

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.08.030

玉米大豆不同间作系统光合特性与产量边际效应

崔文芳 秦德志 陈 静 刘 剑 严海鸥 秦 丽
(内蒙古农业大学职业技术学院, 包头 014109)

摘要: 为明确内蒙古河套灌区间作模式的边际效应及该区域本土化玉米大豆间作技术模式,在滴灌条件下,设置4种间作技术模式(行比为2:3、2:4、4:3、4:4(T2:3、T2:4、T4:3、T4:4)),以玉米大豆单作为对照,对光合特性变化规律、种间竞争力及边际效应进行分析。结果表明,单作与间作玉米叶片叶绿素SPAD及氮质量比总体表现为大喇叭口期达到峰值,之后逐渐下降,进入灌浆期又出现一小高峰,此时,T2:3模式叶绿素SPAD及氮质量比与单作差异均不显著,大喇叭口期,分别较单作下降0.91%、5.07%,灌浆期,较单作分别提高5.09%、5.17%,且净光合速率均于吐丝期达到峰值,但T2:3较单作下降缓慢,其它模式的特点是峰值低,出现早(大喇叭口期),降得快。T2:3模式与单作大豆叶片叶绿素SPAD和氮质量比均在开花期达到峰值,之后逐渐下降,鼓粒期又出现一小高峰,结荚期与鼓粒期,T2:3模式SPAD较单作分别提高2.32%、5.11%,氮质量比分别提高2.34%、5.77%,且净光合速率峰值出现晚(鼓粒期),其它模式峰值出现早,降得快,尤其T2:4、T4:3、T4:4模式的中行更显著。因此,间作群体花后光合功能稳定期长是关键,是发挥间作优势的重要原因。仅T2:3模式土地当量比大于1,达到1.38,且大豆的相对拥挤系数大于玉米,间作大豆侵占力、竞争比率均大于玉米,T2:3具有明显的间作优势和竞争力,大豆相对产量增长大于玉米,是竞争优势种。T2:3模式的玉米、大豆产量最高,分别为9 705、2 265 kg/hm²,占系统产量的81.08%、18.92%。T4:4模式的玉米产量与叶绿素SPAD、净光合速率具有显著的边际优势,而大豆仅光合速率表现边际优势,T2:3模式的中行大豆具有光合优势。综上,T2:3模式是内蒙古河套灌区适宜的间作技术模式。

关键词: 玉米; 大豆; 间作; 边际效应; 种间竞争力

中图分类号: S513; S565.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)08-0309-11 OSID: 

Marginal Effects of Photosynthetic Characteristics and Yield in Maize and Soybean Intercropping Systems

CUI Wenfang QIN Dezhi CHEN Jing LIU Jian YAN Haiou QIN Li
(Vocational and Technical College, Inner Mongolia Agricultural University, Baotou 014109, China)

Abstract: In order to clarify the marginal effect of intercropping patterns and the localized maize and soybean intercropping technical patterns in Hetao Irrigation Area of Inner Mongolia, four intercropping technical patterns (row ratio: 2:3, 2:4, 4:3, 4:4(T2:3, T2:4, T4:3, T4:4)) were set under the condition of trickle irrigation. The changes of photosynthetic characteristics, interspecific competitiveness and marginal effect were analyzed with maize and soybean as control. The results showed that the overall chlorophyll SPAD and nitrogen content of maize leaves in mono-cropping and intercropping reached peak at the large trumpet stage, and then decreased gradually, and then appeared a small peak at the filling stage. At this time, the chlorophyll SPAD and nitrogen contents in the T2:3 mode were not significantly different from those in mono-cropping stage, and the chlorophyll SPAD and nitrogen contents in the large trumpet stage were decreased by 0.91% and 5.07% compared with that in mono-cropping stage, respectively. Compared with monocropping, the net photosynthetic rate was increased by 5.09% and 5.17%, respectively, and reached the peak at the spinneret stage, but T2:3 decreased slowly compared with monocropping. Other modes were characterized by low peak, early appearance (large trumpet stage), and rapid decline. The contents of chlorophyll SPAD and nitrogen in the leaves of T2:3 mode

and mono-cropping soybean reached a peak at the flowering stage, and then decreased gradually, and a small peak appeared at the drum grain stage. At pod stage and drum grain stage, the SPAD value and nitrogen content of T2:3 mode were increased by 2.32% and 5.11%, respectively, compared with that of mono-cropping. The peak value of net photosynthetic rate appeared late (bulging stage), while the peak value of other models appeared early and decreased rapidly, especially in the middle line of models T2:4, T4:3 and T4:4. Therefore, the long post-anthesis photosynthetic stability period of intercropping population was the key, which was an important reason to exert the advantage of intercropping. Only T2:3 model land equivalent ratio was greater than 1, reaching 1.38, and the relative crowding coefficient of soybean was greater than that of maize, and the encroachment power and competition ratio of intercropping soybean were greater than that of maize. T2:3 had obvious intercropping advantage and competitiveness, and the relative yield growth of soybean was greater than that of maize, so it was a competitive dominant species. The maize and soybean yields of T2:3 mode were the highest, which were 9 705 kg/hm² and 2 265 kg/hm², respectively, accounting for 81.08% and 18.92% of the system yield. Maize yield, chlorophyll SPAD and net photosynthetic rate in T4:4 mode had significant marginal advantage, while soybean only showed marginal advantage in photosynthetic rate, and middle-line soybean in T2:3 mode had photosynthetic advantage. In conclusion, T2:3 model was the appropriate intercropping technology model in Hetao Irrigation Area of Inner Mongolia.

Key words: maize; soybean; intercropping; marginal effect; interspecific competitiveness

0 引言

加强间作种植技术的研究和知识储备符合国家“藏粮于地,藏粮于技”的粮食战略^[1]。间作作物间存在的竞争与互补作用是间作优势产生的重要决定因素。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^[2],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^[3]研究表明,玉米间作花生行比为 2:4(2 行玉米 4 行大豆)时,可以放大玉米的正边际效应,缓解花生的负边际效应,并且此模式下宽 2 m 的花生带,有利于小型收获机进行机械操作,被认为是适宜的田间配置模式。WANG 等^[4]研究表明,当糯高粱与大豆行比为 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宽 1.2 m,不利于机械化收获;YANG 等^[5]对甘蔗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,各间作模式土地当量比均大于 1,表现出间作优势;任家兵等^[6]研究了不同施氮水平下小麦蚕豆种间作用,结果表明,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^[7]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。综上可知,不同作物间进行合理配置,能够发挥间作优势,且种间优势表现不同,而小行比间作系统边际效应更显著。

关于玉米大豆不同种植模式的光合特性研究也存在不同意见,徐延辉等^[8]研究认为,玉米大豆行

比 2:4 间作模式中,大豆光合生理指标和产量均有所下降,但提高了玉米净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、水分利用效率。李易玲等^[9]研究认为,减量施氮下,玉米大豆套作显著延长了叶片的持绿期;花后叶片的光合速率、PS II 光合机构功能、叶绿素含量都保持在较高的水平且比单作稳定,充分发挥了玉米的生产潜力并增加了大豆产量,使套作系统总产量显著提高。这表明通过作物群体的合理配置,能够实现玉米和大豆在时间和空间上的互补,增加光合资源的有效利用,保证复合种植的稳产增产。前人在间套作种间作用关系方面已有诸多报道,但基于北方旱地滴灌条件下,玉米大豆间作系统因带宽、行比配置不同引起的种间作用力、边际效应变化对作物产量影响研究较少。

河套灌区是内蒙古自治区重要的粮油基地,也是黄河流域水土流失最严重的区域之一,其中粮食主产区河套平原是黄河上中游地区的主要耗水区域,农业灌溉用水占 81.36%^[10],地表水资源开发已接近极限,农业节水措施单一化、低效化,耗水量巨大。与黄河水漫灌相比,采用滴灌水肥一体化技术,至少可节省 50% 灌水量和 30% 化肥用量^[11],可有效提高水肥利用效率。

