

行距对间作玉米/马铃薯产量优势和种间关系的影响*

字淑慧, 吴开贤, 安瞳昕, 欧阳钺人, 杨友琼, 周 锋, 吴伯志**
(云南农业大学 农学与生物技术学院, 云南 昆明 650201)

摘要:【目的】行距布局决定作物生长和产量,但在玉米马铃薯间作中缺乏研究。【方法】针对云南应用较广 2:2 模式,增减种间(ZJ)和种内(ZN)行距形成 ZJ70 cm+ZN 25 cm、ZJ60 cm+ZN35 cm、ZJ50 cm+ZN45 cm、ZJ40 cm+ZN55 cm 和 ZJ30 cm+ZN65 cm 间作及单作玉米(Ms)和马铃薯(Ps)7 个处理,经 2 年大田试验,研究行距对其间作优势和种间关系的影响。【结果】(1)5 种间作模式 LER 为 1.21~1.42,当 ZJ 从 70 cm 减至 30 cm 时,两作物产量逐渐增加而后有所下降,最大为 ZJ40 cm+ZN55 cm 的马铃薯平均为 13 833 kg/hm²、玉米为 7 808 kg/hm²,LER 为 1.42;总体为种间窄行模式(ZJ>50 cm)比种间宽行模式(ZJ<50 cm)高,间作优势突出,系统生产力高,分界点为 ZJ 40 cm。(2)马铃薯初花期和玉米拔节期是两作物竞争的胶着期,随 ZJ 从 70~30 cm,马铃薯竞争能力逐渐增强(RII 为 -0.06~0.01)、玉米逐渐减弱(RII 为 -0.04~-0.23),随生育期推进,ZJ40 cm+ZN55 cm 的 RII 相对较大。(3)马铃薯干物质转移率和贡献率随 ZJ 缩小而增大,最大为 ZJ40 cm+ZN55 cm 的 32.6% 和 25.5%,比最小 ZJ70 cm+ZN25 cm 分别提高 39.5% 和 47.7%,分界点为 ZJ40 cm。(4)拔节期—吐丝期和吐丝期—乳熟期玉米恢复性生长能力(RGR),ZJ<50 cm 比 ZJ>50 cm 强,最强 ZJ40 cm+ZN55 cm 比最弱 ZJ70 cm+ZN25 cm 在两个时期分别提高 37% 和 30%,分界点为 ZJ40 cm。【结论】间作玉米/马铃薯 2:2 行比、190 cm 带宽模式下,种间窄行的间作优势显著高于种间宽行模式,最高为间距 40 cm+行距 55 cm。这一发现不仅对实际生产有重要意义,也为其他间作作物高效种植提供了行距设计的借鉴。

关键词: 行距配置; 间作优势; 种间关系; 玉米; 马铃薯

中图分类号: S 344.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-390X(2019)02-0200-10

Effects of Row Spacing on the Yields Advantage and Interspecific Interaction of the Intercropped Maize and Potato

ZI Shuhui, WU Kaixian, AN Tongxin, OUYANG Chengren, YANG Youqiong,
ZHOU Feng, WU Bozhi

(College of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: [Purpose] Being an important crop population layout, row spacing determines crop growth and yield. However, there is a lack of research on maize and potato intercropping. [Method] The most widely used model in Yunnan Province is that the row ration of intercropping is 2:2. We conducted a two-year field experiment to study the effects of different row spacing on intercropping advantage and interspecific relations. The spacing range of interspecific row space (ZJ) designed from

收稿日期: 2018-11-07

修回日期: 2019-01-09

网络出版时间: 2019-01-24

*基金项目: 国家自然科学基金项目(31360306); 公益性行业(农业)专项; 云南省玉米产业体系(2017KJTX002)。

作者简介: 字淑慧(1971—), 女, 云南大理人, 在读博士研究生, 副教授, 主要从事作物栽培与耕作研究。

E-mail: zsh7525@163.com

**通信作者 Corresponding author: 吴伯志(1960—), 男, 云南玉溪人, 博士, 教授, 主要从事旱地农业可持续发展研究。E-mail: Bozhiwu@hotmail.com

网络出版地址: [http://dx.doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).zk201811019](http://dx.doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).zk201811019)

30 cm to 70 cm at 10 cm interval, while that of intraspecific row space (ZN) designed from 65 cm to 25 cm correspondingly. As a result, there were five row spacing layout modes (ZJ70 cm+ZN25 cm, ZJ60 cm+ZN35 cm, ZJ50 cm+ZN45 cm, ZJ40 cm+ZN55 cm, ZJ30 cm+ZN65 cm). We also included the maize (Ms) and potato (Ps) monoculture as references. [Result] (1) All five modes of row spacing layout displayed the intercropping advantage with the land equivalent ratio (LER) greater than 1 (1.21-1.42). Overall, the yield of potato and maize gradually increased when the jointing stage of maize were the gluttonous period of competition between the two crops. ZJ decreased gradually from 70 to 30 cm. However, the yield decreased when ZJ further decreased from 70 to 30 cm. The yield of both maize and potato maximized at ZJ40 cm+ZN55 cm treatment, reaching 13 833 kg/hm² for potato, 7 808 kg/hm² for maize, and LER was 1.42. The overall performance was that the narrow ZJ (>50 cm) modes had a higher yield than those of the wider (ZJ<50 cm), which had prominent intercropping advantage and high system productivity. (2) At the early flowering stage of potato, as ZJ decreased from 70 cm to 30 cm, the potato competitiveness gradually increased (RII was -0.06 to 0.01) and the maize gradually decreased (RII was -0.04 to -0.23). With the advancement of maize growth period, the competitiveness of the two crops gradually reduced, but the competitiveness of potato was always greater than that of maize. At any stages, the plants with a row spacing of 40 cm were relatively competitive. (3) The dry matter transfer rate (DMME %) and contribution rate (DMCR %) of potato increased with the decrease of interspecific row space, and the highest ones were 32.6 % and 25.5% of ZJ40 cm+ZN55 cm, which were 39.5% and 47.7% higher than the minimum values of ZJ70 cm+ZN25 cm. In general, the inter-species narrow row mode was higher than the inter-species wide row mode, and the demarcation point was 40 cm. (4) The restorative growth capacity (RGR) showed that the interspecific narrow row mode was better than the interspecific wide row mode for jointing to silking and silking to physiology maturity, the best was ZJ40 cm +ZN55 cm treatment, which was 37% and 30% higher than the smallest of ZJ70 cm + ZN25 cm, and the demarcation point was ZJ40 cm.

