中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

江西红壤旱地玉米||大豆间作模式对作物产量及种间关系的影响

封亮，黄国勤，杨文亭，黄天宝，唐海鹰，麻巧迎，王淑彬

引用本文:
封亮, 黄国勤, 杨文亭, 等. 江西红壤旱地玉米||大豆间作模式对作物产量及种间关系的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(7): 1127–1137.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200882

(向下翻页，阅读全文)

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

玉米||大豆间作对AMF时空变化的影响

Tempo–spatial dynamics of AMF under maize soybean intercropping

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(5): 631–642 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190720

减氮对华南地区甜玉米//大豆间作系统 产量稳定性的影响

Effect of nitrogen reduction on yield stability of sweet maize//soybean inter– cropping system in South China

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(9): 1332–1343 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190129

玉米播期对大豆/玉米间作产量及种间竞争力的影响

Effect of maize sowing date on yield and interspecific competition in soybean/maize intercropping system

中国生态农业学报. 2018, 26(11): 1634–1642 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180132

减量施氮与间作大豆对华南地区甜玉米 农田氮平衡的影响

Effect of nitrogen reduction and soybean intercropping on nitrogen balance in sweet maize fields in South China

中国生态农业学报. 2018, 26(11): 1643–1652 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180121

减量施氮与间作大豆对华南地区甜玉米连作农田 N2O 排放的影响

Effect of reduced N application and soybean intercropping on soil N2O emission in sweet corn fields in South China

中国生态农业学报. 2015(12): 1529–1535 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150417

中国生态农业学报(中英文) 2021 年 7 月 第 29 卷 第 7 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jul. 2021, 29(7): 1127−1137

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200882

封亮, 黄国勤, 杨文亭, 黄天宝, 唐海鹰, 麻巧迎, 王淑彬. 江西红壤旱地玉米||大豆间作模式对作物产量及种间关系的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(7): 1127−1137

FENG L, HUANG G Q, YANG W T, HUANG T B, TANG H Y, MA Q Y, WANG S B. Yields and interspecific relationship of the maize-soybean intercropping system in the upland red soil of Jiangxi Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(7): 1127−1137

江西红壤旱地玉米||大豆间作模式对作物产量及种间关系的影响*

封 亮[1], 黄国勤[1], 杨文亭[1], 黄天宝[2], 唐海鹰[1], 麻巧迎[1], 王淑彬[1**]

(1. 江西农业大学作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室/江西农业大学生态科学研究中心 南昌 330045;
2. 江西省红壤研究所 南昌 331700)

摘 要: 江西红壤旱地光热水资源充沛, 为农业发展提供了优越的自然条件。为筛选江西红壤旱地间作优势明显、群体产量与经济效益较优的玉米||大豆的种植模式, 于2018—2019年设置7个处理: 玉米||大豆间作带宽2 m、行比2∶2, 带宽2.4 m、行比2∶3, 带宽2.4 m、行比2∶4, 带宽2.8 m、行比2∶3, 带宽2.8 m、行比2∶4, 及玉米单作和大豆单作, 分析了两年间不同玉米||大豆间作模式下带宽行比变化对作物产量及种间关系的影响。结果表明: 1)玉米大豆单作产量显著高于各自间作产量; 间作处理中, 带宽2.4 m、行比2∶4模式下作物群体平均产量为6801.88 kg·hm^{-2}, 较带宽2.4 m、行比2∶3模式增产7.56%, 说明适宜带宽模式下增植1行大豆有利于作物增产; 带宽2.4 m、行比2∶4模式两年平均经济效益为15 822.96 元·hm^{-2}, 较玉米、大豆单作平均经济效益增加9.90%、209.48%, 说明间作种植模式相比于单作有利于提高农民经济效益。2)2019年试验中, 带宽2.4 m、行比2∶4模式下土地当量比(LER)最高, 为1.77, 与其他间作处理呈显著性差异, 该模式下两年平均LER为1.59, 相较于带宽2.0 m、行比2∶2 (1.55), 带宽2.4 m、行比2∶3 (1.44), 带宽2.8 m、行比2∶3 (1.35), 带宽2.8 m、行比2∶4 (1.44)间作模式表现出较好的土地生产能力。3)带宽为2.4 m或2.8 m时, 增植1行大豆, LER分别提高10.42%、7.41%, 玉米实际产量损失指数(AYL_M)分别提高77.01%、59.02%, 玉米侵占力(A_M)分别提高91.89%、82.22%, 玉米竞争比率(CR_M)分别提高38.69%、24.11%, 经济效益(EB)分别提高8.38%、4.80%, 玉米收获指数(HI)分别提高6.12%、6.25%, 说明适宜带宽模式下增加大豆行可以提高间作玉米的竞争优势, 以此来提高作物产量与经济效益。行比为2∶3或2∶4时, 带宽由2.4 m增至2.8 m, LER分别减小6.67%、9.66%, AYL_M分别减小42.62%、59.79%, A_M分别减小64.44%、73.17%, CR_M分别减小19.15%、33.14%, EB分别减小10.23%、13.99%, 玉米(HI)分别减小2.08%、0.51%, 说明不同行比配置模式下增加带宽均会削弱间作玉米的竞争优势, 使得群体产量和经济效益降低。综上, 带宽2.4 m、行比2∶4种植模式能较好地协调作物种间关系, 土地产出率较高, 经济效益较优, 可作为江西红壤旱地适宜的玉米||大豆间作模式。

关键词: 红壤旱地; 间作; 玉米; 大豆; 种间关系; 群体产量

中图分类号: S344.2 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Yields and interspecific relationship of the maize-soybean intercropping system

* 国家重点研发计划项目(2016YFD030020906)和江西省重点研发计划项目(20171BBF60035)资助

** 通信作者: 王淑彬, 主要从事旱地农业与生态研究。E-mail: 290598920@qq.com
封亮, 主要从事旱地农业与生态研究。E-mail: 996597837@qq.com

收稿日期: 2020-10-30 接受日期: 2021-04-18

* This study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2016YFD030020906) and the Key Research and Development Project of Jiangxi Province (20171BBF60035).

** Corresponding author, E-mail: 290598920@qq.com

Received Oct. 30, 2020; accepted Apr. 18, 2021

in the upland red soil of Jiangxi Province*

FENG Liang[1], HUANG Guoqin[1], YANG Wenting[1], HUANG Tianbao[2], TANG Haiying[1], MA Qiaoying[1], WANG Shubin[1**]

(1. Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding / Research Center on Ecological Sciences, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2. Jiangxi Institute of Red Soil, Nanchang 331700, China)

Abstract: The upland red soil in Jiangxi Province is rich in light, heat, and water resources and provides superior natural conditions for agricultural development. To screen the maize-soybean intercropping system with obvious advantages, better group yield, and economic benefits in the upland red soil of Jiangxi Province, seven treatments were set up in 2018 and 2019, of which five were maize-soybean intercropping systems with 1) 2 m bandwidth and 2-2 rows ratio, 2) 2.4 m bandwidth and 2-3 rows ratio, 2.4 m bandwidth and 2-4 rows ratio, 2.8 m bandwidth and 2-3 rows ratio, and 2.8 m bandwidth and 2-4 rows ratio; other two were sole maize and sole soybean. The effects of different intercropping patterns of maize and soybean were analyzed for crop yield and the interspecific relationships. The results showed that 1) the yield of sole maize and soybean was significantly higher than that of the intercropped ones. In the 2-year experiment, the average yield was 6801.88 kg·hm^{-2} under the intercropping treatment of 2.4 m bandwidth and 2-4 rows ratio, which was 7.56% higher than that under the intercropping treatment of 2.4 m bandwidth and 2-3 rows ratio, indicating that increasing one row soybean of the intercropping system with suitable bandwidth benefited yield increase. The average economic benefit of intercropping system with a 2.4 m bandwidth and 2-4 rows ratio was 15 822.96 ¥·hm^{-2} for the 2 years, 9.90% and 209.48% higher than that of sole maize and sole soybean, respectively. This indicated that intercropping improved the farmers' economic benefit. 2) In 2019, the land equivalent ratio (LER) of the intercropping treatment with 2.4 m bandwidth and 2-4 rows ratio was 1.77, significantly higher than the other intercropping treatments. The 2-year average LER in this intercropping system was 1.59, compared with 1.55 for the 2.0 m bandwidth and 2-2 rows ratio, 1.44 for the 2.4 m bandwidth and 2-3 rows ratio, 1.35 for the 2.8 m bandwidth and 2-3 rows ratio, and 1.44 for the 2.8 m bandwidth and 2-4 row ratio, which showed better land productivity. 3) When the bandwidth was 2.4 m or 2.8 m, adding one more row of soybean increased the LER by 10.42% and 7.41%, the maize actual yield loss (AYL_M) by 77.01% and 59.02%, the maize invasion (A_M) by 91.89% and 82.22%, the maize competition ratio (CR_M) by 38.69% and 24.11%, the economic benefit (EB) by 8.38% and 4.80%, and the maize harvest index (HI) by 6.12% and 6.25%, respectively. These results showed that increasing the row ratio of soybean could enhance the competitive advantage of intercropped maize with a suitable bandwidth, which improved crop yield and economic benefits. When the bandwidth increased from 2.4 m to 2.8 m with the rows ratios of 2-3 and 2-4, LER decreased by 6.67% and 9.66%, AYL_M decreased by 42.62% and 59.79%, A_M decreased by 64.44% and 73.17%, CR_M decreased by 19.15% and 33.14%, EB decreased by 10.23% and 13.99%, and HI decreased by 2.08% and 0.51%, respectively. These results showed that increased bandwidth weakens the competitive advantage of intercropped maize with different rows ratios and reduced the group yield and economic benefit. In conclusion, the maize-soybean intercropping system of 2.4 m bandwidth with a 2-4 rows ratio better coordinated the crop interspecific relationships and resulted in higher crop yield and better economic benefits. This study provides a reference for the maize-soybean intercropping system in the upland red soil of Jiangxi Province.

