



大豆品种及品种混合与玉米间作对玉米/大豆间作生产力的影响

赵建华¹, 李春杰², 孙建好¹, 李伟绮¹, 吴科生¹, 陈亮之¹, 杨新强¹, 郑浩飞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 资源与环境学院国家农业绿色发展研究院, 北京 100193)

摘要:为筛选适宜于甘肃河西走廊灌区与玉米间作的大豆品种,提升玉米/大豆间作体系生产力。于2021—2022年在甘肃张掖开展田间试验,设置玉米分别与4个大豆品种间作:玉米/长农15 (M/CN15)、玉米/陇中黄601 (M/LZH601)、玉米/陇豆78-1 (M/LD78-1)、玉米/Williams82 (M/Williams82);玉米间作2个品种大豆混合,即玉米/(陇豆78-1 + Williams82),记为M/2SM;玉米间作4个品种大豆混合,即玉米/(长农15 + 陇中黄601 + 陇豆78-1 + Williams82),记为M/4SM。通过测定单间作条件下作物产量,分析各间作体系生产力 (productivity)、土地当量比 (Land Equivalent Ratio, LER)、作物偏土地当量比 (partial Land Equivalent Ratio, pLER)、间作作物增产率 (Overyielding, OY)、大豆相对于玉米竞争力 (Aggressivity, A_{sm}),以明确不同大豆品种对作物产量、体系生产力、种间资源竞争的影响。结果表明:各间作体系生产力均显著高于对应单作加权平均生产力,M/LD78-1、M/LZH601和M/CN15的总LER均大于1,M/Williams82、M/2SM和M/4SM的总LER均小于1,各间作体系大豆偏土地当量比 ($pLER_s$)均小于0.5,玉米偏土地当量比 ($pLER_m$)均大于0.5,M/LZH601中 $pLER_m$ 最高为0.72;各间作体系大豆的增产率 (OY_s)均为负值,玉米的增产率 (OY_m)均为正值,M/LZH601中玉米的增产率最高为44.13%;大豆相对于玉米的资源竞争值均为负值,M/LZH601中大豆相对于玉米的资源竞争力最弱,为-0.673; A_{sm} 与间作体系生产力呈显著负相关。综上,大豆品种混合后与玉米间作无间作产量优势,陇中黄601是适宜河西走廊灌区玉米/大豆间作体系间作优势发挥的大豆品种。

关键词:玉米/大豆间作;大豆品种;玉米间作混合大豆;生产力

Effects of Soybean Varieties and Mixed Soybean Intercropped with Maize on Productivity of Maize/Soybean Intercropping Systems

ZHAO Jianhua¹, LI Chunjie², SUN Jianhao¹, LI Weiqi¹, WU Kesheng¹, CHEN Liangzhi¹, YANG Xinqiang¹, ZHENG Haofei¹

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

Abstract: In order to select suitable soybean varieties to intercrop with maize to improve productivity of maize/soybean intercropping system. A field experiment was carried out from 2021 to 2022 in Zhangye, Gansu province, China, the experimental treatments included: maize/Changnong 15 (M/CN15), maize/Longzhonghuang 601 (M/LZH601), maize/Longdou78-1 (M/LD78-1), maize/Williams82 (M/Williams82); and maize intercropped with mixed two varieties of soybeans, maize/(LD78-1 + Williams82), recorded as M/2SM; maize intercropped with mixed four varieties of soybean, maize/(Changnong15 + Longzhonghuang601 + Longdou78-1 + Williams82), recorded as M/4SM. We investigated crop yield of intercropped and pure stand, and analyzed the productivity of each intercropping system (productivity), land equivalent ratio (LER), partial land equivalent ratio (pLER), overyielding (OY), and aggressivity of soybean relative to maize (A_{sm}) in order to clarify the effects of different soybean varieties on crop yield, intercropping system productivity, and interspecific interaction. The results showed that the productivity of each intercropping system was significantly higher than the weighted average productivity of the corresponding monocrops, the LER values of M/LD78-1, M/LZH601 and M/CN15 were greater than 1, whereas the LER value of M/Williams82, M/2SM and M/4SM were less than 1. The $pLER_s$ of each intercropping system were less than 0.5, whereas the $pLER_m$ was greater than 0.5, and the greatest $pLER_m$ of 0.72 was obtained by M/LZH601. The OY of soybean in each intercropping system was negative, and the OY of maize was positive, the highest OY of maize was obtained by M/LZH601 at 44.13%; the aggressivity value of soybean relative to maize was negative between intercropping systems, and the aggressivity value of soybean relative to maize in M/LZH601 was the weakest as -0.673. A_{sm} was significantly negatively correlated to the productivity of the intercropping system. In summary, there was not intercropping yield advantage if maize intercropped with mixed soybean varieties, Longzhonghuang 601 is suitable varieties for maize/soybean intercropping system intercropping in the Hexi Corridor irrigation area.

Keywords: maize/soybean intercropping; soybean variety; maize intercropped with mixed soybean; productivity

收稿日期:2024-08-08

基金项目:国家重点研发计划(2022YFD1900200);国家自然科学基金(32060261)。

第一作者:赵建华(1980—),男,博士,副研究员,主要从事间套作与资源高效利用方面的研究。E-mail:zhaojianhuatt@163.com。

相对于单一种植,间作在增加农田生物多样性、增加生产力、增强生产力稳定性、控制病虫害等方面优势突出^[1]。间作产量优势主要由种间相互作用决定,当种间互补大于种间竞争时,间作体系表现为间作优势^[2-5];时空生态位分离为间作物种提供了时间和空间上资源利用的错位,促使间作物种资源高效利用^[6-8],由时间生态位分离产生的竞争恢复理论是间作优势发挥的主要驱动^[9-10]。不同的物种由于物种间生物学特性差异,间作后,物种间相互作用必然表现不同,从而导致不同的间作产量优势,如前期研究表明^[11],玉米分别与小麦、胡麻、豌豆、大豆、甘蓝、蒜苗间作,不同的配对作物对玉米的产量影响不一,这充分说明,种间配置是改变间作体系作物种间相互作用的前提和基础。

