其中I24产量显著高于其他处理, 经济效益最佳。

关键词: 谷子; 大豆; 光合特性; 产量; 间作

中图分类号: S44.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-2481(2024)05-0009-09

Analysis of Population Photosynthetic Characteristics and Yield Benefits of Millet-Soybean Intercropping System

LI Yuan¹, JI Xiaoling^{1,2}, PENG Tao^{1,2}, WANG Xiaolin^{1,2}, CHEN Le¹,
CAO Yuyuan¹, SHANG Zhiying¹, ZHANG Xiong^{1,2}

(1. College of Life Sciences, Yulin University, Yulin 719000, China; 2. Engineering and Technology Research Center of Water Saving for Crops in Arid Area of Northern Shaanxi Province, Yulin 719000, China)

Abstract: To explore the mechanism of increasing yield and benefit of millet-soybean intercropping in loess hilly and gully region, in this study, 5 treatments including SG(millet), SD(soybean), I22(millet-soybean row ratio 2:2), I24(2:4), and I42(4:2) were set, the effects of different intercropping treatments on population photosynthetic characteristics, agronomic traits, and yield benefit were comprehensively analyzed. The results showed that net photosynthetic rate, transpiration rate, and stomatal conductance of millet in intercropping were generally higher than those in monoculture, and intercellular CO₂ concentration in monoculture was higher than that in intercropping. The net photosynthetic rate, transpiration rate, and stomatal conductance of intercropping I24 at filling stage were significantly higher than those in I22 and I42. Net photosynthetic rate, transpiration rate, and stomatal conductance of soybean in monoculture were generally higher than those in intercropping. The average plant height, stem diameter, and dry matter accumulation in the entire growth period of millet in intercropping were higher than those in monoculture. The plant height at harvest stage of millet in I24 treatment were significantly higher than that in SG and I22 treatment at maturity, and the stem diameter was significantly higher than that in SG and I42 treatment, the dry matter accumulation was significantly higher than that in SG. The average plant height of soybean in intercropping was higher than that of monoculture, the stem diameter and dry matter accumulation in intercropping were lower than those in monoculture, and the agronomic traits in I24 treatment were better than those in I22 and I42. The yield of millet in intercropping was higher than that in monoculture, and the yield in I24 was 45.17%, 13.14%, and 25.66% higher than that in SG, I22, and I42, respectively. The yield of soybean in intercropping was slightly lower than that in monoculture, without significant difference. The total yield in intercropping was higher than that in monoculture millet and monoculture soybean, with intercropping advantage, and the yield in I24 was significantly higher than that in other treatments, with the best economic benefit.

收稿日期: 2024-06-28

基金项目: 陕西省科学技术厅中央引导地方科技发展基金(2022ZY2-GCZX-05); 陕西省农业农村厅科技创新驱动项目(2022NYT01); 榆林市科学技术局产学研合作项目(CXY-2021-83)

作者简介: 李媛(1989-), 女, 陕西清涧人, 在读硕士, 研究方向: 禾本科豆科间作效益。

通信作者: 纪晓玲(1969-), 女, 陕西定边人, 教授, 硕士生导师, 主要从事农业节水技术研究工作。

Key words: millet; soybean; photosynthetic characteristics; yield; intercropping

谷子和大豆是黄土高原丘陵沟壑区的传统粮食作物,也是重要的经济作物^[1]。随工业化和城市化进程加快,可用于农业的耕地资源日益紧缺^[2],加之长期单一种植方式以及化肥农药的过量使用,使得耕地种植潜力日益减弱。因此,在有限的耕地上挖掘增产潜力,提高经济效益,是确保农业高效发展的有效途径^[3]。间作种植传统深厚,恰当的间作策略在优化土地利用、提高农业产出、保障作物健康、维护生态环境及促进土地永续发展方面具有重要作用^[4-6]。禾本科作物与豆科作物间作是广泛应用的间作方式^[7],既可以利用高位作物禾本科的边行优势扩大豆科作物受光空间^[8],还能发挥豆科固氮养地作用,有利于改善土壤条件,提升土壤地力,是在传统单作的基础上创新发展而来的集高效种植、绿色增收、提质增效于一体的“一地双收”种植模式^[9]。

黄土丘陵沟壑区光照充足,适宜发展间作种植模式^[10],但试区多以传统单作为主,急需研究以间作为代表的绿色高产种植模式^[11]。相关研究表明,禾本科和豆科间作通过作物生理上的互补带来显著的生产效益^[12-14]。薛中侠等^[15]研究发现,禾本科作物玉米是 C₄ 植物,光合作用效率高,光饱和点也相对较高,意味着它们能在光照强度较大的条件下依然保持较高的净光合速率,而豆科作物花生是 C₃ 植物,其光饱和点较低,更适合在光照强度适中的环境下生长,二者间作可发挥各自最佳的生长潜力。刘思彤等^[16]研究发现,高粱与花生间作种植时,高粱的生长形态发生了变化,其整体高度减少,但茎秆粗壮。陈宇等^[17]研究发现,谷子大豆间作增加了谷子干物质积累,提高了穗长和单穗质量,对大豆干物质积累、单株荚数和百粒质量有减少作用。杨玲等^[18]研究发现,玉米大豆间作系统中玉米属于优势作物产量提升,大豆属于劣势作物产量有所降低。张明君等^[19]研究发现,谷子大豆间作在种植面积内实现了土地高效利用,与单作谷子大豆相比,带状间作处理的土地当量比均大于 1,显示出间作优势。前人对禾本科豆科间作的研究主要集中在玉米大豆、玉米花生等,有关谷子大豆间作的研究多停留在其对产量的影响,系统性生产实践和理论研究较少。

本试验以谷子大豆为研究对象,通过测定不同间作模式下谷子大豆群体光合特性、农艺性状和产量效益的变化,明确谷子大豆间作产量响应的基本机理,旨在为黄土丘陵沟壑区谷子大豆间作栽培技