[Conclusion] It follows that under the mode of corn/potato 2 : 2 row ratio and bandwidth of 190 cm, the intercropping advantage of the inter-species narrow row mode was significantly higher than that of the inter-species wide row mode, with the highest interspecies row spacing being ZJ40 cm+ ZN55 cm. This discovery not only has important significance for actual production, but also provides a reference for efficient planting of this model in other ecological environments.

Keywords: row spacing; intercropping advantage; interspecific interaction; maize; potato

作物田间结构配置是重要的种植制度设计方式,能直接影响作物群体内的环境因子,也能调节群体植株间的竞争关系,改变个体和群体对环境资源的利用,达到提高农田系统生产力的目的^[1-5]。行距配置是重要的作物田间结构配置之一。在一定种植密度下,行距配置可以与株距调整协同进行^[6],也可以独立进行调整^[7]。独立的行间距调整有两种方式:一是改变行距设置,主要是进行等行距和宽窄行种植^[8];二是在一定的行距格局下改变行的间距^[9]。大量研究表明:两种行距调整均能显著地改变作物生长和产量^[10-12]。

行间距配置不仅显著影响群体的作物产量,也是调节间套作系统生产力及种间相对竞争力的重要因素^[13-14]。魏珊珊等^[6]在相同密度下设置等行距 60 cm、宽窄行 80 cm+40 cm 和株距 22 cm、44 cm、66 cm 研究夏玉米冠层结构及籽粒灌浆特性,发现宽窄行下株距为 44 cm 的处理产量最高;刘兆新等^[10]通过设置小麦 3 种行距 (25 cm、30 cm、大小行 40 cm+20 cm) 研究对套种花生产量的影响,发现宽窄行显著提高了麦套作花生的产量;赵建华等^[14]设置 5 种玉米行距 (10、20、45、60 和 70 cm) 研究大豆/玉米间作产量及种间

竞争力的影响发现：随行距增加玉米产量和种间竞争力增加，大豆产量则下降。还有一些学者对不同行距不同间作模式作物产量及作物间的竞争力^[15-16]、行距对根际反硝化菌群丰度和功能^[17]等进行了相关研究。尽管如此，这些研究在探讨行距配置时，大多基于种间行距不变或种内行距不变的情况下作物群体的产量、生产力及竞争力的变化；而针对带宽不变的情况下，种内种间行距布局对间作优势及种间关系的影响研究相对较少。

玉米/马铃薯间作是重要的非豆科种植模式。一方面，该间作模式能够优化环境资源利用^[18-20]以及控制病虫害的发生^[21]，具有显著的间作优势^[22]。另一方面，玉米和马铃薯是第三和第四大粮食作物，在中国种植面积较大，随着国家马铃薯主粮化战略的推进，两作物间作在保障粮食安全中均有重要地位^[23-24]。为进一步发挥两作物间作优势，许多学者分别从播期^[24]、行比^[18]、带幅^[19]、光合^[25]、水肥利用^[20, 26]、地上地下相关性^[23]以及地上种间竞争^[25]等方面进行了研究。这些研究发现玉米/马铃薯间作 2 : 2 行比在许多地区均具有较好的增产效应^[18]，但有关该行比下的种间种内行距配置对间作优势及种间关系的研究甚是缺乏。因此，为进一步挖掘 2 : 2 行比间作模式的优势以及种间关系对该模式的影响，本研究以云南广泛种植的玉米/马铃薯间作 2 : 2 行比、190 cm 带宽的种植模式为对象，通过田间试验，研究相同带宽、不同行距布局对两作物间作优势及种间关系的影响，以为农业生产提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于云南农业大学寻甸县大河桥农场，E103.28°，N25.52°，海拔 1 850 m。属于低纬度高原季风气候，1981—2010 年间，年平均气温为 14.5 °C，年平均降雨量 1 020.9 mm (主要集中在 6—9 月)，全年日照时间 2 119.0 h；2013 年降雨量为 899.9 mm、2014 年为 869.1 mm (主要集中在 6—9 月)。试验地土壤为水稻土，肥力均匀；耕作层土壤有机质含量 24.54 g/kg，全氮 1.52 g/kg，全磷 0.40 g/kg，全钾 17.29 g/kg，碱解氮 60.81 mg/kg，速效磷 15.73 mg/kg，速效钾 153.27 mg/kg，pH 7.15。

1.2 试验设计

供试品种：玉米选用滇中广泛种植的寻单

7 号，马铃薯选用云南大面积间套作的耐阴型品种会-2 号，两作物 2 : 2 行比间作模式在云南地区广泛应用。

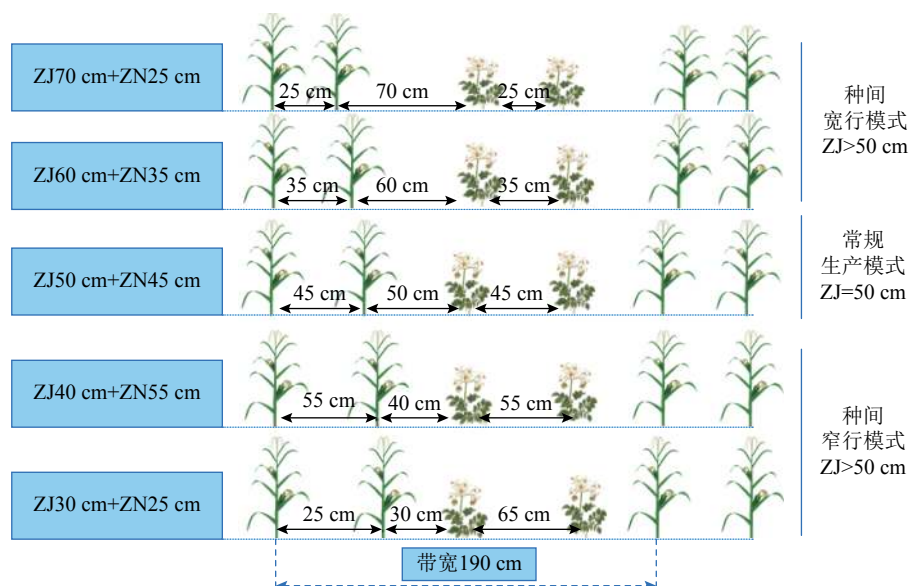
试验以玉米/马铃薯间作系统为研究对象，以农业生产中广泛运用的 2 : 2 行比、带宽 190 cm、种间间距 50 cm 为基础 (即行间距为 45 cm+50 cm+45 cm，玉米和马铃薯种内行距相同)，在此基础上增减种间行 (ZJ) 与种内行 (ZN) 的相对行距，实现 5 种行距模式，分别为：种间行距 70 cm+种内行距 25 cm (ZJ70 cm+ZN25 cm)、种间行距 60 cm+种内行距 35 cm (ZJ60 cm+ZN35 cm)、种间行距 50 cm+种内行距 45 cm (ZJ50 cm+ZN45 cm)、种间行距 40 cm+种内行距 55 cm (ZJ40 cm+ZN55 cm)、种间行距 30 cm+种内行距 65 cm (图 1)，其中种间行距超过 50 cm (ZJ>50 cm) 时为种间宽行模式，低于 (ZJ<50 cm) 则为种间窄行模式。除 5 个间作行距模式外，增设单作玉米和马铃薯行距，分别为 75 cm、55 cm。7 个处理随机区组排列，重复 3 次，试验期 2 年。小区宽 4 m，长 10 m，面积为 40 m²，小区之间间隔 0.8 m，重复之间间隔 1 m。