玉米/豆科间作可实现间作体系氮肥投入减量,间作物种氮素高效利用,间作物种及体系生产力提升,被认为是绿色高效的种植方式^[12]。特别是伴随玉米/大豆带状复合种植技术在全国范围的推广,针对玉米/大豆带状复合种植,学者们从资源高效利用^[13-14]、种植规格^[15-18]等方面开展了大量研究,以期调控最优的时空布局,发挥该体系的最大生产力优势。

然而,玉米/大豆间作体系的间作优势发挥存在区域差异,在河西走廊灌区,玉米和大豆同种,几乎同收,过长的共生期(约120 d左右)限制了体系产量优势发挥。因此,针对玉米/大豆间作体系进行有效的时空布局将有利于体系生产力优势的发挥,如何提升系统生产力,选择合适的大豆品种与玉米间作就显得尤为重要。为此,本研究通过选用不同的大豆品种与玉米间作,探究不同的大豆品种以及大豆品种混合对与之间作的玉米产量、体系生产力、大豆和玉米的相对竞争力的影响,以期筛选出适宜于河西走廊灌区玉米/大豆间作体系间作优势发挥的大豆品种。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2021—2022年在甘肃省农业科学院张掖节水农业试验站进行(38°56′N,100°26′E),试验站位于张掖市南15 km处,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,属于典型干旱灌溉农业区,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1.0 m左右;土壤质地为沙质壤土,有机质22.6 g·kg⁻¹,水解氮100.0 mg·kg⁻¹,速效磷53.6 mg·kg⁻¹,速效钾111.0 mg·kg⁻¹,pH8.33。

1.2 材料

考虑玉米和大豆种间配置后大豆品种特性(熟期和株型)差异对间作大豆产量及体系生产力的影响,本研究选用早熟大豆品种3个,分别为甘肃省农业科学院作物研究所选育的陇中黄601和陇豆78-1,长春市农业科学院大豆所选育的长农15,晚熟大豆品种1个,美国品种Williams82。所有大豆品种由国家作物种质资源库甘肃分库提供,玉米品种选用先玉335。供试氮肥选用尿素(总含氮量≥46%),为甘肃刘化(集团)有限责任公司生产,磷肥选用重过磷酸钙(P₂O₅含量≥43%),为云南磷化集团海口磷业有限公司生产。

1.3 试验设计

设置玉米分别与4个大豆品种间作,即玉米/长农15(M/CN15)、玉米/陇中黄601(M/LZH601)、玉米/陇豆78-1(M/LD78-1)和玉米/Williams82(M/Williams82)。另设置玉米间作混合大豆品种,包括玉米间作2个品种大豆混合,即玉米/(陇豆78-1+Williams82),记为M/2SM,玉米间作4个品种大豆混合,即玉米/(长农15+陇中黄601+陇豆78-1+Williams82),记为M/4SM。大豆品种混合时,按每个品种同等籽粒数量混合。试验处理共6个(表1)。

表1 试验处理对照表
Table 1 Comparison table of treatments

处理代码 Treatment code	玉米/大豆品种组合 Maize/soybean varieties combination
M/CN15	先玉335/长农15
M/LZH601	先玉335/陇中黄601
M/LD78-1	先玉335/陇豆78-1
M/Williams82	先玉335/Williams82
M/2SM	先玉335/(陇豆78-1+Williams82)
M/4SM	先玉335/(长农15+陇中黄601+ 陇豆78-1+Williams82)

种植方式包括玉米/大豆间作、单作大豆和单作玉米。间作种植行比为 2:2,即 2 行大豆,2 行玉米,大豆和玉米种植行距均为 50 cm,株距 20 cm,每个间作带幅 2.0 m;单间作种植规格一致;玉米和 大豆单作种植密度均为 10 万株·hm⁻²,玉米和 大豆间作种植密度均为 5 万株·hm⁻²。小区内作物东

西向种植,间作小区包括 3 个间作组合带,小区面积 24 m² (6 m×4 m),小区与小区间隔 50 cm,随机区 组排列,重复 3 次。施肥量为 N 300 kg·hm⁻²,其中 50% 基施,50% 在玉米大喇叭口期追施; P₂ O₅ 90 kg·hm⁻²,一次性基施。播种时采用点播器人工 点播,出苗后间苗以保证 1 穴 1 株。