随着玉米大豆间作种植已全部实现机械化,我国开始在黄淮海、西北、西南地区大力推广玉米大豆带状复合种植,多措并举扩面积、提产量,推广水肥一体化技术。贾彪等^[12]认为,调控滴灌玉米最佳施氮量,可提高滴灌玉米光合能力,进而提高产量。本文针对河套灌区长期大水漫灌、耕地结构变差的现状,在滴灌条件下实施玉米大豆间作技术,系统研究

不同行比下玉米和大豆的边际效应,结合作物叶绿素积累和光合特性表现,筛选该区域适宜的玉米大豆间作技术模式,以改善土壤结构,保证间作技术产量的稳定性,为河套灌区发展高产稳产的玉米大豆间作技术,实现水肥资源高效利用提供理论指导和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验田概况

试验于 2022 年 4—10 月在内蒙古农业大学敕勒川农业博览园(包头市土默特右旗萨拉齐镇北只图村,110°14'E,40°14'N)进行。该地区属大陆性半干旱季风气候,多年平均降水量 400~500 mm,多年平均气温 6.9℃,无霜期 135 d 左右。试验地前茬为百合花,土质为壤土,土壤有机质质量比 24.65 g/kg,碱解氮质量比 41.56 mg/kg,速效磷质量比 8.19 mg/kg,速效钾质量比 74.98 mg/kg。

1.2 试验材料

玉米品种选用真金 308,株型为半紧凑型,株高 271~286 cm,具有耐密、抗倒、宜机收等特点,由内蒙古真金种业有限公司提供。大豆品种选用中黄 30,有限生长类型,平均株高 70.1 cm,结荚高度 15.0 cm,单株有效荚 62.8 个,单株粒数 137.7 个,单株粒质量 25.3 g,百粒质量 19.0 g,不裂荚,由中国农业科学院作物科学研究所选育。

1.3 试验设计

设置玉米与大豆行比 2:3、2:4、4:3、4:4 间作及玉米、大豆单作模式,即 2 行玉米 3 行大豆(T2:3)、2 行玉米 4 行大豆(T2:4)、4 行玉米 3 行大豆(T4:3)、4 行玉米 4 行大豆(T4:4)间作及单作玉米(CKM)、单作大豆(CKS),采用随机区组排列,6 种模式,3 次重复,共 18 个小区,小区面积 5 m×4.6 m。玉米大豆于 5 月 7 日同期播种,各模式的磷钾肥施用量一致,磷肥为 105 kg/hm² P₂O₅(磷酸二铵),钾肥为 45 kg/hm² K₂O(硫酸钾),均作为底肥施入,于播种前将肥料均匀撒于地表,再翻入耕层 10 cm 左右。大豆开沟施种肥,纯氮(尿素) 45 kg/hm²,玉米氮肥(尿素)在拔节期、大喇叭口期按 3:7 追施,随水滴灌水肥一体化追施。玉米于 5 月 19 日出苗,大豆 5 月 22 日出苗,玉米于 6 月 25 日追拔节肥、灌第 1 水,7 月 13 日大喇叭口期追肥、灌第 2 水(玉米大豆同时进行滴灌),7 月 27 日开花期灌第 3 水,8 月 9 日灌第 4 水(玉米大豆同时进行滴灌),灌水总量为 300 m³/hm²,9 月 25 日收获。

间作模式中,玉米带和大豆带相邻各行依次记

为边行,位于中间的植株行记为中行。T2:3、T2:4、T4:3、T4:4 模式中,玉米种植面积占比分别为 45.0%、40.0%、60.0%、53.0%,大豆种植面积占比分别为 55.0%、60.0%、40.0%、47.0%。玉米大豆同期播种,采用穴播方式,玉米和大豆的间距均为 60 cm,各种植模式的株行距、带宽等见表 1。试验小区种植为南北行向,按照玉米大豆自西向东依次排列,保证大豆的光照条件。

表 1 不同种植模式株行距

Tab. 1 Plant row spacing of different planting patterns					
模式	种植模式	株距/cm	行距/cm	间距/cm	带宽/m
CKM	玉米单作	26.4	50		
CKS	大豆单作	18(穴距)	30		
T2:3	玉米间作	12	40	60	2.2
	大豆间作	16(穴距)	30		
T2:4	玉米间作	12	40	60	2.5
	大豆间作	16	30		
T4:4	玉米间作	14	40	60	3.4
	大豆间作	14(穴距)	30、40、30		
T4:3	玉米间作	16	40	60	3.0
	大豆间作	12(穴距)	30		

1.4 测定指标及方法

于玉米大喇叭口期(V12)、吐丝期(R1)和灌浆期(R3),大豆的分枝期(V4)、盛花期(R2)、鼓粒期(R5),应用便携式光合荧光测量系统(GFS-3000 型)和 SPAD 测定仪分别测定光合特性指标(蒸腾速率 T_r 、气孔导度 G_s 、净光合速率 P_n 、胞间 CO₂ 浓度 C_i)、叶绿素 SPAD 及叶片氮质量比。T2:3、T2:4 模式,玉米大喇叭口期(V12),边行植株选择最新展开叶,吐丝期(R1)和成熟期(R3)选择穗位叶测定光合特性、叶绿素 SPAD 和叶片氮质量比,T4:3、T4:4 模式对边行和中行植株分别测定;间作模式大豆的边行和中行选择顶部成熟的三出复叶分别进行测定,选择晴天的上午对玉米与大豆同时测定。

测产:每小区选取无缺苗断垄且长势整齐的两行玉米,计数有效穗数,去掉两端植株,两行中各连续取 5 穗收获,待果穗风干后考种,逐穗测定穗粒数后全部脱粒,测定百粒质量、含水率,并计算籽粒产量,折算成含水率 14% 的产量。间作 T2:3、T2:4 模式大豆按照带宽进行测产,量取长度 1 m 的带宽,将其中大豆植株带回实验室,风干后测定单位面积产量,并折算成含水率 12% 的产量,T4:3、T4:3 模式边行和中行分别整行收获计产。

1.5 计算方法

土地当量比(LE_R)是衡量产量优势的指标,计算式为

$$LE_R = LE_{R_M} + LE_{R_S} \tag{1}$$

其中 $LER_M = Y_{IM}/Y_{SM}$ (2)

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

式中 Y_{IM} 、 Y_{IS} ——间作内玉米、大豆产量, kg/hm²

Y_{SM} 、 Y_{SS} ——单作玉米、单作大豆产量, kg/hm²

LER_M 、 LER_S ——玉米、大豆土地当量比

当 $LER > 1$ 为间作优势, 当 $LER < 1$ 为间作劣势。

相对拥挤系数 K 是衡量间作中一个作物相对另一作物竞争优势的指标^[2], 计算式为

$$K = K_M K_S$$
 (4)

其中 $K_M = Y_{IM} Z_{IS} / [(Y_{SM} - Y_{IM}) Z_{IM}]$ (5)

$$K_S = Y_{IS} Z_{IM} / [(Y_{SS} - Y_{IS}) Z_{IS}]$$
 (6)

$$Z_{IM} = (L_M + L_{MS}) / L$$
 (7)

$$Z_{IS} = (L_S + L_{MS}) / L$$
 (8)

式中 K_M 、 K_S ——玉米、大豆的相对拥挤系数

Z_{IM} 、 Z_{IS} ——玉米、大豆在间作体系中的种植比例

L_M ——玉米行距, cm

L_S ——大豆行距, cm

L_{MS} ——玉豆间距, cm

L ——带宽, cm

当 $K_M > K_S$ 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作物产量增长的程度, 计算式为

$$A_M = Y_{IM} Z_{IM} / Y_{SM} - Y_{IS} Z_{IS} / Y_{SS}$$
 (9)

$$A_S = Y_{IS} Z_{IS} / Y_{SS} - Y_{IM} Z_{IM} / Y_{SM}$$
 (10)