所有处理的玉米和马铃薯播种方式、株距和田间管理均一致。其中，玉米株距为 20 cm，间作种植密度为 47 580 株/hm²、单作为 62 100 株/hm²，播种时间为 2013 年 5 月 2 日和 2014 年 5 月 4 日，采用打塘穴播，深度为 10 cm，底肥为过磷酸钙 (16%) 560 kg/hm²、尿素 (46.4%) 150 kg/hm² 和硫酸钾 (51%) 100 kg/hm²，并于拔节期和大喇叭口期分别追施尿素 (46.4%) 120 kg/hm²、240 kg/hm²；马铃薯株距为 35 cm，间作种植密度为 30 075 株/hm²、单作为 51 945 株/hm²，播种时间分别为 2013 年 4 月 2 日和 2014 年 4 月 4 日，采用开沟直播，深度为 20 cm，播种时施入底肥过磷酸钙 (P₂O₅: 16%) 350 kg/hm²、尿素 (总 N: 46.4%) 95 kg/hm² 和硫酸钾 (K₂O: 51 %) 65 kg/hm²，不追肥。玉米和马铃薯于播种当天浇水 1 次，保证出苗整齐。中耕除草、培土及病虫害防治等田间管理措施各处理均保持一致。玉米收获时间为 2013 年 10 月 7 日和 2014 年 10 月 8 日，马铃薯收获时间为 2013 年 8 月 17 日和 2014 年 8 月 16 日。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 数据采集

主要观测马铃薯初花期、盛花期、成熟期以及玉米拔节期、孕穗期、成熟期 (马铃薯收获后



注: 带宽 190 cm, ZJ 表示种间行距, ZN 表示种内行距。

Note: Stripe 190 cm, ZJ represents interspecific spacing, ZN represents intraspecific spacing.

图1 间作行距布局设计示意图

Fig. 1 Schematic diagram of row spacing under intercropping patterns

玉米恢复性生长)的生物量指标。观测时,在每个处理 1/3 小区处随机选取具有代表性的 10 个样株(以保证 2/3 处理群体内植株保持不变),齐地剪断,先用钢卷尺测定自然高度,带回实验室分离茎、叶,105 °C 杀青 30 min 后 70 °C 下烘至恒重,称重生物量;马铃薯块茎挖出后,快速在自来水下洗净,稍微晾干,用烘干法在 70 °C 下烘至恒重,称重。

1.3.2 间作优势分析

土地当量比 (LER) 计算: LER 是用来衡量相同面积上间作与单作相比的优势。本试验用 5 种间作模式,与面积相同的单作相比,计算 LER,公式^[27]为

$$LER = (Y_{mi}/Y_{ms}) + (Y_{pi}/Y_{ps})$$

式中, Y_{mi} 和 Y_{pi} 表示间作时玉米和马铃薯收获的经济产量, Y_{ms} 和 Y_{ps} 分别表示玉米、马铃薯单作收获的经济产量。LER > 1, 表示间作有优势; LER 值越大,表征间作优势越强;反之,间作优势较弱。

系统生产力 (SP) 计算: 以经济产量为基础,用 2 种间作作物经济产量的加权平均值 (system productivity, SP, kg/hm²) 评价 5 个间作模式的间作优势,公式^[28]为

$$SP = Y_{mi} \cdot Z_m + Y_{pi} \cdot Z_p$$

式中, Y_{mi} 和 Y_{pi} 表示间作玉米和马铃薯的经济产

量; Z_m 和 Z_p 为玉米和马铃薯在间作系统中所占的面积比例,本试验中, $Z_m = 0.56$, $Z_p = 0.44$ 。SP 值越大,表示间作系统的相对生产力越高;反之,相对生产力越低。

1.3.3 种间关系分析

种间相对关系指数 (RII) 计算: 以生物量为基础,采用种间相对关系指数 RII (relative interaction index) 衡量间作条件下两种作物的竞争能力,公式^[23]为

$$RII = (B_i - B_s) / (B_i + B_s)$$

式中, B_i 表示玉米和马铃薯间作条件下的生物量, B_s 表示玉米和马铃薯单作条件下的生物量。当 RII > 0, 表示作物在间作条件下得到的互利效应大于竞争效应,值越大表征群体互利效应越大,反之越小;当 RII < 0, 表示作物在间作条件下得到的竞争效应大于互利效应,绝对值越大表征间作群体中种间竞争能力越强,反之,表示种间竞争能力越弱;RII = 0, 表示作物在间作条件下未受影响。

间作群体马铃薯干物质转化率 (DMME) 和贡献率 (DMCR) 计算: 本试验以块茎干物质积累为基础,采用玉米马铃薯共生期内竞争较为激烈的初花期和盛花期的营养器官干物质转移率和贡献率指标,评价不同间作模式对马铃薯产量的影响。本评价基于马铃薯干物质的积累首先通过光

