

赵建华, 孙建好, 李 隆, 等. 玉米行距变化对间作系统生产力及玉米生长的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(2): 189-196.

ZHAO Jian-hua, SUN Jian-hao, LI Long, et al. Effects of Maize Row Spacing on System Productivity and the Growth of Intercropped Maize in Intercropping System[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(2): 189-196.

玉米行距变化对间作系统生产力及玉米生长的影响

赵建华¹, 孙建好^{1*}, 李 隆², 李伟琦¹

(1.甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 甘肃 兰州 730070; 2.中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘 要: 间作系统中作物种间距离的变化直接影响着系统的生产力, 因此, 合理的种间配置是间作获得高产的前提。本研究总结归纳了 2010 年甘肃武威和 2014 年甘肃张掖的小麦/玉米、蚕豆/玉米间作系统玉米行距试验, 旨在探明间作玉米在不同种植行距下对间作体系生产力的影响及玉米生长的差异。试验设置 5 个间作玉米的种植行距处理 (D0: 10 cm、D20: 20 cm、D40: 40 cm、D60: 60 cm、D80: 80 cm), 测定了作物产量、产量构成、生物量累积。结果表明: 间作玉米行距变化对间作配对作物产量无显著影响, 主要影响间作玉米产量; 2010 年, 两间作体系间作玉米产量、体系混合产量、系统生产力 (system productivity) 均以 D60 最高, 2014 年均以 D40 最高; 随玉米行距增大, 系统生产力先增加后减小, 拐点均出现在 D60; 玉米行距变化显著改变了玉米的穗粒数、百粒重、单株粒重; 小麦/玉米体系, 两年单株粒重峰值分别出现在 D60 (132 g·株⁻¹) 和 D40 (216 g·株⁻¹); 蚕豆/玉米体系均出现在 D40, 分别为 158 g·株⁻¹ (2010 年) 和 220 g·株⁻¹ (2014 年); 不同行距处理下玉米共生期和单独生长期生长速率均存在差异, 共生期各处理生长速率显著低于单独生长期, 无论哪个时期, D40 和 D60 处理的生长速率均占优。河西灌区小麦/玉米和蚕豆/玉米间作中玉米种植的最佳行距为 40 cm 和 60 cm, 此行距下间作系统可得到最大系统生产力。

关键词: 小麦/玉米间作; 蚕豆/玉米间作; 行距; 系统生产力; 生长速率

中图分类号: S344.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2017)02-0189-08

doi: 10.13254/j.jare.2016.0245

Effects of Maize Row Spacing on System Productivity and the Growth of Intercropped Maize in Intercropping System

ZHAO Jian-hua¹, SUN Jian-hao^{1*}, LI Long², LI Wei-qi¹

(1. Institute of Soil Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China; 2. College of Resource and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: The change for row spacing of intercropped maize directly affects production of intercropping system, therefore, it is necessary for high yield of intercropping system to match reasonable row spacing. Two field experiments (a experiment was conducted at Wuwei in 2010 and another at Zhangye in 2014 in Gansu Province) were carried out to determine the effect of row spacing of intercropped maize on intercropping system production and growth of intercropped maize in two intercropping systems (wheat/maize and faba bean/maize). The experiments included 5 maize row spacing treatments (D0: 0 cm, D20: 20 cm, D40: 40 cm, D60: 60 cm, D80: 80 cm), the yield, agronomy traits and growth of intercropped maize were investigated. The results showed that there were no significant effects of row spacing of intercropped maize on yield of intercropped companion crops, row spacing change mainly affected the yield of intercropped maize; the yield of intercropped maize, the total yield of intercropping system and SP (system productivity) under D60 in 2010 and D40 in 2014 were the greatest in both intercropping systems. With increasing of row spacing of intercropped maize, SP increased firstly, and then decreased, a inflection appeared at D60. The ear grain number, the 100-grains weight and grain weight per plant were significantly affected by different row spacing treatments, the peak value was 132 g·plant⁻¹ (D60) in 2010 and 216 g·plant⁻¹ (D40) in 2014 in wheat/maize intercropping system, and 158 g·plant⁻¹

收稿日期: 2016-10-12

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项 (201103003); 国家科技支撑计划项目 (2012BAD14B10)

作者简介: 赵建华 (1980—), 男, 甘肃兰州人, 博士研究生, 主要从事作物栽培方面的研究。E-mail: zhaojianhuatt@163.com

* 通信作者: 孙建好 E-mail: sunjianhao@126.com

(D40) in 2010 and $220 \text{ g} \cdot \text{plant}^{-1}$ (D40) in 2014 in faba bean/maize intercropping system. The growth rate of intercropped maize during co-growth period was significant lower than those during single growth period, the growth rate under D40 and D60 was always greater than other treatments in any sampling period. Therefore, the reasonable row spacing of intercropped maize was 40 cm and 60 cm in wheat/maize and faba bean/maize intercropping in Hexi corridor, the system production was the greatest.