式中 A_M ——间作玉米侵占力

A_S ——间作大豆侵占力

若 $A_M = A_S$, 表明这两种作物的竞争力相同; $A_M > 0$, 表示玉米占据优势; $A_M < 0$, 表示大豆占据优势。

竞争比率 (CR) 是评价物种之间竞争的一种指标, 计算式为

$$CR_M = (LER_M Z_{IM} / LER_S) / Z_{IS}$$
 (11)

$$CR_S = (LER_S Z_{IS} / LER_M) / Z_{IM}$$
 (12)

式中 CR_M 、 CR_S ——玉米、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。

1.6 数据分析

采用 Excel 2017 进行数据整理, 用 DPS 10.0 软件进行数据方差多重比较分析。

2 结果与分析

2.1 玉米大豆间作不同带宽、行比配置模式叶绿素 SPAD 及氮质量比的边际效应

对不同种植模式玉米各时期叶绿素 SPAD 分析

(表 2), 叶片叶绿素 SPAD 总体表现为大喇叭口期达到峰值, 之后逐渐下降, 吐丝期进入低谷阶段, 进入灌浆期又表现一个小高峰, 但此时, 间作 T2: 3 模式的小高峰与单作 (CKM) 差异不显著 ($P > 0.05$), 显著高于其它模式 ($P < 0.05$), 这可能由于间作 T2: 3 模式中, 2 行玉米、3 行大豆, 带宽 2.2 m, 2 行玉米均处于边行, 每个带宽中田间通风透光良好, 利于叶绿素的合成和积累, 且能够有效抑制植株后期叶绿素的降解而维持较高的水平, 利于延长叶片光合功能期, 防止早衰。

表 2 不同间作模式玉米叶绿素 SPAD 及氮质量比的
边际效应

Tab.2 Marginal effect of chlorophyll SPAD and nitrogen
content of maize under different intercropping modes

种植 模式	SPAD			氮质量比/(mg·g ⁻¹)		
	大喇叭 口期	吐丝期	灌浆期	大喇叭 口期	吐丝期	灌浆期
CKM	120.90 ^a	86.80 ^a	84.04 ^a	46.96 ^a	33.61 ^{ab}	32.51 ^{ab}
T2: 3	119.80 ^a	66.82 ^b	88.32 ^a	44.58 ^{ab}	24.69 ^{bc}	34.19 ^a
T2: 4	118.66 ^a	85.11 ^a	83.22 ^b	46.06 ^a	34.02 ^a	31.40 ^{bc}
T4: 3 边	103.44 ^b	87.18 ^a	82.66 ^b	40.11 ^{bc}	33.71 ^a	31.89 ^b
T4: 3 中	98.34 ^b	80.56 ^a	76.52 ^c	38.13 ^c	31.12 ^{abc}	29.50 ^c
T4: 4 边	121.16 ^a	86.22 ^a	83.12 ^b	43.06 ^{abc}	33.40 ^a	32.22 ^b
T4: 4 中	102.60 ^b	65.02 ^b	80.00 ^{bc}	39.76 ^{bc}	25.03 ^c	31.04 ^{bc}

注: 同列数字后不同小写字母表示模式间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

5 种植植模式中, 大喇叭口期, 叶绿素 SPAD 由大到小依次为 T4: 4 边、CKM、T2: 3、T2: 4、T4: 3 边、T4: 4 中、T4: 3 中, 其中, CKM、T2: 3、T2: 4 与 T4: 4 边差异不显著 ($P > 0.05$), 均显著高于 T4: 3、T4: 4 中行 ($P < 0.05$), T2: 3 较单作仅下降 0.91%; 吐丝期, CKM、T2: 4、T4: 3、T4: 4 边差异均不显著 ($P > 0.05$), 但均显著高于 T2: 3、T4: 4 中 ($P < 0.05$), T2: 3 显著低于单作 23.02% ($P < 0.05$); 灌浆期, 叶绿素 SPAD 由大到小依次为 T2: 3、CKM、T2: 4、T4: 4 边、T4: 3 边、T4: 4 中、T4: 3 中, 其中, 单作与间作 T2: 3 模式显著高于其它模式 ($P < 0.05$), T2: 3 较 CKM 提高 5.09%, 到此时期, 间作 T2: 3 模式玉米叶片叶绿素的合成与积累对田间小环境具有明显的响应效应, 这表明, 2 行玉米、3 行大豆, 带宽 2.2 m, 田间通风透光良好, 利于叶绿素的合成和积累, 且能够有效抑制植株后期叶绿素的降解而稳定保持较高的水平, 利于延长叶片光合功能期, 防止早衰。

不同种植模式玉米叶片氮质量比具有类似表现, 大喇叭口期, 叶片氮质量比由大到小依次为 CKM、T2: 4、T2: 3、T4: 4 边、T4: 3 边、T4: 4 中、T4: 3 中, 其中, CKM、T2: 3、T2: 4、T4: 4 边模式间差异不显著

($P > 0.05$), 但均显著高于 T4:3、T4:4 中 ($P < 0.05$), T2:3、T2:4 较 CKM 仅下降 5.07%、1.92%; 吐丝期, CKM、T2:4、T4:3 边、T4:4 边差异不显著 ($P > 0.05$), 但均显著高于 T2:3、T4:3 中、T4:4 中 ($P < 0.05$); 灌浆期, 叶片氮质量比由大到小依次为 T2:3、CKM、T4:4 边、T4:3 边、T2:4、T4:4 中、T4:3 中, 其中, CKM、T2:3、T4:4 边差异不显著, 均显著高于 T2:4、T4:3、T4:4 中 ($P < 0.05$), T2:3 较 CKM 提高 5.17%。

以 T4:4 模式为例, 大喇叭口期、吐丝期的叶绿素 SPAD 及吐丝期、灌浆期的氮质量比均表现为边行高于中行, 且达到显著水平 ($P < 0.05$), 边行分别高于中行 18.09%、32.61%、33.44%、3.80%, 灌浆期的叶绿素和大喇叭口期的氮质量比虽然未达到显著差异, 但仍为边行优于中行, 这说明, 间作对高秆作物玉米具有明显的边际效应。

对不同种植模式大豆各时期叶绿素 SPAD 分析 (表 3), 大豆叶片叶绿素 SPAD 均在开花期达到峰值, 于开花期之后开始逐渐下降, 结荚期进入低谷阶段, 进入鼓粒期又表现一个小高峰, 这可能与鼓粒期大豆根瘤的固氮作用逐渐增强有关, T2:3 在开花期显著低于 CKS, 到结荚期、鼓粒期与 CKS 已无显著差异, 经历了结荚的低谷期, 在鼓粒期均保持较高的叶绿素 SPAD。5 种植模式, 开花期, 叶绿素 SPAD 由大到小依次为 CKS、T2:4、T4:4、T4:3、T2:3, 其中, T2:3 显著低于单作 ($P < 0.05$), 较 CKS 降低 27.23%, 均显著低于 T4:4、T4:3、T2:4 间作模式 ($P < 0.05$), 且该生育时期各间作模式的边行较中行未表现出明显的边际效应; 结荚期, T2:4 边行植株叶片叶绿素 SPAD 最高, 与 T2:4 中、T4:3、T4:4 模式差异不显著 ($P > 0.05$), 显著高于 CKS、T2:3 模式 ($P < 0.05$), T2:3 与单作差异不显著 ($P > 0.05$), 较