合作用将合成的有机物分配并输送到块茎，其次通过植株营养器官贮存的有机物慢慢转运和转移至块茎。因此，假设马铃薯营养器官干物质全部转移到块根的情况下，营养器官干物质转移率及贡献率的计算公式^[18]为

营养器官干物质转移率 (DMME/%)=(初或盛花期干物重-成熟期干物重)/初或盛花期干物重×100;

营养器官干物质贡献率 (DMCR/%)=(初或盛花期干物重-成熟期干物重)/成熟期块茎干物重×100。

DMME 和 DMCR 数值越大，表征间作群体越有利于马铃薯块茎干物质积累；反之，则不利。

间作群体对玉米恢复性生长计算：由于马铃薯先播种 30 d，为掌握马铃薯对后播种玉米生长的影响，以生物量积累为基础，采用相对生长速率 (relative growth rate, RGR) 进行评价，其公式^[24]为

$$RGR=1/W_1 \times (W_2 - W_1) / (t_2 - t_1)。$$

式中， W_1 、 W_2 分别表示玉米在 t_1 、 t_2 时的生物量，g； t_1 和 t_2 分别表示 2 个测定时期，d。本试验中， $t_2 - t_1$ 为两个时间段，第 1 个 $t_2 - t_1 = 35$ d，表示玉米拔节期 (t_1) 到吐丝期 (t_2) (此阶段马铃薯为初花期—块茎膨大期)，第 2 个 $t_2 - t_1 = 50$ d，表示玉米吐丝期 (t_1) 到乳熟期 (t_2) (此阶段马铃薯为

成熟期—收获期)。值越大表征间作群体中玉米恢复性生长能力越强；反之，越小。

1.4 数据处理和统计分析

数据处理和作图采用 Excel 2007，统计分析采用 SPSS 17.0 中的单因素方差分析 (ANOVA, Duncan)，处理间均值的多重比较采用 LSD 法进行显著性检验，显著水平均为 $P < 0.05$ ，对方差不齐的变量进行自然对数转换，文中显示的均值为实测值，样本重复次数为 15 次。

2 结果与分析

2.1 行距变化对成熟期作物产量和间作优势的影响

通过间作优势分析发现：无论行距大小，玉米/马铃薯间作产量的土地当量比 (LER) 均大于 1，表明 5 种间作模式都有间作优势，但行距模式显著影响间作优势，即与常规模式 (ZJ=50 cm) 相比，种间宽行模式 (ZJ>50 cm) 玉米马铃薯产量和系统生产力均比种间窄行模式 (ZJ<50 cm) 低 (表 1)。

5 种间作模式中，随着种间行距 (ZJ) 从 70 cm 减小到 30 cm、种内行距 (ZN) 从 25 cm 增加到 65 cm，玉米和马铃薯产量逐渐增加，间作优势逐渐增大，生产力优势逐渐提高。其中，ZJ40 cm +

表 1 不同处理作物系统生产力及作物产量差异 (mean±SE)

Tab. 1 Differences in crop system productivity and crop yield under different treatments

年份 year	处理 treatment	产量/(kg·hm ⁻²) yield		系统生产力 system production	
		马铃薯产量 yield of potato	玉米产量 yield of maize	间作优势 LER	生产力优势 SP
2013	ZJ70+ZN25	13 340±222 a	6 042±529 a	1.23±0.05 a	9 254±251 a
	ZJ60+ZN35	13 817±131 b	6 026±560 a	1.25±0.05 a	9 454±348 a
	ZJ50+ZN45	13 892±84 b	7 228±215 b	1.38±0.02 b	10 194±133 b
	ZJ40+ZN55	14 135±92 c	7 335±134 b	1.40±0.03 b	10 327±110 b
	ZJ30+ZN65	14 050±122 c	7 049±487 b	1.37±0.03 b	10 130±243 b
	Ms	—	9 928±297 c	—	—
	Ps	21 573±929 d	—	—	—
2014	ZJ70+ZN25	11 534±428 a	6 782±269 a	1.21±0.06 a	8 873±99 a
	ZJ60+ZN35	11 951±448 a	6 834±335 a	1.23±0.09 a	9 086±188 a
	ZJ50+ZN45	12 194±182 b	7 051±395 a	1.27±0.04 a	10 038±214 b
	ZJ40+ZN55	13 530±600 b	8 281±555 b	1.42±0.04 b	10 332±358 b
	ZJ30+ZN65	12 942±264 b	7 294±419 b	1.36±0.04 b	10 014±161 b
	Ms	—	10 184±127 c	—	—
	Ps	21 236±619 c	—	—	—

注：ZJ为玉米马铃薯之间的种间行距，ZN为玉米马铃薯之间的种内行距；同列数据中小写字母表示差异为显著水平 ($P < 0.05$, Duncan)；下同。
Note: ZJ represents interspecific spacing and ZN represents intraspecific spacing of maize and potato; values in the same column followed by different capitals at 0.01 levels in Duncan test; the same as below.

ZN55 cm 的种间窄行间作模式平均产量最高, 马铃薯为 13 833 kg/hm²、玉米为 7 808 kg/hm², LER 平均最大为 1.41, SP 为 10 329.5; 与最低的种间宽行模式 ZJ70 cm+ZN25 cm 相比, 马铃薯平均提高了 10.2%, 玉米提高了 17.9%, LER 提高了 13.5%, SP 提高了 12.3%; 但当 ZJ 从 40 cm 减小至 30 cm、ZN 从 55 cm 增加到 65 cm 时, 玉米马铃薯的产量优势和系统生产力不再增加, 大小为 ZJ40 cm > ZJ30 cm > ZJ50 cm > ZJ60 cm > ZJ70 cm。总体上, 随着玉米马铃薯的种间行距 (ZJ) 缩小、种内行距 (ZN) 增加, 两作物产量随之增加, 间作群体产量优势更加明显, 间作优势更加突出, 系统生产力更高, 当间距为 40 cm 时, 优势不再增加, 即种间窄行模式 (ZJ < 50 cm) 在提高作物产量、发挥间作优势及提高系统生产力方面均优于种间宽行模式 (ZJ > 50 cm)。说明种间窄行模式更能发挥玉米马铃薯 2 : 2 的间作优势, 提高单位面积的产量和系统生产力, 其分界点在间距 40 cm 处。