Keywords: wheat/maize intercropping; faba bean/maize intercropping; row spacing; system productivity; growth rate

20 世纪八九十年代, 间作这种高产种植方式在甘肃河西灌区被广泛采用, 是当地增产增收的主要种植方式。虽然随着农业发展、产业结构调整、资源条件限制等因素而导致间作种植在甘肃河西灌区种植面积缩减, 但是在河西灌区已有的种植模式中, 小麦/玉米和蚕豆/玉米间作依然是当地农户较常采用的种植模式。

间作是 2 种或 2 种以上作物组成的复合群体, 当作物种植在一起时, 作物种间的交互作用必然发生, 这种作用有种间竞争作用, 也有促进作用^[1-3], 作物间的竞争互补正是复合群体产量优势表现的内在因素。同时, 间作为资源需求特性不同的作物提供了从时间和空间利用生态位分异的基础^[4], 促成了种间互补对相关资源的高效利用^[5], 因此, 对于复合群体作物配置的要求直接影响到系统生产力。

另外, 诸多研究表明, 在间作体系中生育期不同的 2 种作物, 当早熟作物收获后, 可以形成时间和空间上的补偿效应, 使作物在间作共生期内由竞争造成的生长抑制得以恢复^[6]。也就是说, 早熟作物在作物共同生长期内受益, 然而, 当早熟作物收获后, 后熟作物会得到一个生长补偿和恢复, 而生长的补偿和恢复是发生在早熟作物收获后直至后熟作物收获^[7-9]。那么这样的恢复生长是否要建立在间作复合群体中作物种植行距的合理配置上呢? 当间作体系中作物种植行距变化的情况下, 这样的生长又会发生怎样的变化?

综上, 如何合理的调配间作体系中作物种间距离, 如何进行复合群体内作物生育期的合理搭配是提高间作体系生产力的关键。针对小麦/玉米, 蚕豆/玉米间作体系作物竞争和互补的研究很多, 如齐万海等^[10]研究不同隔根方式对小麦/玉米间作体系作物产量的影响; 殷文等^[11]研究了秸秆还田后少耕对小麦/玉米间作体系中作物竞争和互补的影响; 郝艳如等^[12]也采用隔根对小麦/玉米间作体系作物生长进行了研究; 李玉英等^[13]研究了蚕豆/玉米间作体系的种间竞争和互补作用。针对间作系统种间距离也有广泛的研究, 如王建康^[14]对不同种间距离下豌豆/玉米间作体系进行研究, 发现当豌豆与玉米的种间距离为 30 cm 时间

作物产量最高。以上研究多是基于一定种植行距条件下进行的种间关系的研究, 而针对间作体系中作物种植行距变化对系统生产力及组分作物产量影响的研究甚少。因此, 本研究以小麦/玉米和蚕豆/玉米间作体系为研究对象, 总结归纳 2010 年在甘肃武威和 2014 年在甘肃张掖做的间作行距试验, 初步剖析间作玉米种植行距变化对系统生产力及间作玉米生长的影响, 旨在为间作体系中玉米行距合理配置和提高间作系统生产力提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

2010 年试验在甘肃农业科学院武威白云试验站实施, 位于甘肃省武威市永昌镇白云村三组 ($38^{\circ}37' \text{N}$, $102^{\circ}40' \text{E}$), 距离武威市以北 15 km, 海拔 1 504 m; 无霜期 150 d 左右; 年降水量 150 mm, 主要集中在 7—9 月份, 玉米生长季降水 135 mm, 年蒸发量 2 021 mm; 年平均气温 7.7°C , 日照时数 3 023 h, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温 $3 016^{\circ}\text{C}$; 供试土壤为石灰性灌漠土, pH 值 8.8, 耕层土壤含有机质 $19.14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮 $1.18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $68.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷 $17.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $233 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2014 年试验在甘肃省农业科学院张掖节水农业试验站实施, 位于甘肃省张掖市小满镇 ($38^{\circ}56' \text{N}$, $100^{\circ}26' \text{E}$), 距离张掖市以南 10 km, 海拔 1 570 m; 无霜期 153 d; 年降水量不足 130 mm, 主要集中在 6—8 月份, 玉米生长季降水 118 mm, 年平均蒸发量 2 075 mm; 年平均气温 7°C , 日照时数 3 085 h, 昼夜温差 $13.00 \sim 16.07^{\circ}\text{C}$, $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温 $3 388^{\circ}\text{C}$, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 $2 896^{\circ}\text{C}$; 供试土壤为石灰性灌漠土, pH 值 8.2, 耕层土壤含有机质 $17.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效氮 $128.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷 $24.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $82.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

以小麦/玉米、蚕豆/玉米间作系统为研究对象, 设置 5 个间作玉米种植行距(D)处理, 即 0、20、40、60、80 cm, 分别用 D0、D20、D40、D60、D80 代表(图 1), 此时配对作物与玉米的种间距离分别为 40、30、20、10、

