

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2026.53035

青贮玉米 || 拉巴豆间作系统产量优势对空间配置的响应

张译尹** 王 斌** 王腾飞 肖爱萍 胡海英 兰 剑*

宁夏大学林业与草业学院 / 宁夏草牧业工程研究中心 / 农业农村部饲草高效生产模式创新重点实验室, 宁夏银川 750021

摘 要: 合理的豆 || 禾间作种植模式具有明显的增产优势, 然而, 在不同生态位分离间作体系中, 补偿效应和选择效应对不同间作体系的产量优势影响机理仍需进一步研究。本试验于 2021—2022 年以青贮玉米和拉巴豆为研究对象, 以单作青贮玉米(SM)、单作拉巴豆(SL)为对照, 设置青贮玉米与每穴 1 粒拉巴豆间作(ML₁)、青贮玉米与每穴 2 粒拉巴豆间作(ML₂)、青贮玉米与每穴 3 粒拉巴豆间作(ML₃)、青贮玉米与每穴 4 粒拉巴豆间作(ML₄) 4 个处理。研究分析了不同间作模式下饲草生产力、土地当量比(land equivalent ratio, LER)、增产率、相对种间竞争力(relative interspecific competitiveness, RC)和净效应(net effect, NE), 以明确补偿效应(complementarity effect, CE) 和选择效应(selection effect, SE)在间作体系产量优势发挥中的角色。结果表明, 青贮玉米与拉巴豆间作促进了系统饲草产量的形成, 系统生产力均高于单作, 其中 ML₂ 处理的总干草产量(35.19 t hm⁻²)和粗蛋白产量(3.24 t hm⁻²)达到最高, 较 SM 分别提高了 28.48%和 64.64%。所有间作模式的 LER 均大于 1, 且 LER 与补偿效应呈显著正相关, 与选择效应呈显著负相关; 同时青贮玉米增产率与补偿效应呈显著正相关($P < 0.001$), 与选择效应呈显著负相关。此外, 拉巴豆播种比例较低的 2 个处理(ML₁ 和 ML₂)主要通过补偿效应提升系统生产力, 而 ML₃ 和 ML₄ 处理的增产则主要依赖于选择效应。因此, 间作系统中的产量优势随拉巴豆播种比例的增加由补偿效应主导逐渐转变为选择效应主导。

关键词: 青贮玉米 || 拉巴豆; 间作; 产量优势; 生态位互补; 补偿和选择效应

Yield advantage of the silage maize || lablab intercropping system in response to spatial configuration

Zhang Yi-Yin**, Wang Bin**, Wang Teng-Fei, Xiao Ai-Ping, Hu Hai-Ying, and Lan Jian*

College of Forestry and Grassland, Ningxia University / Ningxia Grassland Rangeland Engineering Research Center / Key Laboratory of Forage Efficient Production Mode Innovation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yinchuan 750021, Ningxia, China

Abstract: A well-designed soybean–corn intercropping system can provide significant yield advantages. However, the underlying mechanisms by which compensation and selection effects contribute to these advantages across ecologically distinct environments remain insufficiently understood. This study, conducted from 2021 to 2022, examined silage maize and lablab. Sole-cropped silage maize (SM) and sole-cropped lablab (SL) served as controls. Four intercropping treatments were established: silage maize interplanted with one (ML₁), two (ML₂), three (ML₃), or four (ML₄) lablab seeds per hole. To clarify the roles of the complementarity effect (CE) and selection effect (SE) in intercropping yield advantages, forage productivity, land equivalent ratio (LER), yield increase rate, relative interspecific competitiveness (RC), and net effect (NE) were analyzed across treatments. Results showed that intercropping silage maize with lablab significantly enhanced forage yield, with all intercropping systems outper-

本研究由国家自然科学基金项目(32201474), 宁夏高等学校一流学科建设(草学学科)项目(NXYLXK2017A01)和“一年两熟”人工草地可持续发展模式研究与示范项目(2021BBF02001)资助。

This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (32201474), the Ningxia Higher Education Institution First-Class Discipline Construction Project (Grassland Science Discipline) (NXYLXK2017A01), and the Research and Demonstration Project on the Sustainable Development Model of “Two Crops per Year” Artificial Grasslands (2021BBF02001).

* 通信作者(Corresponding author): 兰剑, E-mail: ndlanjian@163.com

** 同等贡献(Contributed equally to this work)

第一作者联系方式: 张译尹, E-mail: 2543378861@qq.com; 王斌, E-mail: 2415540536@qq.com

Received (收稿日期): 2025-06-06; Accepted (接受日期): 2025-09-10; Published online (网络出版日期): 2025-09-22.