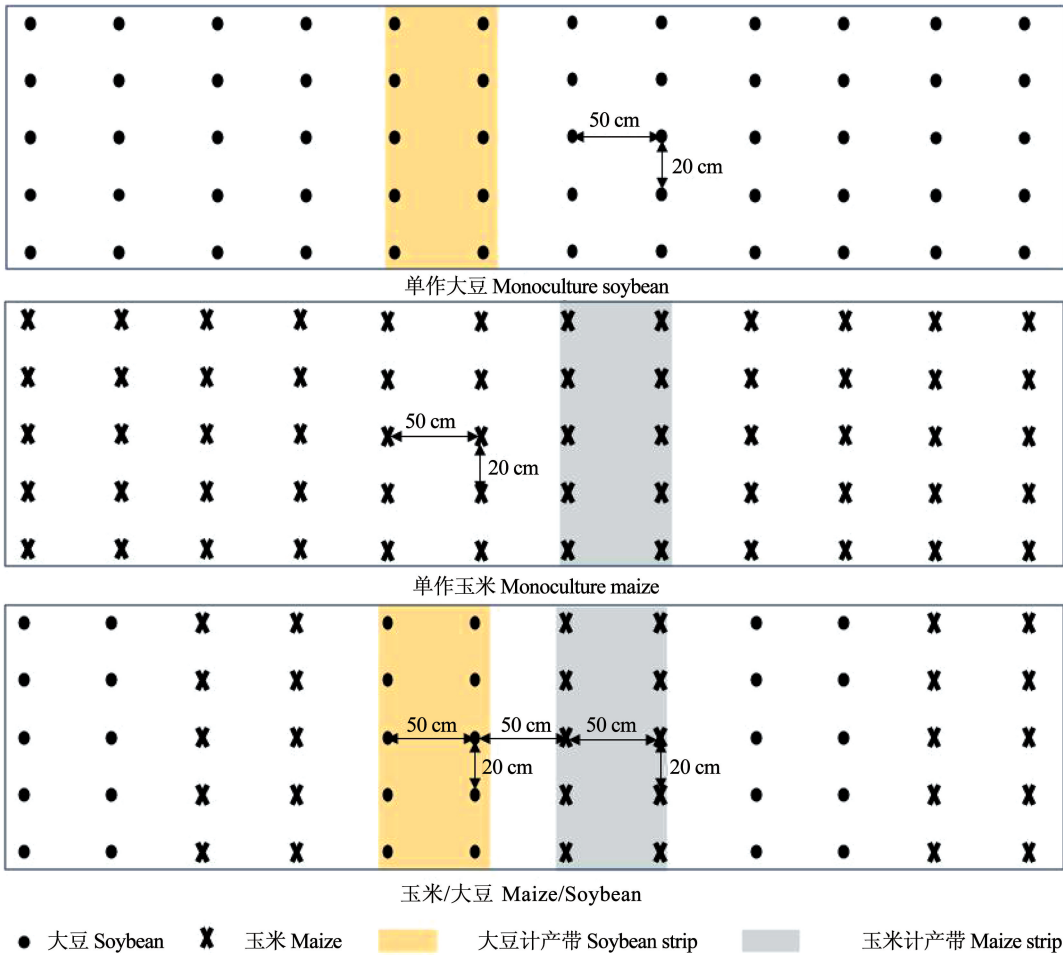


图 1 作物种植及收获计产带示意图

Fig. 1 Diagram of crop planting and harvesting strips

1.4 样品采集

大豆和玉米成熟时,对于间作,在间作种植区的 3 个间作带幅中选取中间带幅,整带幅收获作物 籽粒以计算产量,单作作物计产面积同间作。

1.5 方法

1.5.1 单作体系加权平均生产力 进行单间作生 产力对比时,单作体系生产力采用加权平均方法计 算,即将单作中各作物籽粒产量根据其在间作系统 中的面积占比进行加权平均^[19];间作体系生产力为 间作组分作物实际面积下籽粒产量加和。

加权产量 = $Y_{ss} \times P_s \times Y_{sm} \times P_m$,式中, Y_{ss} 和 Y_{sm} 分别为单作大豆和单作玉米的籽粒产量。 P_s 和

P_m 分别表示大豆和玉米在间作体系中的面积占 比,经核算,本研究大豆和玉米的面积占比分别为 0.50。

1.5.2 土地当量比 土地当量比 (Land Equivalent Ratio, LER) 用于衡量间作优势,其意义在于单作要 获得与间作相同的产量所需要的耕地面积^[20]。

$$LER = pLER_s + pLER_m = \frac{Y_{is}}{Y_{ss}} + \frac{Y_{im}}{Y_{sm}}$$
式中, Y_{is} 和 Y_{im}

分别为间作大豆和玉米的产量; Y_{ss} 和 Y_{sm} 分别为 单作大豆和玉米的产量。 $pLER_s$ 和 $pLER_m$ 分别为大豆 和玉米的偏土地当量比。当 $LER > 1$,表明间作有优 势,当 $LER < 1$ 为间作劣势。

1.5.3 增产率 增产率 (Overyielding, OY) 是指间作与单作相比产量或生物量增加或降低的程度^[21]。

作物增产率 $OY = \frac{Y_i - P \times Y_s}{P \times Y_s} \times 100\%$, 式中, Y_i 表示间作物产量, Y_s 表示对应单作物产量, P 表示间作物在间作体系中的面积占比。当 $OY > 0$, 表示间作物有增产优势, 当 $OY < 0$, 表示间作物产量劣势。

1.5.4 竞争力 竞争力 (Aggressivity, A) 指间作中一种作物相对于另一种作物对水分、养分等有关资源的竞争力^[22]。

$A_{sm} = \frac{Y_{is}}{Y_{ss} \times P_s} - \frac{Y_{im}}{Y_{sm} \times P_m}$, 式中, A_{sm} 为大豆相对于玉米的资源竞争力; Y_{is} 和 Y_{ss} 分别代表大豆间作和单作产量, Y_{im} 和 Y_{sm} 分别代表玉米间作和单作产量。 P_s 和 P_m 分别为大豆和玉米在间作中的占地比例。当 $A_{sm} > 0$ 时, 表明大豆竞争力强于玉米; $A_{sm} < 0$, 玉米强于大豆。

1.6 数据分析

使用 Excel 2016 软件进行数据整理, 采用 R 4.3.2 软件进行图形绘制和处理间差异显著性分析。

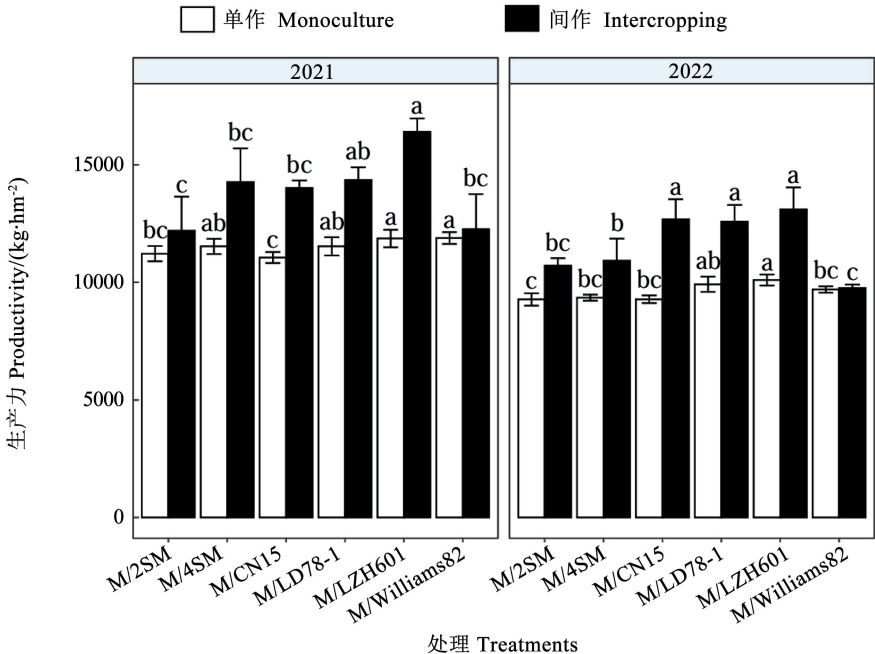
2 结果与分析

2.1 体系生产力

如图 2 所示, 玉米/大豆间作体系的生产力显著高于单作加权生产力。两年平均, 间作体系生产力 ($12\,770.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 较单作体系生产力 ($10\,559.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 高 20.9%。