Keywords: Upland red soil; Intercropping; Maize; Soybean; Interspecific relationship; Group yield

玉米(*Zea mays*)间作大豆(*Glycine max*)模式近年来得到广泛推广，种植面积呈逐年攀升态势[1]。玉米||大豆间作体系中不同作物占据不同生态位置使得光热水肥资源得到互补利用，提高了土地利用效率[2]；玉米||大豆作物间作模式下土壤地下部相互作用增加了根系有益分泌物，从而缓解病虫草危害[3]；玉米大豆高矮作物搭配种植减少了地表水分蒸发，提高了水分利用效率[4]；大豆因根瘤菌固氮作用可减少氮肥施用量、提高氮素利用效率[5]；因同一地块上同时种植两种作物使得群体经济效益得到有效提高[6]。间作种植模式很大程度上缓解人口增长与耕地减少之间的矛盾，为农业可持续集约化提供了机会，在农业生态系统增产增效方面发挥着重要意义[7]。

间作作物间存在竞争与互补两种作用[8]，作物种间互补和竞争作用是间作优势产生的重要决定因素[9]。前人研究表明禾本科作物相对于豆科作物表现出竞争优势[10-11]，而不同的作物搭配种植及行距变化均会影响作物种间作用。Wang 等[12]研究表明玉米间作花生(*Arachis hypogaea*)行比为 2∶4 时可以放大玉米的正边际效应，缓解花生的负边际效应，并且此模式下 2 m 宽的花生带也有利于小型收割机进行机械操作，被认为是适宜的田间配置模式；Wang 等[13]研究表明当糯高粱(*Sorghum bicolor*)与大

豆行比为 2∶1 时, 光环境较优, 土地当量比和经济效益均为最高, 但该模式下大豆带仅有 1.2 m, 不利于机械化收获; Van Oort 等[14]研究表明间作模式下带宽不宜超过 3 m, 反之不利于增加作物产量和经济效益。Yang 等[15]对甘蔗(*Saccharum officinarum*)间作大豆系统进行了研究, 发现大豆比甘蔗更有竞争力, 间作大豆比单作种植长势更优, 各间作处理土地当量比均大于 1, 表现出间作优势; 任家兵等[16]研究了不同施氮水平下小麦(*Triticum aestivum*)||蚕豆(*Vicia faba*)种间作用, 表明间作模式可有效降低低氮水平下的种间竞争, 间作小麦则表现出明显的竞争优势和互利效应; 赵建华等[17]对玉米||大豆间作系统进行研究, 结果表明玉米竞争能力强于大豆, 当玉米种植行距为 45 cm 时有利于作物增产; 王小春等[18]对玉米/大豆和玉米/甘薯两种套作模式下的种间关系进行了研究, 结果表明该两种模式下套作玉米均表现出套作优势, 大豆和甘薯表现出套作劣势。前人在间套作种间作用关系方面已有诸多报道, 但基于南方红壤旱地玉米||大豆间作体系下因带宽行比配置不同而引起的种间作用力变化对作物产量影响研究甚少。

南方红壤地处中国南方热带和亚热带地区, 覆盖面积广, 是中国最重要的农业土壤之一, 丰富的降水资源和光热资源使南方红壤旱地具有优越的种植条件[19], 因此发展玉米间作大豆种植产业具有绝对优势。前人对红壤旱地间作作物品种筛选[20]、玉米间作大豆减氮施肥[21]等进行了相关研究, 目前关于南方红壤旱地种植的玉米间作大豆行比配置研究较少, 同时关于红壤旱地不同带宽行比配置下作物种间相互作用研究也尚不明确。基于此本试验主要探讨以下几个问题: 1)带宽行比配置变化对间作作物产量有何影响; 2)带宽行比配置变化对间作作物种间作用力有何影响; 3)带宽行比配置模式下玉米大豆种间竞争能力与作物产量关系。通过研究不同带宽行比配置模式对作物产量、种间竞争力的影响, 阐明不同田间配置模式下间作群体种间相互作用对产量的响应机理, 为优化间作系统种间竞争力和红壤旱地间作系统农业高产高效研究提供参考。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

本试验于 2018—2019 年在江西省进贤县红壤研究所内进行(116°20′E, 28°15′N), 该点属于中亚热带季风气候, 年均降水量 1537 mm, 年蒸发量 1100~1200 mm, 年均气温 17.7~18.5 ℃。供试土壤基础肥力状况与作物共生期有效光合辐射见表 1, 试验间降水量与平均温度如图 1 所示。

表 1　供试土壤的基础肥力与光合有效辐射状况

Table 1　Agro-chemical properties of the test soils

年份 Year	pH	有机质 Organic matter ($g \cdot kg^{-1}$)	碱解氮 Available nitrogen ($mg \cdot kg^{-1}$)	速效钾 Available potassium ($mg \cdot kg^{-1}$)	有效磷 Available phosphorus ($mg \cdot kg^{-1}$)	有效辐射 Effective radiation ($MJ \cdot m^{-2}$)
2018	5.74	19.79	105.00	257.01	14.22	679.05
2019	5.72	19.70	102.76	174.08	12.80	641.79

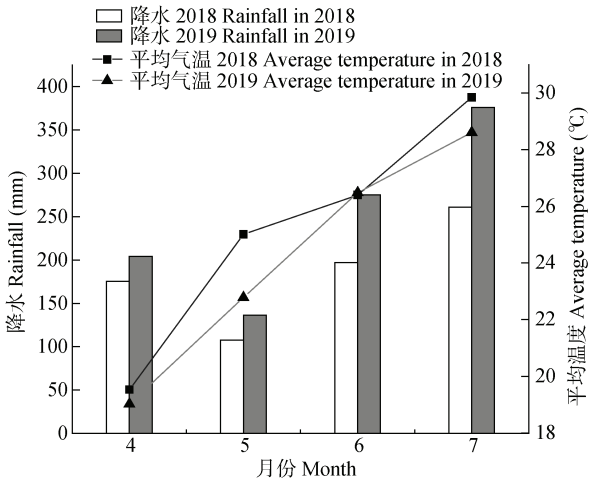

图 1　2018—2019 年试验期间作物生育期降水量与平均温度

Fig. 1　Precipitation and average temperature during crop growth periods in 2018 and 2019

1.2　试验设计

采用单因素随机区组设计, 种植模式为玉米间作大豆, 共 7 个处理, 每个处理重复 3 次。每个小区种 2 带, 各处理密度均为玉米 60 000 株·hm^{-2}、大豆 150 000 株·hm^{-2}, 单株定植。各处理具体配置见图 1。处理 $B_{2.0}R_{2:2}$ 的小区面积为 20 m^2, 玉米、大豆株距分别为 16.6 cm、6.6 cm; 处理 $B_{2.4}R_{2:3}$、$B_{2.4}R_{2:4}$ 的小区面积均为 24 m^2, 玉米株距均为 11.8 cm, 大豆株距分别为 8.3 cm、11 cm; 处理 $B_{2.8}R_{2:3}$、$B_{2.8}R_{2:4}$ 的小区面积均为 28 m^2, 玉米株距均为 11.9 cm, 大豆株距分别为 7.1 cm、9.5 cm; 玉米单作(SM)小区面积为 17.5 m^2, 株距为 23.8 cm; 大豆单作(SS)小区面积 12.5 m^2, 株距为 13.3 cm; 各处理带宽及行比配置如图 2 所示。