URL: <https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20250922.0913.002>

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

forming monocultures. Among them, ML_2 yielded the highest total dry matter (35.19 t hm^{-2}) and crude protein (3.24 t hm^{-2}), representing increases of 28.48% and 64.64%, respectively, compared to SM. All intercropping treatments exhibited LER values greater than one. LER was significantly and positively correlated with the compensation effect, but negatively correlated with the selection effect. Similarly, yield increases in silage maize were positively associated with the compensation effect ($P < 0.001$) and negatively associated with the selection effect. The productivity gains in ML_1 and ML_2 were primarily driven by the compensation effect, while those in ML_3 and ML_4 were mainly attributed to the selection effect. These findings suggest that as the proportion of lablab increases, the dominant mechanism driving yield advantages in the intercropping system gradually shifts from compensation to selection.

Keywords: silage maize || lablab; intercropping; yield advantage; ecological niche complementarity; compensation and selection effects

当前, 全球正面临着生物多样性丧失与食物安全的双重挑战。在土地利用变化、资源约束、气候变化加剧和人口持续增长等多重驱动因素作用下, 这些挑战日益严峻^[1]。与此同时, 城乡居民对肉蛋奶等畜产品的需求每年上升 2.7%~3.2%, 促进了草畜产业快速发展, 致使我国对优质饲草的需求呈“刚性”增长态势^[2-3]。西北地区作为我国重要的农牧业发展区域, 主要以牛羊产业为主, 近年来随着养殖规模的持续扩大, 导致优质饲草需求逐年攀升^[4]。因此, 通过高效栽培技术提高饲草产量、提升单位面积土地利用效率, 已成为缓解饲草供需矛盾、保障畜牧业高质量发展的有效途径。

豆禾间作种植模式作为我国传统农业的精髓, 在农田生态系统中具有重要的经济和生态意义, 并在全球范围内得到广泛应用^[5-6]。合理的间作种植模式相较于传统单作具有显著的增产优势^[7]。一方面, 由于不同作物的生长周期和需求不同, 间作能够分散单一作物生长不确定性带来的风险, 降低生产成本^[8]; 另一方面, 基于不同作物间生物学特性的差异, 间作在空间和时间上实现了集约化种植, 充分发挥了作物的共生和互补特性^[9], 同时有效利用了光能和土壤养分等自然资源, 促进了植物的生长, 具有明显的产量优势^[10]。相关研究表明, 将玉米 (*Zea mays*) 与豌豆 (*Pisum sativum*) 的行比从 2:4 扩大到 3:4 时, 种间竞争增强了 39%, 豌豆和玉米的产量分别提高了 12% 和 8%^[11]。2 行糜子 (*Panicum miliaceum*) 与 4 行绿豆 (*Vigna radiata*) 间作有利于吸收更多的土壤水分与养分, 促进作物生长, 提高糜子产量^[12]。由此可见, 优化种间配置是间作体系产量优势的基础。然而, 在间作系统中, 种间相互作用如何影响产量优势一直以来是科研工作者的研究热点。为此, 通过系统净效应 (NE) 可以更好地解释间作产量优势的实际意义^[13]。Loreau 等^[14]提出了补偿效应 (CE) 和选择效应 (SE) 的概念, 对净效应

进行了量化。补偿效应反映了间作体系中是否存在竞争的补偿, 而选择效应则反映了间作体系中有多少产量优势来源于优势作物的增产^[15]。研究表明, 补偿效应和选择效应在间作系统中会根据时空资源的可用性和物种配置表现出不同的响应^[16]。例如, 通过补偿效应和选择效应提高磷肥利用效率, 主要取决于间作系统中的作物类型和施磷量^[17]。此外, 在肥力充足的土壤环境中, 选择效应对体系的贡献可能更大^[18]。青贮玉米 (*Zea mays*) 与拉巴豆 (*Lablab*) 间作作为一种新型禾本科 || 豆科饲草种植模式, 正在西北干旱、半干旱地区快速推广^[19]。然而, 在青贮玉米 || 拉巴豆体系中, 究竟是补偿效应还是选择效应对豆科 || 禾本科产量优势起主导作用, 仍需进一步研究。鉴于此, 本研究通过开展青贮玉米与拉巴豆不同间作模式下饲草生长动态、干物质积累及生产力变化的研究, 旨在优化种间关系, 运用生态学研究分析方法, 通过选择效应和补偿效应阐明间作产量优势形成机理, 为构建区域饲草高产高效栽培模式提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2021—2022 年在宁夏银川市西夏区宁夏大学茂盛草业科技有限公司科研基地开展 ($38^{\circ}33'N$, $106^{\circ}03'E$ 、海拔 1110.4 m), 该地区光照充足, 年日照时数达 2700~3100 h, 年平均降水量为 180~210 mm, 主要集中在 7 月至 9 月, 年均相对湿度 65%~70%, 年平均气温 $8.5^{\circ}C$, 最高气温为 $38.3^{\circ}C$, 最低气温为 $-23.1^{\circ}C$ (图 1)。青贮玉米生长季的积温为 $2739.5^{\circ}C$, 无霜期 190 d 左右。土壤类型为沙壤土。试验地具备灌溉条件。播种前种植作物为饲用小黑麦。播前测定 0~20 cm 土层土壤 pH 8.42、有机质 15.45 g kg^{-1} 、全氮 0.81 g kg^{-1} 、全磷 0.78 g kg^{-1} 、有效磷 7.82 mg kg^{-1} 、硝态氮 4.52 mg kg^{-1} 、铵态氮 5.13 mg kg^{-1} 。