术提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验于 2022 年在陕西省榆林市榆林学院农牧科教基地(38°20′54.20″N,109°49′54″E)进行。该地属于干旱半干旱农牧交错带,日照充足,年均日照时数为 2 600 h,年平均气温为 8.8 ℃,无霜期为 145 d,年均降水量为 454.3 mm,年均蒸发量为 1 211 mm。土壤为黄绵土,土质疏松。

1.2 试验材料

供试谷子品种为晋谷 21 号,大豆品种为汾豆 78 号,均由山西农业大学经济作物研究所提供。施用的肥料为有机肥,从山西丰稷农业科技发展有限公司购买。

1.3 试验设计

试验设置 5 个处理:谷子单作(SG)、大豆单作(SD)、2 行谷子 2 行大豆间作(I22)、2 行谷子 4 行大豆间作(I24)、4 行谷子 2 行大豆间作(I42)。每个处理重复 4 次,共 20 个小区,每个小区面积为 30 m² (6 m×5 m)。5 月 7 日播种,10 月 7 日收获。谷子行距 0.5 m、株距 0.11 m,大豆行距 0.50 m、株距 0.26 m,东西行向种植。播种前施氮肥(N)、磷肥(P₂O₅)和钾肥(K₂O)量均为 150 kg/hm²,未追肥。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 光合特性指标测定 在谷子拔节期(大豆分枝期)、孕穗期(开花期)、抽穗期(结荚期)、灌浆期(鼓粒期)的晴天上午,各小区随机选取 3 株植株,用便携式光合测定仪测量叶片净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间 CO₂ 浓度(Ci)、蒸腾速率(Tr)。

1.4.2 农艺性状指标测定 在谷子拔节期(大豆分枝期)、孕穗期(开花期)、抽穗期(结荚期)、灌浆期(鼓粒期)、成熟期,各小区选取 12 株植株,用卷尺测量株高、游标卡尺测定茎粗。干物质积累量是随机在各小区选取 3 株植株,烘干至恒质量称量。

1.4.3 产量及产量构成因素测定 按小区收获所有谷穗,称总穗质量后取平均穗质量,选取 30 株为样本谷穗,测定穗粗、穗长、穗质量、穗粒质量、千粒质量。大豆在每个小区选取连续 10 株大豆作为样本,测定单株粒质量、百粒质量、单株荚数、单株粒数。成熟期收获所有作物测定总产量。

1.4.4 土地当量比与经济产值测定 土地当量比(LER, Land equivalent ratio)是衡量间作产量优势的核心指标。当 $LER > 1$ 时,表示间作系统具有产量优势。经济产值是作物产量与单价的乘积。

$$LER = YIG/YSG + YID/YSD \quad (1)$$

式中, YIG 、 YID 分别为谷子、大豆间作条件下净面积籽粒产量; YSG 、 YSD 分别为谷子和大豆在单作条件下的籽粒产量。

1.5 数据处理与分析

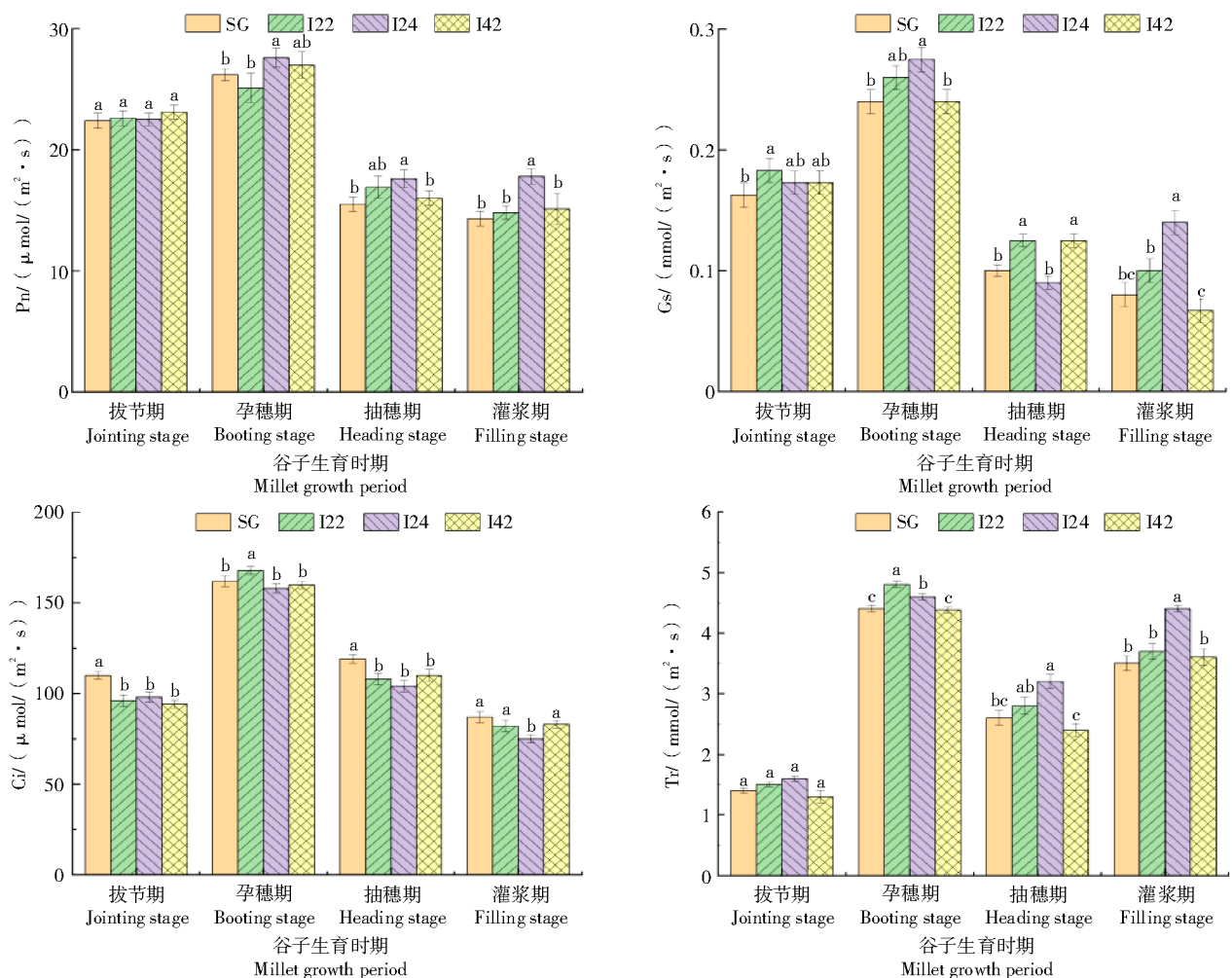
采用Microsoft Excel 2021对数据进行整理,用SPSS 27.0软件对数据进行单因素分析和相关性分析,用Origin 2022软件作图。