1.3　田间管理

玉米品种为‘吉祥 1 号’, 该品种属于紧凑型玉

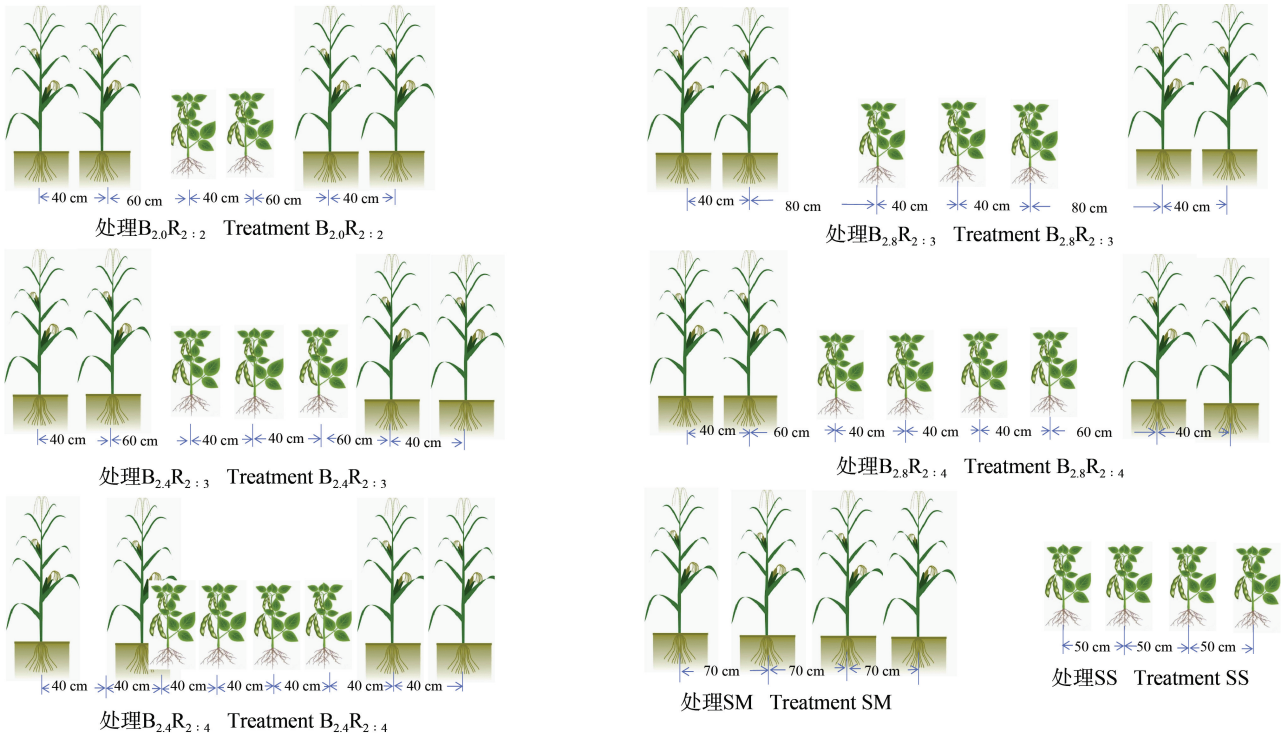

图 2 不同处理的带宽、行比田间配置试验设计图

Fig. 2 Design of field experiment of different treatments with different bandwidths and row ratios

米，株高 2.5 m 左右，穗位高 1 m 左右，穗长 18 cm 左右、根系发达、耐旱、抗倒伏。大豆品种为‘旱豆 1 号’，该品种株高约 30 cm，百粒重约 20 g。2018 年 4 月 9 日同日播种，春大豆、春玉米分别于 7 月 9 日、7 月 22 日收获。2019 年 4 月 8 日同日播种，春大豆、春玉米分别于 7 月 11 日、7 月 30 日收获。玉米全生育期共施纯氮 270 $kg·hm^{-2}$，按底肥：拔节肥：穗肥=3：2：5 比例施用，玉米底肥每公顷配施过磷酸钙 600 kg (含 P_2O_5 12%)，氯化钾 150 kg (含 K_2O 60%)，大豆基肥配施尿素 75 $kg·hm^{-2}$、过磷酸钙 600 $kg·hm^{-2}$、氯化钾 60 $kg·hm^{-2}$、追肥为初花后施尿素 75 $kg·hm^{-2}$，其他管理同大田。

1.4 测定项目及计算方法

1.4.1 作物产量的测定

玉米收获前统计各小区株数、有效穗数，收获期取 10 穗进行考种。大豆收获前统计各个小区的大豆株数，取 20 株长势一致的大豆样进行考种。玉米、大豆各小区收获时未取样的一带实打实收测产，最后折合成公顷产量。

1.4.2 竞争指数计算方法

土地当量比(LER)：衡量产量优势的指标[22]。

$$LER=LER_M+LER_S \quad (1)$$

$$LER_M=Y_{IM}/Y_{SM} \quad (2)$$

$$LER_S=Y_{IS}/Y_{SS} \quad (3)$$

式中：Y_{IM} 和 Y_{IS} 分别代表间作内玉米和大豆的产量，Y_{SM} 和 Y_{SS} 分别为单作玉米和单作大豆的产量。当 LER>1 为间作优势，当 LER<1 为间作劣势。

相对拥挤系数(K)：衡量间作中一个作物相对另一作物竞争优势的指标[11]。

$$K=K_M\times K_S \quad (4)$$

$$K_M=Y_{IM}\times Z_{IS}/(Y_{SM}-Y_{IM})\times Z_{IM} \quad (5)$$

$$K_S=Y_{IS}\times Z_{IM}/(Y_{SS}-Y_{IS})\times Z_{IS} \quad (6)$$

式中：K_M、K_S 分别表示玉米和大豆的相对拥挤系数，Z_{IM}、Z_{IS} 分别表示玉米和大豆在间作体系中的种植比例。本文中玉米占地面积(Z_{IM})=(玉米行距+玉豆行距)/带宽，以 $B_{2.0}R_{2:2}$(带宽 2.0 m)为例，Z_{IM}=(40 cm+60 cm)/200 cm=0.50，$B_{2.4}R_{2:3}$、$B_{2.4}R_{2:4}$、$B_{2.8}R_{2:3}$ 和 $B_{2.8}R_{2:4}$ 的间作面积占比依次为 0.42、0.33、0.43、0.36，大豆占地面积比(Z_{IS})依次为 0.50、0.58、0.67、0.57、0.64。$K_M>K_S$ 时，玉米||大豆间作系统中玉米竞争力较强；$K_M<K_S$，大豆竞争力较强。

侵占力(A)：表征一种间作作物相对产量增长大于另一种间作物物产量增长的程度[11]。

$$A_M=Y_{IM}/Y_{SM}\times Z_{IM}-Y_{IS}/Y_{SS}\times Z_{IS} \quad (7)$$

$$A_S=Y_{IS}/Y_{SS}\times Z_{IS}-Y_{IM}/Y_{SM}\times Z_{IM} \quad (8)$$

若 $A_M=A_S$，表明这两种作物的竞争力相同；$A_M>0$，表明玉米占据优势；$A_M<0$，大豆占据优势。其中 A_M 代表间作玉米的侵占力，A_S 代表间作大豆的侵占力。

竞争比率(CR)：是评价物种之间竞争的一种指标。

$$CR_M=LER_M/LER_S\times Z_{IS}/Z_{IM} \quad (9)$$

$$CR_S=LER_S/LER_M\times Z_{IM}/Z_{IS} \quad (10)$$

式中: CR_M、CR_S 分别表示玉米和大豆的竞争比率。当 $CR_M>1$, 间作体系中玉米竞争能力强于大豆; $CR_M<1$, 间作体系中玉米竞争能力不及大豆。

