



辽西半干旱区玉米大豆间作模式对作物干物质积累分配、产量及土地生产力的影响

蔡倩^{1,3}, 孙占祥^{1,3}✉, 郑家明^{1,3}, 王文斌², 白伟^{1,3}✉, 冯良山^{1,3}, 杨宁^{1,3}, 向午燕^{1,3}, 张哲^{1,3}, 冯晨^{1,3}

¹ 辽宁省农业科学院耕作栽培研究所, 沈阳 110161; ² 辽宁省农业科学院作物研究所, 沈阳 110161; ³ 国家农业环境阜新科学观测实验站, 辽宁阜新 123100

摘要: 【目的】通过分析玉米大豆间作模式作物干物质积累与分配规律及种间竞争关系, 探讨玉米大豆间作的增产机理, 提出适合辽西半干旱区的最优玉米大豆间作模式。【方法】试验于 2018—2019 年在国家农业环境阜新科学观测实验站进行, 采用田间试验方法, 设置 2 行玉米 2 行大豆间作 (MS2: 2)、4 行玉米 4 行大豆间作 (MS4: 4)、6 行玉米 6 行大豆间作 (MS6: 6)、玉米单作 (M)、大豆单作 (S) 等 5 种植模式, 研究作物的干物质积累分配特点、种间竞争力及其对产量和土地生产力的影响。【结果】3 种间作模式均提高了玉米拔节期和灌浆期的干物质积累量, 比单作玉米分别增加 16.58%—20.32% 和 51.29%—52.56%; 间作对大豆分枝期和鼓粒期的干物质积累影响较小, 但分枝期 MS2: 2 间作模式干物质积累量显著低于单作大豆。玉米干物质分配比率拔节期叶大于茎, 灌浆期穗大于茎、叶, 且 3 种间作模式穗的分配比率比单作玉米增加 23.22%—31.70%; 大豆干物质分配比率分枝期茎大于叶, 鼓粒期茎、叶大于荚果, MS2: 2 和 MS4: 4 间作模式大豆荚果分配比率比单作大豆分别降低 19.30%、17.22%, MS6: 6 间作模式与单作大豆差异不显著。间作模式下玉米比大豆表现出了更强的种间竞争力 ($Ams > 0$) 和产量营养竞争比率 ($CRms > 1$)。MS6: 6 和 MS4: 4 间作模式土地当量比 LER 分别为 1.16、1.07, 土地生产力提高 7%—16%, 具有显著的间作优势; MS2: 2 间作模式土地当量比为 0.97, 具有间作劣势。【结论】玉米大豆间作模式土地生产能力的提高主要是通过改变作物干物质积累分配及种间竞争关系实现, MS6: 6 和 MS4: 4 间作模式优势明显。表现最佳的是 MS6: 6 间作模式, 该模式能够显著提高土地生产力, 在当地农业生产中具有很好的应用价值。

关键词: 玉米; 大豆; 种植模式; 干物质积累与分配; 种间竞争; 产量; 土地当量比 (LER)

Dry Matter Accumulation, Allocation, Yield and Productivity of Maize-Soybean Intercropping Systems in the Semi-Arid Region of Western Liaoning Province

CAI Qian^{1,3}, SUN ZhanXiang^{1,3}✉, ZHENG JiaMing^{1,3}, WANG WenBin², BAI Wei^{1,3}✉, FENG LiangShan^{1,3}, YANG Ning^{1,3}, XIANG WuYan^{1,3}, ZHANG Zhe^{1,3}, FENG Chen^{1,3}

¹Tillage and Cultivation Research Institute, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161; ²Crop Research Institute, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161; ³National Agricultural Experimental Station for Agricultural Environment, Fuxin 123100, Liaoning

Abstract: 【Objective】The study investigated the mechanism of overyielding in maize-soybean intercropping systems and optimized

收稿日期: 2020-05-31; 接受日期: 2020-08-31

基金项目: 辽宁省博士科研启动基金 (2019-BS-139)、国家重点研发计划 (2016YFD0300204)、辽宁省“兴辽英才计划”项目 (XLYC1807051, XLYC1908013)、农业部来源项目“农业科研杰出人才其创新团队”、国家青年基金 (41807388)、辽宁省农业科学院学科建设计划项目 (2019DD062010)

联系方式: 蔡倩, E-mail: caiqian2005@163.com. 通信作者孙占祥, E-mail: sunzx67@163.com. 通信作者白伟, E-mail: libai200008@126.com

maize-soybean intercropping configurations in semi-arid western Liaoning province by analyzing the dry matter accumulation and allocation of crops and the competition relationship between species in maize-soybean intercropping systems. 【Method】 The experiment was carried out in 2018-2019 at National Agricultural Environmental Station for Agricultural Environment in Fuxin. The cropping systems were: maize-soybean strip intercropping with 2 rows of maize and 2 rows of soybean (MS2:2), maize-soybean strip intercropping with 4 rows of maize and 4 rows of soybean (MS4:4), maize-soybean strip intercropping with 6 rows of maize and 6 rows of soybean (MS6:6), sole maize (M) and sole soybean (S). The dry matter accumulation and allocation of crops, interspecies competitiveness and its impact on crop yields and land productivity were analyzed. 【Result】 The dry matter of intercropped maize in all the 3 intercropping systems in jointing and grain filling stages was increased by 16.58%-20.32% and 51.29%-52.56%, respectively, compared with that of the sole maize system. The effect of intercropping on the dry matter accumulation of soybean in the branching and grain filling stages was not significant, however the dry matter of soybean in the MS2:2 intercrop in the branching stage was significantly lower than that of sole stands. The dry matter allocation ratio of maize leaf in jointing stage was greater than that of stem, and the ratio of maize ear in filling stage was greater than that of maize stem and leaf. The allocation ratio of intercropped maize ear was 23.22%-31.70% higher than that of sole maize. The dry matter allocation ratio of soybean stem in branching stage was greater than leaf, and the ratio of soybean stem and leaf in grain filling stage was greater than that pod. The allocation ratios of intercropped soybean pod in MS2:2 and MS 4:4 were 19.30% and 17.22% lower than that of soled soybean, while the ratio under MS6:6 was only 6.1% (not significant) lower than that of soled soybean. Maize had a stronger interspecific competitiveness ($A_{MS}>0$) and yield nutrition competition ratio ($CR_{MS}>1$) than soybean in intercropping systems. MS6:6 and MS4:4 intercropping systems had significant land use advantages and the land equivalent ratio (LER) were 1.16 and 1.07, respectively, indicating that intercropping increased the land productivity by 7%-16%. MS2:2 intercropping system didn't have a significant land use advantages, and the LER was 0.97. 【Conclusion】 The maize-soybean intercropping systems affected crop yield and land productivity by changing dry matter accumulation and allocation ratios and interspecific competition. Intercropping systems with wider strip width had a more significant yield advantage. MS6:6 intercropping systems performed the best, which significantly improved the land productivity and might be an option of cropping system in maintaining regional agricultural sustainability.