对比各处理间作体系生产力, 2021 年, M/LZH601 生产力最高达 $16\,405.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 显著高于 M/CN15、M/Williams82、M/2SM 和 M/4SM; 2022 年, M/CN15、M/LD78-1 和 M/LZH601 生产力无显著差异, 但显著高于 M/Williams82、M/2SM 和 M/4SM。两年平均, M/LZH601 间作生产力最高, 达 $14\,751.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; M/Williams82 最低。M/2SM 和 M4SM 生产力均显著低于 M/LZH601。

对比单作加权生产力, 2021 年, M/2SM 和 M/CN15 单作加权生产力显著低于 M/LZH601 和 M/Williams82; 2022 年, M/2SM、M/4SM、M/CN15 和 M/Williams82 单作加权生产力显著低于 M/LZH601。两年平均, M/Williams82 和 M/LZH601 的单作加权生产力均显著高于其他处理。



注: 图柱上方不同小写字母代表同一年份同一种植体系下各处理间差异显著 ($P < 0.05$)。误差线表示平均值的标准误差 ($n = 3$)。

Note: Different lowercase letters above the bars indicate significant difference at $P < 0.05$ among treatments at the same planting pattern in the same year. Error bar represent the standard errors of the means ($n = 3$).

图 2 不同玉米/大豆间作模式单间作生产力

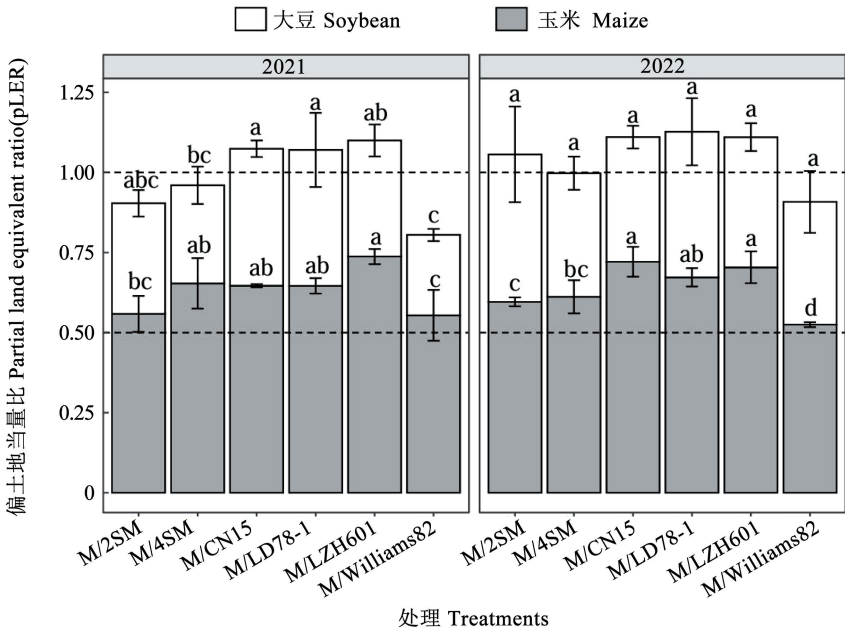
Fig. 2 Productivity of monoculture and intercropping in different maize/soybean intercropping systems

2.2 偏土地当量比

两年中,各间作体系中玉米的偏土地当量比($pLER_s$)均大于0.5,大豆的偏土地当量比($pLER_s$)均小于0.5(图3)。对比大豆偏土地当量比($pLER_s$):2021年,M/CN15和M/LD78-1体系的 $pLER_s$ 分别为0.42和0.43,显著高于M/4SM(0.31)和M/Williams82(0.25);2022年,各间作体系间 $pLER_s$ 无显著差异;两年平均,M/LD78-1的 $pLER_s$ 最高为0.44,M/Williams82的 $pLER_s$ 最低为0.32。对比玉米偏土地当量比($pLER_m$):2021年,

M/2SM(0.56)和M/Williams82(0.55)显著低于M/LZH601(0.74),M/4SM、M/CN15、M/Williams82和M/LZH601体系间 $pLER_m$ 无显著差异;2022年,M/2SM(0.60)、M/4SM(0.61)和M/Williams82(0.53)均显著低于M/LZH601(0.70)和M/CN15(0.72);两年平均,M/LZH601体系 $pLER_m$ 为0.72,显著高于其他体系。

对比土地当量比(LE R),两年平均,M/CN15、M/LD78-1和M/LZH601体系总LE R 均大于1,而M/2SM、M/4SM和M/Williams82体系均小于1。



注:图柱上方不同小写字母代表同一年份同一种植体系下各处理间差异显著($P < 0.05$)。误差线表示平均值的标准误差($n = 3$)。

Note: Different lowercase letters above the bars indicate significant difference at $P < 0.05$ among treatments at the same planting pattern in the same year. Error bar represent the standard errors of the means ($n = 3$).