2 结果与分析

2.1 间作对谷子和大豆光合特性的影响

2.1.1 间作对谷子光合特性的影响 随着生育期的推进,各处理谷子的 P_n 、 G_s 、 C_i 和 Tr 皆呈先增后

减趋势,其中,孕穗期最高(图1)。谷子 P_n 全生育期平均值间作高于单作,孕穗期I24处理较SG、I22处理和I42处理分别增加4.32%、5.34%和3.05%,I24处理与I22处理间差异显著($P < 0.05$);灌浆期I24处理较SG、I22和I42处理分别提高24.47%、20.27%和17.88%,处理间差异显著($P < 0.05$)。谷子 G_s 全生育期平均值间作高于单作,孕穗期I24处理较SG、I22、I42处理分别增加12.5%、7.7%、11.2%,I24处理分别与SG、I42处理差异显著($P < 0.05$);灌浆期I24处理显著高于其他处理($P < 0.05$)。谷子 C_i 全生育期平均值单作高于间作,孕穗期I24与I22处理差异显著($P < 0.05$);拔节期、抽穗期和灌浆期I24处理显著低于SG($P < 0.05$)。谷子 Tr 也呈现间作高于单作趋势,孕穗期和抽穗期I24处理显著高于SG和I42处理;灌浆期I24处理较SG、I22、I42处理分别增加25.71%、18.92%和22.22%,差异显著($P < 0.05$)。



图中同一生育期不同小写字母表示不同处理间在0.05水平上差异显著。下图同

Difference lowercase letters in the same growth period indicated a significant difference between treatments at the level of 0.05. The same as below

图1 不同间作处理下谷子光合特性分析
Fig.1 Analysis of photosynthetic characteristics of millet under different intercropping treatments

2.1.2 间作对大豆光合特性的影响 从图 2 可以看出,大豆全生育期的 P_n 、 G_s 和 T_r 整体表现为单作大于间作。大豆 P_n 随着生育期的推进逐渐下降,鼓粒期 I22、I24、I42 处理较 SD 处理分别降低 22.42%、18.18%、20.00%,且差异显著($P < 0.05$)。大豆 G_s 呈先升高后降低的变化趋势,开花期和鼓粒期 I22 和 I42 处理显著低于 SD 处理($P < 0.05$)。

大豆 C_i 在分枝期、结荚期和鼓粒期各处理无显著差异;结荚期 I24 处理较 SG、I22、I42 处理分别降低 4.36%、8.25%、15.05%,与 I42 处理间差异显著($P < 0.05$)。大豆 T_r 随着生育期的推进逐渐上升,鼓粒期增速最快,I24 处理较 SD、I22 和 I42 处理分别增加 5.38%、24.95% 和 26.67%,且差异达显著水平($P < 0.05$)。