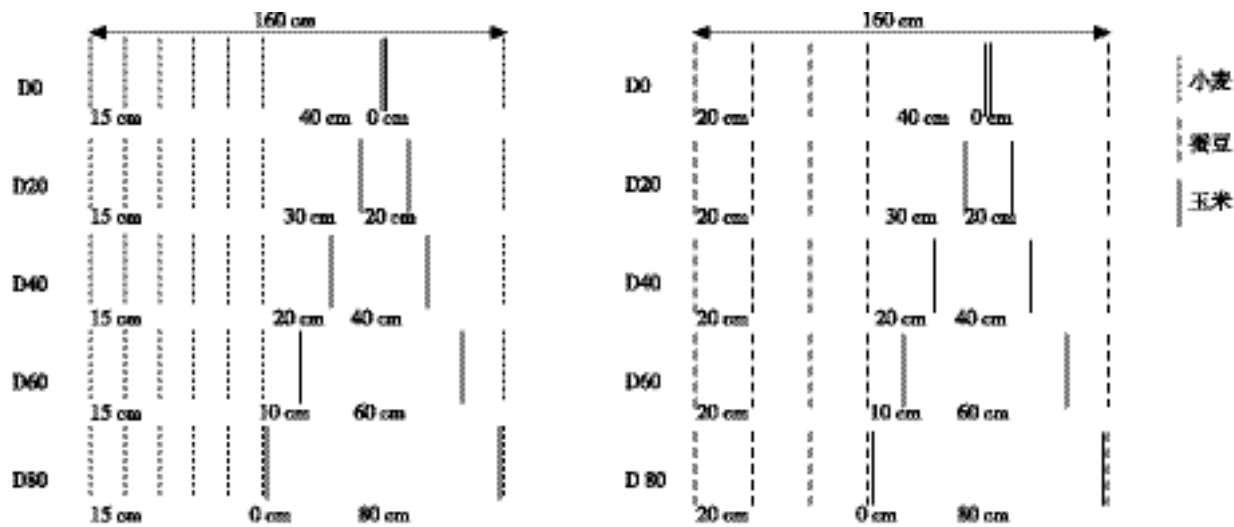


图 1 不同处理作物种植示意图

Figure 1 The sketch of planting arrangement of crops under different treatments

0 cm;各处理 3 次重复,完全随机区组排列。施肥量为 $240 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中 50%基施,50%在玉米大喇叭口期追施, P_2O_5 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,一次性基施。其他田间管理均一致,保证生长时期的充分灌水,并人工除草。

小麦/玉米间作采用 6:2 行比(6 行小麦,2 行玉米)种植,蚕豆/玉米间作采用 4:2 行比(4 行蚕豆,2 行玉米)种植,带幅均为 1.6 m,每小区种植 3 个组合带。小麦行距 15 cm,按行均匀撒播;蚕豆行株距均为 20 cm,人工穴播;玉米采用点播器点播以控制行距,株距 25 cm,出苗后间苗以保证 1 穴 1 株,种植时行距为 0 的处理让 2 种植行尽量靠近。2010 年试验小区面积 48 m^2 ,2014 年小区面积 19.2 m^2 。小麦播种收获时间 2010 年分别为 3 月 26 日,7 月 18 日;2014 年分别为 3 月 26 日,7 月 23 日;玉米播种收获时间 2010 年分别为 4 月 21 日,10 月 10 日;2014 年分别为 4 月 19 日,11 月 1 日。小麦品种 2010 年试验为陇春 25,2014 年试验为永良 4 号;蚕豆品种 2010 年、2014 年均为临蚕 5 号,玉米品种 2010 年为郑单 958,2014 年为先玉 335。

1.3 样品采集及方法

收获时以每小区中间种植带为计产带(避免边行优势)进行实收测产,同时在计产带以外随机取 10 株玉米进行农艺性状的考察;株高、穗位用卷尺进行测量,穗行数、行粒数人工计数,玉米棒带回风干至恒重,脱粒后称籽粒重折算单株粒重,人工数 100 粒称重得百粒重;自玉米苗期起每隔 20 d 进行地上部生物量的测定,测定时小麦以 $0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ 面积采样,蚕豆采样 4 株,玉米苗期取 5 株,后期取 3 株作为样本,

采集的鲜样本先在 105°C 下杀青 1 h,然后在 80°C 条件下烘干至恒重后称重。2010 年采样 7 次,分别为 5 月 21 日、6 月 12 日、6 月 28 日、7 月 18 日、7 月 28 日、8 月 30 日、10 月 10 日;2014 年采样 7 次,分别为 5 月 24 日、6 月 14 日、7 月 4 日、7 月 23 日、8 月 15 日、9 月 24 日、11 月 1 日。

1.4 数据处理与统计分析

1.4.1 数据计算

间作系统生产力 (System productivity, SP, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)^[5] 为单位面积 2 种间作作物籽粒产量的加权平均值。

$$SP = Y_{ic} \times Z_c + Y_{im} \times Z_m \quad (1)$$

式中: Y_{ic} 、 Y_{im} 分别为配对作物和玉米的籽粒产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); Z_c 、 Z_m 分别为配对作物和玉米在间作系统中所占的面积比例。

生长速率 (Growth rate, $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$)

$$GR = (w_2 - w_1) / (t_2 - t_1) \quad (2)$$

式中: w_2 和 w_1 分别表示玉米在不同测定时期积累的生物量 ($\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$), t_2 和 t_1 分别表示两个测定时期 (d)。

1.4.2 统计分析

采用 Microsoft Excel 2007 进行数据整理及绘图,用 SAS8.0 统计分析软件进行数据分析,并用 LSD 法对各处理间的差异显著性在 5% 水平上进行检验。

2 结果与分析

2.1 改变玉米行距对体系生产力的影响

玉米行距变化对间作系统作物产量产生了不同程度的影响(表 1),2 年试验表明,无论是间作体系之

间,还是不同行距处理间,在玉米产量、体系混合产量及系统生产力上均存在显著差异($P<0.05$)。分析配对作物产量,对于小麦/玉米间作,2010 年 D40 处理最高,较 D0 和 D20 分别高 14%和 21%,2014 年 D60 处理最高,分别较 D0 和 D20 高出 17%和 16%,其他处理间无显著差异。而蚕豆/玉米体系中蚕豆的产量无显著差异;可见,改变玉米行距对蚕豆玉米体系蚕豆产量无影响;对于间作玉米产量,小麦/玉米体系中,2010 年 D40和 D60 处理的间作玉米产量显著高于 D0、D20 和 D80,其中 D60 处理最高,较 D0 和 D80 处理产量分别提高 68.2%和 46.8%,2014 年 D40 处理的玉米产量显著高于其他处理,分别较 D0、D20、D60 和

D80 高出 93%、50%、58%和 200%;在蚕豆/玉米体系中,2010 年 D80 处理的间作玉米产量显著低于其他处理;2014 年 D40 处理显著高于其他处理;间作系统混合产量的变化趋势与间作玉米产量变化趋势基本一致;可见,间作玉米行距变化对体系产量的影响主要表现在间作玉米的产量变化上。