图3 不同玉米/大豆间作体系偏土地当量比

Fig.3 Partial land equivalent ratio in different maize/soybean intercropping systems

2.3 作物产量及增产率

如表2所示,大豆品种陇中黄601和Williams82的单作产量显著高于长农15和陇豆78-1,高于2个品种大豆混合和4个品种大豆混合。与玉米间作后,陇豆78-1和陇中黄601产量显著高于其他处理,无论2个品种混合还是4个品种混合后与玉米间作,产量均显著降低;两年中,间作大豆产量最高均为陇中黄601,平均产量为 $1\,286.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。两年所有间作大豆增产率均为负值,2021年,M/Williams82中大豆产量降幅最大,达49.82%,2022年,各间作体系中大豆增产率无显著差异,两年平均,M/Williams82中大豆减产最严重,达36.59%。

2021年,与Williams82间作的玉米产量、与2个品种混合大豆间作的玉米产量显著低于其他处理,同样地,2022年,与Williams82间作的玉米产量、及与品种混合大豆间作的玉米产量均显著低于其他处理。间作玉米增产率均为正值,两年平均,与陇中黄601间作的玉米增产率最高,达44.13%,而与Williams82间作的玉米增产率最低,仅为7.88%。

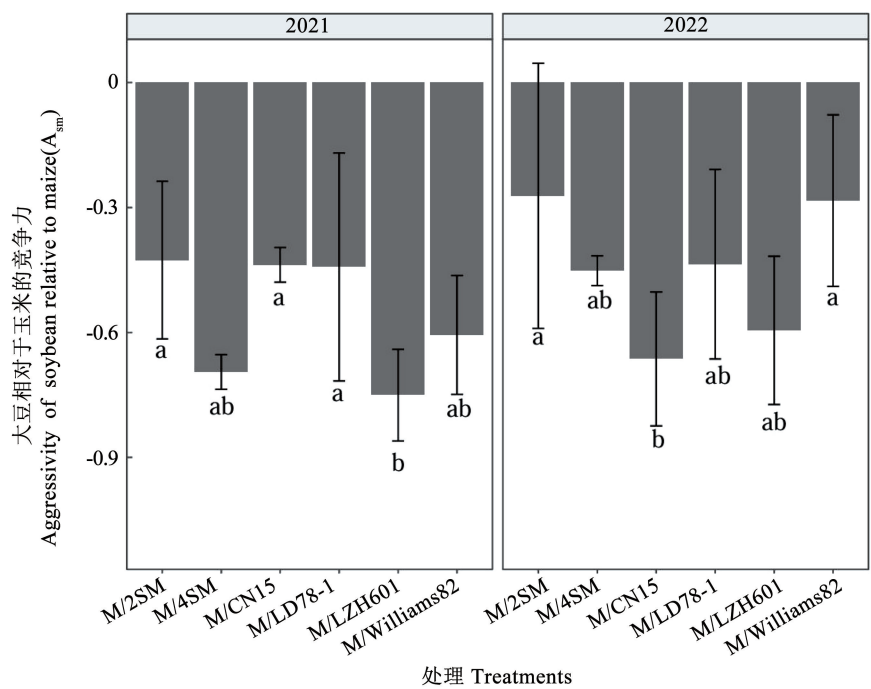
2.4 大豆相对玉米的竞争力

大豆相对玉米的资源竞争力 A_{sm} 值两年均为负值。对比来看,2021年,M/LZH601体系中 A_{sm} 值最低,其他各处理的 A_{sm} 值之间无显著差异;2022年,M/CN15体系中 A_{sm} 值最低;两年平均,M/LZH601体系中 A_{sm} 值显著低于其他处理。

表 2 不同玉米/大豆间作体系作物产量及增产率
Table 2 Yield and overyielding of crops in different maize/soybean intercropping systems

年份 Year	种植模式 Planting patterns	大豆 Soybean/(kg·hm ⁻²)				玉米 Maize/(kg·hm ⁻²)				大豆增产率 Overyielding of soybean/%	玉米增产率 Overyielding of maize/%
		间作 Intercropping	单作 Monoculture	间作 Intercropping	单作 Monoculture	间作 Intercropping	单作 Monoculture	间作 Intercropping	单作 Monoculture		
2021	玉米/2 个品种大豆	550.0 ± 12.5 c	1608.4 ± 191.0 cd	11650.6 ± 1436.3 bc	20834.3 ± 490.8					-30.97 abc	11.68 b
	玉米/4 个品种大豆	675.0 ± 87.5 bc	2225.1 ± 175.0 bc	13592.3 ± 1347.4 a	20834.3 ± 490.8					-38.76 bc	30.72 a
	玉米/Williams82	737.5 ± 135.2 b	2933.5 ± 427.5 a	11529.7 ± 1544.7 c	20834.3 ± 490.8					-49.82 c	10.78 b
	玉米/陇豆 78-1	895.9 ± 118.8 a	2225.1 ± 738.7 bc	13454.8 ± 517.9 ab	20834.3 ± 490.8					-15.11 a	29.18 ab
	玉米/陇中黄 601	1041.7 ± 59.1 a	2900.1 ± 264.6 ab	15363.3 ± 586.7 a	20834.3 ± 490.8					-27.56 ab	47.48 a
2022	玉米/长农 15	545.9 ± 38.2 c	1283.4 ± 170.2 d	13467.4 ± 338.2 ab	20834.3 ± 490.8					-14.48 a	29.28 ab
	玉米/2 个品种大豆	919.8 ± 100.8 c	2133.6 ± 633.0 c	9788.8 ± 270.9 bc	16421.5 ± 240.3					-7.97 a	19.22 c
	玉米/4 个品种大豆	868.1 ± 152.3 c	2280.6 ± 494.7 bc	10053.3 ± 996.1 b	16421.5 ± 240.3					-22.83 a	22.34 bc
	玉米/Williams82	1138.4 ± 316.7 bc	2974.1 ± 407.5 ab	8619.5 ± 181.3 c	16421.5 ± 240.3					-23.36 a	4.98 d
	玉米/陇豆 78-1	1538.1 ± 361.4 a	3414.1 ± 528.9 a	11046.2 ± 518.5 ab	16421.5 ± 240.3					-9.10 a	34.52 ab
平均 Mean	玉米/陇中黄 601	1531.5 ± 147.0 ab	3776.7 ± 238.9 a	11565.9 ± 987.4 a	16421.5 ± 240.3					-18.72 a	40.77 a
	玉米/长农 15	830.1 ± 120.8 c	2139.7 ± 340.3 c	11847.9 ± 927.1 a	16421.5 ± 240.3					-22.15 a	44.21 a
	玉米/2 个品种大豆	734.9 ± 44.2 c	1871.0 ± 398.9 cd	10719.7 ± 800.7 c	18627.9 ± 183.6					-19.47 ab	15.45 d
	玉米/4 个品种大豆	771.6 ± 86.6 bc	2252.9 ± 267.1 c	11822.8 ± 1080.7 b	18627.9 ± 183.6					-30.79 ab	26.53 c
	玉米/Williams82	938.0 ± 140.8 b	2953.8 ± 404.5 ab	10074.6 ± 804.6 c	18627.9 ± 183.6					-36.59 b	7.88 d
	玉米/陇豆 78-1	1217.0 ± 215.4 a	2819.6 ± 571.6 b	12250.5 ± 347.7 b	18627.9 ± 183.6					-12.11 a	31.85 bc
	玉米/陇中黄 601	1286.6 ± 83.3 a	3338.4 ± 60.2 a	13464.6 ± 612.0 a	18627.9 ± 183.6					-23.14 ab	44.13 a
	玉米/长农 15	688.0 ± 41.3 c	1711.6 ± 118.4 d	12657.6 ± 298.3 ab	18627.9 ± 183.6					-18.31 ab	36.75 ab
显著性检验 Significance test (<i>P</i> -value)											
年份 Year(Y)		<0.0001	0.0003	<0.0001						0.0310	0.6875
种植体系 Crop system(Cs)		<0.0001	<0.0001	<0.0001						0.1308	<0.0001
Y × Cs		0.2341	0.1256	0.2379						0.4740	0.1411