Key words: maize; soybean; planting configuration; accumulation and allocation of dry matter; interspecific competition; yield; land equivalent ratio (LER)

0 引言

【研究意义】辽西半干旱区是水资源短缺、旱灾频发的雨养旱作农业区，干旱缺水是作物稳产的主要限制因素^[1]。间作能够增加农田生物多样性^[2-4]，改善土地生产能力^[5]，提高农田光温水利用效率^[6]，与单一种植方式相比，具有明显的生物和经济产量优势^[7-8]。辽宁省是全国 13 个粮食主产区之一，玉米、大豆一直是区域主要作物。禾本科与豆科作物间作在辽西北地区农业发展中具有非常重要的地位^[9]，其中玉米大豆间作模式是当地主要间作模式之一。研究玉米大豆间作模式中作物干物质积累与分配规律及种间竞争关系，明确其增产机理，建立适合辽西半干旱区的最优玉米大豆间作模式，对稳定提高土地生产能力和促进该区域旱作农业绿色可持续发展具有重要意义。【前人研究进展】有关禾本科与豆科间作对作物产量和土地生产能力的研究表明，由于间作作物生长发育阶段在时间、空间上的差异，改变了间作系统光、温、水

等资源的空间分布和利用，进而影响间作作物的产量和土地生产能力^[10-13]。如玉米碗豆^[14]、谷子花生^[15]、玉米大豆^[16-17]、玉米花生^[18]等间作模式均提高了禾本科作物产量，豆科作物产量则不同程度下降，但间作模式土地当量比均有提高，土地生产力表现出较强优势。干物质积累量是作物产量形成的物质基础，干物质向各器官转移、分配与产量密切相关^[19-20]，作物产量高低主要取决于干物质的积累及其向籽粒的分配比率^[21]。张晓娜等^[21]和王雪蓉等^[22]对玉米大豆间作模式研究表明，间作有利于玉米干物质向果穗分配与积累，不利于大豆干物质向荚果分配与积累，但间作模式作物干物质积累量显著高于单作模式。高砚亮等^[23]对玉米花生间作模式研究表明，间作提高了玉米果穗干物质积累量，降低了花生荚果干物质积累量。因此，禾本科与豆科作物在适宜间作行比和合理田间管理下，能够通过改变干物质积累分配和种间互补竞争关系提升农田生产力。【本研究切入点】前人对禾本科与豆科作物间作的研究已经有一定

的基础^[9,23],对玉米大豆间作研究也做了大量工作,主要集中在窄条带间作对作物种间竞争、产量及经济效益的影响^[16-17]。在全球气候变化背景下,辽西半干旱地区“暖干化”趋势明显,关于新的气候条件下玉米大豆间作模式的研究报道较少,特别是宽条带间作对作物干物质积累分配、种间竞争关系和土地生产力等方面缺乏深入和系统研究。【拟解决的关键问题】本文利用国家农业环境阜新科学观测实验站玉米大豆间作定位试验,系统研究玉米大豆不同间作行比配置下作物干物质积累分配、种间竞争关系及其对产量和土地生产能力的影响,明确作物种间竞争和增产机制,确定适宜该区域的玉米大豆间作模式,为提高区域农田生产力和农业绿色可持续发展提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2018—2019 年在国家农业环境阜新科学观测实验站(辽宁省阜新市阜新蒙古族自治县阜新镇沙扎兰村,42°06'N、121°75'E)进行,玉米大豆间作定位试验,始于 2016 年,本文选取 2018—2019 年数据进行分析。实验站为温带大陆性气候,年均气温 7—8℃,年均降水量 300—500 mm,旱灾频发^[24]。试验区地势平坦,土壤为褐土;耕层土壤基本理化性状为 pH 6.90,有机质 11.58 g·kg⁻¹,全氮 0.68 g·kg⁻¹、全

磷 0.53 g·kg⁻¹、全钾 2.64 g·kg⁻¹,速效氮 104.51 mg·kg⁻¹、有效磷 82.45 mg·kg⁻¹、速效钾 102.55 mg·kg⁻¹,容重 1.35 g·cm⁻³。2018 年作物生育期内降雨量为 306 mm,灌溉 1 次、灌水量 50 mm,平均气温为 21.96℃;2019 年作物生育期内降雨量 376 mm,未进行灌溉,平均气温 21.60℃。2 个年度作物生育期内的逐日降雨量、平均气温如图 1 所示。

1.2 试验材料与设计

供试作物品种玉米为郑单 958,大豆为辽豆 15。玉米、大豆同时播种和收获,2018 年 5 月 10 日播种,9 月 25 日收获;2019 年 5 月 13 日播种,9 月 24 日收获。

试验采用完全随机区组设计,共设 5 种植模式,分别为 2 行玉米 2 行大豆间作(MS2:2)、4 行玉米 4 行大豆间作(MS4:4)、6 行玉米 6 行大豆间作(MS6:6)、玉米单作(M)和大豆单作(S)。南北向种植,间作模式玉米和大豆面积各占 50%,每种种植模式 3 次重复,共 15 个小区,每个小区面积 60 m²(长 5 m,宽 12 m)。单、间作模式中玉米株距均为 0.33 m,大豆株距均为 0.13 m,玉米和大豆行距均为 0.5 m(图 2)。

单、间作模式玉米和大豆播种时肥料量相同,均施磷酸二铵(含 N 18%,P₂O₅ 46%) 187 kg·hm⁻¹ 和三元复合肥(含 N、P₂O₅、K₂O 各 15%) 187 kg·hm⁻¹ 作为种肥;玉米拔节期追施尿素(含 N 46%) 225 kg·hm⁻¹,大豆不追肥。其他田间管理一致。

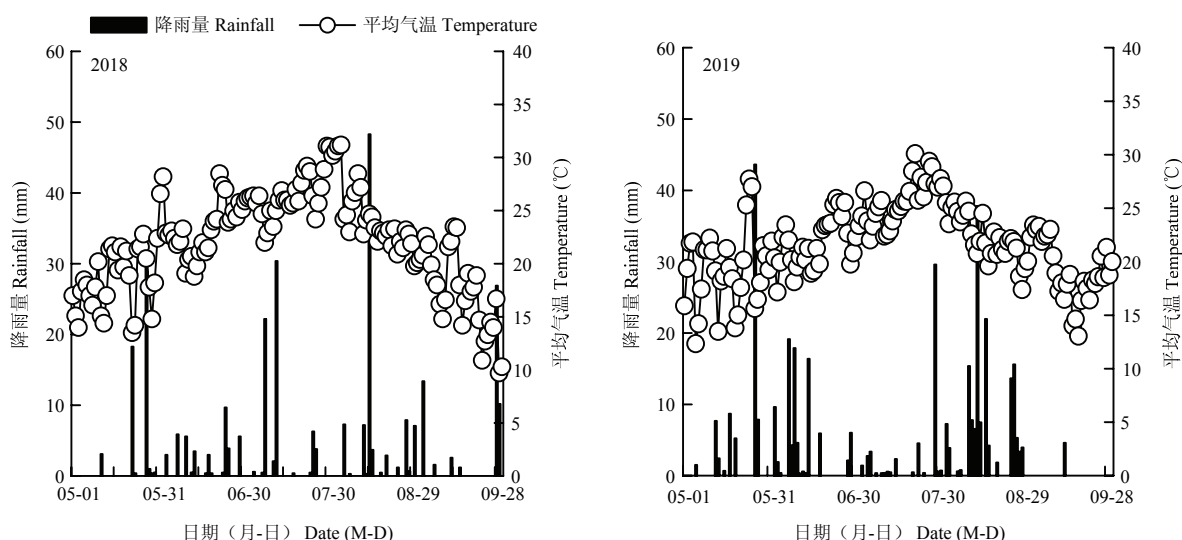
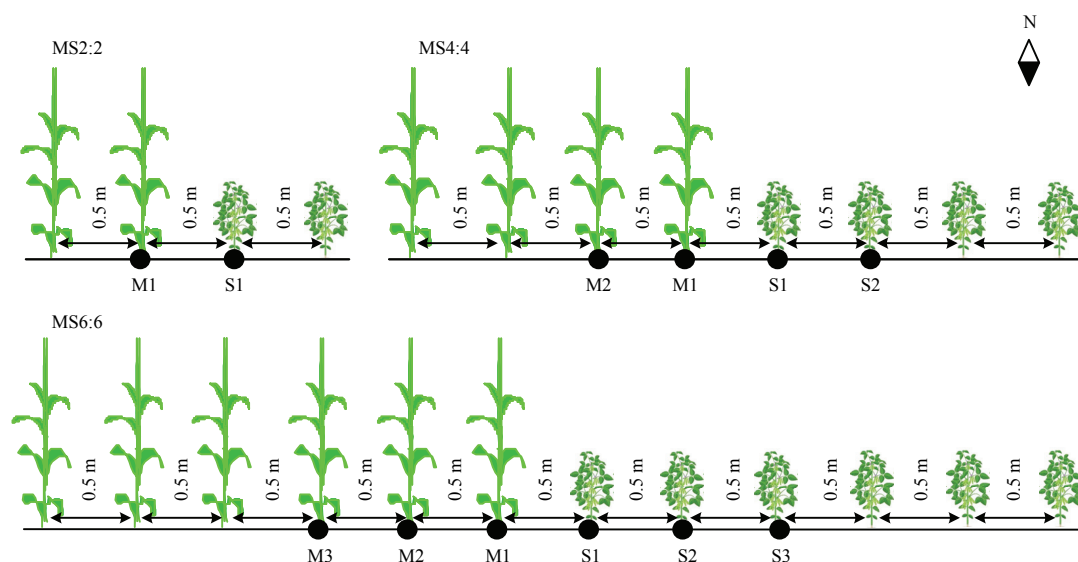


