



玉米行距对大豆/玉米间作作物生长及种间竞争力的影响

赵建华, 孙建好, 陈亮之, 李伟琦

(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)

摘要:为探明大豆玉米间作系统中玉米种植行距对间作作物生长及种间资源竞争的影响。在固定带宽的大豆/玉米间作系统中, 设置 10, 20, 45, 60 和 70 cm 5 个间作玉米种植行距, 分析间作系统的间作优势、作物生长情况以及大豆相对于玉米的资源竞争力变化。结果表明: 随间作玉米行距增加, 间作优势增加, 70 cm 行距间作优势最大, 达 4 271.4 kg·hm⁻²。Logistic 生长拟合曲线表明: 随玉米行距增加, 大豆生物累积量减小, 达到最大日生长速率峰值的天数缩短, 玉米生物累积量最大值出现在 D45 处理下, 达 43 471.1 kg·hm⁻², D45 处理达到最大日生长速率峰值的天数最长, 达 130 d, 且生长后期日生长速率持续高于其它处理; 共生期内, 伴随作物生长, 大豆相对于玉米的资源竞争力 A_{sm} 逐渐降低, 共生后期, 表现为随间作玉米种植行距增加, 大豆相对于玉米的竞争力 A_{sm} 逐渐减小。综合分析表明: 河西灌区大豆/玉米间作系统中, 玉米是强竞争力作物, 玉米种植行距为 45 cm, 有利于大豆和玉米的生长及产量形成, 大豆和玉米种间竞争力较弱, 可作为河西灌区大豆/玉米间作系统中间作玉米的最佳行距配置。

关键词: 玉米行距; 大豆/玉米间作; 间作优势; 种间相对竞争力

Growth and Interspecific Competition of Crops as Affected by Maize Row Spacing in Soybean/Maize Intercropping System

ZHAO Jian-hua, SUN Jian-hao, CHEN Liang-zhi, LI Wei-qi

(Institute of Soil Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China)

Abstract: To explore the effect of maize row spacing on growth and interspecific competition of crops in soybean/maize intercropping. The field experiment was conducted which included 5 maize row spacing treatments (10, 20, 45, 60 and 70 cm) in soybean/maize intercropping system. Intercropping advantage, crops growth, interspecific competition of soybean relative to maize were studied. The results showed that the intercropping advantage increased with maize row spacing increasing, the highest value of intercropping advantage was obtained by D70, which is 4 271.4 kg·ha⁻¹. The crops growth were also fitted by logistic, the result showed that the biomass of intercropped soybean decreased with the increasing of maize row spacing, and the greater the maize row spacing was, the shorter was the days to reach the maximum daily growth rate. The maximum dry matter accumulation of maize was obtained by D45 (43 471.1 kg·ha⁻¹), and the days to reach maximum daily growth rate of maize were also gained by D45 (130 d) which was longest among treatments and always higher than other treatments during later growth period. The aggressivity of soybean relative to maize (A_{sm}) gradually reduced with the growth of crops during co-growth period, the lower was the A_{sm}, the wider was the maize row spacing during the later co-growth period. By comprehensive analysis, we could concluded that maize is a stronger competitive crop in soybean/maize intercropping system, the intercropped crops would gain high biomass and yield and the competitiveness between intercropped crops would be weakest when the row spacing of maize is 45 cm. Hence, in present study, D45 is more reasonable row spacing for intercropped maize in soybean/maize intercropping system in Hexi corridor.

Keywords: Maize row space; Soybean/Maize intercropping system; Intercropping advantage; Aggressivity

间套作是中华传统农业的精髓, 由于其有提高土地利用效率^[1]、增加粮食产量^[2]、提高农民收益、增加农田生态系统稳定性^[3]、提升作物品质、抑制病虫害发生^[4]等优势而备受关注。甘肃河西灌区是间套作种植较为普遍的地区, 存在的间套作模式种类繁多, 其中大豆 (*Glycine max*) / 玉米 (*Zea mays* L.) 间作由于其显著的增产效应, 较高的养分利用效率、较低的农田氮肥投入^[5]等特点被当地农

户普遍采纳并种植。

两种作物生长在一起必然产生种间竞争或互补的相互作用^[6]。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。而间作为资源需求特性不同的作物提供了时间和空间上的生态位分离, 促成了种间相互作用对相关资源的高效利用^[7-9]。因此, 间作系统中作物搭配^[10]、作物空间配置的变化都会直接改变作物地上、地下物质的积累

收稿日期: 2018-09-03

基金项目: 国家重点研发计划子课题 (2017YFD0201808-02)。

第一作者简介: 赵建华 (1980 -), 男, 博士, 副研究员, 主要从事间套作资源高效利用研究。E-mail: zhaojianhuatt@163.com。

通讯作者: 孙建好 (1972 -), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事间套作资源高效利用研究。E-mail: sunjianhao@126.com。