注:同列数据中不同小写字母表示同一年份处理间差异显著 (*P* < 0.05)。
Note: Values in the same column followed by different lowercase letters indicate significant difference at *P* < 0.05 among treatments in the same year.



注:柱上方不同小写字母代表同一年份处理间差异显著($P<0.05$)。误差线表示平均值的标准误差($n=3$)。
Note: Aggressivity of legumes relative to maize. Different lowercase letters above the bars indicate significant difference at $P<0.05$ among treatments in the same year. Error bar represent the standard errors of the means ($n=3$).

图 4 不同玉米/大豆间作体系大豆相对玉米资源竞争力

Fig. 4 Aggressivity of soybean relative to maize in different maize/soybean intercropping systems

2.5 间作体系生产力与竞争力的关系

大豆相对于玉米的竞争力与玉米/大豆体系生产力呈显著的负相关,随大豆相对于玉米的竞争力增强,间作体系生产力下降(图 5)。对比来看,陇中黄

601 相对于玉米的竞争力最弱,两年平均为 -0.673 ,对应的体系生产力最高,为 $14\,751.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。2 个品种混合大豆相对于玉米的竞争力值最大为 -0.349 ,对应生产力为 $11\,454.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

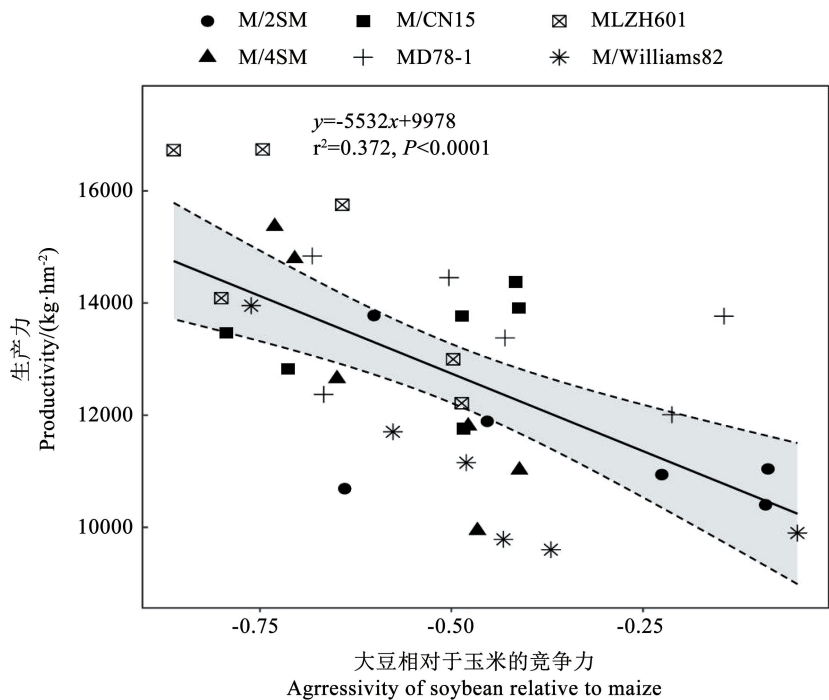


图 5 大豆相对于玉米的资源竞争力与玉米/大豆间作体系生产力的关系

Fig. 5 Relationship between aggressivity of soybean relative to maize and productivity of maize/soybean intercropping

3 讨论

3.1 大豆品种或大豆品种混合后与玉米间作对间作优势的影响

研究已证实,相对于单作种植,间作具有明显的产量优势,很多学者引入单作加权平均产量与间作体系产量进行体系生产力对比,且很多研究也表明,间作体系生产力均显著高于单作加权平均产量^[23-24]。本研究表明,各间作体系的生产力均较对应单作加权平均产量高,表明间作生产力优势,但不同大豆品种参与的间作体系生产力表现不同,其中 M/LZH601 体系生产力显著高于其他体系。