2.2 行距变化对共生期内两作物相对竞争力的影响

由于马铃薯先播种 30 d, 对后播种的玉米生长产生了一定的影响。由表 2 所示: 在玉米拔节期前随着种间行距从 70 cm 减小到 30 cm、种内行距从 25 cm 增加到 65 cm, 马铃薯的竞争能力逐渐增加 (-0.06~0.01), 玉米逐渐减弱 (-0.04~-0.23), 种间窄行模式 (ZJ < 50 cm) 马铃薯的平均 RII (0.15~0.18) 比种间宽行模式 (ZJ > 50 cm) 的 RII (-0.04~0.04) 大; 玉米则相反, 种间窄行模式的

竞争效应 (RII 为 -0.13~-0.11) 大于种间宽行模式 (RII 为 -0.03~-0.05), 处理间差异显著 ($P < 0.05$); 随着生育期推进, 盛花期, 种间窄行模式马铃薯 RII (0.04~0.08) 仍比种间宽行模式 (-0.08~0.00) 大, 而此时已进入吐丝期的玉米, 种间竞争效应已消减, 互利效应逐渐凸显 (RII 为 -0.02~0.04), 但处理间差异不显著; 马铃薯收获期和玉米灌浆期, 两作物除 ZJ70 cm+ZN25 cm 外均表现为种间互利效应, 差异不显著。整个观测期内, 马铃薯的种间互利效应均比玉米显著 (RII > 0, $P < 0.01$), 其中, 种间宽行模式的 ZJ70 cm+ZN25 cm 处理, 其马铃薯和玉米均表现竞争效应 (RII < 0), 这可能是因为种间距离大、种内距离小, 使其种内竞争大于种间互利效应所致; 总体来说, 种间行距 40 cm+种内行距 55 cm 处理的马铃薯 (RII 为 0.05~0.13) 和玉米 (RII 为 -0.19~0.04) 的竞争能力均较强。

综上所述, 在两作物共生期内, 马铃薯初花期和玉米拔节期是两作物种间竞争的胶着期, 种间窄行模式的马铃薯比种间宽行模式的竞争力强, 而玉米则弱, 最大竞争力在间距 40 cm 处; 随着生育期推进, 种间窄行模式中两种作物的竞争能力相互消减, 但马铃薯竞争能力均大于玉米。

2.3 行距变化对马铃薯干物质转移率和贡献率的影响

不同处理马铃薯在共生期内表现出的种间互利效应和竞争效应, 最终通过间作优势 (表 1) 和干物质转移率 (DMME) 及贡献率 (DMCR) (表 3) 体现。5 种间作模式中, 随着种间行距缩小, DMME 和 DMCR 随之增大, 种间窄行模式比种

表 2 不同处理对玉米和马铃薯相对竞争能力 (RII) 的影响
Tab. 2 Effect of different intercropping treatments on the relative interaction index (RII) of maize and potato

年份 year	处理 treatment	马铃薯 potato			玉米 maize		
		初花期 early flowering	盛花期 flowering	收获期 harvest	拔节期 jointing	吐丝期 booting	乳熟期 milk stage
2013	ZJ70+ZN25	-0.06±0.01 a	-0.04±0.01 a	-0.01±0.00 a	-0.04±0.01 c	-0.02±0.00 a	-0.02±0.01 a
	ZJ60+ZN35	0.01±0.00 b	0.01±0.00 b	0.02±0.00 a	-0.09±0.02 b	0.01±0.00 a	0.02±0.00 a
	ZJ50+ZN45	0.01±0.00 b	0.06±0.01 c	0.02±0.00 a	-0.09±0.02 b	0.03±0.01 a	0.02±0.00 a
	ZJ40+ZN55	0.13±0.02 c	0.10±0.02 c	0.05±0.01 a	-0.19±0.03 a	0.04±0.01 a	0.01±0.00 a
	ZJ30+ZN65	0.09±0.03 c	0.07±0.02 c	0.04±0.01 a	-0.23±0.04 a	0.02±0.00 a	0.01±0.00 a
2014	ZJ70+ZN25	-0.02±0.00 a	-0.13±0.02 a	-0.02±0.00 a	-0.01±0.00 b	-0.02±0.00 a	-0.02±0.01 a
	ZJ60+ZN35	0.06±0.01 b	-0.01±0.00 b	0.02±0.00 a	-0.01±0.00 b	0.01±0.00 a	0.01±0.00 a
	ZJ50+ZN45	0.10±0.03 b	0.01±0.00 b	0.03±0.01 a	-0.03±0.01 b	0.02±0.00 a	0.02±0.00 a
	ZJ40+ZN55	0.23±0.04 c	0.06±0.01 c	0.04±0.01 a	-0.02±0.00 b	0.04±0.01 a	0.02±0.00 a
	ZJ30+ZN65	0.22±0.03 c	0.01±0.00 b	0.03±0.00 a	-0.16±0.04 a	0.01±0.00 a	0.01±0.00 a

间宽行模式 (ZJ>50 cm) 高, 最高点为 ZJ=40 cm。其中, 两年初花期和盛花期 DMME 和 DMCR 的平均最大值为 ZJ40cm+ZN55 cm 处理, 分别为 32.6% 和 25.5%, 比 ZJ70 cm+ZN25 cm 的平均最小值 19.8% 和 13.4% 分别提高了 39.5% 和 47.7%, 处理间差异显著 ($P < 0.05$)(表 3)。说明种间窄行模式比种间宽行模式更能提高马铃薯干物转移率和贡献率, 其分界点为种间行距 40 cm。

表 3 不同处理马铃薯干物质转移率 (DMME) 和贡献率 (DMCR) 的差异
Tab. 3 Differences in dry matter transfer rate (DMME) and contribution rate (DMCR) of potato under different treatments