分配以及产量潜力的发挥^[11]。前人诸多研究表明,间套作中作物行距的变化会直接影响间作系统生产力,如王建康^[12]研究豌豆/玉米间作系统豌豆和玉米在3个种间距离处理下体系生产力变化,发现豌豆与玉米的种间距离为30 cm时,间作作物产量最高。赵建华等^[13]研究豌豆/玉米间作系统玉米行距变化对生产力的影响发现随间作玉米行距增加,玉米产量先增加后减小。针对大豆/玉米套作体系,杨峰等^[14]研究了带宽200 cm的条件下,玉米行距配置对系统产量的影响,结果表明随玉米窄行变宽,玉米产量逐渐增加。程玉柱等^[15]研究表明长江下游地区玉米/大豆间作采取玉米行距50 cm、玉米大豆距离50 cm的种植模式作物产量较好。以上研究均表明间作系统行距配置对系统作物产量有显著影响,然而对于间作系统中行距配置变化对作物生长及种间相互作用的影响并未充分关注。在甘肃河西走廊灌区大豆/玉米间作系统基本形成同种同收的模式,过长的共生期影响作物产量潜力的发挥和作物生长,合理的作物行距配置对于此系统生产力提升显得尤为重要。为此,本研究通过在大豆/玉米间作体系中设置不同玉米种植行距,研究行距变化对间作优势、作物生长及种间竞争力的影响,以期为河西灌区大豆/玉米间作作物种植行距合理配置提供科学依据。

1 材料与方法

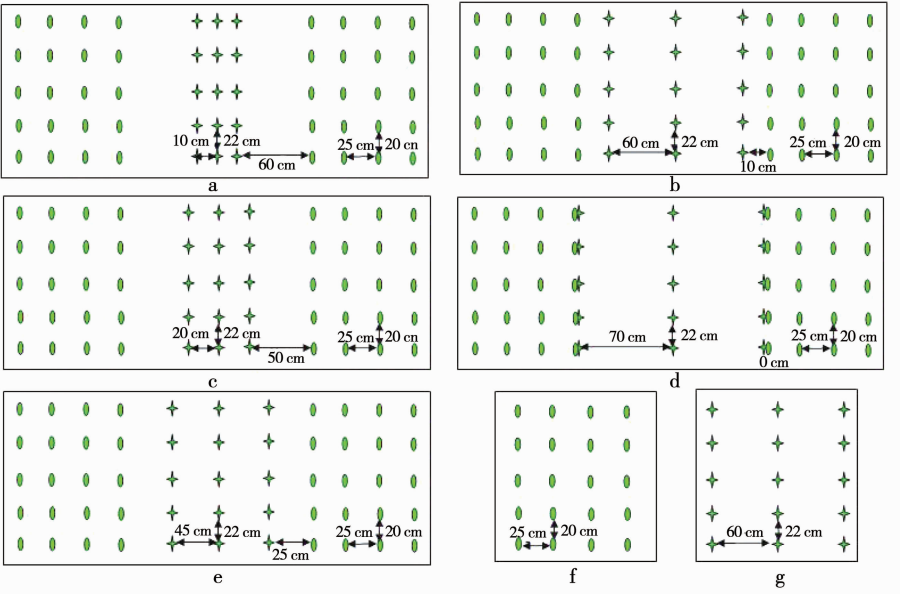
1.1 试验地概况

试验于2014年4-10月在甘肃省农科院张掖

节水农业试验站(E100°26',N38°56')进行,试验地海拔1 570 m,平均年日照时数3 085 h,昼夜温差13.00~16.07℃,年平均气温7℃,≥0℃积温3 388℃,≥10℃积温2 896℃,无霜期153 d。0~200 cm平均土壤容重为1.376 g·cm⁻³,年平均蒸发量2 075 mm,年降水量不足130 mm,干旱指数达10.3,属于典型的无灌溉就无农业的干旱灌溉地区,具有西北绿洲灌溉农业区的典型特征。地下水埋深68~73 m,地下水位年变幅约1.0 m;试验地属灌漠土,有机质17.9 g·kg⁻¹,速效氮128.8 mg·kg⁻¹,速效磷24.7 mg·kg⁻¹,速效钾82.0 mg·kg⁻¹,pH8.2。