表 3 不同间作模式大豆叶绿素 SPAD 和氮质量比的
边际效应

Tab.3 Marginal effects of chlorophyll SPAD and nitrogen content in soybean under different intercropping modes						
模式	SPAD			氮质量比/(mg·g ⁻¹)		
	开花期	结荚期	鼓粒期	开花期	结荚期	鼓粒期
CKS	115.58 ^a	64.22 ^b	80.22 ^{ab}	44.88 ^a	24.74 ^b	31.02 ^{ab}
T2:3边	84.38 ^c	65.72 ^b	83.72 ^a	29.10 ^c	25.32 ^b	32.78 ^a
T2:3中	83.84 ^c	65.70 ^b	84.92 ^a	31.62 ^c	25.32 ^b	32.84 ^a
T2:4边	110.44 ^a	85.12 ^a	83.22 ^a	42.84 ^a	32.90 ^a	31.10 ^{ab}
T2:4中	110.06 ^a	71.03 ^{ab}	83.92 ^a	42.70 ^a	27.42 ^{ab}	32.42 ^a
T4:3边	94.76 ^b	82.02 ^{ab}	77.24 ^{bc}	36.70 ^b	31.7 ^{ab}	29.98 ^{bc}
T4:3中	96.12 ^b	72.70 ^{ab}	75.61 ^c	37.62 ^b	28.06 ^{ab}	29.22 ^c
T4:4边	100.78 ^b	68.96 ^{ab}	84.22 ^a	39.06 ^b	25.02 ^b	32.58 ^a
T4:4中	94.51 ^b	70.44 ^{ab}	81.92 ^a	36.60 ^b	26.86 ^{ab}	31.54 ^{ab}

CKS 提高 2.32%; 鼓粒期, 叶绿素 SPAD 由大到小依次为 T2:3、T2:4、T4:4、CKS、T4:3, 其中, CKS、T2:3、T2:4、T4:4 模式显著高于 T4:3 模式 ($P < 0.05$), 这可能与 T4:3 模式中 4 行玉米的幅宽已经较宽, 对大豆的遮光作用比较显著, 3 行大豆幅宽较窄, 空间所限及光照不足, 限制了大豆叶片叶绿素的合成与积累, 导致该模式在开花期和鼓粒期两个小高峰, 叶绿素 SPAD 的峰值均较低。T2:3 与 CKS 差异不显著, 较单作提高 5.11%。

不同种植模式大豆叶片氮质量比具有类似表现, 开花期之后开始逐渐下降, 结荚期进入低谷阶段, 进入鼓粒期又表现一个小高峰。开花期, 氮质量比由大到小依次为 CKS、T2:4、T4:4、T4:3、T2:3, 其中, 单作与间作 T2:4 模式间差异不显著 ($P > 0.05$), 但均显著高于 T2:3、T4:3、T4:4 ($P < 0.05$), T2:3 较 CKS 显著降低 35.16% ($P < 0.05$); 结荚期, T2:4、T4:3、T4:4 中差异不显著 ($P > 0.05$), 但均显著高于 CKS、T2:3、T4:4 边 ($P < 0.05$), T2:3 与 CKS 差异不显著, 较 CKS 提高 2.34%; 鼓粒期, 该时期的氮质量比与叶绿素 SPAD 表现相同, 由大到小依次为 T2:3、T2:4、T4:4、CKS、T4:3, 其中, CKS、T2:3、T2:4、T4:4 模式间差异不显著 ($P > 0.05$), 均显著高于 T4:3 ($P < 0.05$), T2:3 与 CKS 差异不显著 ($P > 0.05$), 较 CKS 提高 5.77%。

4 个间作模式, 大豆与玉米不同, 大豆在间作中均未表现出明显的边际效应, 但叶片叶绿素 SPAD 和氮质量比均在结荚期表现低谷, 开花期和鼓粒期出现小高峰, 这可能与大豆鼓粒期根瘤固氮作用增强有关, T4:3 模式表现不佳。

2.2 玉米大豆间作不同带宽、行比配置模式光合特性的边际效应

对不同种植模式玉米各时期光合特性指标进行分析 (表 4), 基本表现为各模式 P_n 从大喇叭口期到吐丝期逐渐升高, 吐丝期达到峰值, 此时 T2:3 与 CKM 差异不显著 ($P > 0.05$), 持续到灌浆期, T2:3 的 P_n 缓慢下降, 其它模式均急剧下降。5 种植模式中, 大喇叭口期, T4:4 边、T2:4、T2:3 模式的 G_s 、 P_n 显著高于 CKM ($P < 0.05$), 而 T2:3 也因 P_n 显著低于 CKM, 使 C_i 显著高于 CKM, 模式间 P_n 由大到小依次为 T2:4、CKM、T4:4 边、T4:3 中、T4:4 中、T4:3 边、T2:3, 此时单作与间作的光合特性未表现显著优势; 吐丝期, CKM、T2:3、T2:4、T4:4 边的 T_r 、 G_s 、 P_n 模式间差异不显著 ($P > 0.05$), 均显著高于 T4:3、T4:4 中 ($P < 0.05$), 模式间 P_n 表现由大到小依次为 T2:3、CKM、T4:4 边、T2:4、T4:3 边、T4:3 中、T4:4 中, 其中, T2:3 的 P_n 最高, 达到 35.77 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 较

CKM、T4:4边、T2:4 提高 35.70%、51.06%、105.57%,因光合消耗使 T2:3、T4:4 边的 C_i 显著低于其它模式;灌浆期,T4:3边、T2:3 的 T_r 、 G_s 、 P_n 模式间差异不显著,均显著高于 T4:4 ($P < 0.05$),模式间 P_n 由大到小依次为 T4:3边、T2:3、T2:4、T4:4边、T4:3中、CKM、T4:4中,其中,T4:3边的 P_n 最高,达到 $43.20 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,较 T2:3 提高 26.69%,两个模

式间差异不显著 ($P > 0.05$),但显著高于其它模式 ($P < 0.05$),此时单作玉米的 P_n 已明显低于T2:3, C_i 积累量增加,说明单作玉米从吐丝期到灌浆期的光合能力较 T2:3 已明显减弱,而此时,T2:3 的 P_n 仅从 $35.77 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 下降到 $34.10 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。说明间作 T2:3 模式有利于玉米后期保持较高的光合功能期。

表 4 不同间作模式玉米的光合特性

种植模式	大喇叭口期				吐丝期				灌浆期			
	$T_r/$	$G_s/$	$P_n/$	$C_i/$	$T_r/$	$G_s/$	$P_n/$	$C_i/$	$T_r/$	$G_s/$	$P_n/$	$C_i/$
	(mmol·	(mmol·	(μmol·	(μL·	(mmol·	(mmol·	(μmol·	(μL·	(mmol·	(mmol·	(μmol·	(μL·
	$\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$\text{L}^{-1})$	$\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$\text{L}^{-1})$	$\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$\text{L}^{-1})$
CKM	8.33 ^a	317.64 ^b	13.30 ^b	336.95 ^c	6.65 ^a	320.47 ^a	26.36 ^a	248.92 ^a	7.06 ^a	440.24 ^a	4.07 ^c	394.83 ^a
T2:3	2.19 ^f	102.09 ^e	1.83 ^g	407.00 ^a	6.94 ^a	354.23 ^a	35.77 ^a	208.94 ^b	6.20 ^a	422.76 ^a	34.10 ^a	266.73 ^b
T2:4	5.96 ^c	312.71 ^b	16.81 ^a	346.97 ^c	4.92 ^a	196.69 ^a	17.40 ^{ab}	250.39 ^a	3.03 ^b	145.37 ^b	11.03 ^b	303.72 ^b
T4:3边	1.19 ^g	38.72 ^f	2.50 ^f	318.01 ^{cd}	3.44 ^b	144.69 ^b	10.07 ^b	281.52 ^a	8.85 ^a	403.23 ^a	43.20 ^a	232.11 ^b
T4:3中	3.23 ^e	116.64 ^d	11.54 ^d	265.30 ^e	3.13 ^b	132.87 ^b	7.08 ^b	308.01 ^a	5.95 ^{ab}	241.29 ^{ab}	5.43 ^c	387.45 ^a
T4:4边	7.31 ^b	377.94 ^a	12.49 ^c	378.61 ^b	4.61 ^a	186.12 ^{ab}	23.68 ^a	186.41 ^b	2.92 ^b	144.67 ^b	8.50 ^b	348.59 ^a
T4:4中	5.61 ^d	220.19 ^c	10.63 ^c	347.75 ^c	2.66 ^b	101.75 ^c	5.64 ^b	390.81 ^a	1.57 ^c	75.33 ^c	1.83 ^c	406.60 ^a