图 1 2018—2019 年试验区作物生育期内降雨量和平均气温

Fig. 1 Daily rainfall and mean air temperature during crop growth period of experimental station in 2018-2019



M1、M2、M3 分别表示玉米边 1 行、边 2 行、边 3 行，S1、S2、S3 分别表示大豆边 1 行、边 2 行、边 3 行

M1, M2 and M3 refer to the first, second and third row from the borderline of a maize strip. S1, S2 and S3 refer to the first, second and third row from the borderline of a soybean strip

图 2 玉米和大豆间作种植模式田间示意图

Fig. 2 Row arrangements of maize and soybean in field experiment

1.3 测定项目与方法

1.3.1 地上干物质测定 在玉米拔节期（2019 年 7 月 11 日）、灌浆期（2019 年 9 月 5 日），大豆分枝期（2019 年 7 月 11 日）、鼓粒期（2019 年 9 月 5 日）进行植株取样。每小区的单、间作玉米和大豆均按行取样（图 2），MS2:2 间作模式玉米和大豆条带各取 1 行（边 1 行），MS4:4 间作模式玉米和大豆条带各取 2 行（边 1 行、边 2 行），MS6:6 间作模式玉米和大豆条带各取 3 行（边 1 行、边 2 行、边 3 行），M 单作模式和 S 单作模式玉米和大豆各取 1 行。每行选取 3 株有代表性的植株，地上部植株取样后按茎、叶、穗（荚果）进行分离，并装入网袋中风干至恒重后测定干物质重。

1.3.2 产量测定 在作物成熟期，对单、间作模式各小区玉米和大豆按行取样，取样方法与干物质相似，其中玉米每行随机选取 3.34 m 行长玉米穗，大豆每行随机选取 0.67 m 行长大豆荚果进行产量测定。将采集的样品装入纱网袋内，放到风干棚内风干至恒重，脱粒，籽粒称重后用水分测定仪测定含水率，折算成含水率为 14% 的玉米、大豆产量^[11]。

1.3.3 相关指标及其计算方法 单作和间作模式玉米和大豆的种植密度用均一化种植密度 HD_i 表示，计算公式如下^[25-26]：

$$HD_i = P_i \times RLD_i \quad (1)$$

式中， HD_i 表示作物均一化种植密度，株/ m^2 ； P_i 为作物株距密度，株/m； RLD_i 为作物行长密度，行/m 或 $m \cdot m^{-2}$ ， i 表示玉米或大豆。本试验单、间作模式中玉米株距密度均为 3.0 株/m，大豆株距密度均为 7.5 株/m；间作玉米和大豆的行长密度（ RLD ）均为 $1 m \cdot m^{-2}$ （或行/m），单作玉米和大豆的行长密度均为 $2 m \cdot m^{-2}$ （或行/m）。

单作和间作模式作物产量用均一化产量 Y_i 表示，计算公式如下^[25-26]：

$$Y_i = PY_i \times HD_i \quad (2)$$

式中， Y_i 为作物的均一化产量， $g \cdot m^{-2}$ ； PY_i 表示作物的单株产量，g/株， i 表示玉米或大豆。

土地当量比（ LER ）是衡量作物间作土地生产力的一个重要指标，计算公式如下^[11,27]：

$$LER = LER_M + LER_S = \frac{Y_{M,I}}{Y_M} + \frac{Y_{S,I}}{Y_S} \quad (3)$$

式中， LER_M 、 LER_S 分别为间作模式中玉米和大豆的相对土地当量比，又称偏土地当量比； Y_M 、 $Y_{M,I}$ 和 Y_S 、 $Y_{S,I}$ 分别表示玉米和大豆的单作、间作均一化产量（ $g \cdot m^{-2}$ ）。当 $LER < 1$ 时，表明该间作模式具有劣势；当 $LER = 1$ 时，表明该间作模式无优势；当 $LER > 1$ 时，则表明该间作模式具有优势，有一定的应用价值^[11,27]。

种间相对竞争能力 A_{MS} 用公式 (4) 计算^[28-29]:

$$A_{MS} = \frac{Y_{M,I}}{Y_M} - \frac{Y_{S,I}}{Y_S}$$

(4)

式中, A_{MS} 表示在玉米大豆间作模式中玉米相对于大豆的竞争能力。 $A_{MS}>0$, 表明玉米竞争能力强于大豆; $A_{MS}<0$, 表明玉米竞争能力比大豆弱。

产量营养竞争比率 CR_{MS} 计算公式如下^[28-29]:

$$CR_{MS} = \frac{Y_{M,I}}{Y_M} \times \frac{Y_S}{Y_{S,I}}$$

(5)

式中, CR_{MS} 为在玉米大豆间作模式中玉米相对于大豆产量的营养竞争比率。 $CR_{MS}>1$, 表明玉米的产量营养竞争能力比大豆强; $CR_{MS}<1$, 表明玉米比大豆的营养竞争能力弱。

干物质分配比率 DPR_i 用公式 (6) 计算^[21]:

$$DPR_i(\%) = \frac{D_i}{D} \times 100$$

(6)

式中, DPR_i 表示作物不同器官的干物质分配比率, D_i 为作物 i 器官的干物质质量, D 为作物地上部干物质总量, i 为作物地上部茎、叶、穗或荚果等器官。