年份 year	处理 treatment	初花期 early flowering				盛花期 flowering			
		DMME/%	比 ZJ70 高/%	DMCR/%	比 ZJ70 高/%	DMME/%	比 ZJ70 高/%	DMCR/%	比 ZJ70 高/%
2013	ZJ70+ZN25	23.9±2.4 a	—	15.1±1.5 a	—	25.9±5.6 a	—	17.6±2.2 a	—
	ZJ60+ZN35	27.4±2.3 b	12.9	17.4±1.7 a	13.5	32.6±2.8 b	20.4	22.5±2.7 ab	22.0
	ZJ50+ZN45	32.4±1.7 c	26.3	22.1±1.9 ab	31.7	36.0±2.5 c	27.9	26.7±1.6 b	34.3
	ZJ40+ZN55	36.8±3.5 c	35.0	30.4±2.7 b	50.5	37.3±3.5 c	30.4	30.3±3.1 b	42.0
	ZJ30+ZN65	35.2±1.6 c	32.2	26.4±1.5 b	42.9	36.7±2.5 c	29.4	27.4±2.3 b	22.0
	Ps	24.4±1.4 ab	1.8	16.3±1.3 a	7.3	25.5±2.4 a	-1.7	17.4±1.7 a	-0.9
2014	ZJ70+ZN25	19.3±1.9 a	—	12.5±1.4 a	—	10.1±2.7 a	—	8.2±1.6 a	—
	ZJ60+ZN35	19.4±2.6 a	0.4	13.1±2.2 a	4.6	11.4±1.2 a	11.4	8.5±2.1 a	3.5
	ZJ50+ZN45	29.1±1.5 b	33.6	22.7±2.3 b	44.9	21.4±2.6 c	52.6	15.4±2.7 b	46.9
	ZJ40+ZN55	29.5±1.6 b	34.0	22.6±2.2 b	44.6	26.9±2.8 c	62.5	18.7±2.6 c	56.1
	ZJ30+ZN65	29.2±2.2 b	34.6	20.8±1.5 b	39.9	17.7±2.6 b	43.1	12.2±1.7 b	32.8
	Ps	17.2±2.6 a	-12.2	9.5±1.6 a	-31.5	11.1±1.7 a	9.0	7.9±1.3 a	-3.9

2.4 行距变化对间作群体玉米恢复性生长的影响

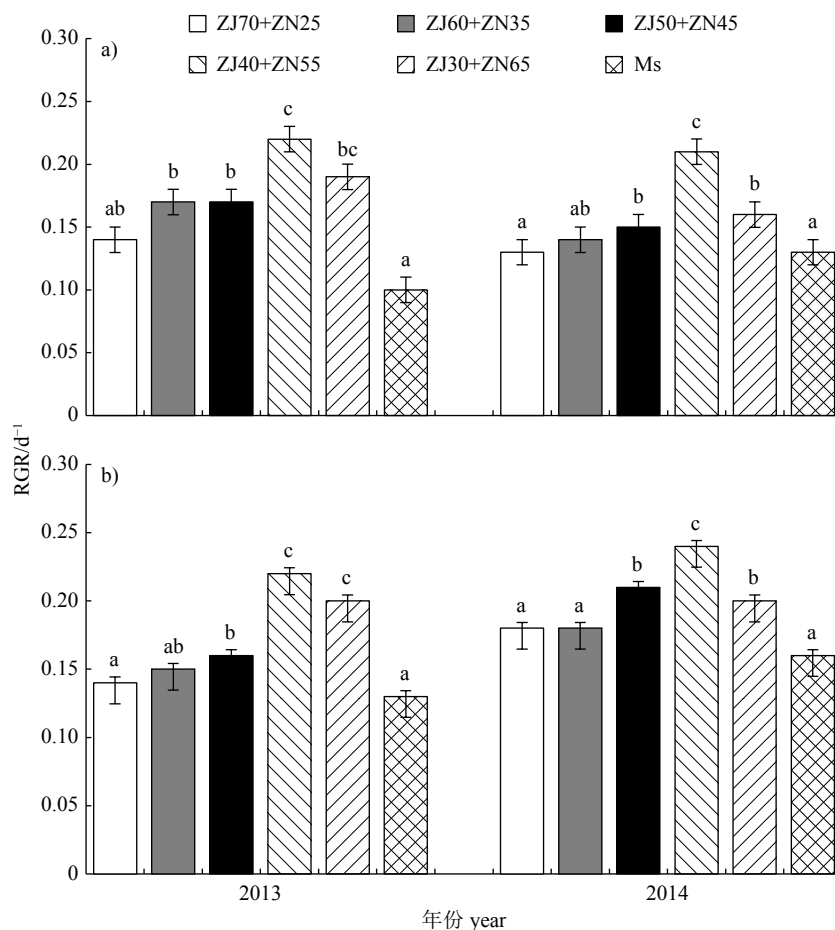
为进一步了解后播种 30 d 玉米在不同处理中的生长情况, 对其进行恢复性生长能力 (RGR) (图 2) 分析发现: 5 种间作模式在拔节期—吐丝期和吐丝期—乳熟期的 RGR, 最大为 ZJ40 cm+ZN55 cm 的 0.22 d⁻¹ 和 0.23 d⁻¹, 比最小 ZJ70 cm+ZN25 cm 的 0.14 d⁻¹ 和 0.16 d⁻¹ 分别提高了 37% 和 30%; 第二为 ZJ30 cm+ZN65 cm 的 0.18 d⁻¹ 和 0.20 d⁻¹, 比 ZJ70 cm+ZN25 cm 提高了 23% 和 20%; 第三为 ZJ50 cm+ZN45 cm 的 0.16 d⁻¹ 和 0.19 d⁻¹, 比 ZJ70 cm+ZN25 cm 提高了 15% 和 13%; 处理间差异显著 ($P < 0.05$); 整体看, 种间窄行模式 (ZJ<50 cm) 玉米的 RGR 比种间宽行模式 (ZJ>50 cm) 的大, 最大为 ZJ=40 cm, 最小为 ZJ=70 cm, 大小分界点为 ZJ=40 cm。由此可见, 种间窄行模式的玉米恢复性生长能力比种间宽行模式恢复能力强, 分界点为间距 40 cm。

3 讨论

间套作体系中, 调节作物的行距其实就是构建合理的空间布局, 减少群体的竞争效应, 发挥群体的互利效应, 达到提高间套作优势和系统生产力的目的^[5]。赵建华等^[12]通过设置豌豆/玉米间