对于间作系统生产力,均表现为随玉米行距增加,系统生产力先增加后减小。对于小麦/玉米间作系统,2010 年系统生产力峰值出现在 D60 处理,较 D0 处理和 D80 处理系统生产力提高了 66.7%和 23.0%,而 2014 年试验中峰值出现在 D40。对于蚕豆/玉米体系,在 2010 年试验中,系统生产力的峰值出现在

表 1 不同处理下系统生产力及作物产量差异

Table 1 The yield of crops and the system production under different treatments

年份 Year	间作体系 Intercropping system	处理 Treatment	间作配对作物 companion crops/kg·hm ⁻²	Intercropped maize/kg·hm ⁻²	间作玉米 maize/kg·hm ⁻²	Intercropped faba bean+ Maize	混合产量 Total yield(Wheat/ Maize)/kg·hm ⁻²	系统生产力 System production/kg·hm ⁻²	
2010 年	小麦/玉米	D0	2 611.2±408.0b	4 088.5±495.3c	6 699.7±597.7c	2 703.6±378.0c			
		D20	2 458.5±262.1b	5 608.6±824.5ab	8 067.1±585.0b	3 246.0±70.5b			
		D40	2 986.3±120.7a	6 346.3±836.4a	9 332.5±729.0a	4 246.3±247.4a			
		D60	2 663.3±234.4ab	6 880.9±454.0a	9 544.2±266.7a	4 508.5±100.5a			
		D80	2 646.0±338.7ab	4 686.7±906.2bc	7 332.7±941.8bc	3 666.3±470.9b			
	蚕豆/玉米	D0	1 260.5±128.0a	7 984.5±738.8a	9 245.0±655.9a	1 680.7±93.8d			
		D20	1 260.5±202.8a	7 953.0±456.9a	9 213.5±403.2a	2 933.6±140.8c			
		D40	1 395.9±136.6a	8 544.9±465.9a	9 940.8±602.5a	4 076.8±260.1a			
		D60	1 222.3±42.1a	8 711.8±561.7a	9 934.1±599.4a	4 499.0±267.0a			
		D80	1 364.7±117.4a	5 659.1±1 055.9b	7 023.8±1 090.6b	3 511.9±545.3b			
	显著水平 <i>P</i> 值 Significance level <i>P</i> value								
	间作系统 Intercropping system		—	<0.000 1		0.002 6		0.007 1	
	行距处理 Row spacing		—	<0.000 1		<0.000 1		<0.000 1	
	间作系统×行距处理 I×R		—	0.033 8		0.024 5		0.067 5	
2014 年	小麦/玉米	D0	2 486.2±102.8b	5 329.4±656.8c	7 815.6±650.4c	2 663.9±99.3e			
		D20	2 514.0±271.9b	6 863.7±734.1b	9 377.7±469.4b	3 601.4±41.0c			
		D40	2 784.9±156.4ab	10 312.2±1 089.6a	13 097.1±1 056.5a	5 607.6±392.6a			
		D60	2 909.9±159.1a	6 525.3±572.9bc	9 435.2±419.5b	4 491.6±164.7b			
		D80	2 777.9±224.7ab	3 431.8±589.8d	6 209.8±471.7d	3 104.9±235.8d			
	蚕豆/玉米	D0	1 930.7±186.7a	6 833.7±763.8c	8 764.3±918.7c	2 237.1±214.8c			
		D20	1 465.4±106.9ab	8 963.8±1 271.8b	10 429.1±1 351.0bc	3 340.0±379.9b			
		D40	1 659.8±196.9ab	10 978.9±649.8a	12 638.7±547.0a	5 154.5±191.3a			
		D60	1 652.9±216.9ab	9 622.1±739.5ab	11 275.0±952.7ab	5 139.4±443.6a			
		D80	1 395.9±430.5b	9 110.5±826.1b	10 506.4±891.6bc	5 253.2±445.8a			
	显著水平 <i>P</i> 值 Significance level <i>P</i> value								
	间作系统 Intercropping system		—	<0.000 1		0.000 1		0.008 9	
	行距处理 Row spacing		—	<0.000 1		<0.000 1		<0.000 1	
	间作系统×行距处理 I×R		—	0.001 1		0.002 8		<0.000 1	

注:表中数据为平均值±标准差,同列数据中不同小写字母表示 0.05 水平上差异显著,下同。

Note: The data are means of three replicates ± standard error, values in the same column followed by different small letters are significantly different at 0.05 levels in LSD test. The same below.

D60,2014 年试验中,其峰值出现在 D80,但是与 D40 和 D60 处理的生产力无显著差异。对比来看,小麦/玉米体系和蚕豆/玉米体系 2010 年试验中 D60 处理的系统生产力最高,分别达 4 508.5 kg·hm⁻² 和 4 499.0 kg·hm⁻²,2014 年试验以 D40 处理占优,分别达 5 607.6 kg·hm⁻² 和 5 154.5 kg·hm⁻²。

2.2 改变玉米行距对玉米农艺性状的影响

决定系统生产力的关键在于玉米产量,间作玉米行距变化对间作玉米的农艺性状产生了影响,见表 2。结果表明,对于株高,间作体系间存在显著差异,与蚕豆间作的玉米株高显著的高于与小麦间作的玉米株高,2010 年试验中,小麦/玉米体系中 D0 处理显著低于 D80,蚕豆/玉米体系 D80 显著低于其他处理;2014 年试验中,小麦/玉米体系中 D40 处理显著高于其他处理,而蚕豆/玉米间作体系中各处理间无显著