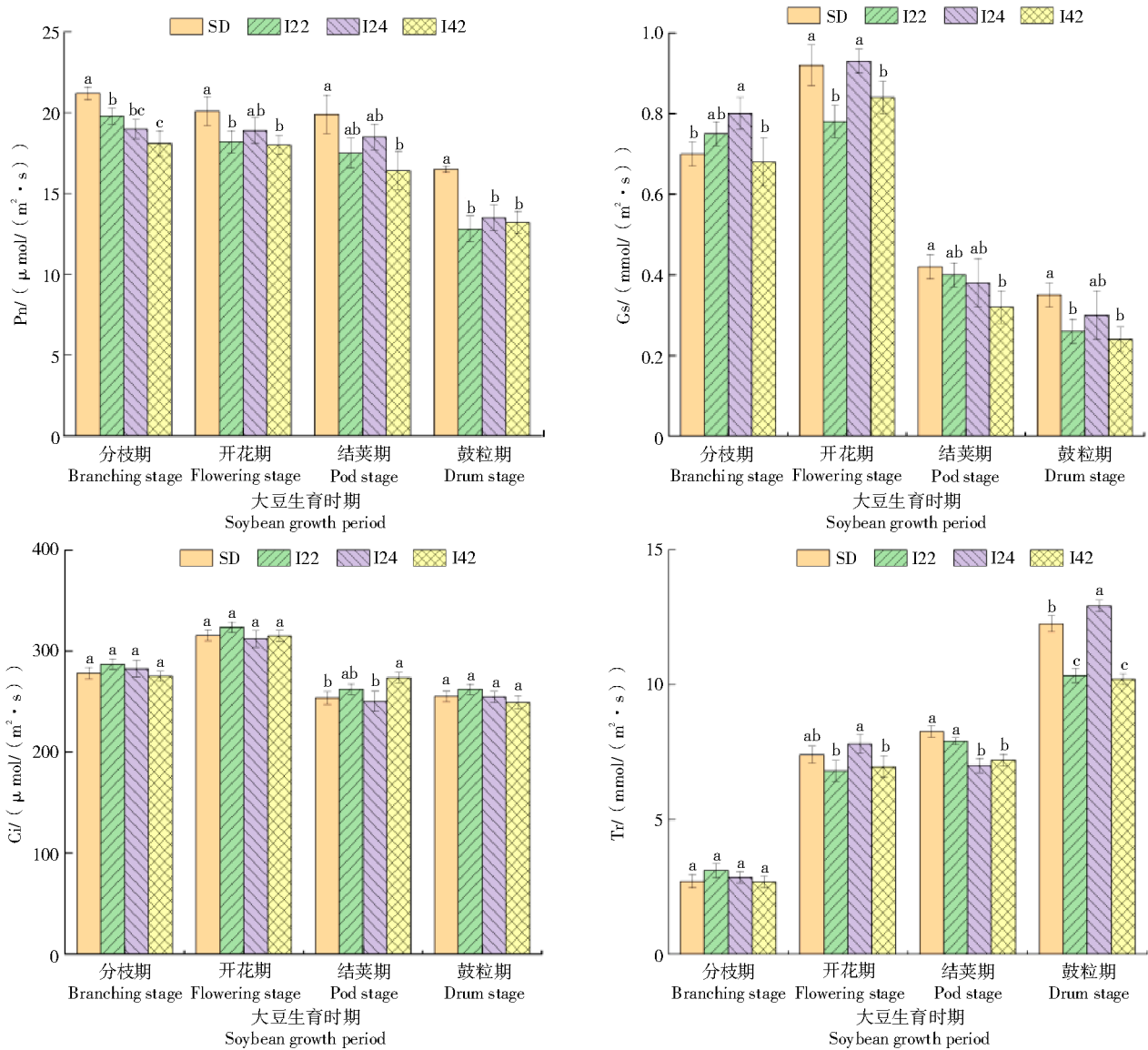


图 2 不同间作处理大豆光合特性分析
Fig.2 Analysis of photosynthetic characteristics of soybean under different intercropping treatments

2.2 间作对谷子和大豆植株农艺性状的影响

2.2.1 间作对作物株高、茎粗的影响 谷子株高全生育期间作高于单作,且 I24 处理谷子株高最高(表 1)。拔节期谷子株高间作显著高于单作;抽穗期和灌浆期 I24 处理的谷子株高显著高于 SG、I22 和 I42 处理($P < 0.05$);成熟期 I24 处理的谷子株高较 SG、I22 和 I42 处理分别增加 4.49%、2.36% 和 0.17%,

I24 处理与 SG、I22 处理存在显著差异($P < 0.05$)。谷子茎粗全生育期平均值间作大于单作,孕穗期 I24 处理的谷子茎粗较 SG、I22、I42 处理分别增加 8.21%、5.88%、1.63%,与 SG 处理间差异显著($P < 0.05$);抽穗期和灌浆期 I24 处理的谷子茎粗显著高于 SG 处理($P < 0.05$),各间作处理无显著差异;成熟期 I24 处理的谷子茎粗较 SG、I22、I42 处理分别

提高9.53%、2.4%和9.41%,而且与SG和I42处理均显著差异($P<0.05$)。大豆株高全生育期平均值间作高于单作,结荚期I24、I42处理的大豆株高显著高于SD、I22处理($P<0.05$);鼓粒期I24处理的大豆株高显著高于SD处理($P<0.05$),与I22、I42处理间

无显著差异;成熟期各处理间的大豆株高差异不显著。大豆茎粗结荚期I22、I42处理显著低于SD处理;鼓粒期I24处理的大豆茎粗显著高于I42处理($P<0.05$);成熟期I24处理的大豆茎粗较I22、I42处理分别增加6.9%、10.63%,与SD处理无显著差异。

表1 不同间作处理下谷子和大豆株高、茎粗分析

Tab.1 Analysis of plant height and stem diameter of millet and soybean under different intercropping treatments cm

| 生育时期 Growth period | 处理 Treatment | 谷子 Millet | | 大豆 Soybean | |
|-------------------------------------|-----------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| | | 株高 Plant height | 茎粗 Stem diameter | 株高 Plant height | 茎粗 Stem diameter |
| 拔节期/分枝期 Jointing/Branching stage | SG/SD | 76.46±3.55c | 8.12±0.16a | 29.02±1.65a | 5.22±0.51a |
| | I22 | 80.80±2.51ab | 8.15±0.10a | 30.31±2.14a | 5.63±1.14a |
| | I24 | 79.04±2.18b | 8.13±0.20a | 30.61±1.05a | 4.99±0.36a |
| | I42 | 81.25±1.31a | 8.25±0.50a | 29.82±1.63a | 5.34±0.38a |
| 孕穗期/开花期 Booting/Flowering stage | SG/SD | 116.27±1.66a | 8.65±0.10b | 51.58±1.75a | 8.68±2.27ab |
| | I22 | 117.25±1.13a | 8.84±1.2ab | 53.21±1.11a | 8.47±2.02b |
| | I24 | 117.61±2.42a | 9.36±1.09a | 53.93±2.41a | 9.17±1.76a |
| | I42 | 116.71±1.42a | 9.21±1.8ab | 52.77±2.05a | 8.62±1.47ab |
| 抽穗期/结荚期 Heading/Podding stage | SG/SD | 160.59±3.98b | 8.71±1.32b | 69.93±4.46b | 11.37±1.04a |
| | I22 | 160.81±4.66b | 9.12±1.26a | 69.71±5.67b | 11.13±2.08b |
| | I24 | 167.13±1.94a | 9.21±0.86a | 74.33±5.28a | 11.27±1.58ab |
| | I42 | 161.65±3.34b | 9.04±1.2ab | 74.63±2.25a | 11.11±1.19b |
| 灌浆期/鼓粒期 Filling/Filling stage | SG/SD | 161.07±4.43c | 9.05±0.61b | 81.20±2.36b | 12.43±4.97ab |
| | I22 | 167.98±3.41b | 9.19±0.8ab | 82.67±2.44ab | 12.41±1.25ab |
| | I24 | 169.62±2.86a | 9.28±1.11a | 83.89±5.37a | 13.63±0.51a |
| | I42 | 163.71±3.91b | 9.35±1.21a | 82.47±4.52ab | 12.13±1.04b |
| 成熟期 Harvest stage | SG/SD | 162.27±3.86 | 9.34±1.83b | 102.83±0.86a | 14.93±2.56a |
| | I22 | 165.72±3.57b | 9.99±0.65ab | 103.07±2.82a | 13.63±1.27ab |
| | I24 | 169.56±0.64a | 10.23±2.01a | 101.97±3.11a | 14.57±1.02a |
| | I42 | 169.27±1.42ab | 9.37±1.98b | 102.47±1.97a | 13.17±0.76b |