1.4.3　产量及效益计算方法

实际产量损失指数(AYL): 表示间作玉米或间作大豆产量相对于单作玉米或单作大豆是损失还是增加[11]。AYL>0, 表示该处理相较于单作表现出增益; AYL<0, 表明该处理相较于单作表现出损失。AYL_M、AYL_S 的正负表示玉米或大豆在体系中表示增益或损失的贡献[23]。Y_{IM} 和 Y_{IS} 代表间作玉米、大豆产量, Z_{IM} 和 Z_{IS} 代表间作玉米与大豆种植比例, P_{MM} 和 P_{SS} 分别代表玉米与大豆单作种植比例(均为 1), Y_M 和 Y_S 分别代表单作玉米大豆产量。

$$AYL=AYL_M+AYL_S \quad (11)$$

$$AYL_M=(Y_{IM}/Z_{IM})/(Y_M/P_{MM})-1 \quad (12)$$

$$AYL_S=(Y_{IS}/Z_{IS})/(Y_S/P_{SS})-1 \quad (13)$$

间作优势指数(IA): 该指标反映间作系统是否具有间作优势[21]。IA>0 代表具有间作优势, IA=0 代表既无优势也无劣势, IA<0 代表具有间作劣势。

$$IA=IA_M+IA_S \quad (14)$$

$$IA_M=AYL_M\times ¥_M \quad (15)$$

$$IA_S=AYL_S\times ¥_S \quad (16)$$

$$收获指数(HI)=经济产量/生物学产量 \quad (17)$$

$$经济效益(EB)=Y_{IM}\times ¥_M+Y_{IS}\times ¥_S \quad (18)$$

式中: $¥_M$ 和 $¥_S$ 分别代表玉米与大豆的市场价格。

1.5　数据处理

数据处理采用 Microsoft Excel 2019 软件统计处理数据, 利用 SPSS Statistics 20 对数据进行方差分析, 用 Origin 2018 进行制图。

2　结果与分析

2.1　玉米||大豆间作带宽行比配置对作物产量及农学指标的影响

由表 2 可知, 单作作物产量显著高于间作作物产量。带宽为 2.4 m 或 2.8 m 时, 玉米、大豆行比由 2∶3 增至 2∶4, 间作作物产量均有所增加。说明在带宽相同条件下, 可通过增加行比、减小种间距离来提高种植密度进而提高作物产量。间作处理 $B_{2.8}R_{2:3}$ 玉米产量在两年试验中均为最低, 较单作玉米分别减产 31.99%和 29.99%, 并且该模式下的大豆产量分别低于处理 $B_{2.8}R_{2:4}$, 说明间作处理 $B_{2.8}R_{2:3}$ 相对于处理 $B_{2.8}R_{2:4}$ 不利于作物增产。带宽为 2.8 m 时玉米产量均低于带宽 2.4 m, 说明带宽过大不利于间作玉米产量增加。带宽 2.0 m 模式下大豆产量在两

表 2　玉米||大豆间作系统不同种植模式对作物产量与农学指标的影响

Table 2　Effects of planting patterns of maize||soybean intercropping system on yields and agronomic indicators of crops

年份 Year	处理 Treatment	玉米 Maize						大豆 Soybean			
		产量 Yield (kg·hm^{-2})	穗长 Spike length (cm)	千粒重 1000-seed weight (g)	每行粒数 Grains per row	每穗行数 Rows per ear	每穗粒数 Grains per panicle	单株有效荚数 Effective pods per plant	单株粒数 Seeds number per plant	百粒重 100-seed weight (g)	产量 Yield (kg·hm^{-2})
2018	$B_{2.0}R_{2:2}$	6029.6b	16.55a	256.13ab	12.89c	34.45c	414.44d	26.89b	51.41a	23.43a	612.33e
	$B_{2.4}R_{2:3}$	4797.00d	18.26a	265.53a	14.89a	36.56abc	536.33a	26.20b	47.43b	22.56a	673.20d
	$B_{2.4}R_{2:4}$	5146.50c	19.39a	244.43b	13.78bc	39.56ab	532.64a	26.21b	38.93d	23.61a	743.07bc
	$B_{2.8}R_{2:3}$	4355.73e	18.33a	254.13ab	14.00ab	36.11bc	504.44b	29.00a	47.40b	23.00a	705.60cd
	$B_{2.8}R_{2:4}$	4450.00e	18.11a	252.03ab	13.78bc	35.22c	478.00c	24.40c	39.21d	23.91a	759.53b
	SM/SS	6404.75a	19.56a	243.10b	14.00ab	39.89a	525.10a	23.89c	40.88c	23.07a	1222.00a
2019	$B_{2.0}R_{2:2}$	6666.67b	18.52ab	294.56a	13.80a	36.50a	501.30a	24.22a	41.41ab	15.52d	672.22c
	$B_{2.4}R_{2:3}$	6550.00b	18.63a	298.59a	13.07a	36.80a	481.01ab	18.65bc	36.31bc	17.50ab	627.85d
	$B_{2.4}R_{2:4}$	6977.78b	17.43abc	294.49a	12.80a	35.07a	449.04ab	24.05a	46.00a	17.91a	736.40b
	$B_{2.8}R_{2:3}$	5595.24c	16.90bc	291.36a	13.07a	32.93a	430.45b	22.78ab	42.17ab	17.32abc	611.91d
	$B_{2.8}R_{2:4}$	5780.95c	16.50c	292.65a	13.20a	32.67a	431.07b	22.11ab	44.33ab	16.38bcd	700.27c
	SM/SS	7992.38a	18.23ab	296.51a	13.20a	34.80a	459.01ab	16.09c	29.50c	16.04cd	823.11a
年份 Year (Y)		**	ns	**	**	ns	**	**	*	**	**
处理 Treatment (T)		**	*	ns	ns	*	**	**	**	ns	**
Y×T		**	**	ns	**	ns	**	ns	**	ns	**

各处理的详细介绍见图 1; 不同小写字母表示同一年份不同处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著。**和*分别表示在 $P<0.01$ 和 $P<0.05$ 水平有显著影响; ns 代表影响不显著。Detail information of each treatment is shown in the figure 1. Different lowercase letters mean significant difference among treatments in the same year at $P<0.05$ level. ** and * indicate significant effects at $P<0.01$ and $P<0.05$ levels, respectively. "ns" means no significant effect.

年试验中均低于带宽 2.4 m 带宽模式。综合来看，带宽 2.4 m、行比 2∶4 模式下作物产量较优，利于作物增产。

年份、处理和年份与处理交互作用均对作物产量有极显著影响，处理对大豆百粒重、玉米千粒重均无显著影响，不同年份对大豆百粒重、玉米千粒重具有极显著性影响。年份对玉米穗长、每穗行数均无显著影响，处理对玉米穗长、每穗行数有显著影响，年份与处理交互作用对玉米穗长、每穗行数无显著影响。处理间对大豆单株有效荚数、单株粒数有极显著影响。

2.2 玉米||大豆间作带宽、行比配置模式对竞争指数的影响

2.2.1 土地当量比(LER)与相对拥挤系数(*K*)

由表 3 数据可得，不同间作处理下 LER、*K* 值表现不同，说明不同田间配置模式对 LER、*K* 值均会造成影响。在两年试验中，所有间作处理下，LER 变化范围表现为 1.26~1.77，所有间作模式下的 LER 均大于 1，无论带宽行比如何变化，都不影响间作产量优势，表现出间作优势。2019 年试验中处理 $B_{2.4}R_{2:4}$ 模式 LER 最高，为 1.77，与其他间作处理呈显著性差异。*K* 值与 LER 变化趋势相似，处理 $B_{2.4}R_{2:4}$ 模式下 *K* 值最大，所有间作处理下 $K_M>K_S$，表明玉米竞争力强于大豆。

在本试验中，带宽为 2.4 m 或 2.8 m 模式下，增加行比配置，LER_M、LER_S、LER、K_M、*K* 值均呈增加趋势；当行比为 2∶3 或 2∶4 时，带宽由 2.4 m 增至 2.8 m，LER_M、LER、K_M、*K* 值均呈减小趋势；当种间距离不变，带宽由 2 m 增至 2.8 m 时，LER_M、K_S、*K* 值变化趋势一致。

2.2.2 侵占力(*A*)与侵占比率(CR)

由表 3 可知，两年试验间，A_M 均为正值且以处理 $B_{2.4}R_{2:4}$ 模式配置下最高，处理 $B_{2.0}R_{2:2}$ 最低，表明在所有间作模式下，玉米均表现为竞争优势种。各间作模式下 $CR_M>CR_S$，与 CR 变化呈一致性。在本试验中，带宽相同时，增加行比配置，A_M 与 CR_M 呈增加趋势，A_S 与 CR_S 呈减小趋势；当行比相同时，增加带宽配置，A_M 与 CR_M 均呈减小趋势，A_S 与 CR_S 呈增加趋势；当种间距离相等，带宽由 2 m 增至 2.8 m 时，CR_M 增加，CR_S 减小。