差异。对于穗长,2010 年小麦/玉米中,D0 处理显著低于其他处理,蚕豆/玉米体系,各处理间无显著差异;2014 年,小麦/玉米体系,D80 显著低于其他处理,蚕豆/玉米体系 D20 处理显著低于 D40。对于穗粒数,两年试验表明,无论体系间还是行距处理间均存在显著差异,小麦间作玉米的穗粒数 2010 年试验变幅在 309~476 粒·穗⁻¹,2014 年为 434~578 粒·穗⁻¹,而与蚕豆间作的玉米两年穗粒数变幅分别为 382~447 粒·穗⁻¹ 和 540~626 粒·穗⁻¹,整体而言,与蚕豆间作的玉米穗粒数显著高于与小麦间作的玉米,对比各处理间,2010 年试验中,小麦/玉米体系中 D40、D60 和 D80 处理的穗粒数显著高于 D0 和 D20,蚕豆/玉米体系中 D20 显著低于其他处理;2014 年试验,两体系中均显示出 D40 处理的穗粒数显著高于其他处理,小麦/玉米体系达到 578 粒·穗⁻¹,而此时 D0 和 D80 处

表 2 不同处理下玉米农艺性状

Table 2 Agronomy trait of intercropped maize under different row spacing treatments

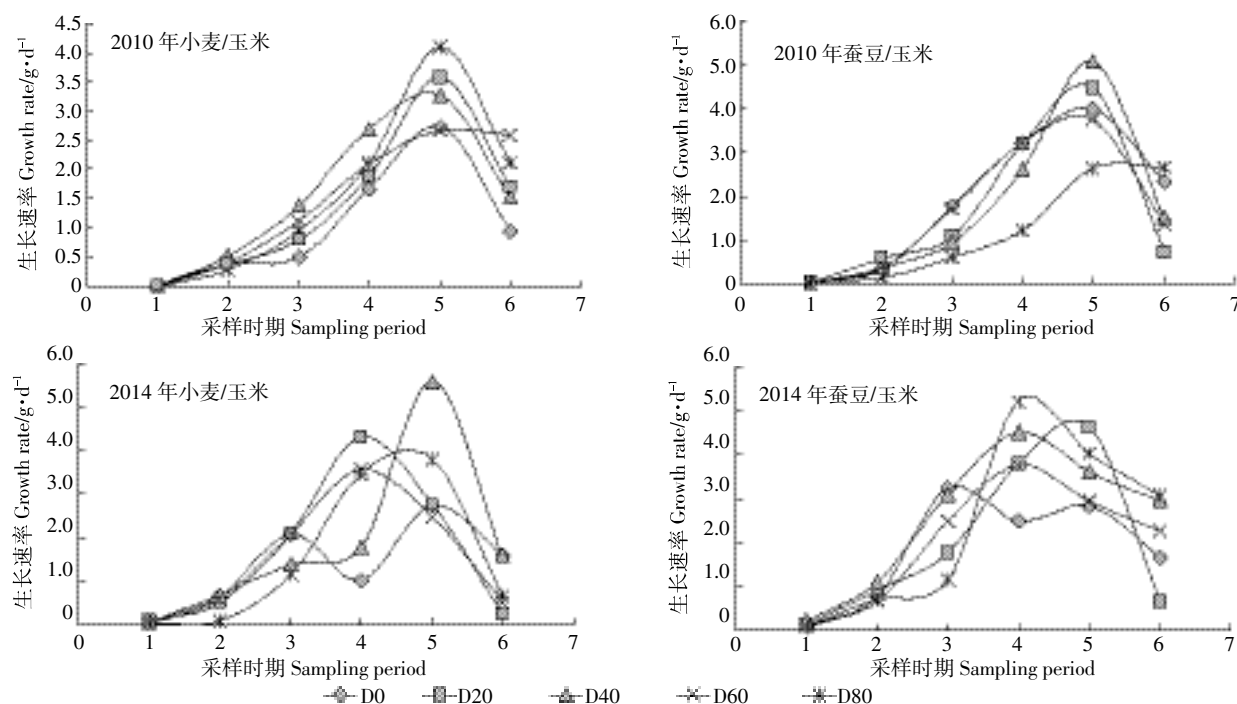
年份 Year	间作系统 Intercropping system	处理 Treatment	株高 Plant height/cm	穗长 Ear length/cm	穗粒数 Grains per ear	百粒重 100-grain weight/g	单株粒重 g Grain weight per plant/g
2010 年	小麦/玉米	D0	143.4±14.2b	13.7±1.2b	333±43c	26.4±2.7c	90±19c
		D20	155.4±9.6ab	16.1±1.8a	309±11c	32.8±0.7a	101±20bc
		D40	153.5±5.9ab	16.0±0.7a	398±20b	33.8±0.8a	125±10ab
		D60	156.6±10.5ab	17.1±0.8a	438±27ab	31.0±2.5ab	132±11a
		D80	165.0±14.8a	17.9±0.2a	476±10a	27.7±3.2bc	120±6ab
	蚕豆/玉米	D0	183.0±12.2a	17.3±1.2a	447±6a	36.8±1.6ab	166±9a
		D20	177.4±4.6a	16.4±0.9a	382±8b	35.6±0.4ab	136±7c
		D40	177.8±7.8a	17.8±0.2a	446±19a	37.3±0.9a	158±10ab
		D60	178.3±7.5a	17.0±0.7a	440±22a	34.3±2.0bc	148±12bc
		D80	151.9±5.4b	17.7±0.6a	441±4a	32.9±1.3c	138 ± 9c
显著水平 <i>P</i> 值 Significance level <i>P</i> value							
间作系统 Intercropping system		<0.000 1	0.003 1	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	
行距处理 Row spacing		0.449 3	0.003 2	<0.000 1	0.001 1	0.027 2	
间作系统×行距处理 I×R		0.001 3	0.005 2	<0.000 1	0.014 9	0.003 5	
2014 年	小麦/玉米	D0	211.3±4.6c	20.5±1.5a	467±6bc	25.2±2.8c	101±23b
		D20	252.9±5.9b	18.6±2.8ab	478±59bc	35.7±2.3a	129±25b
		D40	269.3±12.2a	19.7±1.2ab	578±8a	34.3±1.5a	216±14a
		D60	253.4±13.2ab	18.9±0.9ab	511±17b	28.5±0.1b	131±11b
		D80	206.7±3.3c	17.6±0.5b	434±13c	21.2±0.9d	64±7c
	蚕豆/玉米	D0	286.7±11.5a	21.0±1.2a	540±8b	31.0±0.8b	130±9c
		D20	300.3±11.1a	18.6±1.1b	564±43b	33.7±1.1a	179±25b
		D40	303.6±12.7a	20.3±0.4a	626±16a	34.0±1.7a	220±13a
		D60	300.6±7.9a	19.5±0.7ab	546±18b	33.9±1.4a	192 ± 14ab
		D80	289.7±12.8a	19.8±1.0ab	581±14b	32.2±0.9ab	182 ± 18b
显著水平 <i>P</i> 值 Significance level <i>P</i> value							
间作系统 Intercropping system		<0.000 1	0.134 6	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	
行距处理 Row spacing		<0.000 1	0.055 8	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	
间作系统×行距处理 I×R		0.004 0	0.685 2	0.012 7	<0.000 1	0.000 4	