同时以 T4:4模式为例,大喇叭口期、吐丝期、灌浆期的 T_r 、 G_s 、 P_n 均表现为边行优于中行,且达到显著水平 ($P < 0.05$),大喇叭口期边行分别高于中行 30.30%、71.64%、17.50%,吐丝期边行分别高于中行 73.31%、82.92%、319.86%,灌浆期边行分别高于中行 85.99%、92.05%、364.48%,说明高秆作物玉米间作 T4:4模式的蒸腾速率、气孔导度、净光合速率具有明显的边际效应。

对不同种植模式大豆各时期光合特性进行分析(表 5),各模式的表现存在一定差异。T2:4、T4:3、T4:4 3 个间作模式的中行叶片光合速率 P_n 开花期就达到了峰值,之后持续大幅度下降,边行在结荚期

达到峰值,而单作与 T2:3模式从开花期到结荚期持续上升,二者均在鼓粒期达到峰值,这可能与 CKS、T2:3两个模式的田间小气候环境条件较适宜,同时鼓粒期大豆根瘤的固氮作用逐渐增强有关,该规律与玉米表现有所差异。5 种植植模式,开花期,T2:4中、T4:3中、T4:4中的 P_n 均达到峰值,显著高于T2:3 ($P < 0.05$),T2:3显著低于 CKS。结荚期,CKS 的 P_n 表现最高,具有明显优势,均显著高于其它模式 ($P < 0.05$),T2:4边、T4:3边、T4:4边此时均达到峰值,T2:3仍然较低。到鼓粒期,T2:3和 CKS 的 P_n 均达到峰值,由大到小依次为 T2:3中、CKS、T2:3边、T4:4边、T2:4中、T4:4中、T2:4边、T4:3中、T4:3边,

表 5 不同间作模式大豆的光合特性

种植模式	开花期				结荚期				鼓粒期			
	$T_r/$	$G_s/$	$P_n/$	$C_i/$	$T_r/$	$G_s/$	$P_n/$	$C_i/$	$T_r/$	$G_s/$	$P_n/$	$C_i/$
	(mmol·	(mmol·	(μmol·	(μL·	(mmol·	(mmol·	(μmol·	(μL·	(mmol·	(mmol·	(μmol·	(μL·
	$\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$\text{L}^{-1})$	$\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$\text{L}^{-1})$	$\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	$\text{L}^{-1})$
CKS	7.35 ^e	337.91 ^d	13.29 ^b	338.74 ^d	14.00 ^a	1 071.01 ^a	32.22 ^a	318.39 ^d	11.00 ^a	937.27 ^a	34.27 ^b	319.00 ^d
T2:3边	8.96 ^c	459.45 ^c	1.52 ^g	403.92 ^a	5.91 ^g	302.23 ^f	5.16 ^h	360.67 ^{ab}	5.42 ^f	350.82 ^f	12.30 ^c	358.94 ^c
T2:3中	10.88 ^b	643.80 ^b	1.65 ^f	400.07 ^a	7.27 ^f	403.69 ^e	6.24 ^g	364.62 ^a	7.51 ^c	533.11 ^c	52.42 ^a	233.55 ^e
T2:4边	8.25 ^d	474.07 ^c	7.20 ^d	406.58 ^a	9.09 ^e	410.82 ^e	9.52 ^f	358.72 ^{ab}	7.40 ^c	446.86 ^d	2.93 ^e	430.67 ^{ab}
T2:4中	14.45 ^a	1 098.69 ^a	37.64 ^a	349.91 ^{cd}	11.66 ^c	584.74 ^d	18.24 ^d	340.95 ^{bc}	9.99 ^b	723.91 ^b	3.76 ^e	436.35 ^a
T4:3边	8.19 ^d	323.52 ^d	4.89 ^e	377.86 ^b	12.65 ^b	907.60 ^b	24.45 ^b	334.07 ^{cd}	6.72 ^d	287.48 ^g	1.00 ^f	418.29 ^{ab}
T4:3中	8.13 ^d	328.49 ^d	9.16 ^c	364.52 ^{bc}	9.93 ^d	611.62 ^d	5.15 ^h	378.69 ^a	4.91 ^g	202.83 ^h	1.49 ^f	409.31 ^b
T4:4边	4.26 ^f	154.07 ^f	4.61 ^e	376.03 ^b	11.13 ^c	608.54 ^d	22.68 ^c	323.58 ^{cd}	6.10 ^e	383.84 ^e	6.97 ^d	416.17 ^{ab}
T4:4中	7.15 ^e	286.14 ^e	37.18 ^a	196.24 ^e	12.32 ^b	751.50 ^c	14.13 ^e	359.28 ^{ab}	6.42 ^{de}	394.57 ^e	3.57 ^e	428.11 ^{ab}

T2:3 模式光合优势表现较强,T4:3 模式最弱。T2:3 中的 P_n 超越单作,显著高于单作 52.96% ($P < 0.05$), T_r 、 G_s 显著下降 31.73%、43.12%,因光合消耗 C_i 较 CKS 下降 26.79%。T2:3 边 P_n 较 CKS 下降 64.11%, T_r 、 G_s 显著下降 50.73%、62.57%, C_i 较 CKS 高 12.52%。T4:4、T2:4、T4:3 模式的 P_n 较单作和间作 T2:3 显著下降,从结荚期到鼓粒期,持续下降,而单作保持光合效率峰值,到鼓粒期,提高 6.36%,间作 T2:3 在鼓粒期达到峰值,并在鼓粒期保持峰值,受玉米隐蔽作用影响相对较弱。

T2:3 模式,3 个时期中行 P_n 较边行具有优势,距离玉米植株越近,受玉米隐蔽影响越严重,而 T4:4 模式,玉米由 2 行增加到 4 行,大豆由 3 行增加到 4 行,玉米的隐蔽作用增强,对中行影响更显著,大豆的幅宽增大,受光的空间增加,使边行较中行表现光合优势,在结荚期和鼓粒期光合速率

具有一定边际效应。

2.3 玉米大豆间作不同带宽、行比配置模式对土地当量比、相对拥挤系数的影响

由表 6 可得,不同间作模式, LER 、 K 表现不同,说明不同田间配置模式对 LER 、 K 均会造成影响。间作模式下, LER 变化范围为 0.59~1.38,所有间作模式下的 LER 仅 T2:3 模式大于 1,达到 1.38,表现明显的间作优势,行比由 2:3 增加到 2:4,带宽由 2.2 m 增大到 2.5 m, LER 由 1.38 下降为 0.80,而其中 LER_s 由 0.67 下降为 0.28,说明 T2:3 模式更具有间作优势。相对拥挤系数 K 与 LER 变化趋势相似,T2:3 模式下 K 最大,为 4.92,且 $K_M > K_S$,表明 T2:3 模式中,玉米竞争力强于大豆,处于竞争的优势生态位,其它模式的 K_M 、 K_S 均较小,导致 K 更小,表明这些间作模式的作物优势生态位不强。

表 6 玉米大豆间作系统不同种植模式对玉米和大豆土地当量比、相对拥挤系数、作物侵占力与侵占比率的影响

Tab.6 Effects of intercropping treatments on land equivalent ratio, relative crowding coefficient, crop invasiveness and invasiveness ratio of maize and soybean in maize soybean intercropping system