1.4 数据分析

用 Excel 整理分析数据并作图; 用 SPSS20 软件

(SPSS Inc.Chicago, USA) 对数据进行方差分析 (ANOVA), 显著水平为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 间作对作物产量的影响

玉米大豆间作对玉米均一化产量 (籽粒产量) 影响显著 ($P<0.05$) (表 1)。2018 年玉米产量表现为 $MS4:4<MS2:2<MS6:6<M$, 2019 年玉米产量表现为 $MS2:2<MS4:4<MS6:6<M$ 。单、间作模式玉米均一化种植密度分别为 6 株/ m^2 和 3 株/ m^2 , 间作模式玉米占地比例均为 50%, $MS2:2$ 、 $MS4:4$ 和 $MS6:6$ 间作模式玉米 2 年均一化产量平均值分别为单作玉米的 62.77%、62.40% 和 65.50%, 说明在相同土地面积上间作玉米的产量高于单作, 具有较强的产量优势。

玉米大豆间作对大豆均一化产量影响亦达到显著水平 ($P<0.05$), 2018 年和 2019 年大豆产量均表现为 $MS2:2<MS4:4<MS6:6<S$ 。单、间作模式大豆均一化种植密度分别为 15 株/ m^2 和 7.5 株/ m^2 , 间作模式大豆占地比例与玉米相同, 但 $MS2:2$ 、 $MS4:4$ 和 $MS6:6$ 间作模式大豆 2 年均一化产量平均值分别为单作大豆

表 1 玉米大豆间作对作物产量的影响
Table 1 Effect of crop yield in maize- soybean intercropping systems

年份 Year	种植模式 Planting configuration	均一化产量 Grain yield (kg·hm ⁻²)	
		玉米 Maize	大豆 Soybean
2018	单作 Sole	8112.0±856.0a	2474.5±203.5a
	MS2:2	5268.0±316.2b	766.4±78.4c
	MS4:4	5123.0±490.1b	1086.7±232.7b
	MS6:6	5628.7±390.1b	1227.2±50.7b
2019	单作 Sole	10228.2±829.3a	3378.7±433.0a
	MS2:2	6245.0±263.0b	1235.2±177.7c
	MS4:4	6321.5±290.1b	1498.8±115.1bc
	MS6:6	6384.3±140.0b	1692.3±148.6b
平均值 Mean	单作 Sole	9170.1±844.1a	2926.6±318.3a
	MS2:2	5756.5±210.6b	1000.8±108.5c
	MS4:4	5722.3±267.6b	1292.7±115.7b
	MS6:6	6006.5±167.5b	1459.7±87.0b
P	种植模式 Planting configuration	0.000	0.000
	年份 Year	0.001	0.003
	种植模式×年份 Planting configuration×Year	0.522	0.457

表中每竖列不同字母表示同一年度种植模式在 0.05 水平差异显著。下同
Different small letters indicate significant difference between planting configuration within same year at 0.05 level. The same as below

的 34.20%、44.17%和 49.88%。可见在相同面积上间作大豆产量小于单作，大豆产量在间作模式中表现出劣势，该劣势随着间作带宽的增加而降低，且 MS2:2 间作模式大豆产量显著低于 MS6:6 模式 ($P<0.05$)。另外，方差分析结果还表明，玉米、大豆均一化产量受种植模式、年份的影响显著 ($P<0.05$)，而受种植模式和年份交互作用的影响不明显 ($P>0.05$)。

2.2 间作对土地生产力的影响

玉米和大豆间作模式土地当量比方差分析结果表明(表 2)，不同间作模式对玉米偏土地当量比(LER_M)影响较小，2018 年和 2019 年 3 种间作模式间 LER_M 差异不显著 ($P>0.05$)，MS2:2、MS4:4 和 MS6:6 间作模式 2 年 LER_M 平均值分别为 0.63、0.62、0.66。间作模式对大豆偏土地当量比(LER_S)有较大影响，2018

年 MS6:6 和 MS4:4 间作模式 LER_S 与 MS2:2 间作模式差异显著 ($P<0.05$)，2019 年 MS6:6 间作模式 LER_S 与 MS2:2 间作模式差异显著 ($P<0.05$)； LER_S 2 年平均值表现为 MS6:6>MS4:4>MS2:2，分别为 0.50、0.44、0.34。整个间作系统的土地当量比(LER)变化特征与 LER_S 相似，2018 年和 2019 年土地当量比(LER)均表现为 MS6:6>MS4:4>MS2:2，其 2 年平均值分别为 1.16、1.07、0.97，MS6:6 和 MS4:4 间作模式 $LER>1$ ，而 MS2:2 间作模式 $LER<1$ ，说明 MS6:6 和 MS4:4 间作模式提高了土地生产力，间作优势明显；MS2:2 间作模式则降低了土地生产力。间作模式、年份、间作模式和年份交互作用对 LER_M 的影响不显著 ($P>0.05$)；间作模式对 LER_S 和 LER 影响达到显著水平 ($P<0.05$)。

表 2 玉米和大豆不同种植模式土地当量比

Table 2 Land equivalent ratios in different maize-soybean cropping systems

年份 Year	种植模式 Planting configuration	LER_M	LER_S	LER
2018	MS2:2	0.65±0.04a	0.31±0.03b	0.96±0.07b
	MS4:4	0.63±0.06a	0.44±0.09a	1.07±0.11ab
	MS6:6	0.69±0.05a	0.50±0.02a	1.19±0.03a
2019	MS2:2	0.61±0.03a	0.37±0.05b	0.98±0.05b
	MS4:4	0.62±0.03a	0.44±0.03ab	1.06±0.02a
	MS6:6	0.62±0.01a	0.50±0.04a	1.13±0.04a
平均值 Mean	MS2:2	0.63±0.02a	0.34±0.04b	0.97±0.06b
	MS4:4	0.62±0.04a	0.44±0.06a	1.07±0.05ab
	MS6:6	0.66±0.03a	0.50±0.02a	1.16±0.03a
P	种植模式 Planting configuration	0.647	0.039	0.027
	年份 Year	0.299	0.648	0.730
	种植模式×年份 Planting configuration×Year	0.769	0.906	0.796

表中 LER_M 、 LER_S 和 LER 分别为间作玉米、大豆和间作系统的土地当量比

LER indicates land equivalent ratio. LER_M and LER_S indicate partial LER of maize and soybean respectively

2.3 间作对作物干物质积累与分配的影响

2.3.1 玉米 玉米干物质积累量方差分析结果表明，玉米大豆间作模式对玉米干物质积累量影响显著 ($P<0.05$) (表 3)。拔节期不同种植模式玉米干物质积累量表现为 MS2:2>MS4:4>MS6:6>M，间作模式分别比单作增加 20.32%、19.10%、16.58%；灌浆期玉米干物质积累量表现为 MS4:4>MS6:6>MS2:2>M，间作模式分别比单作增加 52.56%、51.70%、51.29%。说明玉米大豆间作可显著增加玉米关键生育期的干物质积累量。

玉米拔节期干物质分配特点是“茎少、叶多”，茎分配比率为 40.05%—41.32%，叶分配比率为 58.68%—59.65%。拔节期茎分配比率间作模式与单作差异不显著 ($P>0.05$)；MS6:6 和 MS2:2 间作模式的叶分配比率与单作差异显著 ($P<0.05$)，表现为单作模式大于间作模式。说明间作模式可增加拔节期玉米干物质向茎分配，减少向叶分配。灌浆期玉米干物质分配特点为“穗最多、茎次之、叶最少”，穗分配比率为 41.17%—54.22%，茎分配比率为 31.60%—40.25%，叶分配比率为 13.57%—18.58%；3 种间作模式玉米各