土地当量比 LER 表征间作体系相对于单作体系的土地利用效率^[25-26],其中偏土地当量比可以更好地反映间作组分作物相对于对应单作的土地利用优势及组分作物对于体系生产力的贡献^[27],本研究中两年平均,M/LD78-1、M/LZH601、M/CN15 这3个体系的 LER 大于 1,而 M/Williams82、M/2SM 和 M/4SM 的 LER 小于 1,表现为间作劣势。对比来看,相对于其他间作体系,M/Williams82 体系中大豆和玉米的偏土地当量比均较低,表明两种作物间作后产量均相对单作而言无优势。将所有间作体系偏土地当量比平均后,大豆偏土地当量比值为 0.38,小于 0.5,玉米的偏土地当量比值为 0.64,大于 0.5,说明间作体系生产力的主要贡献来自于玉米。相比对应单作,所有的间作大豆均减产,这进一步说明,间作大豆产量损失,从而导致大豆偏土地当量比低于 0.5。间作体系间对比,间作 Williams82 产量有 36.59% 的降幅,减产最为严重,玉米的增产率也仅为 7.88%,远低于其他间作体系中玉米的产量增幅,这表明玉米间作 Williams82 后,产量劣势是因为 Williams82 大幅减产。以往对比研究玉米/豌豆、玉米/蚕豆和玉米/大豆体系 LER 发现,玉米/大豆体系的 LER 总是低于玉米/豌豆和玉米/蚕豆^[28],究其原因也是大豆的大幅减产。反观本研究中玉米与 LZH601 间作,虽然 LZH601 有 23.14% 减产,但是与之间作的玉米有 44.13% 增产,玉米作为主导作物的大幅增产弥补了大豆的减产损失。

相对于单作,间作大豆产量的大幅损失是造成

玉米/大豆间作体系产量优势不明显的原因之一,本研究设计大豆品种混合后与玉米间作,以期保证大豆产量,然而从研究结果看,不管大豆 2 个品种混合还是 4 个品种混合后与玉米间作,整个体系的生产力均相对于未混合的大豆与玉米间作体系的生产力低。进一步探究大豆和玉米的增产率发现,相比单作大豆,2 个品种混合和 4 个品种混合的间作大豆平均增产率分别为 -19.47% 和 -30.79%,与其他间作大豆增产率未达显著差异,可是对应的玉米增产率仅分别为 15.45% 和 26.53%,远低于 M/LD78-1 中玉米的增产率 (31.85%)、M/LZH601 (44.13%) 和 M/CN15 (36.75%),这充分说明大豆品种混合后与玉米间作,体系产量劣势在于玉米的减产。本研究中,相比较其他体系,2 个大豆品种混合的间作体系 A_{sm} 值较大,可能的原因是两品种混合的大豆种内竞争加剧,从而增强了大豆对玉米的资源竞争,然而当 4 个品种混合后, A_{sm} 值反而降低,可能的原因在于伴随混合大豆品种增多,种内竞争弱化,也弱化了对于玉米的竞争。由这些结果推断,在玉米/大豆间作体系中不同大豆混合后与玉米间作,想要保证大豆和玉米产量,被混合大豆品种的选择及混合品种的数量很关键,本研究中混合时为随机选取,对于品种选择和混合品种数量的研究有待于进一步探究。

3.2 大豆品种或大豆品种混合后与玉米间作对种间竞争力的影响

竞争—恢复原理是间作产量优势的主要驱动因素之一,该原理正是利用了间作物种时空资源利用分异,弱化了种间竞争^[29-31]。本研究中,各间作体系中大豆相对玉米的资源竞争力 A_{sm} 值两年均为负值,这表明玉米是竞争优势作物,M/LZH601 体系中 A_{sm} 值最低 (-0.673),说明玉米相对于 LZH601 具有更强的资源竞争力,而其他间作大豆相对于玉米的资源竞争均强于陇中黄 601。特别地,2 个大豆品种混合和 4 个品种混合后,大豆相对于玉米的资源竞争力分别为 -0.349 和 -0.573,与之间作的玉米增产率仅分别为 15.45% 和 26.53%,远低于与陇中黄 601 间作玉米的 44.13%,这表明大豆对玉米形成的强资源竞争促使玉米增产困难,以致于降低了体系的生产力优势。这也印证了 Li 等^[32] 和本人前期的研究结果^[33],即对于玉米/大豆体系而言,间

作产量优势主要源于选择效应,即主要来源于高产作物—玉米的产量贡献。本研究中,与陇豆 78-1、陇中黄 601 和长农 15 间作的玉米增产率均超过 30%,而与 Williams82、2 个品种混合和 4 个品种混合的玉米增产率分别仅为 15.45%、26.53% 和 7.88%,这进一步说明玉米的增产才是玉米/大豆体系生产力的保障。大豆相对于玉米的资源竞争力与体系生产力的线性负相关关系进一步的说明;若想玉米/大豆体系高产,就要弱化玉米/大豆间作体系中大豆的竞争力,增强玉米的资源竞争,保证玉米的产量不受损严重。

4 结论

本研究中,玉米分别与 4 个大豆品种间作,且与 2 个品种混合和 4 个品种混合大豆间作,仅有玉米/陇豆 78-1、玉米/陇中黄 601 和玉米/长农 15 的土地当量比均大于 1,且 3 个体系中玉米的增产率均大于 30%,对比来看,玉米/陇中黄 601 中玉米的增产率最高,达 44.13%,陇中黄 601 相对于玉米的资源竞争力最弱,间作体系生产力最高。无论 2 个品种还是 4 个品种混合大豆与玉米间作,玉米的增产率均低于其他体系玉米的增产率,大豆相对于玉米的资源竞争力值均最大。因此,就玉米/大豆体系生产力优势而言,陇中黄 601 是适合河西走廊灌区与玉米间作的大豆品种,大豆品种混合与玉米间作无间作产量优势。

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 agroecosystem services and functioning: current knowledge and perspectives[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(4): 403-415.)

[2] 李春杰. 种内/种间互作调控小麦/蚕豆间作体系作物生长与氮磷吸收的机制[D]. 北京: 中国农业大学, 2018. (LI C J. The mechanisms of intra and interspecific interaction on regulating growth and n/p acquisition by intercropped wheat and faba bean [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018.)

[3] ZHANG F, LI L. Using competitive and facilitative interactions in intercropping systems enhances crop productivity and nutrient-use efficiency[J]. Plant and Soil, 2003, 248(1): 305-312.

[4] CHERIERE T, LORIN M, CORRE-HELLOU G. Species choice and spatial arrangement in soybean-based intercropping: Levers that

drive yield and weed control[J]. Field Crops Research, 2020, 256: 107923.

[5] 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.