种植模式	LER_M	LER_s	LER	K_M	K_s	K	A_M	A_s	CR_M	CR_s
T2:3	0.71	0.67	1.38	2.96	1.66	4.92	-0.04	0.04	0.89	1.12
T2:4	0.53	0.28	0.80	1.67	0.25	0.42	0.05	-0.05	1.28	0.78
T4:3 边	0.35	0.32	0.67	0.36	0.71	0.26	0.08	-0.08	1.64	0.61
T4:3 中	0.26	0.33	0.59	0.24	0.74	0.18	0.03	-0.03	1.20	0.83
T4:4 边	0.35	0.25	0.61	0.48	0.38	0.19	0.07	-0.07	1.56	0.64
T4:4 中	0.28	0.33	0.60	0.09	0.54	0.05	-0.01	0.01	0.95	1.05

带宽由 2.2 m (T2:3) 增加为 3.0 m (T4:3) 模式时,增加了玉米行比配置, LER_M 、 LER_s 、 LER 、 K_M 、 K_s 、 K 值均呈下降趋势;当带宽由 2.5 m (T2:4) 增至 3.4 m (T4:4),增加了玉米行比配置, LER_M 、 LER 、 K_M 、 K 均呈减小趋势,而 LER_s 、 K_s 略有增加;当种间距离不变,带宽由 2.2 m (T2:3) 增至 3.4 m (T4:4) 时, LER_M 、 LER_s 、 LER 、 K_M 、 K_s 、 K 均呈减小趋势;带宽由 2.5 m (T2:4) 增至 3.0 m (T4:3) 时, LER_M 、 LER 、 K_M 均呈减小趋势,而 LER_s 、 K_s 增大。这表明,玉米、大豆行数增加, LER 、 K 均明显减弱,但大豆行数增加时, LER 、 K 下降幅度较小,且 T4:3、T4:4 边行均表现边际优势。因此,间作中,玉米不适宜设置较大的幅宽。

2.4 玉米大豆间作不同带宽、行比配置模式对作物侵占力的影响

对间作不同带宽、行比配置模式作物侵占力和竞争比率进行分析(表 6),各间作模式的 A 、 CR 变化趋势一致,T2:3 模式 $A_s > 0$,这表明,间作系统中大豆占优势,大豆相对产量增长大于玉米, $CR_s > 1$,这表明,该模式中大豆竞争力强于玉米,大豆是竞争

优势种,其它模式相反,玉米是竞争优势种。

2.5 玉米大豆间作不同带宽、行比配置模式产量

表 7 表明,间作系统中,玉米在产量中占主导地位,各模式产量由小到大依次为 T2:3、T2:4、T4:4 边、T4:3 边、T4:4 中、T4:3 中,T2:3 模式的玉米、大豆产量最高,分别达到 9 705、2 265 kg/hm²,占系统产量的 81.08%、18.92%,为单作玉米和大豆的 71.10% 和 66.52%;其次是 T2:4 模式,玉米、大豆产量分别为 7 185、930 kg/hm²,分别占系统产量的 88.54%、11.46%,为单作玉米和大豆 52.64% 和 27.31%。T4:3 边行、T4:4 边行玉米产量均显著高于中行 ($P < 0.05$),分别较中行高 22.87%、19.94%,这表明,T4:3 边、T4:4 边的玉米产量具有边际优势,大豆产量边行未表现边际优势,与叶绿素 SPAD、含氮质量比表现一致,均不具有显著的边际优势。

3 讨论

3.1 不同间作模式合理的群体结构

玉米大豆间作基于作物高矮搭配合适、养分喜

表 7 不同带宽、行比配置模式产量

Tab.7 Output of different band width and row ratio configuration modes

种植模式	间作系统产量/(kg·hm ⁻²)			占间作系统产量比例/%		间作种植面积比例/%	
	玉米	大豆	系统产量	玉米	大豆	玉米	大豆
T2:3	9 705 ^a	2 265 ^a	11 970 ^b	81.08	18.92	45	55
T2:4	7 185 ^b	930 ^c	8 115 ^c	88.54	11.46	40	60
T4:3边	6 285 ^c	1 095 ^b	7 380 ^d	85.16	14.84	60	40
T4:3中	5 115 ^d	1 125 ^b	6 240 ^e	81.97	18.03	60	40
T4:4边	6 315 ^c	870 ^c	7 185 ^d	87.89	12.11	53	47
T4:4中	5 265 ^d	1 110 ^b	6 375 ^e	82.59	17.41	53	47
CKM			13 650 ^a				
CKS			3 405 ^f				

好不同和大豆的固氮作用等优势,被认为是更高效的间作系统^[13]。合理搭配作物,同时采用适宜的调控措施,增强优势作物或者同步增强优劣势作物的光合源是促进间作高产稳产的有效途径。作物在空间上的合理搭配是间作复合群体高效截获光能的重要基础。作物通过高矮、带宽、行比搭配等途径,构建立体空间结构、优化群体光分布。共生期中,玉米大豆间作高矮相间,形成伞状冠层结构,有利于增加条带两侧的人射辐射,冠层中部叶片受光充分^[14],矮秆作物大豆是 C3 作物,能够更好地截获底层光能,充分利用弱光,优化了间作群体的光能利用,提高了复合群体光能截获率^[15]。王雅梅等^[16]对不同农机作业宽幅条件下玉米大豆间作研究认为,3 种间作模式(播幅 2:1、2:2、2:3)以籽粒产量为基础的 *LER* 随着大豆播幅的增加而增加,玉米大豆播幅 2:2、2:3 种植具有间作生产优势。潘利文等^[17]对适宜机械化的玉米大豆行比 2:4 和 4:4 两种间作模式的产量和经济效益进行研究,认为 2:4 模式优于 4:4。这可能因为小行距窄带宽,玉米大豆均能发挥边际效应,且大豆能够截获和利用底层弱光,因此保证了系统产量。王甜等^[18]研究了带宽和密度配置对玉米大豆间作中大豆产量的影响,认为带宽 2.4 m、大豆种植密度为 67 500~82 500 株/hm² 时,大豆光合特性改善,产量较高。这可能因为小带宽下,降低了大豆种植密度,改善了大豆的受光条件,优化了植株个体与群体生长发育的协调性,缓解大豆个体与群体之间的矛盾,从而获得产量优势。封亮等^[19]对江西地区红壤旱地的玉米大豆间作模式研究表明,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,可作为江西地区红壤旱地适宜的玉米大豆间作模式。VAN OORT 等^[20]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。这可能因为行比 2:4 模式玉米幅宽小,2 行玉米对大豆的隐蔽作用相对行比 4:4 模式较弱,单位面

积玉米产量下降较少,大豆产量略有降低,但仍能保证系统产量,且间作系统经济效益大于单作玉米或大豆,故间作大豆少量的减产并不影响间作系统的经济效益。

以上研究均认为,小行比窄带宽间作优势更显著,产量表现更好,这可能因为行比 2:3、2:4 模式中,3 行或 4 行大豆能发挥中行的光合优势,2 行玉米能发挥边际效应,使间作系统产量表现较高。本研究得到相近的结果,T2:3 模式带宽 2.2 m,2 行玉米光合速率峰值高,降得慢,3 行大豆峰值出现晚(鼓粒期,下降速度有待于进一步研究),且中行较边行光合速率更高,具有一定光合优势,这也是该模式 *LER* 大于 1 的主要原因,且 $K_s > K_m, A_s > 0, CR_s > 1$, T2:3 具有明显的间作优势和竞争力,大豆相对产量增长大于玉米,是竞争优势种,而 T4:4 模式的玉米光合速率峰值低,出现早(大喇叭口期-吐丝期),降得快,大豆光合速率峰值出现早(开花期-结荚期),降得快。但蔡倩等^[21]认为,玉米大豆间作模式中 M6S6(6 行玉米 6 行大豆)间作产量优势最强。可见,协调统筹不同株型作物的空间布局,创造合理的间作群体结构,使光能的分配和利用更加高效,提高光能利用率,是保证间作生产力的关键。