注:不同小写字母表示不同处理间在0.05水平上差异显著。下表同。

Note: Different lowercase letters indicated significant difference between different treatments at the level of 0.05. The same as below.

2.2.2 间作对作物干物质积累量的影响 谷子干物质积累量除拔节期和孕穗期外,其余生育期间作普遍高于单作(表2)。抽穗期I24处理的谷子干物质积累量显著高于SG处理($P<0.05$);灌浆期I24处理的谷子干物质积累量显著高于SG、I22、I42处理($P<0.05$);成熟期间作显著高于单作($P<0.05$),

I24处理较SG、I22、I42处理分别增加14.96%、7.39%和10.53%。大豆干物质积累量生育前期各处理间无显著差异,结荚期和鼓粒期平均值单作高于间作,I24处理与SD处理间无显著差异;成熟期各处理差异显著($P<0.05$),I24处理较I22和I42处理分别增加25.07%、38.41%(表3)。

表2 不同间作处理谷子干物质积累量分析

Tab.2 Analysis of dry matter accumulation of millet under different intercropping treatments g

| 处理 Treatment | 拔节期 Jointing stage | 孕穗期 Booting stage | 抽穗期 Heading stage | 灌浆期 Filling stage | 成熟期 Harvest stage |
|-----------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| SG | 3.31±1.87a | 7.68±2.91a | 22.48±0.59b | 30.46±2.13b | 70.29±2.91b |
| I22 | 3.11±1.07b | 8.24±3.23a | 25.70±1.18ab | 30.52±2.77b | 75.25±1.03a |
| I24 | 3.04±0.53b | 8.59±2.56a | 31.51±3.01a | 33.05±2.52a | 80.81±3.05a |
| I42 | 3.42±1.96a | 7.91±1.51a | 24.96±2.48ab | 30.05±1.17b | 73.11±2.95a |

表 3 不同间作处理下大豆干物质积累量分析
Tab.3 Analysis of dry matter accumulation of soybean under different intercropping treatments g

| 处理 Treatment | 分枝期 Branching stage | 开花期 Flowering stage | 结荚期 Podding stage | 鼓粒期 Filling stage | 成熟期 Harvest stage |
|-----------------|------------------------|------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| SD | 2.91±0.46a | 12.65±4.95a | 33.83±5.57a | 55.33±2.54a | 121.93±5.47a |
| I22 | 2.39±0.33a | 11.18±6.06a | 26.90±2.64ab | 47.63±5.72ab | 76.46±3.07d |
| I24 | 2.59±1.01a | 11.93±1.48a | 27.70±3.19ab | 52.83±1.88ab | 95.63±1.24b |
| I42 | 2.50±1.17a | 10.78±3.17a | 23.85±1.48b | 45.03±3.73b | 69.09±1.65c |

2.3 谷子大豆间作对作物产量效益的影响

2.3.1 间作对作物产量构成因素的影响 谷子的穗粗、穗长、穗质量、穗粒质量和千粒质量间作高于单作(表 4)。谷子穗粗间作显著高于单作($P<0.05$), I24 处理较 SG 和 I42 处理分别增加 4.84%、0.56%; I24 处理穗长较 SG、I22 和 I42 处理分别增加 3.88%、1.06%、3.84%, 其中, I22、I24 处理分别与 SG、I42 处理存在显著差异($P<0.05$); I24 处理穗质量较 SG、I22、I42 处理分别增加 16.81%、5.76%、6.57%, 各处理间差异显著($P<0.05$); I24 处理穗粒

质量较 SG、I22、I42 处理分别增加 21.75%、4.34%、1.98%, 其中与 SG 处理间存在显著差异($P<0.05$); 千粒质量各处理间无显著差异。

大豆的豆荚数、粒数和单株粒质量间作显著低于单作($P<0.05$)(表 5)。I24 处理豆荚数较 I22 和 I42 处理分别增加 9.21%、7.89%, 且与 SD 处理间差异显著; I24 处理大豆粒数较 I22 和 I42 处理分别增加 20.74%、4.29%; I24 处理单株粒质量较 I22 处理增加 13.25%; 百粒质量各处理间无显著差异。

表 4 不同间作处理下谷子产量构成因素分析
Tab.4 Analysis on yield components of millet under different intercropping treatments

| 处理 Treatment | 穗粗/mm Spike thickness | 穗长/cm Spike length | 穗质量/g Spike weight | 穗粒质量/g Grain weight per spike | 千粒质量/g 1000-grain weight |
|-----------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| SG | 18.79±0.15b | 21.11±0.14b | 13.20±0.19c | 11.45±0.57b | 3.04±0.03a |
| I22 | 20.10±0.26a | 21.70±0.14a | 14.58±0.32a | 13.36±0.62ab | 3.05±0.02a |
| I24 | 19.70±0.20a | 21.93±0.19a | 15.42±0.32b | 13.94±0.53a | 3.06±0.03a |
| I42 | 19.59±0.12a | 21.12±0.14b | 14.47±0.21b | 13.67±0.19a | 3.05±0.01a |