[6] 董楠. 不同作物组间作优势和时空稳定性的生态机制[D]. 北京: 中国农业大学, 2017. (DONG N. The ecological mechanism of yield advantage and spatio-temporal stability in different crop combination [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.)

[7] YU Y, STOMPH T J, MAKOWSKI D, et al. Temporal niche differentiation increases the land equivalent ratio of annual intercrops: A meta-analysis [J]. Field Crops Research, 2015, 184: 133-144.

[8] 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: 3110.

[9] LI L, SUN J, ZHANG F, 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(3): 173-181.

[10] LI L, SUN J, ZHANG F, 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.

[11] ZHAO J, BEDOUSSAC L, SUN J, et al. Competition-recovery and overyielding of maize in intercropping depend on species temporal complementarity and nitrogen supply [J]. Field Crops Research, 2023, 292: 108820.

[12] 柴强, 胡发龙, 陈桂平. 禾豆间作氮素高效利用机理及农艺调控途径研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(1): 19-26. (CHAI Q, HU F L, CHEN G P. Research advance in the mechanism and agronomic regulation of high-efficient use of nitrogen in cereal-legume intercropping [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(1): 19-26.)

[13] 覃潇敏, 潘浩男, 肖靖秀, 等. 不同磷水平下玉米-大豆间作系统根系形态变化[J]. 应用生态学报, 2021, 32(9): 3223-3230. (QIN X M, PAN H N, XIAO J X, et al. Root morphological changes in maize and soybean intercropping system under different phosphorus levels [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(9): 3223-3230.)

[14] 吕越, 吴普特, 陈小莉, 等. 玉米/大豆间作系统的作物资源竞争[J]. 应用生态学报, 2014, 25(1): 139-146. (LÜ Y, WU P T, CHEN X L, et al. Resource competition in maize/soybean intercropping system [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(1): 139-146.)

[15] 赵长江, 高菲, 李祯玮, 等. 玉米大豆不同间作行比对大豆光合生理特性及产量的影响[J]. 四川农业大学学报, 2023, 41(5): 820-825, 848. (ZHAO C J, GAO F, LI Z W, et al. Effects of different maize/soybean intercropping row ratios on photosynthetic physiological characteristics and yield of soybean [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2023, 41(5): 820-825, 848.)

[16] 姬忠明, 罗万宇, 王小春. 带宽、玉米密度对鲜食玉米鲜食大豆带状间作群体物质积累及产量的影响[J]. 四川农业大学学报, 2023, 41(5): 791-800. (JI Z M, LUO W N, WANG X C. Effects of bandwidth and maize density on matter accumulation and yield of fresh corn and soybean strip intercropping population[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2023, 41(5): 791-800.)

[17] 方佳欣. 不同带型玉豆间作系统对氮素转移和利用的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023. (FANG J X. Effects of intercropping system of different belt types on nitrogen transfer and utilization[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2023.)

[18] WU Y, GONG W, YANG F, et al. Dynamic of recovery growth of intercropped soybean after maize harvest in maize-soybean relay strip intercropping system[J]. Food and Energy Security, 2022, 11(1): e350.

[19] 李小飞. 长期间套作下作物生产力、稳定性和土壤肥力研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017. (LI X F. Effects of continuous intercropping on crop productivity, stability and soil fertility[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.)

[20] WILLY R W. Intercropping-Its importance and research needs, Part 2. Agronomy and research approaches [J]. Field Crops Research, 1979, 32: 73-85.

[21] LI Q Z, SUN J H, WEI X J, et al. Overyielding and interspecific interactions mediated by nitrogen fertilization in strip intercropping of maize with faba bean, wheat and barley[J]. Plant and Soil, 2011, 339(1): 147-161.

[22] BEDOUSSAC L, JUSTES E. A comparison of commonly used indices for evaluating species interactions and intercrop efficiency: Application to durum wheat-winter pea intercrops[J]. Field Crops Research, 2011, 124(1): 25-36.

[23] CONG W F. China's intercropping leads to higher grain yield gains [J]. Science China Life Sciences, 2020, 63(10): 1612-1614.

[24] XING Y, YU R P, AN R, et al. Two pathways drive enhanced nitrogen acquisition via a complementarity effect in long-term intercropping[J]. Field Crops Research, 2023, 293: 108854.

[25] FRIDLEY J D. The influence of species diversity on ecosystem productivity: How, where, and why? [J]. Oikos, 2001, 93(3): 514-526.

[26] WILLEY R W, RAO M R. A competitive ratio for quantifying competition between intercrops [J]. Experimental Agriculture, 1980, 16(2): 117-125.

[27] VAN DER WERF W, ZHANG L Z, LI C J, et al. Comparing performance of crop species mixtures and pure stands [J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2021, 8: 481-489.

[28] 任旭灵, 滕园园, 王一帆, 等. 玉米间作豌豆种间竞争互补对少耕密植的响应[J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(6): 860-869. (REN X L, TENG Y Y, WANG Y F, et al. Response of interspecific competition and complementarity of maize/pea intercropping to reduced tillage and high-density planting[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(6): 860-869.)

[29] 李印娟. 小麦/玉米套作系统作物光能利用效率与生长竞争恢复机制研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020. (LI Y J. Study on the recovery mechanism of crop light energy utilization efficiency and growth competition in wheat/maize intercropping system[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2020.)

[30] 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 W, ZHAO C, YU A Z, 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.)

[31] XIA H Y, ZHAO J H, SUN J H, et al. Dynamics of root length and distribution and shoot biomass of maize as affected by intercropping with different companion crops and phosphorus application rates[J]. Field Crops Research, 2013, 150: 52-62.

[32] LI X F, WANG C B, ZHANG W P, et al. The role of complementarity and selection effects in P acquisition of intercropping systems[J]. Plant and Soil, 2018, 422(1): 479-493.

[33] 赵建华, 孙建好, 陈亮之, 等. 玉/豆间作产量优势中补偿效应和选择效应的角色[J]. 作物学报, 2022, 48(10): 2588-2596. (ZHAO J H, SUN J H, CHEN L Z, et al. Role of complementarity and select effect for yield advantage of maize/legumes intercropping systems [J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(10): 2588-2596.)