1.2 试验设计

试验设置5个玉米行距(D):10,20,45,60和70 cm,分别用D10、D20、D45、D60、D70表示;3种植植方式:大豆/玉米间作、玉米单作和大豆单作;3次重复,完全随机区组排列。大豆单作株行距一致,行距25 cm,株距20 cm,间作大豆种植密度93 027株·hm⁻²,单作大豆种植密度200 010株·hm⁻²,玉米单作株距均为22 cm;间作带幅215 cm,种植4行大豆,3行玉米,每小区种植3个间作带;单作玉米等行距种植,行距60 cm。间作玉米种植密度63 434株·hm⁻²,单作玉米种植密度757 61株·hm⁻²。大豆与玉米同期播种,同期收获,播种时间为2013年4月24日,收获时间为10月17日。大豆品种为中黄30,玉米品种为郑单958。施肥量:N 240 kg·hm⁻²,50%基施,50%在玉米大喇叭口期追施;P₂O₅ 90 kg·hm⁻²,一次性基施,供试肥料尿素(N:46%)和重过磷酸钙(P₂O₅:43%)。试验处理种植示意图1。



a、b、c、d、e 分别为 D10、D20、D45、D60、D70 处理,f 和 g 分别为单作大豆和单作玉米。
a,b,c,d,e indicates treatment D10,D20,D45,D60,D70 respectively, f and g was sole soybean and sole maize.

图1 大豆/玉米间作玉米行距处理示意图

Fig.1 The sketch of maize row spacing treatments in soybean/maize intercropping

1.3 测定项目与方法

1.3.1 干物质产量统计 于作物出苗后每隔 20 d 进行地上部干物质采样,采样时间分别为 6 月 13 日、7 月 3 日、7 月 26 日、8 月 15 日、9 月 5 日、10 月 17 日。采样时每小区选取长势一致植株 4 株采集地上部鲜样,105℃ 杀青 1 h,然后 80℃ 烘干至恒重后称重得干物质重。作物收获时,间作小区以每小区中间种植带为计产带(避免边行优势)进行测产;计产面积 12.9 m²(2.15 m×6 m),单作小区选取中部位与间作作物同等面积进行收获计产。

1.3.2 相关指标的计算 间作优势(kg·hm⁻²) = $\frac{Y_{is} + Y_{im} - (Y_{ss} \times Z_s + Y_{sm} \times Z_m)}{(Z_s + Z_m)}$ ^[16],式中, Y_{is} 和 Y_{im} 分别代表间作大豆和玉米的产量; Y_{ss} 和 Y_{sm} 分别为单作大豆和单作玉米的产量。 Z_s 表示间作大豆密度与其单作模式大豆密度的比值, Z_m 表示间作玉米密度与其单作模式大豆密度的比值。本研究中 Z_s 为 0.47, Z_m 为 0.84。

生长模型:玉米生育期内地上部干物质采样 6 次,采用 Logistic 方程模拟“S”生长曲线,Logistic 方程为: $y = \frac{A}{1 + \exp[r \times (T_{\max} - t)]}$,式中 y (kg·hm⁻²)表示第 t 天的干物质累积量, A (kg·hm⁻²)表示最大干物质累积量, T_{\max} 表示达到最大日生长速率的时间,d; r 表示初始生长速率^[17],d⁻¹。

日生长速率: $\frac{dy}{dt} = r \times y(1 - \frac{y}{A})$,作物日生长速率达到最大值是在 $y = A/2$ 时, $T_{\max} = r \times A/4$ 。

作物竞争力(aggressivity)^[18]指间作体系中一种作物相对于另一种作物对水分、养分等与产量形成有关资源的竞争力,公式为:

$$A_{sm} = Y_{is}/(Y_{ss} \times Z_s) - Y_{im}/(Y_{sm} \times Z_m)$$

式中, A_{sm} 为大豆相对于玉米的资源竞争力; Y_{is} 和 Y_{im} 分别代表间作总面积上大豆和玉米的生物量; Y_{ss} 和 Y_{sm} 分别为单作大豆和单作玉米的生物量; Z_s 和 Z_m 分别为间作模式中大豆和玉米的密度占单作大豆和单作玉米密度的比例。当 $A_{sm} > 0$,表明大豆竞争力强于玉米; $A_{sm} < 0$,玉米强于大豆。

1.4 数据分析

采用 Excel 2003 进行绘图,用 SAS 8.0 统计分析软件进行方差分析,并用 LSD 法对各处理间的差异显著性在 5% 水平上进行检验。用 Origin 8.0 进行生长模型拟合并获得拟合参数。

2 结果与分析

2.1 玉米行距对间作优势的影响

大豆/玉米间作系统的间作优势随间作玉米行距增加而增大(图 1)。玉米行距在 10 和 20 cm 时,间作优势均为负值,分别为 -765.3 和 -648.2 kg·hm⁻²;而在行距大于 45 cm 时间作优势均为正值,且行距 70 cm 时间作优势达最大值(4 271.4 kg·hm⁻²),并显著高于 D45 (2 787.3 kg·hm⁻²)和 D60 处理(2 762.8 kg·hm⁻²)。