表 3 玉米||大豆间作系统不同种植模式对玉米(M)和大豆(S)土地当量比(LER)、相对拥挤系数(*K*)、作物侵占力(*A*)与侵占比率(CR)的影响

Table 3 Effects of intercropping treatments on land equivalent ratio (LER), relative crowding coefficient (*K*), crop invasiveness (*A*) and invasiveness ratio (CR) of maize (M) and soybean (S) in maize||soybean intercropping system

年份 Year	处理 Treatment	LER			*K*			*A*		CR	
		LER_M	LER_S	LER	K_M	K_S	*K*	A_M	A_S	CR_M	CR_S
2018	$B_{2.0}R_{2:2}$	0.94a	0.50d	1.44a	16.34a	1.00a	16.33a	0.88bc	–0.88bc	1.88b	0.53b
	$B_{2.4}R_{2:3}$	0.75c	0.55c	1.30bc	4.13c	0.89ab	3.67c	0.83c	–0.83b	1.88b	0.53b
	$B_{2.4}R_{2:4}$	0.80b	0.61ab	1.41a	8.32b	0.77b	6.38b	1.53a	–1.53d	2.68a	0.37c
	$B_{2.8}R_{2:3}$	0.68d	0.58bc	1.26c	2.84c	1.03a	2.94c	0.57d	–0.57a	1.56c	0.64a
	$B_{2.8}R_{2:4}$	0.70d	0.62a	1.31b	4.05c	0.93a	3.75c	0.96b	–0.96c	1.99b	0.50b
2019	$B_{2.0}R_{2:2}$	0.84ab	0.82b	1.65b	5.12b	4.47a	22.69b	0.03d	–0.03a	1.02d	0.98a
	$B_{2.4}R_{2:3}$	0.82b	0.76c	1.58c	6.39b	2.34b	14.92bc	0.64b	–0.64c	1.48b	0.67c
	$B_{2.4}R_{2:4}$	0.87a	0.89a	1.77a	14.51a	4.47a	61.86a	1.31a	–1.31d	1.98a	0.51d
	$B_{2.8}R_{2:3}$	0.70c	0.74c	1.44d	3.13b	2.23b	6.92c	0.32c	–0.32b	1.25c	0.80b
	$B_{2.8}R_{2:4}$	0.73c	0.85ab	1.58c	4.70b	3.25ab	15.12bc	0.68b	–0.68c	1.51b	0.66c

各处理的详细介绍见图 1；不同小写字母表示同一年份不同处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著。Detail information of each treatment is shown in the figure 1. Different lowercase letters mean significant difference among treatments in the same year at $P<0.05$ level.

2.3 玉米||大豆间作带宽、行比配置对实际产量损失(AYL)的影响

由表 4 可知，两年试验中，所有间作处理 AYL 均为正值，表明所有间作处理均存在间作优势；且所有处理的 $AYL_M>0$，说明与单作相比，所有间作处理玉米产量均有所增加；2018 年，$B_{2.4}R_{2:3}$、$B_{2.4}R_{2:4}$ 和 $B_{2.8}R_{2:4}$ 的 $AYL_S<0$，说明与单作相比，3 个间作处理的大豆产量有所减小；2018 年 $B_{2.0}R_{2:2}$ 和 $B_{2.8}R_{2:3}$ 处理和 2019 年所有间作处理 $AYL_S>0$。两年间作处理 $B_{2.4}R_{2:4}$ 模式下 AYL_M 均为最高，且与其他间作模式呈显著差异，表明该间作模式相较于其他处理玉米产量更具有增产优势。带宽为 2.4 m、2.8 m 模式下，增植 1 行大豆，AYL_M、AYL 呈增加趋势，说明增植 1 行大豆有利于提高间作玉米产量；行比为 2∶3、2∶4 时，增加带宽配置，AYL_M、AYL 均呈减小趋势，不利于间作玉米增产。

表 4　玉米||大豆间作系统不同种植模式对玉米(M)和大豆(S)实际产量损失(AYL)的影响

Table 4　Effects of intercropping patterns on actual yield loss (AYL) of maize (M) and soybean (S) in maize||soybean intercropping system

处理 Treatment	2018			2019		
	AYL_M	AYL_S	AYL	AYL_M	AYL_S	AYL
$B_{2.0}R_{2:2}$	0.88 bc	0.00a	0.89 b	0.67 c	0.63 a	1.30 b
$B_{2.4}R_{2:3}$	0.78 c	–0.05ab	0.73 c	0.95 b	0.32 b	1.27 b
$B_{2.4}R_{2:4}$	1.44 a	–0.09b	1.34 a	1.65 a	0.34 b	1.98 a
$B_{2.8}R_{2:3}$	0.58 d	0.01a	0.60 d	0.63 c	0.30 b	0.93 c
$B_{2.8}R_{2:4}$	0.93 b	–0.03ab	0.90 b	1.01 b	0.33 b	1.34 b

各处理的详细介绍见图 1; 不同小写字母表示同一年份不同处理在 $P<0.05$ 水平差异显著。Detail information of each treatment is shown in the figure 1. Different lowercase letters mean significant difference among treatments in the same year at $P<0.05$ level.

2.4　玉米||大豆间作带宽、行比配置模式对作物收获指数(HI)的影响

由图 3 可得, 不同种植模式下的作物收获指数不同。2018 年(图 3A), 处理 $B_{2.4}R_{2:4}$ 玉米的收获指数最高, 与单作玉米无显著差异。间作处理 $B_{2.8}R_{2:3}$ 的大豆收获指数最大, 显著高于其他处理。2019 年(图 3B), 间作处理 $B_{2.4}R_{2:4}$ 模式下的玉米收获指数最高, 与单作玉米无显著性差异。大豆收获指数各处理间差异不显著。在带宽同为 2.4 m 或 2.8 m 模式下, 增植 1 行大豆, 玉米收获指数增加, 说明增加行比配置有利于同化产物向籽粒运输。

2.5　玉米||大豆间作带宽、行比配置模式对经济效益(EB)及间作优势指数(IA)的影响

由表 5 中数据可知, 2018 年处理 $B_{2.0}R_{2:2}$ 模式配置下 EB 最高, 为 15 120.87 元·hm^{-2}, 与其他间作处理呈显著差异。2019 年, 处理 $B_{2.4}R_{2:4}$ 模式 EB 最高, 为 17 637.59 元·hm^{-2}, 与其他间作处理差异显著, 比处理 $B_{2.0}R_{2:2}$、$B_{2.4}R_{2:3}$、$B_{2.8}R_{2:3}$ 和 $B_{2.8}R_{2:4}$ 分别增长 5.35%、7.93%、19.21%和 14.60%。两年试验中, 除 2019 年带宽 2.0 m 模式及 $B_{2.8}R_{2:3}$ 外, 其他间作处理均表现为 $IA_M>IA_S$, 说明在间作体系中玉米较大豆表现为间作优势。各处理模式下 IA 均大于 1, 且在两年试验中处理 $B_{2.4}R_{2:4}$ 模式 IA 与其他处理呈显著

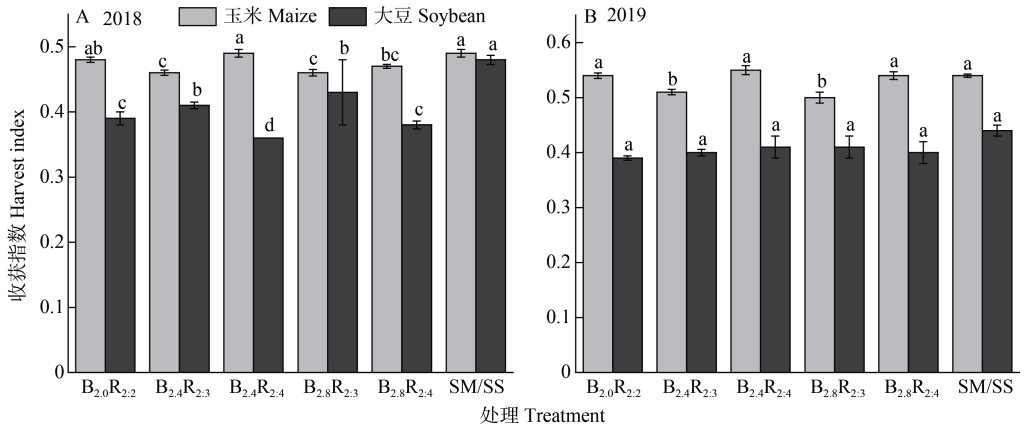

图 3　玉米||大豆间作系统不同种植模式对作物收获指数的影响

Fig. 3　Effects of different intercropping treatments on crop harvest index in maize||soybean intercropping system

各处理的详细介绍见图 1;不同小写字母分别表示不同处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著。Detail information of each treatment is shown in the figure 1. Different lowercase letters mean significant difference among treatments at $P<0.05$ level.