理分别仅为 467 粒·穗⁻¹ 和 434 粒·穗⁻¹, 蚕豆/玉米体系最高达 626 粒·穗⁻¹, 分别较 D0 和 D80 高 86 粒·穗⁻¹ 和 45 粒·穗⁻¹。对于百粒重, 2010 年小麦/玉米体系中, D0 处理显著低于其他处理, 蚕豆/玉米体系, D40 显著高于其他处理, 2014 年小麦/玉米体系中, D20 和 D40 处理百粒重显著高于其他处理, 蚕豆/玉米体系中, D0 处理显著低于其他处理, 综合来看, 两年试验均是 D40 处理的百粒重高于其他处理。单株粒重小麦/玉米体系 2010 年 D60 处理高于其他处理, 2014 年 D40 处理高于其他处理, 蚕豆/玉米体系 2010 年 D0 高于其他处理, 但与 D40 处理没有显著差异, 2014 年 D40 和 D60 高于其他处理, 这也与间作玉米产量及系统生产力形成一致。

2.3 改变玉米行距对玉米生长速率的影响

将不同采样时期生物量求算生长速率, 可以看出间作玉米在不同行距处理下生长速率的动态变化(图 2), 总体看来, 间作玉米的生长速率均表现为先逐步增加后降低的趋势。对于小麦/玉米体系, 1~3 阶段为间作作物共同生长阶段, 3~6 阶段为间作玉米单独生

长阶段, 对于蚕豆/玉米体系, 1~4 阶段为间作作物共生期, 4~6 阶段为玉米单独生长期。共生期内各处理的生长速率显著小于单独生长期, 2010 年单独生长期各处理的生长速率为共生期各处理生长速率的 2.2~7.0 倍, 2014 年为 1.3~6.2 倍。但是无论共生期还是单独生长期, 不同行距处理下玉米的生长还是存在差异, 对于小麦/玉米体系, 2010 年试验中, 1~3 阶段, D40 处理的生长速率显著高于其他处理, 从采样开始到小麦收获, D40 处理的生长速率为 0.63 g·株⁻¹·d⁻¹, 而此时 D0 和 D80 的速率分别仅为 0.29 g·株⁻¹·d⁻¹ 和 0.41 g·株⁻¹·d⁻¹, 2014 年试验中, 1~3 阶段各处理生长速率无显著差异; 对于蚕豆/玉米体系, 1~4 阶段, 2010 年 D60 和 D0 处理生长速率显著高于其他处理, D80 处理生长速率始终低于其他处理, 从采样至蚕豆收获, D40 处理的生长速率为 1.08 g·株⁻¹·d⁻¹, D80 仅为 0.39 g·株⁻¹·d⁻¹, 4~6 采样阶段, D40 处理生长速率显著提升, 从蚕豆收获至玉米收获, D40 处理的生长速率达 3.09 g·株⁻¹·d⁻¹; 2014 年试验, D40 处理显著高于其他处理, 达 2.28 g·株⁻¹·d⁻¹, 蚕豆收获后至玉米收



2010 年采样阶段: 1: 5 月 21 日至 6 月 12 日; 2: 6 月 12 日至 6 月 28 日; 3: 6 月 28 日至 7 月 18 日; 4: 7 月 18 日至 7 月 28 日; 5: 7 月 28 日至 8 月 30 日; 6: 8 月 30 日至 10 月 10 日。2014 年采样阶段: 1: 5 月 24 日至 6 月 14 日; 2: 6 月 14 日至 7 月 4 日; 3: 7 月 4 日至 7 月 23 日; 4: 7 月 23 日至 8 月 15 日; 5: 8 月 15 日至 9 月 24 日; 6: 9 月 24 日至 11 月 1 日
Sampling period in 2010: 1: 21 May to 12 June; 2: 12 June to 28 June; 3: 28 June to 18 July; 4: 18 July to 28 July; 5: 28 July to 30 August; 6: 30 August to 10 October. Sampling period in 2014: 1: 24 May to 14 June; 2: 14 June to 4 July; 3: 4 July to 23 July; 4: 23 July to 15 August; 5: 15 August to 24 September; 6: 24 September to 1 November