器官干物质分配比率与单作模式之间差异显著 ($P<0.05$)，穗分配比率表现为 $MS6:6>MS2:2>MS4:4>M$ ，间作模式分别比单作增加 31.70%、27.91%、23.22%；茎分配比率表现为 $MS2:2<MS6:6<MS4:4<M$ ，间作模式分别比单作减少 21.49%、19.98%、11.68%；叶分配比率表现为 $MS6:6<MS4:4<MS2:2<M$ ，间作模式分别比单作减少 15.29%、26.15%、26.96%。由此可见，间作减少了灌浆期玉米干物质向茎、叶的分配，增加了向穗分配，有利于玉米单株产量提高。

表 3 单作及间作玉米单株干物质积累与分配比率
Table 3 Above-ground dry matter accumulation and allocation rate of maize in sole and maize-soybean intercropping systems

种植模式 Planting configuration	单株干物质积累 Dry matter accumulation per plant (g/plant)		干物质分配比率 Dry matter partitioning ratio (%)				
	拔节期 Jointing stage	灌浆期 Filling stage	拔节期 Jointing stage		灌浆期 Filling stage		
			茎 Stem	叶 Leaf	茎 Stem	叶 Leaf	穗 Ear
M	64.97±5.85b	277.67±14.30b	40.05±1.05a	59.95±1.05a	40.25±3.62a	18.58±1.11a	41.17±3.38b
MS2:2	78.17±4.77a	420.10±19.43a	41.25±1.90a	58.75±1.90b	31.60±1.16c	15.74±0.44b	52.66±0.84a
MS4:4	77.38±5.26a	423.62±17.62a	40.57±0.48a	59.43±0.48a	35.55±1.16ab	13.72±0.73c	50.73±1.25a
MS6:6	75.74±2.93a	421.22±21.27a	41.32±0.67a	58.68±0.67b	32.21±2.26bc	13.57±0.61c	54.22±1.95a

2.3.2 大豆 大豆干物质积累量方差分析结果表明（表 4），分枝期 3 个间作模式大豆干物质积累量均有所下降，其大小顺序为 $MS2:2<MS4:4<MS6:6<S$ ，间作模式分别比单作降低 27.05%、13.88%、8.61%，但只有 $MS2:2$ 间作模式与单作差异显著 ($P<0.05$)，而鼓粒期单、间作模式大豆干物质积累差异均不显著 ($P>0.05$)。说明分枝期 $MS2:2$ 间作模式大豆干物质积累量明显降低，而鼓粒期 3 种间作模式对大豆干物质积累量影响均较小。

大豆分枝期干物质分配特点是“茎多、叶少”，茎分配比率为 54.99%—57.73%，叶分配比率为 42.27%—45.01%。分枝期茎分配比率表现为 $MS2:2>MS4:4>S>MS6:6$ ，叶分配比率为 $MS2:2<MS4:4<S<MS6:6$ ，且只有 $MS2:2$ 间作模式的茎和叶分配比率与单作差异显著 ($P<0.05$)，说明分枝期 $MS2:2$

间作模式大豆干物质向茎的分配增加，向叶的分配减少。鼓粒期大豆干物质分配特点为“茎>叶>荚”，茎分配比率为 40.45%—44.64%，叶分配比率为 36.06%—37.52%，荚果分配比率为 18.65%—23.11%。不同种植模式茎分配比率表现为 $MS4:4>MS2:2>MS6:6>S$ ，间作模式分别比单作增加 10.36%、8.36%、4.43%，且 $MS2:2$ 和 $MS4:4$ 间作模式与单作模式间差异显著 ($P<0.05$)；叶分配比率间作模式与单作差异不显著 ($P>0.05$)；荚果分配比率表现为 $MS2:2<MS4:4<MS6:6<S$ ，间作模式分别比单作减少 19.30%、17.22%、6.10%，且 $MS2:2$ 和 $MS4:4$ 间作模式与单作差异显著 ($P<0.05$)。结果说明，间作能够增加鼓粒期大豆干物质向茎分配，减少向荚果分配，不利于大豆单株产量提高。

表 4 单作及间作大豆单株物质积累与分配比率
Table 4 Above-ground dry matter accumulation and allocation rate of soybean in sole and maize-soybean intercropping systems

种植模式 Planting configuration	单株干物质积累 Dry matter accumulation per plant (g/plant)		干物质分配比率 Dry matter partitioning ratio (%)				
	分枝期 Branching stage	鼓粒期 Pod filling stage	分枝期 Branching stage		鼓粒期 Pod filling stage		
			茎 Stem	叶 Leaf	茎 Stem	叶 Leaf	荚果 Pod
S	9.87±1.47a	44.07±1.65a	55.71±0.77b	44.29±0.77a	40.45±0.89c	36.43±1.66a	23.11±0.83a
MS2:2	7.20±0.83b	43.67±6.77a	57.73±0.82a	42.27±0.82b	43.83±1.76ab	37.52±2.64a	18.65±2.62b
MS4:4	8.50±1.09ab	44.52±7.02a	56.72±1.27ab	43.28±1.27ab	44.64±1.26a	36.23±2.14a	19.13±1.48b
MS6:6	9.02±1.05ab	47.09±7.27a	54.99±1.12b	45.01±1.12a	42.24±1.02bc	36.06±1.74a	21.70±2.37ab

2.4 作物种间竞争力

间作模式玉米大豆种间竞争能力分析结果表明(图3), 2018年MS6:6、MS4:4间作模式玉米相对大豆的种间竞争能力(A_{MS})和产量营养竞争比率(CR_{MS})与MS2:2间作模式差异显著($P<0.05$); 2019年MS6:6间作模式 A_{MS} 和 CR_{MS} 与MS2:2间作

模式差异也达显著水平($P<0.05$)。 A_{MS} 和 CR_{MS} 2年平均均值均表现为MS2:2>MS4:4>MS6:6, 分别为0.29、0.18、0.16和1.93、1.58、1.38, 且 $A_{MS}>0$, $CR_{MS}>1$ 。表明在玉米大豆间作模式中玉米的竞争能力强于大豆, 即玉米为优势作物而大豆为劣势作物。

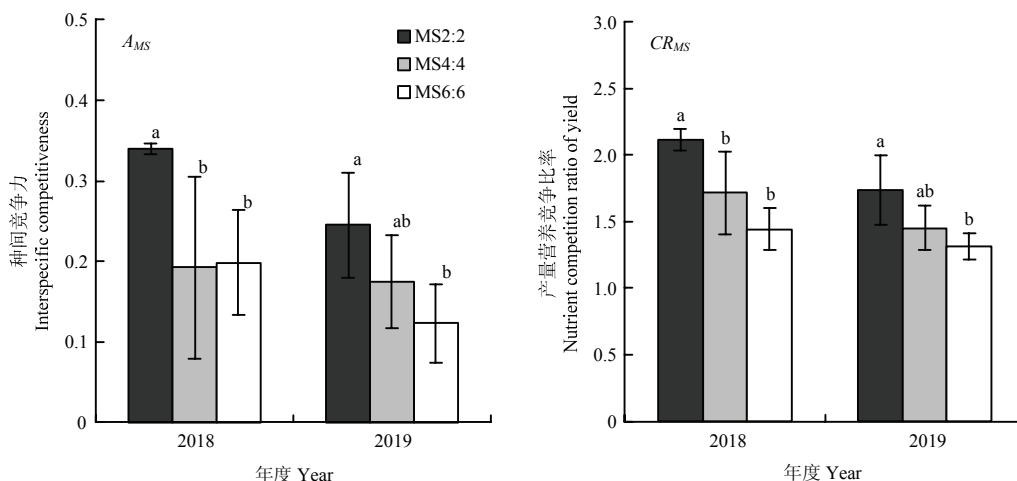


图3 玉米大豆间作两作物的种间竞争力(A_{MS})及产量营养竞争比率(CR_{MS})的比较

Fig. 3 Interspecific competition(A_{MS}) and nutrient competition ratio of yield (CR_{MS}) of different maize-soybean intercropping systems