作种植体系中玉米 5 种行距 (0、20、40、60 和 80 cm) 发现: 间作体系产量随玉米行距增大, 产量先增后降, 产量峰值出现在玉米行距 40 cm 时; 杨峰等^[29]在带宽 200 cm 下, 设置玉米窄行行距为 20、40、60 和 80 cm 进行玉米—大豆宽窄行套作研究, 发现随玉米窄行变宽, 玉米产量逐渐增加, LER 最大值为行距 40 cm。本研究以生产中广泛应用的种间行距 50 cm 为基准, 在固定带宽 190 cm 下, 设置种间宽行行距为 70 cm、60 cm (ZJ >50 cm) 和种间窄行行距为 40 cm、30 cm (ZJ <50 cm) 以及与之匹配的种内行距为 25 cm、35 cm 和 55cm、65 cm 的 5 种行距布局, 研究种间种内行距的变化对产量变化和种间关系的影响, 结果显示: ZJ<50 cm 的种间窄行模式的产量和生产力优势比种间宽行模式高, 产量和生产力最高为种间行距 40 cm (ZJ40 cm+ZN55 cm) 的处理, 这一结果与前人在其他间作系统中的研究结果一致。由此可见, 玉米马铃薯间距 40 cm、两作物行距 55 cm 的空间布局, 更能发挥作物群体的互利效应, 提高间作优势和系统生产力。

间作优势的发挥, 一方面, 主要通过调控合理的行间距, 降低种间竞争, 提高作物产量而获得较高的生产力^[5, 14-15]; 另一方面, 通过调节播



注: a) 拔节期—吐丝期; b) 吐丝期—乳熟期; 不同小写字母代表差异为显著水平 ($P < 0.05$)。

Note: a) jointing to silking stage; b) silking to physiological maturity stage; histograms capped with different letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

图2 行距变化对玉米相对生长速率 (RGR) 的影响

Fig. 2 Effect of row spacing pattern on relative growth rate (RGR) of maize

期, 使高产作物在竞争中取得最好的产量优势^[14, 27]。赵建华等^[14, 30]设置5种玉米行距(10、20、45、60和70 cm), 研究玉米行距对大豆/玉米间作产量及种间竞争力的影响发现: 随玉米行距增加, 玉米产量、系统生产力(SP)随之提升, 种间相对竞争力随之增加, 而间作大豆产量随之下降, 其中, 竞争力平衡点为行距45 cm; 王健康^[9]通过设置豌豆带与玉米带的3种间距(15、30和45 cm)与不施氮肥和施氮肥相结合, 研究不同间距对玉米间作豌豆对氮素竞争互补的调控效应, 发现间距为30 cm的处理无论施氮与否复合产量最高, 种间竞争能力最小, 群体生物量较大。本研究对玉米马铃薯常规模式(2:2行比、间距50 cm、带宽190 cm)进行种间种内的行距调整, 通过研究发现: 两作物产量随种间行距减小而逐渐增大, 最大为间距40 cm+行距55 cm的处理,

其中, 种间窄行模式(ZJ<50 cm)比种间宽行模式高; 两作物竞争力, 随着种间行距从大到小, 前期马铃薯的竞争能力(RII)逐渐加大、玉米的逐渐缩小, 中后期玉米加大、马铃薯减小, 后期两者趋于一致; 玉米恢复性生长速率随间距减小而逐渐增加, 拐点依然在间距40 cm的处理。这一结果与赵建华等^[14, 30]、王健康等^[9]的研究结果类似。另外, BEGUM等^[24]通过设置马铃薯、玉米同时播种和马铃薯先播种(10、20、30和40 d), 研究不同播期对两作物间作产量的影响发现: 马铃薯先播种30 d的处理, 马铃薯和玉米的产量比其他间作模式高, 经济效益最好。本研究中, 仅研究常规农业中马铃薯先播种30 d的情况, 结果显示: 种间窄行模式产量、种间竞争力(前期)、马铃薯干物质转移率和贡献率以及玉米恢复性生长率均优于种间宽行模式, 综合优势最好为

ZJ40 cm+ZN55 cm 处理,这一结果与 BEGUM 等^[24]的研究结果相吻合。因此,鉴于本研究间作模式在云南种植面积较大,研究结果对试验地区及相似地区两作物间作增产的应用和推广具有一定的现实意义。

本研究是基于马铃薯先播种 30 d 的基础上进行种间、种内行距调整得到的结果。由于作物播期不同,形成的田间布局和作物群体结构各异。因此,不同播期下,2:2 行比、190 cm 带宽是否存在种间窄行模式的间作优势和系统生产力比种间宽行模式优势更突出的结果还需进一步研究。

综上所述,云南省农业生产中应用较为广泛的马铃薯先播种 30 d、玉米后播种的间作模式(2:2 行比、间距 50 cm、带宽 190 cm),增减种间和种内的相对行距能够显著地影响间作产量优势和种间关系,即随种间行距从 70 cm 减小至 30 cm、种内行距从 25 cm 增加至 65 cm,两作物产量和间作优势增加:种间竞争力表现为前期马铃薯强、玉米弱,中后期慢慢趋于相近;马铃薯干物质转移率和贡献率较高,玉米恢复性生长能力随之提高。总体上,种间行距 30~50 cm、种内行距 55~65 cm 的种间窄行模式(ZJ<50 cm)比种间行距 60~70 cm 和种内行距 25~35 cm 的种间宽行模式(ZJ>50 cm)两作物产量和间作优势突出,大小拐点在种间行距 40 cm 和种内行距 55 cm 处,此种间和种内行距下可获得最好间作优势和系统生产力。这一规律是否在马铃薯与玉米播种间隔小于或大于 30 d 下存在还需进一步研究。

[参考文献]