图 2 不同处理下玉米生长速率变化

Figure 2 The growth rate of intercropped maize under different treatments

获,D40处理的速率达到 $3.30\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

3 讨论

3.1 玉米行距变化对系统生产力及作物产量的影响

间作本质上是将生理、生态具有差异的作物组合在同一群体内,通过优化群体结构,发挥种间互补作用,在时空上集约利用光、热、水、养分资源的高产高效种植模式^[16-18]。群体中作物空间配置的变化直接改变了作物地上地下物质的积累分配以及产量潜力的发挥^[19]。合理的空间配置促进群体作物生态位的分离,作物间竞争互补达到和谐,促进作物对于周围环境资源的高效利用,以实现最大的产量效应。而间作体系中玉米行距的变化实质上是改变了群体作物的空间配置,从而影响了群体内部作物产量,最终影响系统生产力。赵建华等^[19]研究豌豆/玉米间作体系中玉米不同行距对产量的影响发现,行距为40 cm时体系产量及间作玉米产量均最高;杨峰等^[20]研究玉米大豆间作系统,在200 cm带幅中,玉米行距80 cm,种间距离40 cm时玉米产量最大。在本研究中或许是因为两个年份种植玉米的品种差异,当2010年玉米行距为40 cm,2014年为60 cm时,间作系统生产力占优;说明无论品种和地区差异,当玉米种植行距在40~60 cm间时,玉米与配对作物的空间配置最优,过小的行距致使玉米种内竞争加剧,过大的行距又促使种间竞争过于强烈不利于作物的产量发挥;进一步的分析发现,间作玉米不同行距引起玉米产量变化的主要因素是穗粒数和百粒重,2010年试验中,小麦/玉米体系间作玉米随行距增加穗粒数增大,与蚕豆间作的玉米穗粒数却未发生变化,百粒重均是以D40处理的最高,然而2014年表现出D40穗粒数、百粒重均较其他处理高;两年结果的不同可能是因为品种差异造成的,不同的品种对于间作的影响力表现不同,但不管怎样,间作玉米产量峰值出现的处理都在D40和D60处理下。

3.2 玉米行距变化对玉米生长的影响

小麦/玉米间作中,在小麦、玉米共生期内,玉米对资源的竞争处于劣势,生长速率低,小麦收获后,间作玉米地上部扩大了光、热、气资源的吸收空间。地下部扩大了水和养分的吸收范围,得到了明显的恢复生长,后期生长表现出明显的增产作用,这种竞争恢复生长已在诸多研究中证实^[21-24]。本研究中,虽然两体系共生期和单独生长期不一样,但是比较分析,2010年单独生长期的生长速率是共生期生长速率的2.2~7.0

倍,2014年达到1.3~6.2倍,因此,无论行距怎么变化,玉米的恢复生长均存在;然而不同的玉米行距对于玉米的生长产生了不同的影响,这正是由于共生期配对作物对于间作玉米的不同程度的竞争作用而造成的,配对作物收获后,进入单独生长期,不同处理的生长速率也存在差异,对于小麦/玉米体系,虽然D80有较高的生长速率,但是共生期内强烈的竞争致使前期的生物量较小,最终产量形成上还是低于D40和D60;蚕豆/玉米体系,虽然前期各处理生长速率差异不明显,但是蚕豆收获后,D40的生长速率显著提高,如2014年单独生长期D40的平均生长速率达到 $3.09\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,D80的生长速率仅为 $2.64\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。因此,配对作物收获前后D40和D60生长速率的变化最终决定了体系产量,由于两年试验选取的品种不一致,这也许是造成生长期D40和D60生长速率两年变化规律不一致的原因,但是,无论怎样,D40和D60两处理前期生长速率占优在前期积累了好的生物产量,配对作物收获后虽生长缓慢,但是由于前期的基数较大,最终产量形成也占优;而前期生长速率不占优,配对作物收获后,D40的生长速率显著提升致使最终的生物产量占优。

笔者仅是对不同行距处理下两间作体系作物生产力和玉米生长进行了初步的探究,生产力形成和外界环境,如光照、养分供应等诸多因素相关,进一步的深入分析研究有待于今后开展,以便更深入地剖析不同行距下作物产量差异及生长变化的原因。

4 结论

小麦/玉米、蚕豆/玉米系统中间作玉米行距变化均影响间作玉米产量及系统生产力,同时影响玉米的生长。玉米行距变化对配对作物的影响不显著,主要影响了间作玉米的产量,而引起玉米产量变化的主要因素是不同行距下间作玉米穗粒数和百粒重的变化;不同行距下,共生期生长速率均显著小于单独生长期,无论哪个时期,玉米行距40 cm和60 cm的处理生长速率均较其他处理占优,因此,适合河西灌区小麦/玉米和蚕豆/玉米间作系统的最佳玉米行距配置为40 cm或60 cm,此行距下可让配对作物和玉米的生态位达到和谐,系统生产力达最大。

参考文献:

- [1] Vandermeer J H. The ecology of intercropping[M]. New York: Cambridge University Press, 1989.