表 5　玉米||大豆间作系统不同种植模式对玉米(M)和大豆(S)经济效益(EB)与间作优势指数(IA)的影响

Table 5　Effects of intercropping patterns on economic benefit (EB) and intercrop dominance index (IA) of maize (M) and soybean (S) in maize||soybean intercropping system

处理 Treatment	2018			2019			EB	
	IA_M	IA_S	IA	IA_M	IA_S	IA	2018	2019
$B_{2.0}R_{2:2}$	1.77bc	0.01a	1.78b	1.34c	3.17a	4.51b	15 120.87a	16 694.44b
$B_{2.4}R_{2:3}$	1.57c	–0.25ab	1.32c	1.91b	1.58b	3.48c	12 960.00c	16 239.26b
$B_{2.4}R_{2:4}$	2.87a	–0.46b	2.41a	3.30a	1.68b	4.98a	14 008.33b	17 637.59a
$B_{2.8}R_{2:3}$	1.17d	0.07a	1.23c	1.26c	1.52b	2.78d	12 239.47d	14 250.00d
$B_{2.8}R_{2:4}$	1.86b	–0.15ab	1.71b	2.02b	1.65b	3.66c	12 697.67c	15 063.24c
SM	—	—	—	—	—	—	12 809.50	15 984.80
SS	—	—	—	—	—	—	6110.00	4115.55

各处理的详细介绍见图 1; 玉米大豆的经济产值以 2019 年市场价格计算, 玉米价格 2.0 元·kg^{-1}, 大豆价格 5.0 元·kg^{-1}。Detail information of each treatment is shown in the figure 1. The economic values of maize and soybean calculated by market price in 2019, the price of maize was 2.0 ¥·kg^{-1}, the price of soybean was 5.0 ¥·kg^{-1}.

差异，相比于其他间作处理更具有间作优势，处理 $B_{2.8}R_{2:3}$ 模式 IA 表现为最小，两年间 EB 均为最低，说明该模式相较于其他间作处理表现不佳。

本试验中，带宽相同时，增加行比配置，EB、IA_M、IA 均不同程度地提高；当行比相同时，增加带宽配置，EB、IA_M、IA 均降低。综合来看，处理 $B_{2.4}R_{2:4}$ 模式下平均经济效益较优，有利于增加收入。

3 讨论

3.1 玉米||大豆间作带宽、行比配置对作物产量与经济效益的影响

间作作为高效种植制度，在作物增产增效方面具有重要作用[24]。在本试验中单作玉米、大豆的产量显著高于间作(表 2)，这与前人的研究结果相似[25]，原因可能是单作种植模式下作物株行距较为合理，相比于间作种植，缓解了植株个体之间的竞争能力；原因二可能是单作种植行距较宽，作物行间 CO_2 供应量充足和良好的通风环境有利于作物光合作用和提高作物产量[26]。各间作模式行比配置不同，对作物产量影响也不同，原因是不同种植模式因作物空间生态位置差异，对作物田间冠层小气候会产生不同影响，导致产量差异[27]。雍太文等[28]研究表明，玉米-大豆带状套作种植相较于大豆单作种植有利于提高大豆经济系数，带状轮作种植有利于提高系统产量和玉米种间竞争力。2018 年试验中间作大豆收获指数均低于单作大豆，这与前人研究的结果不一致，原因可能是套作大豆在套作玉米荫蔽作用解除后，大豆冠层在一定程度上得到恢复和补偿，增加套作大豆光能截获量，增加套作大豆的经济系数[29]；另外带状轮作种植模式下大豆茬口土壤表层 NO_3^--N 积累量提高，增加了接茬玉米叶片的氮素吸收量，有利于提高系统产量[30]；还可能是土壤质地(红壤土/紫色土)、种植方式(间作/套作)等因素所致。本试验中间作玉米的种间竞争力高于间作大豆，这与雍太文等[28]研究结果一致。

在本试验中不同带宽配置下，增植 1 行大豆，作物产量增加，这与罗万宇等[31]研究结果一致，原因可能是种间距离减小，地下部互作能力加强，大豆带向玉米带氮素转移量增加，促进玉米对氮素的吸收，有利于玉米灌浆期 PSⅡ反应中心维持较高比例的开放程度，提高了 PSⅡ电子传递能力，有利于光合作用和提高玉米干物质积累量[18]；同时大豆根系可分泌有机酸或质子活化了土壤中难溶性的磷，更易于促进玉米对磷素的吸收，促进作物增产[32]。不同带宽模式下，增加行比配置，对增产幅度不同，带宽 2.4 m 模式下作物产量增幅高于带宽 2.8 m 模式，说明超过适宜带宽再增加行比配置会削弱作物增产潜力[33]。原因可能是带宽 2.8 m 模式下，间作玉米株距更小，一方面对光温水肥资源竞争加剧，另一方面玉米叶片由于荫蔽作用，抑制了叶面积指数的增加和间作玉米增产优势。两年试验中间作玉米产量变化趋势一致，间作大豆产量变化趋势不一致，原因可能为不同年份间生态因子(降水量、平均温度、有效辐射)对大豆农艺性状与产量的影响较大[34]，在后期试验中将再做进一步的探讨。

本试验研究结果表明，作物田间空间布局不同，影响作物产量的同时也在影响经济效益，间作作物经济效益比单作玉米经济效益增加约 1.17%~18.04%，比单作大豆经济效益高出 2 倍以上，说明间作种植相比单作种植具有较优的产出效益，这与李隆[1]的研究结果一致。在间作处理中，带宽相同增加行比配置，经济效益增加，与作物产量变化呈正相关趋势[35]，带宽 2.4 m、行比 2∶4 模式有利于作物干物质积累与叶面积指数的增加，有利于提高作物群体产量[36-37]，两年平均经济效益优于其他间作处理，表现出较好的经济效益优势。

3.2 玉米||大豆间作带宽、行比配置对种间关系影响

前人研究表明，世界范围内玉米||大豆间作 LER 为 1.32[6]，我国玉米||大豆间作 LER 可达 1.40 以上[38]。本试验中，各间作处理 LER>1，再次说明玉米||大豆间作有利于提高土地利率效率[39]。两年试验间带宽 2.4 m、行比 2∶4 模式平均 LER 为 1.59，比其他间作处理表现出较好的优势，原因可能是此模式下，大豆比带宽 2 m 模式下能截获更多的光能；小于带宽 2.8 m 模式下的种间距离，玉米更易于吸收土壤中的氮素[2]，间作玉米增产潜力明显，这与任媛媛等[11]研究结果一致。本研究结果表明，带宽 2.4 m 或 2.8 m 模式下增植 1 行大豆，LER 增加，原因可能有两种：1)增植 1 行大豆减小了种间距离，玉米大豆根系产生有益根系分泌物，增加土壤中微生物多样性，因此玉米大豆地下部根系互作效应大于地上部[40]；2)大豆种植密度不变，增植 1 行大豆使大豆个体间株距增大，有利于大豆光能截获，缓解了个体间竞争，有利于提高大豆叶面积指数，利于光合产物的合成[41]。行比相同，增加带宽使 LER 减小，可能与种间距离扩大、地下部根系互作能力减弱有关[42]；带宽 2.8 m 模式下作物株距小于带宽 2.4 m 模式，作物个体相互遮荫、相互竞争[43]，使得 LER 减小。当种间距离不变，带宽行比同时增加，LER 呈先减后增趋势，这与作物产量增加有关[34]。随带宽、行比增加，玉米株距逐渐缩小、个体间光温水利用竞争加剧，不利于玉米产量增加[44]；前人研究表明随着大豆株距

增加, 个体间更加协调, 大豆群体产量随之增加[45], 这与 2018 年试验结果一致, 与 2019 年大豆产量试验结果不一致, 原因可能是受光温水资源等因素影响。