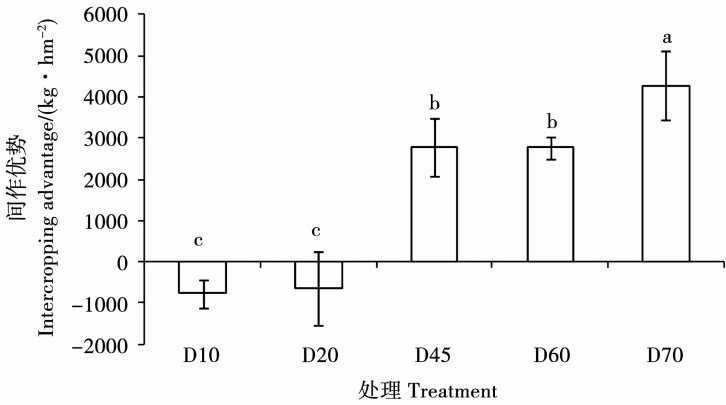


图 2 玉米行距对间作优势的影响

Fig. 2 Intercropping advantage as affected by maize row spacing

2.2 玉米行距对作物生长的影响

各处理 Logistic 拟合曲线参数见表 1,大豆最大生长量(A)随间作玉米行距增加而降低,达到最大日生长速率的时间(T_{\max})也表现为随间作玉米行距增加而缩短,D10 处理达到日生长速率的时间最长,

为 70 d;对于玉米,拟合所得 A 表现为随间作玉米行距增加先升高再降低的趋势,以 D45 处理最高,达 43 471 kg·hm⁻²,初始生长速率(r)先降低再增加,D45 处理 r 值为 0.04 d⁻¹, T_{\max} 也表现为先增加后降低,D45 处理下 T_{\max} 最大,达 130 d。

表 1 玉米行距处理下大豆和玉米生长模型参数

Table 1 Parameters of growth models of soybean and maize as affected by maize row spacing

处理 Treatment	大豆 Soybean			玉米 Maize		
	最大干物质累积量	初始生长速率	达到最大日生长	最大干物质累积量	初始生长速率	达到最大日生长
	$A/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$	r/d^{-1}	速率的时间 T_{max}/d	$A/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$	r/d^{-1}	速率的时间 T_{max}/d
D10	4469.2 ± 847.3	0.05 ± 0.02	70 ± 11	22406.8 ± 613.8	0.07 ± 0.005	87 ± 2
D20	6439.0 ± 591.4	0.10 ± 0.08	67 ± 10	26695.0 ± 1666.2	0.05 ± 0.002	99 ± 4
D45	3108.3 ± 140.0	0.11 ± 0.03	53 ± 3	43471.1 ± 4734.1	0.04 ± 0.002	130 ± 7
D60	2640.3 ± 186.5	0.07 ± 0.02	63 ± 4	37995.2 ± 7826.9	0.05 ± 0.005	107 ± 10
D70	1839.4 ± 193.5	0.13 ± 0.08	45 ± 5	33053.8 ± 4334.3	0.05 ± 0.005	95 ± 5

玉米行距变化对大豆和玉米生物量影响的研究结果表明:D20 处理大豆生物量显著高于其它行距处理,出苗 60 d 以前,各玉米行距处理对大豆生物量无显著影响,于出苗 60 d 起各处理下大豆干物

质累积开始出现差异,D20 生长量显著快于其它处理,自出苗 80 d 后,生物量大小依次为 D20 > D10 > D45 > D60 > D70。玉米后期生物量累积大小依次是 D45 > D60 > D70 > D20 > D10(图 3)。

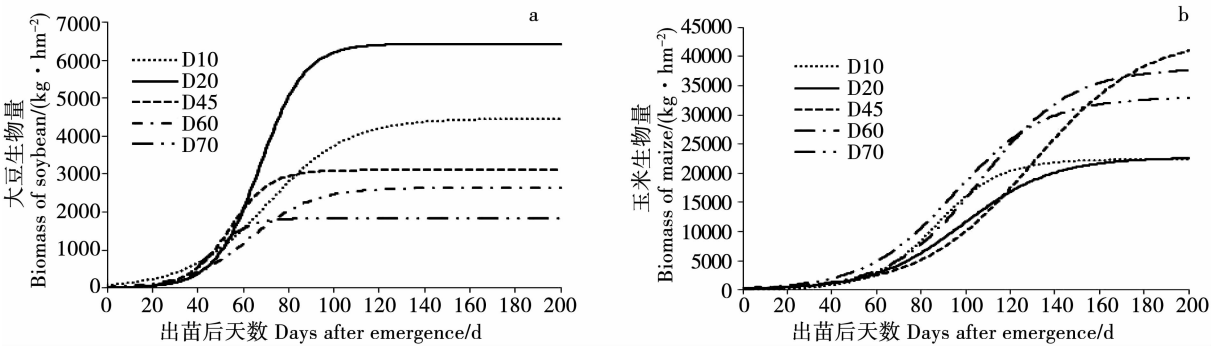


图 3 玉米行距处理下大豆(a)和玉米(b)生物量

Fig. 3 Biomass of soybean (a) and maize (b) affected by maize row spacing

进一步对各处理下作物的日生长速率进行拟合,分析各玉米行距处理下作物生长速度差异(图 4),D20 和 D45 处理下间作大豆的日生长速率在前期较其它处理高,D70 处理下间作大豆的日生长速率达到峰值的时间最短,之后日生长速率较其它处