3 讨论

3.1 作物产量和土地生产力

玉米大豆间作对作物产量影响较大, 但玉米和大豆表现各不相同。本研究中MS2:2、MS4:4和MS6:6间作模式玉米和大豆产量与单作之间差异显著($P<0.05$), 间作中玉米、大豆占地比例各为50%, 间作玉米产量相当于单作产量的62.77%—65.50%, 间作大豆产量仅相当于单作产量的34.20%—49.88%, 说明间作使玉米产量明显提高, 大豆产量降低。刘洋等^[10]和高砚亮等^[23]分别对玉米大豆间作、玉米花生间作研究表明, 高秆作物对矮秆作物有遮阴影响, 导致矮秆作物光合作用降低, 进而影响大豆和花生的产量。还有学者指出 C_4 作物和 C_3 作物间作在光、水、养分等资源利用上存在竞争和互补效应, 认为 C_4 作物与 C_3 作物间作是弱竞争复合体系^[21]。本研究结果也表明, 随着间作带宽的增加, 大豆产量劣势减小, 大豆和玉米两作物之间也表现出竞争和互补并存的弱竞争效应。

土地当量比是衡量土地生产力的重要指标^[30], 多数研究认为间作能够提高土地当量比和土地生产力, 但在不同生态类型区, 不同作物、不同带宽间作导致土地生产力提高的幅度也不同。高砚亮等^[9]玉米(M)花生(P)间作模式研究表明, 2M:4P和4M:4P间作系统的土地当量比为1.10—1.24, 表现出明显间作优势。苟芳等^[11]对向日葵和马铃薯、苜蓿和马铃薯、苜蓿和豆类间作模式研究表明, 基于经济产量的土地当量比为1.05—1.12, 土地生产力提高了5%—12%。本研究结果表明, 2018—2019年MS4:4和MS6:6间作模式土地当量比为1.07和1.16, 土地生产力提高7%和16%, 具有间作优势; MS2:2间作模式土地当量比为0.97, 土地生产力降低, 表现出间作劣势。说明玉米大豆间作选择适宜的间作带宽十分重要, 原因可能是在窄条带的间作模式中, 与高秆作物玉米截光量的优势相比, 玉米对矮秆作物大豆遮阴劣势的影响更大, 在水分和养分竞争方面大豆也处于严重的劣势地位^[11,31]。在带宽较大的间作系统中, 随着带宽加大, 高秆作物玉米对矮秆作物

大豆的遮阴作用及水分和养分的竞争减小^[26], 玉米边行截光量优势能够弥补大豆受遮阴及水分和养分等方面的竞争形成的劣势^[2]。

3.2 作物干物质积累与分配

干物质积累与分配能够反映出作物的生长发育状况, 间作能够通过影响干物质积累分配特征影响作物产量^[22]。本研究表明, 间作对拔节期和灌浆期玉米干物质积累量影响显著, 与单作相比分别增加了 16.58%—20.32%和 51.29%—52.56%, 而对大豆分枝期和鼓粒期干物质积累量影响较小; 3 种间作模式均使玉米灌浆期干物质向穗的分配比率明显增加, 使大豆鼓粒期干物质向荚果的分配比率降低。干物质积累与器官分配比例变化说明间作有利于玉米产量提高而不利大豆产量形成。随着间作带宽的增加, 大豆干物质向荚果分配比率增加, 表明适宜的间作带宽可以降低对大豆产量的不利影响。间作能够改变玉米和大豆干物质积累与分配, 从种间竞争角度来看, 原因可能是间作模式中玉米对光、水、养分的竞争力比大豆更强^[31], 因此, 间作有利于玉米干物质向穗分配, 不利于大豆干物质向荚果分配。从作物根系特点角度考虑, 玉米根系比大豆根系发达, 根系表面积和根长也优于大豆, 因此, 间作模式中玉米根系吸收的水分和养分更多, 使大豆吸收的水分和养分减少, 从而影响玉米和大豆茎、叶对籽粒形成的贡献, 最终导致玉米产量增加, 大豆产量降低^[21]。

3.3 作物种间竞争关系

玉米大豆间作玉米表现出更强的种间竞争优势。本研究表明, 玉米相对于大豆的竞争能力为 0.16—0.29 ($A_{MS} > 0$)、产量营养竞争比率为 1.38—1.93 ($CR_{MS} > 1$), 表明玉米竞争能力和产量营养竞争能力均强于大豆, 说明在玉米大豆间作存在禾本科与豆科作物的种间竞争, 且玉米为优势作物, 大豆为劣势作物^[32]。其原因在于高秆作物 (玉米) 和矮秆作物 (大豆) 间作, 玉米地上光截获量增加^[33]和地下养分、水分利用效率提高所致^[9]; 大豆的生物学特征与玉米不同, 在对土壤水分和养分吸收竞争及对光截获争夺中处于不利地位^[34-36], 其生长发育及荚果干物质积累受到影响必然造成大豆产量的降低。

4 结论

辽西半干旱地区玉米大豆间作模式对作物干物质积累、器官分配及土地生产力影响显著。4 行玉米 4 行大豆 (MS4:4) 和 6 行玉米 6 行大豆 (MS6:6) 间作

模式土地生产力提高, 表现为间作优势, 2 行玉米 2 行大豆 (MS2:2) 间作模式土地生产力降低, 表现为间作劣势; 3 种间作模式的玉米干物质积累量明显增加, 向穗分配比率提高, 而大豆干物质积累量虽然变化较少, 但向荚果分配比率明显减小; 玉米的种间竞争能力和产量营养竞争能力均强于大豆, 为竞争优势作物, 而大豆则为竞争劣势作物。综合间作模式作物干物质积累与分配特点、种间竞争关系、土地生产力水平等因素, 可以认为 MS6:6 间作模式是辽西半干旱区适宜的高效种植模式。

为进一步优化玉米大豆间作模式, 未来将深入探讨单位面积间作与单作玉米种植株数相同条件下, 玉米大豆间作模式对作物产量和土地生产力的影响, 从而实现更高的土地生产力。