- [2] Willey R W. Intercropping its importance and research needs: I. Competition and yield advantage[J]. *Field Crops Abstracts*, 1979, 32: 1–10.
- [3] Willey R W, Rao M R. A competitive ratio for quantifying competition between intercrops[J]. *Experimental Agriculture*, 1980, 16(2): 117–125.
- [4] Firbank L G, Watkinson A R. On the effects of plant competition: From monocultures to mixtures[M]// Grace J B, Tilman D. Perspectives on plant competition, San Diego, CA: Academic Press, 1990:165–192.
- [5] Takim F O. Advantages of maize–cowpea intercropping over sole cropping through competition indices[J]. *Journal Agricultural Biodiversity Research*, 2012, 1: 53–59.
- [6] Tsay J S, Fukai S, Wilson G L. Effects of relative sowing time of soybean on growth and yield of cassava in cassava/soybean intercropping[J]. *Field Crops Research*, 1988, 19: 227–239.
- [7] Li Long, SUN Jian–hao, ZHANG Fu–suo, et al. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping: I. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients[J]. *Field Crops Research*, 2001, 71(2): 123–137.
- [8] Li Long, SUN Jian–hao, ZHANG Fu–suo, et al. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping: II. Recovery or compensation of maize and soybean after wheat harvesting[J]. *Field Crops Research*, 2001, 71: 173–181.
- [9] 李 隆, 杨思存, 孙建好, 等. 小麦/大豆间作中作物种间的竞争作用和促进作用[J]. *应用生态学报*, 1999, 10(2):197–200.
LI Long, YANG Si–cun, SUN Jian–hao, et al. Interspecific competition and facilitation in wheat/soybean intercropping system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(2):197–200. (in Chinese)
- [10] 齐万海, 柴 强. 不同隔根方式下间作小麦玉米的竞争能力及产量相应[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(1):31–34.
QI Wan–hai, CHAI Qiang. Yield response to wheat/maize competitiveness in wheat/maize intercropping system under different root partition patterns[J]. *Chinese Journal of Eco–Agriculture*, 2010, 18(1):31–34. (in Chinese)
- [11] 殷 文, 赵 财, 于爱忠, 等. 秸秆还田后少耕对小麦/玉米间作系统中种间竞争和互补的影响[J]. *作物学报*, 2015, 41(4):633–641.
YIN Wen, ZHAO Cai, YU Ai–zhong, et al. Effect of straw returning and reduced tillage on interspecific competition and complementation in wheat/maize intercropping system[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(4):633–641. (in Chinese)
- [12] 郝艳如, 劳秀荣, 赵秉强, 等. 隔根对小麦/玉米间套种植生长特性的影响[J]. *麦类作物学报*, 2003, 23(1):71–74.
HAO Yan–ru, LAO Xiu–rong, ZHAO Bing–qiang, et al. Effect of separating root method on wheat and corn intercropping system[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2003, 23(1):71–74. (in Chinese)
- [13] 李玉英, 余常兵, 孙建好, 等. 蚕豆/玉米间作系统经济生态施氮量及对氮素环境承受力[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(3):223–227.
LI Yu–ying, YU Chang–bing, SUN Jian–hao, et al. Nitrogen environmental endurance and economically–ecologically appropriate amount of nitrogen fertilizer in faba bean/maize intercropping system[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(3): 223–227. (in Chinese)
- [14] 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.
WANG Jian–kang. Distance between adjacent rows of maize and pea affect nitrogen facilitation and competition in intercropping systems [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [15] 柴 强, 杨彩虹, 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[J]. *作物学报*, 2011, 37(9):1623–1630.
CHAI Qiang, YANG Cai–hong, HUANG Gao–bao. Water use characteristics of alternately irrigated wheat/maize intercropping in oasis region of Northwestern China [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(9): 1623–1630. (in Chinese)
- [16] 高 阳, 段爱旺, 刘祖贵, 等. 间作种植模式对玉米和大豆干物质积累与产量组成的影响[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(2): 214–221.
GAO Yang, DUAN Ai–wang, LIU Zu–gui, et al. Effect of intercropping patterns on dry matter accumulation and yield components of maize and soybean[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(2):214–221. (in Chinese)
- [17] 王 竹, 杨文钰, 伍晓燕, 等. 玉米株型和幅宽对套作大豆初花期形态建成及产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(2):323–329.
WANG Zhu, YANG Wen–yu, WU Xiao–yan, et al. Effect of maize plant type and planting width on the early morphological characters and yield of relay planted soybean[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(2):323–329. (in Chinese)
- [18] YANG Feng, HUANG Shan, GAO Ren–cai, et al. Growth of soybean seedlings in relay strip intercropping system in relation to light quantity and red: far–red ratio[J]. *Field Crops Research*, 2014, 155: 245–253.
- [19] 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):1451–1456.
ZHAO Jian–hua, SUN Jian–hao, LI Long, et al. Effect of maize row spacing on yield of pea/maize intercropping system[J]. *Chinese Journal of Eco–Agriculture*, 2012, 20(11):1451–1456. (in Chinese)
- [20] 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):642–650.
YANG Feng, LOU Ying, LIAO Dun–ping, et al. Effects of row spacing on crop biomass, root morphology and yield in maize soybean relay strip intercropping system[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(4):642–650. (in Chinese)
- [21] Echarte L, Maggiora A D, Cerrudo D, et al. Yield response to plant density of maize and sunflower intercropped with soybean[J]. *Field Crops Research*, 2011, 121:423–429.
- [22] ZHANG Fu–suo, LI Long. Using competitive and facilitative interactions in intercropping systems enhances crop productivity and nutrient use efficiency[J]. *Plant Soil*, 2003, 248: 305–312.
- [23] Midmore M D, Roca J, Berrios I D. Potato (*Solanum* spp.) in the hot tropics:IV. Intercropping with maize and the influence of shade on potato microenvironment and crop growth [J]. *Field Crops Research*, 1988, 18:145–157.
- [24] LIU Tie–dong, SONG Feng–bing, LIU Sheng–qun, et al. Light interception and radiation use efficiency response to narrow–wide row planting patterns in maize[J]. *Australian Journal of Crop Science*, 2012, 6:506–513.