理显著下降。对于玉米,D45 处理的日生长速率生长前期较其它处理低,生长后期 D45 处理的日生长速率持续高于其它处理,并且 D45 处理日生长速率达峰值的时间最晚。

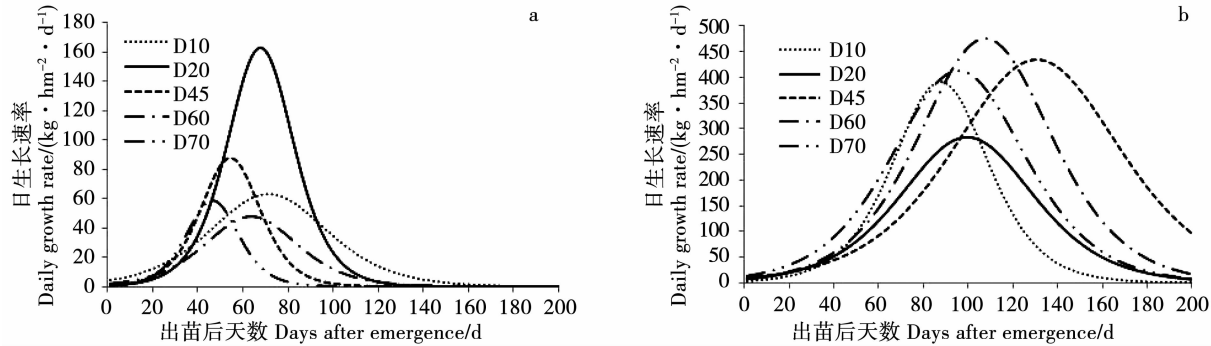


图 4 玉米行距对大豆(a)和玉米(b)日生长速率的影响

Fig. 4 Daily growth rate of soybean (a) and maize (b) as affected by maize row spacing

2.3 玉米行距对作物竞争力的影响

进一步对共生期内大豆相对于玉米的资源竞争力(A_{sm})进行动态分析(图 5),出苗后 80 d 以前,各处理的 A_{sm} 值均大于 0,而至出苗 80 d 后,除 D20

处理 A_{sm} 值大于 0 外,各处理 A_{sm} 值均开始下降,D60 和 D70 的 A_{sm} 值下降迅速,显著低于 D10、D20 和 D45 处理。至共生期结束,各处理 A_{sm} 值均小于 0, A_{sm} 值大小次序为 D10 > D20 > D45 > D60 > D70。

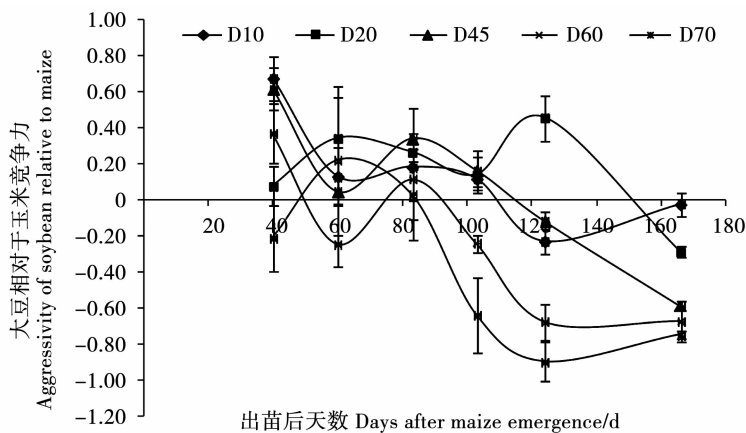


图5 玉米行距处理下大豆相对于玉米的种间竞争力动态

Fig. 5 The dynamic of aggressivity of soybean relative to maize during growth period

3 讨论

大豆与玉米间作,大豆处于空间生态位的劣势^[19],因此种间距离成为影响大豆和玉米种间互作效应,进而影响作物生长的决定因素。焦念元^[20]研究玉米/花生间作系统中玉米间作行比对体系间作优势的影响发现,间作优势会随着玉米间作行比的缩小而增加,间作行比缩小意味着种间距离的靠近;在本研究中,在固定的215 cm的带宽中,间作玉米行距增加,意味着种间距离也缩小,间作优势也随着增加。