不同间作处理 K 值不同, 说明不同田间配置模式对种间竞争能力强弱均会造成影响。前人研究表明在玉米大豆共生后期, 玉米对资源竞争力强于大豆, K 值增加, $K_M>K_S$[20]。在本试验中, 玉米共生后期 K_M 在所有间作处理下均大于 K_S, 说明共生后期间作玉米相较于间作大豆表现出竞争优势, 因为间作玉米占据高生态位, 光竞争优势强于间作大豆, 且玉米具有较强的正边际效应, 而大豆为低位作物, 长期处于光照劣势, 受负边际效应影响较大[46], 这与赵建华等[22]结果一致。AYL 值反映不同间作方式或品种导致的作物产量损失或增加[21], 两年试验中 AYL_M 均为正值, 表明不同间作模式下玉米具有产量优势, 这与刘鑫[47]、任媛媛等[11]研究结果一致; 而刘鑫[47]研究结果表明 $AYL_S<0$, 大豆产量相对减产。本试验中 AYL_S 两年趋势不一致, 2019 年与刘鑫研究结果不一致, 原因可能是因为 2019 年试验期间作物生育期内降水增多, 影响作物产量进而影响 AYL_S。两年试验间 AYL>0, 表明间作具有产量优势, 间作体系中以玉米增产为主。

不同带宽行比配置下, 种间距离不同而导致间作作物竞争作用存在差异, 因此作物种间关系也不同。本试验中, 带宽相同、增加行比配置 K、AYL、A_M、CR_M 呈增加趋势, 而 A_S、CR_S 呈减小趋势, 说明种间距离减小, 玉米对大豆竞争能力加剧, 不利于大豆生长, 原因可能是随着生育期推进, 玉米作为高秆作物对大豆遮荫效果增强。行比相同, 带宽由 2.4 m 增至 2.8 m, K_M、AYL_M、A_M、CR_M 呈下降趋势, A_S、CR_S 呈增加趋势, 说明行比相同、带宽增加, 不利于间作玉米产量提高, 原因可能是种间距离增大, 作物根系互作能力减弱, 禾本科作物对豆科作物氮素吸收能力减弱所致。种间距离恒定, 带宽由 2 m 增至 2.8 m, 行比由 2∶2 增至 2∶4 时, K、AYL 变化趋势一致, 呈先增后减趋势, 因此合理的空间配置促进群体作物生态位的分离, 作物间竞争互补达到和谐, 促进作物对资源的高效利用, 以实现最大的产量效应[48], 而 A_M、CR_M 呈增加趋势, A_S、CR_S 呈减小趋势, 说明种内种间距离不变, 带宽、行比都增加的同时, 间作系统中玉米间作优势强于大豆。

4　结论

两年试验中带宽 2.4 m、行比 2∶4 模式下玉米||大豆间作系统平均 LER 为 1.59, 玉米相对产量损失指数和间作优势较高, 作物群体产量较优, 为 6801.88 kg·hm^{-2}, 平均经济效益较高, 为 15 822.95 元·hm^{-2}, 说明间作系统产量的提高以玉米为主, 玉米相较于大豆表现为优势种, 该模式下间作玉米增产优势明显。

带宽相同、增加行比配置, 土地当量比、相对拥挤指数、相对产量损失指数、玉米侵占力、玉米竞争比率、经济效益、玉米收获指数、作物产量呈增加趋势; 行比相同, 带宽由 2.4 m 增至 2.8 m 时, 土地当量比、相对拥挤指数、相对产量损失指数、玉米侵占力、玉米竞争比率、经济效益、玉米收获指数呈下降趋势、间作玉米产量减少。

参考文献 References

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

[2] TAN Y, HU F L, CHAI Q, et al. Expanding row ratio with lowered nitrogen fertilization improves system productivity of maize/pea strip intercropping[J]. European Journal of Agronomy, 2020, 113: 125986

[3] 陈曼, 万秀娟, 梁峥, 等. 间作套种控制病虫害的研究进展[J]. 农业科技通讯, 2016, (8): 8–11
CHEN M, WAN X J, LIANG Z, et al. Research progress of intercropping and interplanting for pest control[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2016, (8): 8–11

[4] YIN W, CHAI Q, ZHAO C, et al. Water utilization in intercropping: A review[J]. Agricultural Water Management, 2020, 241: 106335

[5] RODRIGUEZ C, CARLSSON G, ENGLUND J E, et al. Grain legume-cereal intercropping enhances the use of soil-derived and biologically fixed nitrogen in temperate agroecosystems. A meta-analysis[J]. European Journal of Agronomy, 2020, 118: 126077

[6] 田艺心, 曹鹏鹏, 高凤菊, 等. 减氮施肥对间作玉米-大豆生长性状及经济效益的影响[J]. 山东农业科学, 2019, 51(11): 109–113
TIAN Y X, CAO P P, GAO F J, et al. Effects of nitrogen reduction on growth traits and economic benefits of intercropped maize and soybean[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2019, 51(11): 109–113

[7] 李河旺, 张冬菊, 李向涛, 等. 粮豆间作——中国大豆面积恢复的有效途径[J]. 大豆科技, 2013, (6): 37–39
LI H W, ZHANG D J, LI X T, et al. Intercropping of grain crops and soybean: An effective way to restore soybean area in China[J]. Soybean Science & Technology, 2013, (6): 37–39

[8] POWER A G. The ecology of intercropping[J]. Trends in Ecology & Evolution, 1989, 4(10): 324–325

[9] DAPAAH H K, ASAFU-AGYEI J N, ENNIN S A, et al. Yield stability of cassava, maize, soya bean and cowpea intercrops[J]. The Journal of Agricultural Science, 2003, 140(1): 73–82

[10] NDAKIDEMI P A. Manipulating legume/cereal mixtures to

optimize the above and below ground interactions in the traditional African cropping systems[J]. African Journal of Biotechnology, 2007, 525(25): 2526–2533

[11] 任媛媛, 王志梁, 王小林, 等. 黄土塬区玉米大豆不同间作方式对产量和经济收益的影响及其机制[J]. 生态学报, 2015, 35(12): 4168–4177
REN Y Y, WANG Z L, WANG X L, et al. The effect and mechanism of intercropping pattern on yield and economic benefit on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(12): 4168–4177

[12] WANG R N, SUN Z X, ZHANG L Z, et al. Border-row proportion determines strength of interspecific interactions and crop yields in maize/peanut strip intercropping[J]. Field Crops Research, 2020, 253: 107819

[13] WANG C, ZHOU L B, ZHANG G B, et al. Responses of photosynthetic characteristics and dry matter formation in waxy *Sorghum* to row ratio configurations in waxy *Sorghum*-soybean intercropping systems[J]. Field Crops Research, 2021, 263: 108077

[14] VAN OORT P A J, GOU F, STOMPH T J, et al. Effects of strip width on yields in relay-strip intercropping: a simulation study[J]. European Journal of Agronomy, 2020, 112: 125936

[15] YANG W T, LI Z X, WANG J W, et al. Crop yield, nitrogen acquisition and sugarcane quality as affected by interspecific competition and nitrogen application[J]. Field Crops Research, 2013, 146: 44–50

[16] 任家兵, 张梦瑶, 肖靖秀, 等. 小麦||蚕豆间作提高间作产量的优势及其氮肥响应[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(12): 1890–1900
REN J B, ZHANG M Y, XIAO J X, et al. Wheat and faba bean intercropping to improve yield and response to nitrogen[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(12): 1890–1900

[17] 赵建华, 孙建好, 陈亮之, 等. 玉米行距对大豆/玉米间作作物生长及种间竞争力的影响[J]. 大豆科学, 2019, 38(2): 229–235
ZHAO J H, SUN J H, CHEN L Z, et al. Growth and interspecific competition of crops as affected by maize row spacing in soybean/maize intercropping system[J]. Soybean Science, 2019, 38(2): 229–235

[18] 王小春, 杨文钰, 邓小燕, 等. 玉/豆和玉/薯模式下玉米氮素吸收利用差异及氮肥调控效应[J]. 作物学报, 2014, 40(3): 519–530
WANG X C, YANG W Y, DENG X Y, et al. Differences of nitrogen uptake and utilization and nitrogen regulation effects in maize between maize/soybean and maize/sweet potato relay intercropping systems[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(3): 519–530

[19] XU R K, ZHAO A Z, LI Q M, et al. Acidity regime of the Red Soils in a subtropical region of Southern China under field conditions[J]. Geoderma, 2003, 115(1/2): 75–84

[20] 王淑彬, 张鹏, 杨文亭, 等. 红壤旱地玉米大豆间作模式适宜玉米品种筛选[J]. 江西农业大学学报, 2020, 42(1): 10–19
WANG S B, ZHANG P, YANG W T, et al. Selection of maize varieties suitable for maize soybean intercropping model in red soil[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2020, 42(1): 10–19