3.2 不同间作模式玉米大豆光合特性及产量边际效应

玉米大豆间作条件下,作物光照条件^[22]、土壤养分状况以及农田小气候^[23]均发生改变。王竹等^[24]研究发现,大幅宽种植减弱了作物之间的竞争,缓解了大豆的遮阴问题,减少了玉米对大豆的资源掠夺,有利于提高间作系统的生物量和产量,尤其是利于保证大豆产量较少减产。而 HE 等^[25]研究认为,小带宽玉米带保证了间作玉米的充足光照和通风,同时玉米的根系可以充分延伸到大豆条带吸收养分,大带宽大豆种植避免了邻近玉米的遮光。可见,间作群体的两种作物田间结构配置是影响种

间协调关系和边际效应的重要因素,对矮秆作物的受光条件及产量效应具有决定性作用。赵德强等^[26]研究认为,大幅宽玉米小幅宽大豆种植的 3M6S(3 行玉米 6 行大豆)模式具有最高的相对生物量和产量。玉米大豆间作表现出强烈的边际效应,间作玉米的Ⅰ行、Ⅱ行和Ⅲ行,以及间作大豆的Ⅱ行和Ⅲ行均表现为间作优势,间作大豆Ⅰ行为间作劣势。范元芳等^[27]研究认为,玉米大豆间作时,大豆受到邻近玉米的遮光影响;王一等^[28]研究认为,大豆花期以后遮阴降低了叶片最大光合速率,降低了单株粒质量。以上均认为遮阴是大豆干物质积累量和产量降低的主要原因,而Ⅰ行间作大豆处于间作劣势可能因为距离玉米最近,遭受玉米中下部叶片遮阴作用更严重,有效受光时间非常有限,多数时间接受的是弱光或光合作用的低效光,因此对其光合速率影响很大。本研究也得到相似的结果,玉米大豆间作群体以小带宽更能发挥间作优势,以 T2:3 模式较优,大豆带的中行更具有间作优势。同时,T4:4 模式大豆边行的光合速率在结荚期和鼓粒期具有边际优势,产量、叶绿素 SPAD 和氮质量比均未表现边际优势,可能在玉米后期植株对大豆的遮光严重,边行玉米仍有一定受光的空间,光合速率具有边际优势,而遮光对耐荫作物大豆边行与中行叶片叶绿素的合成及叶片氮素的积累影响不显著,因此,叶绿素含量和氮质量比未表现边际效应,遮光条件下,大豆边行和中行植株均略有徒长,影响生殖生长,致使产量也未表现边际效应。

间作改善光合性能的优势在生育后期更加明显,籽粒产量大部分来自花后的光合产物,本研究结果表明,T2:3 模式的玉米叶绿素 SPAD 在灌浆期与单作差异不显著,光合速率在吐丝期和灌浆期与单作差异均不显著,大豆叶绿素 SPAD 在结荚期、鼓粒期与单作差异不显著,光合速率在鼓粒期与单作相

近,因此认为,间作群体花后较长的光合功能稳定期是发挥间作优势的重要原因,与李易玲等^[9]的研究结果一致。

发展间作至关重要的一个环节是统筹协调适宜机械化与种间互作增效的空间布局和群体优化理论。范虹等^[29]研究认为,间作有利于群体生育后期保持较高光合源,提高高位作物个体的光合速率、叶绿素含量、光能利用率,但削弱了矮位作物光合性能。本研究中,也发现 T2:3 模式玉米叶片的叶绿素 SPAD、氮质量比和光合速率在吐丝期和灌浆期甚至超越单作,且系统产量仅次于单作,T4:4 模式中边行玉米具有明显的边际效应。综上,T2:3 模式中两个边行玉米在发挥边际效应和群体间作优势的基础上获得了较好的产量效应,同时,该模式在生产中已实现了机械化生产,因此认为 T2:3 模式是河套灌区较适宜的间作技术模式。

4 结束语

T2:3 间作模式及单作玉米光合速率峰值于吐丝期正常来临,但 T2:3 较单作下降缓慢,其它模式玉米光合速率峰值低,出现早(大喇叭口期),降得快,大豆峰值出现晚(鼓粒期),其它模式出现早,降得快,尤其 T2:4、T4:3、T4:4 模式的中行下降速度更显著。因此,间作玉米的花后光合功能稳定期长是关键,是 T2:3 间作模式充分发挥间作优势增产的重要原因。仅 T2:3 模式 LER 大于 1,达到 1.38,且 $K_s > K_m$,T2:3 具有明显的间作优势和竞争力, $A_s > 0$, $CR_s > 1$,间作系统中大豆占优势,中行具有显著光合优势,大豆相对产量增长大于玉米,竞争力强于玉米,是竞争优势种,该模式的玉米、大豆产量分别达到 9 705、2 265 kg/hm²,占系统产量的 81.08%、18.92%。综上,T2:3 模式是内蒙古河套灌区适宜的间作技术模式。

参 考 文 献

[1] 蔡祖聪. 浅谈“十四五”土壤肥力与土壤养分循环分支学科发展战略[J]. 土壤学报,2020,57(5):1128-1136.
CAI Zucong. Discussion on the strategies for development of the subdiscipling of soil fertility and nutrient cycling for the 14th Five-Year Plan[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5):1128-1136. (in Chinese)

[2] 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 Yuanyuan, WANG Zhiliang, WANG Xiaolin, 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. (in Chinese)