表 5 不同间作处理下大豆产量构成因素分析
Tab.5 Analysis on yield components of soybean under different intercropping

| 处理 Treatment | 豆荚数/个 Number of pods | 粒数/粒 Number of grains | 单株粒质量/g Grain weight per plant | 百粒质量/g 100-grain weight |
|-----------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| SD | 99±5.97a | 204±3.28a | 40.62±1.78a | 20.35±0.51a |
| I22 | 76±3.42b | 142±6.28c | 30.49±0.99c | 21.38±0.39a |
| I24 | 83±3.40b | 163±5.27b | 34.53±1.02b | 23.21±0.37a |
| I42 | 82±3.66b | 156±6.71b | 36.01±1.27b | 22.03±0.53a |

2.3.2 间作对作物产量及土地当量的影响 谷子大豆产量随着谷子大豆行比变化而变化。从表 6 可以看出, 谷子产量, 间作处理显著高于单作处理($P<0.05$), I24 处理较 SG、I22、I42 处理分别增加 46.59%、14.18%、26.35%, 差异显著($P<0.05$)。大豆产量, 间作小于单作, I24 处理高于 I22 和 I42 处理, 但无显著差异。从土地当量比(LER)来看, I22、I24、I42 处理的 LER 均大于 1, 表现出间作优势, 其中, I24 处理 LER 为 1.14, 优于 I22 和 I42 处理。

表 6 不同间作处理下系统产量分析
Tab.6 Analysis of system yield under different intercropping treatments kg/hm²

| 处理 Treatment | 谷子产量 Millet yield | 大豆产量 Soybean yield | 谷子复合产量 Compound yield of foxtail millet | 大豆复合产量 Compound yield of soybean | LER |
|-----------------|----------------------|-----------------------|--|-------------------------------------|------------|
| SG | 4 747.0±59.9c | | 4 747.0±59.9c | | 1.00a |
| SD | | 2 314.4±59.7a | | 2 314.4±59.7a | 1.00a |
| I22 | 6 094.2±21.1b | 2 143.3±89.9a | 3 047.1±65.2b | 1 071.5±15.2b | 1.11±0.03a |
| I24 | 6 858.5±69.3a | 2 283.8±87.8a | 2 319.5±74.2b | 1 522.5±15.2b | 1.14±0.06a |
| I42 | 5 507.1±73.2b | 2 143.0±96.1a | 3 671.5±86.3b | 714.3±15.2b | 1.08±0.03a |

2.3.3 间作对群体经济效益的影响 群体经济效

益是评价间作是否科学高效的核心指标。谷子大

豆间作群体经济效益高于单作处理经济效益(表7), I24处理较SG、SD、I22、I42处理分别增加5.63%、45.98%、1.34%、0.79%, I24处理经济效益优于其他处理。

表7 不同间作处理下群体经济效益分析
Tab.7 Analysis of different intercropping treatments on economic benefit of population

| 处理 Treat- ment | 谷子产值/ (元/hm ²) Millet output value | 大豆产值/ (元/hm ²) Soybean out- put value | 总产值/ (元/hm ²) Total output value | 成本/(元/hm ²) Cost | | | | | 总成本/ (元/hm ²) Total input | 经济效益/ (元/hm ²) Benefit |
|----------------------|---|--|---|------------------------------|------------------|------------|-------------|---------------|---|--|
| | | | | 耕地 Machine | 肥料 Fertilizer | 种子 Seed | 地膜 Mulch | 收获 Harvest | | |
| SG | 22 216.0 | | 22 215.9 | 1 200 | 3 255 | 300 | 800 | 3 000 | 8 555 | 13 660.96 |
| SD | | 18 515.2 | 18 515.2 | 1 200 | 3 255 | 375 | 800 | 3 000 | 8 630 | 9 885.20 |
| I22 | 142 660.0 | 8 572.0 | 22 832.0 | 1 200 | 3 255 | 338 | 800 | 3 000 | 8 593 | 14 239.46 |
| I24 | 10 855.3 | 12 180.2 | 23 035.5 | 1 200 | 3 255 | 350 | 800 | 3 000 | 8 605 | 14 430.50 |
| I42 | 17 182.8 | 5 714.6 | 22 897.4 | 1 200 | 3 255 | 325 | 800 | 3 000 | 8 580 | 14 317.40 |

注:谷子和大豆分别按照市场价4.68、8元/kg计算。

Note: Millet and soybeans were calculated at market prices of 4.68, 8 yuan/kg, respectively.

3 结论与讨论

间作是将2种或者2种以上生育季节相近的作物在同一块土地上同时或同季节成行或成带地相间种植的方式,通常将高的喜阳植物和矮的喜阴植物进行间作种植。与单作相比,间作是人工复合群体,个体间既有协作,又有竞争。间作立体而重复利用空间,提高种植密度,充分利用作物的高低位改善群体光热条件,减少个体竞争和光照损失,促进作物光合作用的吸收^[20]。王钰云等^[21]研究认为,在谷子花生间作中得出间作处理下谷子的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度均有不同程度的提高,胞间CO₂浓度有所下降,与本试验研究结果基本一致。王雅梅等^[22]研究发现,在玉米大豆间作研究中,间作大豆叶片净光合速率、气孔导度较单作降低。本研究表明,谷子大豆间作下谷子生理指标间作优于单作,而谷子抽穗期I24处理Gs显著低于I22和I42处理,大豆整个生育期净光合速率、气孔导度和蒸腾速率的平均值单作优于间作,但是结荚期大豆Gs则I24处理低于SD和I22处理。这可能是这一时期谷子和大豆均需光强烈,不同作物对光能的竞争吸收为后期光能的互补提供条件,同时可以保障作物生育后期保持较高的光合性能,有效光能吸收保持时间长且光合值稳定,为作物生育后期株高茎粗增加、干物质积累及籽粒的形成奠定基础。