作物干物质积累主要依靠光合作用,在间套作系统中,高矮作物间作时,高矮作物通过不同冠层减弱种间竞争强度,从而达到光资源的高效利用^[21-22]。在大豆/玉米间作系统中,玉米是高位作物,大豆是矮位作物^[23],因此,作物之间的空间配置变化直接影响作物对光能的截获、地上和地下物质的累积和分配^[11]。杨峰等^[24]研究200 cm带宽下大豆/玉米套作体系作物生物量变化,发现套作大豆的地上和地下生物量均随玉米行距的增加而降低。在本研究中,生长前期(出苗60 d前)无论大豆还是玉米各处理下生长差异不明显,然而,60 d后差异显现,大豆的生物量随玉米行距增加而减小,玉米的生物量随玉米行距增加而增加,这说明随生长进程,处于空间生态位劣势的大豆随间作玉米行距增加,受玉米遮蔽严重,生物量累积随之减小。高仁才等^[25]研究200 cm固定带宽的大豆/玉米套作体系中玉米行距对大豆冠层光环境和产量的影响,发现玉米行距为20~40 cm有利于大豆生长发育的光环境和产量形成。在本研究中,间作玉米行距45 cm成为间作优势的转折点,D10和D20间作优势为负值,而45 cm后间作优势明显;同样的,D45、D60和D70玉米生物量累积显著高于D10和

D20,而相反地,D10和D20大豆生物量又显著高于D45、D60和D70处理,可能是玉米行距较小时,留给大豆较宽阔的空间,大豆可以更好的利用地上光资源,而当玉米行距增加,高位的玉米对大豆的遮挡加剧,从而降低了大豆的生物累积量。另外,Logistic拟合曲线显示大豆达到最大日生长速率的时间 T_{max} 随玉米行距的增加而减小,而玉米 T_{max} 随行距处理先增加后减小,峰值出现在D45处理,且在生长后期D45日生长速率持续高于其它处理。说明玉米行距45 cm时,大豆和玉米彼此对各自生长的影响最小,因此,D45处理玉米后期生物量持续增长,日生长速率维持在较高水平。

间作群体中,作物间的种间相互作用(竞争或互补)驱动着复合群体产量优势的发挥^[26-27]。然而种间互作这一动态的、连续的过程受到间作作物共生环境的影响^[28],这其中作物行距配置是主要因素之一,吴越等^[29]研究表明玉米大豆间作生长过程中存在强烈的种间竞争关系,玉米对资源的竞争力比大豆强。本研究中, A_{sm} 值随共生期推进而下降且到后期均小于零,说明随生长进程,玉米的相对资源竞争力增强,到共生后期,D60和D70处理的 A_{sm} 值显著小于其它行距处理,说明随种间距离缩小,大豆相对于玉米的资源竞争力越弱。研究证实,间作系统中两作物存在共生期差异时,早熟作物收获后,后熟作物可以得到生长补偿恢复^[30];然而,河西灌区大豆/玉米间作系统中,大豆和玉米同种同收,生长时期的高度重叠并不能表现生长恢复,因此,作物间的空间布局就是其作物生产力发挥、种间相互作用平衡的关键。本研究中,共生后期 A_{sm} 值表现为玉米行距越大, A_{sm} 值越小的规律,明显说明玉米行距越大,在资源竞争方面越是占有优势。对比来看,间作优势在玉米种植行距45 cm时出现转折,生物量Logistic拟合曲线中D45处理玉米生物量最

高,日生长速率共生后期持续较高,因此,若综合考虑间作系统组分作物产量和种间竞争能力,45 cm 是较为适宜的玉米种植行距。

4 结 论

在 215 cm 带宽的大豆/玉米间作系统中,随间作玉米行距增加,间作优势随之增加,D70 处理下间作优势最大,达4 271.4 kg·hm⁻²。随玉米行距的增加,大豆生长受抑制,玉米生长以间作玉米行距为 45 cm 的处理最佳。共生期内,随生长进程的推进,大豆相对于玉米的资源竞争能力减弱,同时,随玉米行距增加,大豆相对于玉米的竞争能力减弱,玉米对环境的资源竞争能力增强。因此,综合考虑大豆和玉米的产量,当玉米行距 45 cm 时,大豆和玉米生长相互影响最小,种间竞争能力相对最弱,间作系统大豆和玉米综合表现最优。

参考文献

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

[2] Li L, Sun J H, Zhang F S, et al. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping I: Yield advantage and interspecific interactions on nutrients [J]. Field Crops Research, 2001, 71: 123-137.

[3] Li L, Li S M, Sun J H, et al. Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(27): 11192-11196.

[4] 杨进成, 刘坚坚, 安正云, 等. 小麦蚕豆间作控制病虫害与增产效应分析[J]. 云南农业大学学报, 2009, 24(3): 340-348. (Yang J C, Liu J J, An Z Y, et al. Analyses on effect of interplanting on diseases and pests control and yield increase of wheat and faba bean [J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2009, 24(3): 340-348.)