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

- [6] 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,2020,28(12): 1890–1900.
REN Jiabing, ZHANG Mengyao, XIAO Jingxiu, 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. (in Chinese)
- [7] 赵建华,孙建好,陈亮之,等. 玉米行距对大豆/玉米间作物生长及种间竞争力的影响[J]. 大豆科学,2019,38(2):229–235.
ZHAO Jianhua, SUN Jianhao, CHEN Liangzhi, 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. (in Chinese)
- [8] 徐延辉,王畅,郑殿峰,等. 带状复合种植对玉米和大豆光合特性及籽粒产量的影响[J]. 大豆科学,2017,36(4):540–546.
XU Yanhui, WANG Chang, ZHENG Dianfeng, et al. Effects of the strip compound planting system on photosynthetic characteristic and grain yield of maize and soybean[J]. Soybean Science, 2017, 36(4):540–546. (in Chinese)
- [9] 李易玲,彭西红,陈平. 减量施氮对套作玉米大豆叶片持绿、光合特性和系统产量的影响[J]. 中国农业科学,2022,55(9):1749–1762.
LI Yiling PENG Xihong, CHEN Ping. Effects of reducing nitrogen application on leaf stay-green, photosynthetic characteristics and system yield in maize-soybean relay strip intercropping[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(9):1749–1762. (in Chinese)
- [10] 于健,杨金忠,徐冰,等. 内蒙古沿黄灌区滴灌技术应用需求与发展措施[J]. 中国水利,2018(7):50–54
YU Jian, YANG Jinzhong, XU Bing, et al. Application of drip irrigation technologies in irrigation districts along Yellow River in Inner Mongolia and relevant measures[J]. China Water Resources, 2018(7):50–54. (in Chinese)
- [11] 尚小龙,曹建斌,王艳,等. 保护性耕作技术研究现状及展望[J]. 中国农机化学报,2021,42(6):191–201.
SHANG Xiaolong, CAO Jianbin, WANG Yan, et al. Current situation and prospect of conservation tillage technology[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(6):191–201. (in Chinese)
- [12] 贾彪,贺正. 宁夏引黄灌区滴灌玉米穗位叶光响应特征研究[J]. 农业机械学报,2019,50(11):153–160.
JIA Biao, HE Zheng. Photoresponse characteristics of spike leaves of maize in Ningxia Yellow River irrigation area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11):153–160. (in Chinese)
- [13] IQBAL N, HUSSAIN S, AHMED Z, et al. Comparative analysis of maize-soybean strip intercropping systems: a review[J]. Plant Production Science, 2019, 22(2):131–142.
- [14] 蔺芳,刘晓静,童长春,等. 基于产量效应的间作紫花苜蓿/禾本科牧草光能利用特征[J]. 应用生态学报,2020,31(9):2963–2976.
LIN Fang, LIU Xiaojing, TONG Changchun, et al. Characteristics of light energy utilization of inter cropping alfalfa/gramineae forage based on yield effect[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(9):2963–2976. (in Chinese)
- [15] 高莹,吴普特,赵西宁,等. 春小麦/春玉米间作模式光温环境特征研究[J]. 水土保持研究,2015,22(3):163–169.
GAO Ying, WU Pute, ZHAO Xining, et al. Characteristics of light environment and soil temperature in the spring wheat/spring maize intercropping system[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(3):163–169. (in Chinese)
- [16] 王雅梅,许彦骁,王亚露,等. 玉米-大豆不同宽幅间作对大豆光合特性及群体产量的影响[J]. 农业环境科学学报,2020,39(11):2587–2595.
WANG Yamei, XU Yanxiao, WANG Yalu, et al. Effects of maize-soybean intercropping with different widths on photosynthetic characteristics of soybean and population yield[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(11):2587–2595. (in Chinese)
- [17] 潘利文,朱暖暖,杨豫龙,等. 适宜机械化玉米-大豆间作生产模式研究[J]. 玉米科学,2021,29(1):104–111.
PAN Liwen, ZHU Nuannuan, YANG Yulong, et al. Production pattern of maize-soybean intercropping system under mechanization production condition[J]. Journal of Maize Sciences, 2021, 29(1):104–111. (in Chinese)
- [18] 王甜,庞婷,杜青,等. 田间配置对间作大豆光合特性、干物质积累及产量的影响[J]. 华北农学报,2020,35(2):107–116.
WANG Tian, PANG Ting, DU Qing, et al. Effects of different field collocation patterns on photosynthetic characteristics and dry matter accumulation and yield in intercropping soybean[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2020, 35(2):107–116. (in Chinese)
- [19] 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,2021,29(7):1127–1137.
FENG Liang, HUANG Guoqin, YANG Wenting, et al. Yields and inter specific 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. (in Chinese)
- [20] 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, 112:125–136.
- [21] 蔡倩,孙占祥,王文斌,等. 辽西半干旱区玉米大豆间作对作物产量及水分利用的影响[J]. 中国农业气象,2022,43(7):551–562.
CAI Qian, SUN Zhanxiang, WANG Wenbin, et al. Yield and water use of maize/soybean intercropping systems in semi-arid western Liaoning[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2022, 43(7):551–562. (in Chinese)
- [22] 丁梦秋,闻诗文,陆卫平,等. 结实期弱光胁迫对甜玉米籽粒灌浆和叶片衰老的影响[J]. 核农学报,2017,31(5):964–971.
DING Mengqiu, WEN Shiwen, LU Weiping, et al. Effects of weak-light stress after pollination on grain filling and leaf senescence in sweet maize[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2017, 31(5):964–971. (in Chinese)
- [23] 张琳琳,孙仕军,陈志君,等. 不同颜色地膜与种植密度对春玉米干物质积累和产量的影响[J]. 应用生态学报,2018,29(1):113–124.

ZHANG Linlin, SUN Shijun, CHEN Zhijun, et al. Effects of different colored plastic film mulching and planting density on dry matter accumulation and yield of spring maize[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(1): 113 – 124. (in Chinese)

[24] 王竹,杨文钰. 玉米株型和幅宽对套作大豆碳氮代谢及产量的影响[J]. 中国油料作物学报,2014,36(2): 206 – 212.
WANG Zhu, YANG Wenyu. Effects of plant-types of maize and planting width on carbon-nitrogen metabolism and yield of relay-cropping soybean[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2014, 36(2): 206 – 212. (in Chinese)

[25] HE H M, YANG L, ZHAO L H, et al. The temporal-spatial distribution of light intensity in maize and soybean intercropping systems[J]. Journal of Resources and Ecology, 2012, 3(2): 169 – 173.

[26] 赵德强,李彤,侯玉婷,等. 玉米大豆间作模式下干物质积累和产量的边际效应及其系统效益[J]. 中国农业科学,2020, 53(10):1971 – 1985.
ZHAO Deqiang, LI Tong, HOU Yuting, et al. Benefits and marginal effect of dry matter accumulation and yield in maize and soybean intercropping patterns[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(10): 1971 – 1985. (in Chinese)

[27] 范元芳,刘沁林,王锐,等. 玉米-大豆带状间作对大豆生长、光合荧光特性及产量的影响[J]. 核农学报,2017,31(5): 972 – 978.
FAN Yuanfang, LIU Qinlin, WANG Rui, et al. Effects of shading on growth, photosynthetic fluorescence characteristics and yield of soybean in maize – soybean intercropping systems[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2017, 31(5): 972 – 978. (in Chinese)

[28] 王一,张霞,杨文钰,等. 不同生育时期遮阴对大豆叶片光合和叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国农业科学,2016, 49(11):2072 – 2081.
WANG Yi, ZHANG Xia, YANG Wenyu, et al. Effect of shading on soybean leaf photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics at different growth stages[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(11): 2072 – 2081. (in Chinese)

[29] 范虹,殷文,柴强. 间作优势的光合生理机制及其冠层微环境特征[J]. 中国生态农业学报,2022,30(11):1750 – 1761.
FAN Hong, YIN Wen, CHAI Qiang. Research progress on photo-physiological mechanisms and characteristics of canopy microenvironment in the formation of intercropping advantages[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(11):1750 – 1761. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 285 页)

[19] LE COZLER Y, ALLAIN C, XAVIER C, et al. Volume and surface area of Holstein dairy cows calculated from complete 3D shapes acquired using a high-precision scanning system; interest for body weight estimation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 165: 104977.

[20] 牛金玉. 基于三维点云的奶牛体尺测量与体重预测方法研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2018.  
NIU Jinyu. Body size measurement and weight prediction for dairy cows based on 3D point cloud[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018. (in Chinese)

[21] JENSEN D B, DOMINIAK K N, PEDERSEN L J. Automatic estimation of slaughter pig live weight using convolutional neural networks[C]// II International Conference on Agro Big Data and Decision Support Systems in Agriculture, 2018.

[22] MARTINS B M, MENDES A L C, SILVA L F, et al. Estimating body weight, body condition score, and type traits in dairy cows using three dimensional cameras and manual body measurements[J]. Livestock Science, 2020, 236: 104054.

[23] CANG Y, HE H, QIAO Y. An intelligent pig weights estimate method based on deep learning in sow stall environments[J]. IEEE Access, 2019, 7: 164867 – 164875.

[24] HE H, QIAO Y, LI X, et al. Automatic weight measurement of pigs based on 3D images and regression network[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 187: 106299.

[25] CARION N, MASSA F, SYNNAEVE G, et al. End-to-end object detection with transformers[C]// European Conference on Computer Vision. Springer, Cham, 2020: 213 – 229.

[26] GOFER E, PRAISLER S, GILBOA G. Adaptive LiDAR sampling and depth completion using ensemble variance[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2021, 30: 8900 – 8912.

[27] 张梦泽. 三维点云数据的精简与平滑处理算法[D]. 青岛:中国海洋大学, 2014.  
ZHANG Mengze. A 3D data reduction and smoothing algorithm for point clouds[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014. (in Chinese)

[28] 赵鹏. 三维点云数据的离群点检测和模型重建[D]. 大连:大连理工大学, 2015 .  
ZHAO Peng. Outlier detection and model reconstruction of 3D point cloud data[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015. (in Chinese)

[29] 徐壮. 室内监控环境下的跌倒行为检测算法研究[D]. 南京:南京邮电大学, 2021.  
XU Zhuang. Research on fall detection algorithms in indoor monitoring environment[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2021. (in Chinese)

[30] QIAO Y, KONG H, CLARK C, et al. Intelligent perception for cattle monitoring: a review for cattle identification, body condition score evaluation, and weight estimation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 185: 106143.