参考文献 References

- [1] BAI W, SUN Z X, ZHENG J M, DU G J, FENG L S, CAI Q, YANG N, FENG C, ZHANG Z, EVERS J B, VAN DER WERF W, ZHANG L Z. Mixing trees and crops increases land and water use efficiencies in a semi-arid area. *Agricultural Water Management*, 2016, 178: 281-290.
- [2] ZHANG D S, DU G J, SUN Z X, BAI W, WANG Q, FENG L S, ZHENG J M, ZHANG Z, LIU Y, YANG S, YANG N, FENG C, CAI Q, EVERS J B, VAN DER WERF W, ZHANG L Z. Agroforestry enables high efficiency of light capture, photosynthesis and dry matter production in a semi-arid climate. *European Journal of Agronomy*, 2018, 94: 1-11.
- [3] 唐秀梅, 黄志鹏, 吴海宁, 刘菁, 蒋菁, 唐荣华. 玉米/花生间作条件下土壤环境因子的相关性和主成分分析. *生态环境学报*, 2020, 29(2): 223-230.
TANG X M, HUANG Z P, WU H N, LIU J, JIANG J, TANG R H. Correlation and principal component analysis of the soil environmental factors in corn/peanut intercropping system. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(2): 223-230. (in Chinese)
- [4] 张晓娜, 陈平, 杜青, 周颖, 任建锐, 金福, 杨文钰, 雍太文. 玉米/大豆、玉米/花生间作对作物氮素吸收及结瘤固氮的影响. *中国生态农业学报*, 2019, 27(8): 1183-1194.
ZHANG X N, CHEN P, DU Q, ZHOU Y, REN J R, JIN F, YANG W Y, YONG T W. Effects of maize/soybean and maize/peanut intercropping systems on crops nitrogen uptake and nodulation nitrogen fixation. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(8): 1183-1194. (in Chinese)
- [5] REN J H, ZHANG L Z, DUAN Y, ZHANG J, EVERS J B, ZHANG

- Y, SUZ C, VAN DER WERF W. Intercropping potato (*Solanum tuberosum* L.) with hairy vetch (*Vicia villosa*) increases water use efficiency in dry conditions. *Field Crops Research*, 2019, 240: 168-176.
- [6] 张悦, 邸万通, 王晶晶, 董宛麟, 于洋, 苟芳, 王旗, 张东升, 顾生浩, 张立祯. 北方农牧交错带间套作资源利用的研究进展. *生态学杂志*, 2017, 36(9): 2623-2632.
- ZHANG Y, DI W T, WANG J J, DONG W L, YU Y, GOU F, WANG Q, ZHANG D S, GU S H, ZHANG L Z. Progress and perspectives of resource use in intercropping system in agro-pastoral ecotone. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(9): 2623-2632. (in Chinese)
- [7] ZHANG Y, DUAN Y, NIE J, YANG J, REN J H, VAN DER WERF W, EVERS J B, ZHANG J, SU Z C, ZHANG L Z. A lack of complementarity for water acquisition limits yield advantage of oats/vetch intercropping in a semi-arid condition. *Agricultural Water Management*, 2019, 225: 1-9.
- [8] 李伟绮, 孙建好, 赵建华. 覆膜对玉米间作豌豆干物质积累与分配的影响. *中国土壤与肥料*, 2016(5): 118-123.
- LI W Q, SUN J H, ZHAO J H. Effects of mulching on dry matter accumulation and distribution in maize-pea intercrop. *Journal of Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016(5): 118-123. (in Chinese)
- [9] 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. *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. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(19): 3702-3713. (in Chinese)
- [10] 刘洋, 孙占祥, 白伟, 郑家明, 侯志研, 张莹, 文凤. 玉米大豆间作对辽西地区作物生长和产量的影响. *大豆科学*, 2011, 30(2): 225-228.
- LIU Y, SUN Z X, BAI W, ZHENG J M, HOU Z Y, ZHANG Y, WEN F. Effect of maize and soybean interplanting on crops growth and yield in western Liaoning province. *Soybean Science*, 2011, 30(2): 224-228. (in Chinese)
- [11] 苟芳, 张立祯, 董宛麟, 于洋, 邸万通, 赵沛义, 妥德宝, 潘学标. 农牧交错带不同间套作模式的土地生产力. *农业工程学报*, 2013, 29(6): 129-141.
- GOU F, ZHANG L Z, DONG W L, YU Y, DI W T, ZHAO P Y, TUO D B, PAN X B. Productivity of strip intercropping systems in agro-pastoral ecotone. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(6): 129-141. (in Chinese)
- [12] 程玉柱, 李龙, 周琴, 郭娜, 邢邯, 江海东. 玉米/大豆不同配置下的玉米生长和产量形成研究. *南京农业大学学报*, 2016, 39(1): 34-39.
- CHENG Y Z, LI L, ZHOU Q, GUO N, XING H, JIANG H D. Growth and yield formation of maize under different maize/soybean intercropping patterns. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2016, 39(1): 34-39. (in Chinese)
- [13] 张丽, 张乃明, 张仕颖, 贾广军, 宁东卫, 岳献荣, 夏运生. AMF和间作对作物产量和坡耕地土壤径流氮磷流失的影响. *农业工程学报*, 2019, 35(22): 216-224.
- ZHANG L, ZHANG N M, ZHANG S Y, JIA G J, NING D W, YUE X R, XIA Y S. Effects of AMF and intercropping on crop yield and soil nitrogen and phosphorus loss by runoff on slope farmland. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(22): 216-224. (in Chinese)
- [14] 任旭灵, 滕园园, 王一帆, 殷文, 柴强. 玉米间作豌豆种间竞争互补对少耕密植的响应. *中国生态农业学报*, 2019, 27(6): 860-869.
- REN X L, TENG Y Y, WANG Y F, YIN W, CHAI Q. Response of interspecific competition and complementarity of maize/pea intercropping to reduced tillage and high-density planting. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(6): 860-869. (in Chinese)
- [15] 王钰云, 王宏富, 李智, 段宏凯, 黄珊珊. 谷子花生间作对谷子光合特性及产量的影响. *中国农业科技导报*, 2020, 22(5): 153-165.
- WANG Y Y, WANG H F, LI Z, DUAN H K, HUANG S S. Influences of millet-peanut intercropping on photosynthetic characteristics and yield of millet. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2020, 22(5): 153-165. (in Chinese)
- [16] LIU S, YANG J Y, ZHANG X Y, DRURY C F, REYNOLDS W D, HOOGENBOOM G. Modelling crop yield, soil water content and soil temperature for a soybean-maize rotation under conventional and conservation tillage systems in Northeast China. *Agricultural Water Management*, 2013, 123(10): 32-44.
- [17] 张亦涛, 任天志, 刘宏斌, 雷秋良, 翟丽梅, 王洪媛, 刘申, 尹昌斌, 张继宗. 玉米大豆间作降低小麦玉米轮作体系土壤氮残留的效应与机制. *中国农业科学*, 2015, 48(13): 2580-2590.
- ZHANG Y T, REN T Z, LIU H B, LEI Q L, ZHAI L M, WANG H Y, LIU S, YIN C B, ZHANG J Z. Effect and mechanism of maize intercropping with soybean on reducing soil nitrogen residue in wheat-maize rotation. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(13): 2580-2590. (in Chinese)
- [18] WANG R N, SUN Z X, ZHANG L Z, YANG N, FENGL S, BAI W, ZHANG D S, WANG Q, EVERS J B, LIU Y, REN J H, ZHANG Y,