[5] 雍太文, 刘小明, 刘文钰, 等. 减量施氮对玉米-大豆套作体系中作物产量及养分吸收利用的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 474-482. (Yong T W, Liu X M, Liu W Y, et al. Effects of reduced N application rate on yield and nutrient uptake and utilization in maize-soybean relay strip intercropping system [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(2): 474-482.)

[6] Vandermeer J. The ecology of intercropping [M]. New York: Cambridge University Press, 1989:1045-1055.

[7] Zhang F S, Li L. Using competitive and facilitative interactions in intercropping systems enhances crop productivity and nutrient-use efficiency [J]. Plant and Soil, 2003(248): 305-312.

[8] 张桂国, 董树亭, 杨在宾. 苜蓿 + 玉米间作系统产量表现及其种间竞争能力的评定[J]. 草业学报, 2011, 20(1): 22-30. (Zhang G G, Dong S T, Yang Z B. Production performance of al-

falfa + maize intercropping systems and evaluation of interspecies competition [J]. Acta Partaculture Sinica, 2011, 20(1): 22-30.)

[9] Li L, Zhang F S, Li X L, et al. Interspecific facilitation of nutrient uptake by intercropped maize and faba bean [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2003, 65(1): 61-71.

[10] 赵建华, 孙建好, 陈伟, 等. 不同作物与玉米间套作对玉米产量和生物量累积的影响[J]. 作物杂志, 2013(4): 120-125. (Zhao J H, Sun J H, Chen W, et al. Yield and biomass accumulation of maize intercropped with different crops [J]. Crops, 2013(4): 120-125.)

[11] Yang F, Huang S, Gao R C, 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.

[12] 王健康. 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 J K. Distance between adjacent rows of maize and pea affect nitrogen facilitation and competition in intercropping systems [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2014.)

[13] 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 J H, Sun J H, Li L, 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.)

[14] 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 F, Lou Y, Liao D P, 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.)

[15] 程玉柱, 李龙, 周琴, 等. 玉米/大豆不同配置下的玉米生长和产量形成研究[J]. 南京农业大学学报, 2016, 39(1): 34-39. (Cheng Y Z, Li L, Zhou Q, et al. Growth and yield formation of maize under different maize/soybean intercropping patterns [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2016, 39(1): 34-39.)

[16] 林洪鑫, 潘晓华, 袁展汽, 等. 施氮和木薯-花生间作对作物产量和经济效益的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(4): 947-958. (Lin H X, Pan X H, Yuan Z Q, et al. Effects of nitrogen application and cassava-peanut intercropping patterns on crop yields and economic benefit [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(4): 947-958.)

[17] Dong N, Tang M M, Zhang W P, et al. Temporal differentiation of crop growth as one of the drivers of intercropping yield advantage [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 3110.

[18] 曾瑾汐, 文熙宸, Muhammad Ali Raza, 等. 氮磷配施对玉米-大豆套作模式下种间作用、玉米产量及干物质积累与转运的影响[J]. 草业学报, 2017, 26(7): 166-176. (Zeng J X, Wen X C, Muhammad A R, et al. Effects of combined applications of nitrogen and phosphorus on interspecies interaction, yield, and dry matter accumulation and translocation in maize in a maize-soybean relay intercropping system [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(7): 166-176.)

[19] 高蕊, 龚颖婷, 李沛然, 等. 木薯//大豆间距对间作物农艺性状及品质的影响[J]. 大豆科学, 2018, 37(1): 81-86. (Gao R, Gong Y T, Li P R, et al. Effects of the cassava and soybean spac-

ing in an intercropping system on the agronomic traits and crop quality[J]. *Soybean Science*, 2018, 37(1): 81-86.)

[20] 焦念元,李亚辉,杨 潇,等. 玉米/花生间作行比和施磷对玉米光合特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(9): 2959-2967. (Jiao N Y, Li Y H, Yang X, et al. Effects of maize/peanut intercropping row ratio and phosphate fertilizer on photosynthetic characteristics of maize [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(9): 2959-2967.)

[21] Zhu J Q, Van der Werf W, Anten N P R, et al. The contribution of phenotypic plasticity to complementary light capture in plant mixtures [J]. *New Phytologist*, 2015, 207(4): 1213-1222.

[22] Zhang L, Werf W V D, Bastiaans L, et al. Light interception and utilization in relay intercrops of wheat and cotton [J]. *Field Crops Research*, 2008, 107(1): 29-42.

[23] Maddonni G A, Otegui M E. Intra-specific competition in maize: Early establishment of hierarchies among plants affects final kernel set [J]. *Field Crops Research*, 2004, 85: 1-13.

[24] 杨峰,娄莹,刘沁林,等. 玉米行距配置对套作大豆生物量、根系伤流及养分的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(20): 4056-5064. (Yang F, Lou Y, Liu Q L, et al. Effect of maize row spacing on biomass, root bleeding sap and nutrient of soybean in relay strip intercropping systems[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(20): 4056-5064.)