农艺性状株高、茎粗和干物质可以直接反映植株的生长发育情况^[23],合理的群体结构有利于作物个体的生长发育^[24]。林文磊等^[25]研究发现,玉米大豆间作下玉米的株高、茎粗相比于单作有所增加。

黄显然等^[26]研究则认为,不同田间配置下玉米大豆株高有显著性差异。本研究谷子大豆间作下,成熟期间作处理谷子的株高和茎粗较单作均有提高,大豆的株高无显著变化,大豆的茎粗较单作略有降低。但是谷子抽穗期和大豆结荚期,I24处理谷子株高显著高于其他处理,茎粗较单作谷子显著增加,大豆株高显著高于单作,大豆茎粗较其他处理不同程度提高,即I24处理谷子大豆呈现又高又粗的良好态势。

种植模式会引起谷子和大豆产量构成因素的变化^[27],产量构成因素直接决定着作物产量^[28],是评价间作模式是否具有种植优势的核心指标^[29-31]。王钰云等^[32]研究表明,谷子花生间作时,谷子产量构成因素及产量均高于单作。崔纪菡等^[33]在谷子与花生/大豆间作中研究发现,间作提高了谷子产量,降低了花生和大豆产量,谷子与花生间作总经济效益提高,谷子与大豆间作下总经济效益降低。本研究发现,间作处理下谷子穗粗、穗长、穗质量、穗粒质量、千粒质量均有增加;大豆豆荚数、单株粒数和单株粒质量间作处理均有不同程度降低,间作处理土地当量比均大于1,其中I24处理产量最高、经济效益最佳,最具有间作优势,这是由于2行谷子4行大豆间作处理谷子能够更好的吸收光热水肥资源,也不影响大豆的通风和透光,加之大豆的固氮作用促进了谷子产量的增加,同等面积下谷子产量提升幅度大于大豆产量下降幅度,复合产量最高,从而提高群体经济效益。

综上,与单作相比,谷子大豆间作行比为2行谷子4行大豆时,不仅能降低单作种植重茬带来的不利影响,减少田间病虫害的发生,而且对耕地可

以做到养分互补和用养结合,可极大地改善田间生态环境,提高作物群体产量,最终实现谷子的高产稳产,可为黄土丘陵沟壑区谷子大豆间作提供理论指导。

参考文献:

- [1] 黄洪伟. 碳中和背景下区域水资源优化配置[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2023.
HUANG H W. Optimal allocation of regional water resources under the background of carbon neutrality[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2023.
- [2] 王爱琼. 黄河流域土地生态安全评价及影响因素研究[D]. 西安:西安理工大学,2023.
WANG A Q. A study on land ecological security assessment and its influencing factors in the Yellow River basin[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.
- [3] 卫冕. 可持续发展视角下大豆生产优化研究[D]. 长春:吉林农业大学,2023.
WEI M. Optimization of soybean production from the perspective of sustainable development[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2023.
- [4] 王小林,徐伟洲,张雄,等. 黄土塬区夏玉米物质生产及水分利用对品种间作竞争的响应[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(3):377-387.
WANG X L, XU W Z, ZHANG X, et al. Response of matter production and water use of summer maize to intercropping competition in Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Ecological Agriculture, 2018, 26(3):377-387.
- [5] 岳伟,金珊珊. 聊城地区玉米大豆带状间作种植管理技术[J]. 特种经济动植物, 2024, 27(3):124-126.
YUE W, JIN S S. Management techniques of maize-soybean strip intercropping in Liaocheng[J]. Special Economic Animals and Plants, 2024, 27(3):124-126.
- [6] 韩飞. 西北旱作区玉米花生间作复合群体节水、减氮增效机制[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2023.
HAN F. Mechanism of water saving, nitrogen reducing and efficiency increasing of maize-peanut intercropping complex population in northwest dryland[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2023.
- [7] 周琳焱. 榆林市经济—人口—水资源—环境系统耦合协调发展研究[D]. 西安:西安理工大学,2023.
ZHOU L Y. Study on the coupling and coordinated development of economy-population-water resources-environment system[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.
- [8] 张朝辉,张邦彦,谢小伟,等. 盐碱地甜高粱间作大豆对作物生产性能和光合特性的影响[J]. 草地学报, 2024, 32(1):219-228.
ZHANG C H, ZHANG B Y, XIE X W, et al. Effects of intercropping soybean with sweet sorghum on crop performance and photosynthetic characteristics in saline-alkali soil[J]. Journal of Grassland Science, 2024, 32(1):219-228.
- [9] 冯晓敏,高翔,臧华栋,等. 燕麦—绿豆间作效应及氮素转移特性[J]. 植物学报, 2023, 58(1):122-131.
FENG X M, GAO X, ZANG H D, et al. Effects of oat-mungbean intercropping and characteristics of nitrogen transfer [J]. Journal of Botany, 2023, 58(1):122-131.
- [10] LI X F, WANG Z G, BAO X G, et al. Long-term increased grain yield and soil fertility from intercropping[J]. Nature Sustainability, 2021, 4(11):943-950.
- [11] XU Z, LI C J, ZHANG CC, et al. Intercropping maize and soybean increases efficiency of land and fertilizer nitrogen use, A meta-analysis[J]. Field Crops Research, 2020(2):246-252.
- [12] 崔德华,王毓华,阎小铭. 旱地小麦膜际栽培技术[J]. 山西农机, 2001(1):37.
CUI D H, WANG Y H, YAN X M. Cultivation techniques of wheat under film mulch in dryland[J]. Shanxi Agricultural Machinery, 2001(1):37.
- [13] 胡云宇. 陕西榆林横山区谷子膜际种植技术[J]. 农业工程技术, 2021, 41(23):65-66.
HU Y Y. Planting techniques of millet under mulch in Hengshan area of Yulin, Shaanxi province[J]. Agricultural Engineering Technology, 2021, (23):65-66.
- [14] 曹宇媛. 谷子大豆间作对作物产量和水分利用效率的影响[D]. 榆林:榆林学院,2023.
CAO Y Y. Effect of millet-soybean intercropping on crop yield and water use efficiency[D]. Yulin: Yulin College, 2023.
- [15] 薛中侠,明璐. 不同耕作模式对花生生长、光合特性及产量的影响[J]. 基层农技推广, 2024, 12(3):36-39.
XUE Z X, MING L. Effects of different tillage patterns on growth, photosynthetic characteristics and yield of peanut[J]. Extension of Agricultural Technology at the Grass-roots Level, 2024, 12(3):36-39.
- [16] 刘思彤,张东娟,许锦,等. 间作对高粱光合特征及物质生产的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2023, 43(6):52-61.
LIU S T, ZHANG D J, XU J, et al. Effects of intercropping on the photosynthetic characteristics and biomass production of sorghum[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2023, 43(6):52-61.
- [17] 陈宇,袁宏安,韩芳,等. 不同间作方式对谷子间作大豆群体结构的影响[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(24):37-40.
CHEN Y, YUAN H A, HAN F, et al. Effects of different intercropping patterns on population structure of millet-soybean intercropping system[J]. Hubei Agricultural Science, 2021, 60(24):37-40.
- [18] 杨玲. 宁夏引黄灌区玉米 || 大豆对田间水氮利用及作物产量的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2022.
YANG L. Effect of maize || soybean on water and nitrogen use and crop yield in irrigation area of Ningxia[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022.
- [19] 张明君,杜娟,张强,等. 陕北地区谷子大豆间作种植模式研究与效益分析[J]. 陕西农业科学, 2021, 67(12):25-31.
ZHANG M J, DU J, ZHANG Q, et al. Study on intercropping patterns of millet and soybean in Shanbei region and benefit analysis[J]. Shaanxi Agricultural Science, 2021, 67(12):25-31.
- [20] 李智,王宏富,王钰云,等. 谷子大豆间作对谷子生物性状及产量的影响[J]. 山西农业科学, 2020, 48(2):193-197.
LI Z, WANG H F, WANG Y Y, et al. Effects of millet-soybean