[21] YANG W T, MIAO J Q, WANG X W, et al. Corn-soybean intercropping and nitrogen rates affected crop nitrogen and carbon uptake and C∶N ratio in upland red soil[J]. Journal of Plant Nutrition, 2018, 41(15): 1890–1902

[22] 赵建华, 孙建好, 李伟绮. 玉米播期对大豆/玉米间作产量及种间竞争力的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(11): 1634–1642
ZHAO J H, SUN J H, LI W Q. Effect of maize sowing date on yield and interspecific competition in soybean/maize intercropping system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(11): 1634–1642

[23] 廖敦平. 玉米-大豆带状套作下不同行距配置的系统评定[D]. 雅安: 四川农业大学, 2015: 18–20
LIAO D P. Identification of advantages of maize-soybean relay strip intercropping system in different narrow-row planting patterns[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2015: 18–20

[24] 樊志龙, 柴强, 曹卫东, 等. 绿肥在我国旱地农业生态系统中的服务功能及其应用[J]. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1389–1402
FAN Z L, CHAI Q, CAO W D, et al. Ecosystem service function of green manure and its application in dryland agriculture of China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(4): 1389–1402

[25] 张晓娜, 陈平, 庞婷, 等. 玉米/豆科间作种植模式对作物干物质积累、分配及产量的影响[J]. 四川农业大学学报, 2017, 35(4): 484–490
ZHANG X N, CHEN P, PANG T, et al. The effects of dry matter accumulation, distribution and yield in the maize/soybean and maize/peanut intercropping system[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2017, 35(4): 484–490

[26] 罗华, 王杰, 宋勇, 等. 玉米-大豆间套作模式研究现状及其展望[J]. 作物研究, 2020, 34(5): 502–506
LUO H, WANG J, SONG Y, et al. Research status and prospect of maize and soybean intercropping model[J]. Crop Research, 2020, 34(5): 502–506

[27] 张悦, 邸万通, 王晶晶, 等. 北方农牧交错带间套作资源利用的研究进展[J]. 生态学杂志, 2017, 36(9): 2623–2632
ZHANG Y, DI W T, WANG J J, et al. Progress and perspectives of resource use in intercropping system in agro-pastoral ecotone[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(9): 2623–2632

[28] 雍太文, 刘小明, 宋春, 等. 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, et al. 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

[29] 龚万灼, 吴雨珊, 雍太文, 等. 玉米-大豆带状套作中荫蔽及光照恢复对大豆生长特性与产量的影响[J]. 中国油料作物学报, 2015, 37(4): 475–480
GONG W Z, WU Y S, YONG T W, et al. Effects of shade and lighting recovery on growth and yield of soybean in maize-soybean relay strip intercropping[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2015, 37(4): 475–480

[30] 雍太文, 陈平, 刘小明, 等. 减量施氮对玉米-大豆套作系

统土壤氮素氨化、硝化及固氮作用的影响[J]. 作物学报, 2018, 44(10): 1485–1495
YONG T W, CHEN P, LIU X M, et al. Effects of reduced nitrogen on soil ammonification, nitrification, and nitrogen fixation in maize-soybean relay intercropping systems[J]. Acta Agronomica Sinica, 2018, 44(10): 1485–1495

[31] 罗万宇, 唐庄峻, 任永福, 等. 带宽、行比对鲜食玉米间作鲜食大豆群体产量效益的影响[J]. 四川农业大学学报, 2019, 37(4): 442–451
LUO W Y, TANG Z J, REN Y F, et al. Effects of bandwidth and row ratio on population yield and benefit of fresh maize intercropping with fresh soybean[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2019, 37(4): 442–451

[32] 毛璐, 宋春, 徐敏, 等. 栽培模式及施肥对玉米和大豆根际土壤磷素有效性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(12): 1502–1510
MAO L, SONG C, XU M, et al. Effects of cropping patterns and fertilization on rhizosphere soil phosphorus availability of maize/soybean relay intercropping system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(12): 1502–1510

[33] 杨晓璐. 宽窄行配置对马铃薯光合特性及产量品质的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2019: 2–4
YANG X L. Effects of wide-narrow row spacing configurations on photosynthetic characteristics, yield and quality of potato[D]. Chongqing: Southwest University, 2019: 2–4

[34] 慈敦伟, 张礼凤, 汪宝卿, 等. 大豆种质资源农艺性状和产量的年份间差异及其关系[J]. 植物遗传资源学报, 2011, 12(6): 872–880
CI D W, ZHANG L F, WANG B Q, et al. Variation of agronomic traits and production of germplasm resources of soybean in different years and the relationship between them[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2011, 12(6): 872–880

[35] 徐振华. 区域粮食作物产量、养分效率和经济效益的关系及调控途径研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2011: 7–10
XU Z H. Relationships and regulatory approaches among yield, nutrient efficiency and benefits of grain crop[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2011: 7–10

[36] 封亮, 王淑彬, 杨文亭, 等. 带宽、行比配置对玉米农艺性状及干物质积累影响[J]. 江西农业大学学报, 2020, 42(3): 429–437
FENG L, WANG S B, YANG W T, et al. Effects of bandwidth and row ratio on the agronomic characters and dry matter accumulation of corn[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2020, 42(3): 429–437

[37] 封亮, 王淑彬, 杨文亭, 等. 红壤旱地玉米大豆间作模式对大豆农艺性状和产量的影响[J]. 大豆科学, 2020, 39(6): 882–890
FENG L, WANG S B, YANG W T, et al. Effects of maize soybean intercropping patterns on soybean agronomic characters and yield in upland red soil[J]. Soybean Science, 2020, 39(6): 882–890

[38] 杨文钰, 杨峰. 发展玉豆带状复合种植, 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

[39] 卢凤芝. 不同带宽对玉米—大豆带状套作系统作物养分积累竞争和产量的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2014: 18–20
LU F Z. Effects of different strip-widths on grain yield, crop nutrition accumulation and competitiveness in maize and soybean relay strip intercropping system[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2014: 18–20

[40] 吕越, 吴普特, 陈小莉, 等. 地上部与地下部作用对玉米/大豆间作优势的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 129–136,142
LYU Y, WU P T, CHEN X L, et al. Effect of above- and below-ground interactions on maize/soybean intercropping advantage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 129–136,142

[41] 周勋波, 杨国敏, 孙淑娟, 等. 不同株行距配置对夏大豆群体结构及光截获的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(3): 691–697
ZHOU X B, YANG G M, SUN S J, et al. Effect of different plant-row spacing on population structure and PAR interception in summer soybean[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(3): 691–697

[42] CAVALIERI A, BAK F, GARCIA-LEMOS A M, et al. Effects of intra- and interspecific plant density on rhizosphere bacterial communities[J]. Frontiers in Microbiology, 2020, 11: 1045 DOI:10.3389/fmicb.2020.01045

[43] 余常兵, 孙建好, 李隆. 种间相互作用对作物生长及养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 1–8
YU C B, SUN J H, LI L. Effect of interspecific interaction on crop growth and nutrition accumulation[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(1): 1–8

[44] 徐幸. 种植密度对不同株高玉米品种茎秆抗倒伏性能及产量的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2019: 45–50
XU X. The effects of planting density on stems lodging resistance and yield for different plant height maize varieties[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2019: 45–50

[45] 杨梦平, 潘丽丽, 张勇, 等. 株距对不同株型大豆农艺性状及产量的影响[J]. 大豆科学, 2017, 36(3): 377–384
YANG M P, PAN L L, ZHANG Y, et al. Effect of plant spacing on agronomic trait and yield of different plant type soybean[J]. Soybean Science, 2017, 36(3): 377–384

[46] 田艺心, 高凤菊, 曹鹏鹏. 鲁西北地区夏玉米/大豆间作适宜模式分析[J]. 大豆科学, 2020, 39(4): 571–576
TIAN Y X, GAO F J, CAO P P. Analysis on suitable model of summer maize/soybean intercropping in northwest Shandong Province[J]. Soybean Science, 2020, 39(4): 571–576

[47] 刘鑫. 玉豆带状间作系统光能分布、截获与利用研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2016: 83–84
LIU X. Study of the light distribution, interception and use efficiency in maize-soybean strip intercropping system[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2016: 83–84

[48] 赵建华, 孙建好, 李隆, 等. 玉米行距变化对间作系统生产力及玉米生长的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(2): 189–196
ZHAO J H, SUN J H, LI L, et al. Effects of maize row spacing on system productivity and the growth of intercropped maize in intercropping system[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2017, 34(2): 189–196