- [1] MARTIN M O, PAQUETTE A, DUPRAS J, et al. The new green revolution: sustainable intensification of agriculture by intercropping[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 615: 767. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2017.10.024](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.024).
- [2] LAL R. Sustainable intensification of China's agroecosystems by conservation agriculture[J]. *International Soil & Water Conservation Research*, 2018, 6(1): 1. DOI: [10.1016/j.iswcr.2017.11.001](https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.11.001).
- [3] FRANCO J G, KING S R, VOLDER A. Component crop physiology and water use efficiency in response to intercropping[J]. *European Journal of Agronomy*, 2018, 93: 27. DOI: [10.1016/j.eja.2017.11.005](https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.11.005).
- [4] DU J B, HAN T F, GAI J Y, et al. Maize-soybean strip intercropping: achieved a balance between high productivity and sustainability[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(4): 747. DOI: [10.1016/s2095-3119\(17\)61789-1](https://doi.org/10.1016/s2095-3119(17)61789-1).
- [5] 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. DOI: [10.13930/j.cnki.cjea.16006](https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.16006).
- [6] 魏珊珊, 王祥宇, 董树亭. 株行距配置对高产夏玉米冠层结构及籽粒灌浆特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(2): 441.
- [7] 裴建峰, 张海红, 李鸿萍, 等. 不同行距配置方式对夏玉米冠层结构和群体抗性的影响[J]. *作物学报*, 2016, 42(1): 104. DOI: [10.3724/SP.J.1006.2016.00104](https://doi.org/10.3724/SP.J.1006.2016.00104).
- [8] YANG F, LIAO D P, FAN Y F, et al. Effect of narrow-row planting patterns on crop competitive and economic advantage in maize-soybean relay strip intercropping system[J]. *Plant Production Science*, 2016, 20(1): 1. DOI: [10.1080/1343943x.2016.1224553](https://doi.org/10.1080/1343943x.2016.1224553).
- [9] 王建康. 间距对玉米间作豌豆氮素竞争互补的调控效应[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2014.
- [10] 刘兆新, 刘婷如, 刘妍, 等. 小麦行距配置对套种花生生理特性和产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(6): 1951.
- [11] YANG F, LIAO D P, WU X L, et al. Effect of above-ground and belowground interactions on the intercrop yields in maize-soybean relay intercropping systems[J]. *Field Crops Research*, 2017, 203: 16. DOI: [10.1016/j.fcr.2016.12.007](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.12.007).
- [12] 赵建华, 孙建好, 李隆, 等. 改变玉米行距种植对豌豆/玉米间作体系产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(11): 1451. DOI: [10.3724/SP.J.1011.2012.01451](https://doi.org/10.3724/SP.J.1011.2012.01451).
- [13] LV Y, FRANCIS C, WU P T, et al. Maize-soybean intercropping interactions above and below ground[J]. *Crop Science*, 2014, 54(3): 914. DOI: [10.2135/cropsci2013.06.0403](https://doi.org/10.2135/cropsci2013.06.0403).
- [14] 赵建华, 孙建好, 樊廷录, 等. 玉米行距对大豆/玉米间作产量及种间竞争力的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(3): 159. DOI: [10.7606/j.issn.1000-7601.2015.03.26](https://doi.org/10.7606/j.issn.1000-7601.2015.03.26).
- [15] HUANG C D, LIU Q Q, GOU F, et al. Plant growth patterns in a tripartite strip relay intercrop are shaped by asymmetric aboveground competition[J]. *Field Crops Research*, 2017, 201: 41. DOI: [10.1016/j.fcr.2016.10.021](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.10.021).
- [16] SADEGHPOUR A, JAHANZAD E, ESMAEILI A, et al. Forage yield, quality and economic benefit of intercropped barley and annual medic in semi-arid conditions: Additive series[J]. *Field Crops Research*, 2013, 148: 43. DOI: [10.1016/j.fcr.2013.03.021](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.03.021).
- [17] 宋贺, 金文俊, 车钊, 等. 种植行距和品种对玉米根际反硝化菌群丰度和功能的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(3): 391. DOI: [10.13930/j.cnki.cjea.160882](https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160882).
- [18] 周锋, 安瞳昕, 吴开贤, 等. 间作群体中玉米对马铃薯生长及竞争力的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(6): 105. DOI: [10.7606/j.issn.1000-7601.2015.06.18](https://doi.org/10.7606/j.issn.1000-7601.2015.06.18).
- [19] HAMDANI J S, SURADINATA Y R. Effects of row intercropping system of corn and potato and row spacing of corn on the growth and yields of Atlantic potato cultivar planted in medium altitude[J]. *Asian Journal of Agricultural Research*, 2015, 9(3): 104.

- [20] FAN Z W, AN T X, WU K X, et al. Effects of intercropping of maize and potato on sloping land on the water balance and surface runoff[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 166: 9. DOI: [10.1016/j.agwat.2015.12.006](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.12.006).
- [21] MA L, ZHU Q L, GENG C X, et al. Contribution of nutrient uptake and utilization on yield advantage in maize and potato intercropping under different nitrogen application rates[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(4): 1265. DOI: [10.13287/j.1001-9332.201704.026](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.201704.026).
- [22] KIDANE B Z, HAILU M H, HAILE H T. Maize and potato intercropping: a technology to increase productivity and profitability in Tigray[J]. *Open Agriculture*, 2017, 2(1): 411. DOI: [10.1515/opag-2017-0044](https://doi.org/10.1515/opag-2017-0044).
- [23] WU K X, FULLEN M A, AN T X, et al. Above and below-ground interspecific interaction in intercropped maize and potato: a field study using the 'target' technique[J]. *Field Crops Research*, 2012, 139: 63. DOI: [10.1016/j.fcr.2012.10.002](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.10.002).
- [24] BEGUM A A, BHUIYA M S U, HOSSAIN S M A, et al. system productivity of potato+maize intercropping as affected by sowing date[J]. *Bangladesh Agronomy Journal*, 2016, 19(2): 11. DOI: [10.3329/baj.v19i2.31848](https://doi.org/10.3329/baj.v19i2.31848).
- [25] 朱启林, 向蕊, 汤利, 等. 间作条件下施氮量对马铃薯光合特性的调控作用[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(5): 1391.
- [26] 马心灵, 朱启林, 耿川雄, 等. 不同氮水平下作物养分吸收与利用对玉米马铃薯间作产量优势的贡献[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(4): 1265. DOI: [10.13287/j.1001-9332.201704.026](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.201704.026).
- [27] 吴开贤, 安瞳昕, 范志伟, 等. 土壤氮异质性与种间地上竞争对玉米和马铃薯生长的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(12): 1571. DOI: [10.3724/SP.J.1011.2012.01571](https://doi.org/10.3724/SP.J.1011.2012.01571).
- [28] ZHANG Y T, LIU J, ZHANG J Z, et al. Row ratios of intercropping maize and soybean can affect agronomic efficiency of the system and subsequent wheat[J]. *PLoS One*, 2015, 10(6): e0129245. DOI: [10.1371/journal.pone.0129245](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0129245).
- [29] 杨峰, 娄莹, 廖敦平, 等. 玉米—大豆带状套作行距配置对作物生物量、根系形态及产量的影响[J]. *作物学报*, 2015, 41(4): 642. DOI: [10.3724/SP.J.1006.2015.00642](https://doi.org/10.3724/SP.J.1006.2015.00642).
- [30] 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. DOI: [10.13254/j.jare.2016.0245](https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0245).

责任编辑: 何承刚