[25] 高仁才,杨 峰,廖敦平,等. 行距配置对套作大豆冠层光环境及其形态特征和产量的影响[J]. *大豆科学*, 2015, 34(4): 611-615. (Gao R C, Yang F, Liao D P. et al. Effects of different row spacings of maize on light environment, morphological characteristics and yield of soybeans in a relay intercropping system[J]. *Soybean Science*, 2015, 34(4): 611-615.)

[26] Willey R W. Intercropping its importance and research needs: I. Competition and yield advantage [J]. *Field Crops Abstracts*, 1979, 32: 1-10.

[27] Willey R W, Rao M R. A competitive ratio for quantifying competition between intercrops [J]. *Experimental Agriculture*, 1980, 16(2): 117-125.

[28] Trinder C, Brooker R, Davidson H, et al. Dynamic trajectories of growth and nitrogen capture by competing plants [J]. *New Phytologist*, 2012, 193(4): 948-958.

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

[30] Li L, Sun J H, Zhang F S, 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.

(上接第 216 页)

[2] 姜洪真,马伯军,钱前,等. 全基因组关联分析(GWAS)在作物农艺性状研究中的应用[J]. *农业生物技术学报*, 2018, 26(7): 1244-1257. (Jiang H Z, Ma B J, Qian Q, et al. Application of Genome-wide Association Analysis (GWAS) in the study of crop agronomic characters [J]. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 2018, 26(7): 1244-1257.)

[3] 王艳,韩英鹏,李文滨. 大豆分子标记研究新进展[J]. *大豆科学*, 2015, 34(1): 148-154, 162. (Wang Y, Han Y P, Li W B. New progress in the research of soybean molecular markers [J]. *Soybean Science*, 2015, 34(1): 148-154, 162.)

[4] Wang Q, Tian F, Pan Y, et al. A SUPER powerful method for genome wide association study [J]. *PLoS One*, 2014, 9(9): 684-695.

[5] 唐友,郑萍,王嘉博,等. 对比 Bayesian B 等多种方法的大豆全基因组选择应用研究[J]. *大豆科学*, 2018, 37(3): 353-358. (Tang Y, Zheng P, Wang J B, et al. Application research for soybean genomics selection by comparing Bayesian B and other methods [J]. *Soybean Science*, 2018, 37(3): 353-358.)

[6] 周永正. 一般混合线性模型固定效应、随机效应与另一随机向量的联合估计[J]. *数学的实践与认识*, 2011(19): 58-64. (Zhou Y Z. Joint estimation of fixed effects, random effects and another random vector in general mixed linear models. Practice and cognition of [J]. *Journal of Mathematics in Practice and Theory*, 2011(19): 58-64.)

[7] Zhang Z, Ersoz E, Lai C Q, et al. Mixed linear model approach adapted for genome-wide association studies[J]. *Nature Genetics*, 2010, 42: 355-360.

[8] 韩丹丹,赵敬丽,王丽娟,等. 动物全基因组关联分析的混合模型方法[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2017(9): 107-109. (Han D D, Zhao J L, Wang L J, et al. Mixed model method for animal genome association analysis [J]. *Heilongjiang Animal Husbandry Veterinary*, 2017(9): 107-109.)

[9] 厉新民,林鸿宣. 全基因组关联分析实现水稻粒型自然变异的分子解析[J]. *植物学报*, 2016, 51(4): 411-415. (Li X M, Lin H X. Molecular analysis of natural variation of rice grain type by genome-wide association analysis [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2016, 51(4): 411-415.)

[10] Meuwissen T H, Hayes B J, Goddard M E. Prediction of total genetic value using genome-wide dense marker maps[J]. *Genetics*, 2001, 157(4): 1819-1829.

[11] Tang Y, Liu X L, Wang J B, et al. GAPIT Version 2: An enhanced integrated tool for genomic association and prediction[J]. *Plant Genome*, 2016, 9(2): 1-9.

[12] 张统雨,朱才业,杜立新,等. 羊重要性状全基因组关联分析研究进展[J]. *遗传*, 2017, 39(6): 491-500. (Zhang T Y, Zhu C Y, Du L X, et al. Advances in genome-wide association analysis of important traits in sheep [J]. *Heredity*, 2017, 39(6): 491-500.)

[13] 薛永国,魏嵘,唐晓飞,等. 黑龙江省育成大豆品种性状演变分析[J]. *大豆科学*, 2015, 34(3): 361-366. (Xue Y G, W L, Tang X F, et al. Analysis of the character evolution of soybean cultivars bred in Heilongjiang province [J]. *Soybean Science*, 2015, 34(3): 361-366.)

[14] Li M, Liu X, Bradbury P, et al. Enrichment of statistical power for genome-wide association studies[J]. *BMC Biology*, 2014, 12: 73.