- intercropping on biological characters and yield of millet[J]. Shanxi Agricultural Science, 2020, 48(2): 193-197.
- [21] 王钰云,王宏富,李智,等. 谷子花生间作对谷子光合特性及产量的影响[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(5): 153-65.
WANG Y Y, WANG H F, LI Z, et al. Effects of millet and peanut intercropping on photosynthetic characteristics and yield of millet[J]. China Agricultural Science and Technology News, 2020, 22(5): 153-65.
- [22] 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-soybean intercropping with different width on photosynthetic characteristics and water use efficiency of soybean[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020.
- [23] 王红伟. 不同栽培模式与密度对芸豆生长及产量的影响[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2023.
WANG H W. Effects of different planting patterns and densities on growth and yield of kidney bean[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2023.
- [24] 陈喜凤. 米豆条带间作体系产量效应分析及其抗倒机制研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2020.
CHEN X F. Study on yield effect and lodging resistance mechanism of rice-bean intercropping system[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2020.
- [25] 林文磊, 吕美琴, 施迎迎, 等. 玉豆间作对大豆生长发育、产量、品质及群体经济产值的影响[J]. 大豆科学, 2024, 43(3): 342-351.
LIN W L, LÜ M Q, SHI Y Y, et al. The effect of intercropping of maize and soybean on the growth and development, yield, quality and economic output of soybean population[J]. Soy Science, 2024, 43(3): 342-351.
- [26] 黄显然. 不同株距对大豆玉米带状复合种植农艺性状及产量的影响[J]. 南方农业, 2023, 17(22): 52-54.
HUANG X R. Effects of different plant spacing on agronomic characters and yield of soybean and maize in strip compound cropping system[J]. Agriculture in the South, 2023, 17(22): 52-54.
- [27] 曹宇媛, 纪晓玲, 刘琴, 等. 谷子大豆间作模式对作物干物质积累分配及产量的影响[J]. 山西农业科学, 2024, 52(1): 61-67.
CAO Y Y, JI X L, LIU Q, et al. Effects of millet-soybean intercropping system on dry matter accumulation, distribution and yield[J]. Shanxi Agricultural Science, 2024, 52(1): 61-67.
- [28] 林松明, 孟维伟, 南镇武, 等. 玉米间作花生冠层微环境变化及其与荚果产量的相关性研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(1): 31-41.
LIN S M, MENG W W, NAN Z W, et al. Studies on the change of peanut canopy microenvironment and its correlation with pod yield in maize intercropping[J]. Chinese Journal of Ecological Agriculture, 2020, 28(1): 31-41.
- [29] 海丹. 黄土高原东部及东南部农田土壤耕作制度研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
HAI DAN. Study on soil tillage systems in eastern and south-eastern Some Random Place Somewhere[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2023.
- [30] 许豆豆, 贺云新, 李飞, 等. 间套作模式在棉田上的研究进展[J]. 河南农业科学, 2023, 52(6): 1-11.
XU D D, HE Y X, LI F, et al. Research progress of intercropping patterns in cotton fields[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2023, 52(6): 1-11.
- [31] 曹曼君. 不同间作比例对玉米大豆光合特性及产量的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2022.
CAO M J. Effects of different intercropping ratios on photosynthetic characteristics and yield of maize and soybean[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2022.
- [32] 王钰云. 基于谷子花生间作模式的谷子生理特性及产量变化的研究[D]. 太原: 山西农业大学, 2020.
WANG Y Y. Studies on physiological characteristics and yield changes of millet based on millet-peanut intercropping system [D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2020.
- [33] 崔纪茵, 李顺国, 刘猛, 等. 谷子与花生/大豆间作对产量效益的影响及其品种间差异[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(17): 35-40.
CUI J H, LI S G, LIU M, et al. Effect of millet intercropping with peanut/soybean on yield benefit and difference among varieties[J]. Anhui Agricultural Science, 2020, 48(17): 35-40.