- VAN DER WERF W. Border-row proportion determines strength of interspecific interactions and crop yields in maize/peanut strip intercropping. *Field Crops Research*, 2020, 253: 1-10.
- [19] 刘浩, 左青松, 刘婧怡, 周佳琳, 丁立, 杨晨. 盐分浓度对油菜干物质积累分配、农艺性状及品质的影响. *中国农学通报*, 2017, 33(22): 19-23.
- LIU H, ZUO Q S, LIU J Y, ZHOU J L, DING L, YANG C. Effects of salt-ion content on dry matter accumulation and distribution, agronomic traits and quality of rapeseed. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(22): 19-23. (in Chinese)
- [20] 赵建华, 孙建好, 陈亮之, 李伟琦. 玉米行距对大豆/玉米间作作物生长及种间竞争力的影响. *大豆科学*, 2019, 38(2): 229-235.
- ZHAO J H, SUN J H, CHEN L Z, LI W Q. Growth and interspecific competition of crops as affected by maize row spacing in soybean/maize intercropping system. *Soybean Science*, 2019, 38(2): 229-235. (in Chinese)
- [21] 张晓娜, 陈平, 庞婷, 杜青, 付智丹, 周颖, 任建锐, 杨文钰, 雍太文. 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. *四川农业大学学报*, 2017, 35(4): 484-490.
- ZHANG X N, CHEN P, PANG T, DU Q, FU Z D, ZHOU Y, REN J R, YANG W Y, YONG T W. The effects of dry matter accumulation, distribution and yield in the maize/soybean and maize/peanut intercropping system. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2017, 35(4): 484-490. (in Chinese)
- [22] 王雪蓉, 张润芝, 李淑敏, 许宁, 牟尧, 张春怡. 不同供氮水平下玉米/大豆间作体系干物质积累和氮素吸收动态模拟. *中国生态农业学报*, 2019, 27(9): 1354-1363.
- WANG X R, ZHANG R Z, LI S M, XU N, MU Y, ZHANG C Y. Simulation of dry matter accumulation and nitrogen absorption in a maize/soybean intercropping system supplied with different nitrogen levels. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(9): 1354-1363. (in Chinese)
- [23] 高砚亮, 孙占祥, 白伟, 冯良山, 蔡倩, 冯晨, 张哲. 玉米||花生间作系统作物产量及根系空间分布特征的影响. *玉米科学*, 2016, 24(6): 79-87.
- GAO Y L, SUN Z X, BAI W, FENG L S, CAI Q, FENG C, ZHANG Z. Spatial distribution characteristics of root system and the yield in maize || peanut intercropping system. *Journal of Maize Sciences*, 2016, 24(6): 79-87. (in Chinese)
- [24] 白伟, 孙占祥, 张立祯, 郑家明, 冯良山, 蔡倩, 向午燕, 冯晨, 张哲. 耕层土壤虚实结构优化春玉米根系形态提高水分利用效率. *农业工程学报*, 2019, 35(21): 88-97.
- BAI W, SUN Z X, ZHANG L Z, ZHENG J M, FENG L S, CAI Q, XIANG W Y, FENG C, ZHANG Z. Furrow loose and ridge compaction plough layer structure optimizing root morphology of spring maize and improving its water use efficiency. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(21): 88-97. (in Chinese)
- [25] 白伟, 孙占祥, 郑家明, 杜桂娟, 蔡倩, 冯良山, 杨宁. 东北风沙半干旱区仁用杏作物间作对作物产量和土地生产力的影响. *生态学杂志*, 2017, 36(9): 2521-2528.
- BAI W, SUN Z X, ZHENG J M, DU G J, CAI Q, FENG L S, YANG N. Effect of apricot and crop intercropping on yield and land productivity in a semi-arid area of Northeast China. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(9): 2521-2528. (in Chinese)
- [26] 董宛麟, 张立祯, 于洋, 苟芳, 赵沛义, 妥德宝, 潘学标. 向日葵和马铃薯间作模式的生产力及水分利用. *农业工程学报*, 2012, 28(18): 127-133.
- DONG W L, ZHANG L Z, YU Y, GOU F, ZHAO P Y, TUO D B, PAN X B. Productivity and water use in sunflower intercropped with potato. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(18): 127-133. (in Chinese)
- [27] MAO L L, ZHANG L Z, LI W Q, VAN DER WERF W, SUN J H, SPIERTZ H, LI L. Yield advantage and water saving in maize /pea intercrop. *Field Crops Research*, 2012, 138: 11-20.
- [28] YANG W, LI Z, WANG J, WU P, ZHANG Y. Crop yield, nitrogen acquisition and sugarcane quality as affected by interspecific competition and nitrogen application. *Field Crops Research*, 2013, 146(3): 44-50.
- [29] 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. *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. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(6): 659-667. (in Chinese)
- [30] 高砚亮, 孙占祥, 白伟, 郑家明, 冯良山, 杨宁, 蔡倩, 冯晨, 张哲. 玉米花生间作效应研究进展. *辽宁农业科学*, 2016(1): 41-46.
- GAO Y L, SUN Z X, BAI W, ZHENG J M, FENG L S, YANG N, CAI Q, FENG C, ZHANG Z. The research progress on the interspecific interaction of the peanut-maize intercropping system. *Liaoning Agricultural Sciences*, 2016(1): 41-46. (in Chinese)
- [31] 林松明, 孟维伟, 南镇武, 徐杰, 李林, 张正, 李新国, 郭峰, 万书波. 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. *中国生态农业学报*, 2020, 28(1): 31-41.

- LIN S M, MENG W W, NAN Z W, XU J, LI L, ZHANG Z, LI X G, GUO F, WAN S B. Canopy microenvironment change of peanut intercropped with maize and its correlation with pod yield. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(1): 31-41. (in Chinese)
- [32] 赵乾旭, 史静, 夏运生, 张乃明, 宁东卫, 岳献荣, 杨海宏. AMF与隔根对紫色土上玉米||大豆种间氮竞争的影响. *中国农业科学*, 2017, 50(14): 2696-2705.
- ZHAO Q X, SHI J, XIA Y S, ZHANG N M, NING D W, YUE X R, YANG H H. Effect of AMF inoculation on N uptake of interspecific competition between maize and soybean growing on the purple soil. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(14): 2696-2705. (in Chinese)
- [33] WANG Q, ZHANG D S, ZHANG L Z, HAN S, VAN DER WERF W, EVERS J, SU Z C, ANTEN P R N. Spatial configuration drives complementary capture of light of the understory cotton in young jujube plantations. *Field Crops Research*, 2017, 213: 21-28.
- [34] 柴强, 杨彩红, 黄高宝. 交替灌溉对西北绿洲区小麦间作玉米水分利用的影响. *作物学报*, 2011, 37(9): 1623-1630.
- CHAI Q, YANG C H, HUANG G B. Water use characteristics of alternately irrigated wheat/maize intercropping in oasis region of northwestern China. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(9): 1623-1630. (in Chinese)
- [35] 焦念元, 李亚辉, 杨潇, 尹飞, 马超, 齐付国, 刘领, 熊瑛. 玉米/花生间作行比和施磷对玉米光合特性的影响. *应用生态学报*, 2016, 27(9): 2959-2967.
- JIAO N Y, LI Y H, YANG X, YIN F, MA C, QI F G, LIU L, XIONG Y. Effect of maize/peanut intercropping row ratio and phosphate fertilizer on photosynthetic characteristics of maize. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(9): 2959-2967. (in Chinese)
- [36] 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. *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 region. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(3): 468-481. (in Chinese)

(责任编辑 杨鑫浩)