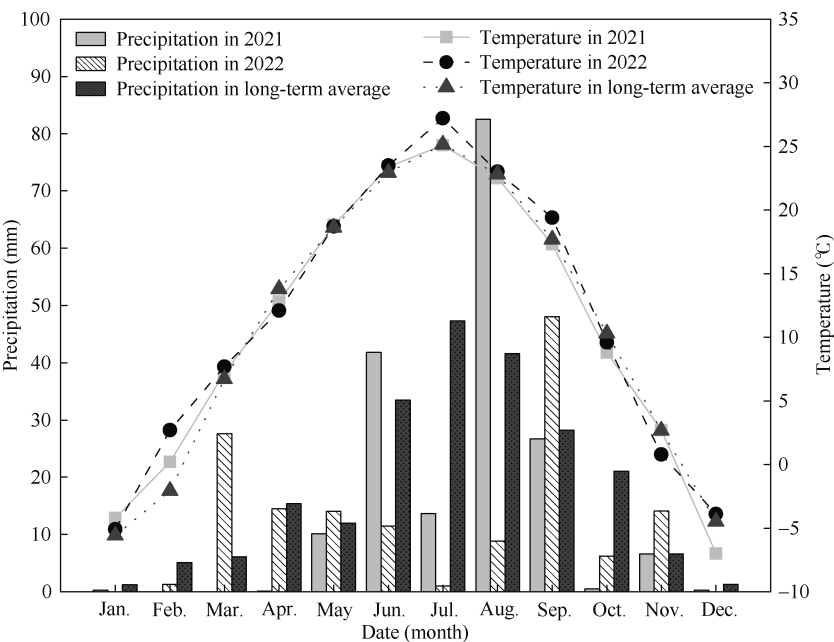


图 1 试验地点气象数据
Fig. 1 Meteorological data at the experimental site

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计, 设置 4 种不同间作模式, 分别为青贮玉米与每穴 1 粒拉巴豆(intercropping of silage maize with 1 lablab per hole, ML₁)、青贮玉米与每穴 2 粒拉巴豆(intercropping of silage maize with 2 lablab per hole, ML₂)、青贮玉米与每穴 3 粒拉巴豆(intercropping of silage maize with 3 lablab per hole, ML₃)、青贮玉米与每穴 4 粒拉巴豆(intercropping of silage maize with 4 lablab per hole, ML₄), 以单作青贮玉米(single crop of silage maize, SM)、单作拉巴豆(single crop of lablab, SL, 每穴 3 粒)作为对照, 种植模式如图 2。共计 6 个处理, 每个处理 3 个重复, 总计 18 个小区, 小区面积为 90 m² (10 m × 9 m)。为适应机械化发展, 考虑农机农艺相结合, 单作和间作均采用宽窄行种植模式, 采用穴播方式播种, 宽行 70 cm, 窄行 30 cm, 株距 23 cm。拉巴豆分别点播在青贮玉米穴间。播种前撒施 150 kg hm⁻² 磷酸二铵

(P₂O₅ ≥ 46%)和 120 kg hm⁻² 硫酸钾(K₂O ≥ 50%)作为基肥, 在青贮玉米拔节期和吐丝期追施 300 kg hm⁻² 尿素(N ≥ 46%)。试验地采用地面滴灌, 滴灌带间隔 100 cm, 滴头间隔 20 cm, 生长季灌水 4 次, 每次灌水量分别为 64 mm、47 mm、60 mm、54 mm。在青贮玉米拔节期人工除草 1 次。青贮玉米与拉巴豆于 2021 年 5 月 19 日播种、9 月 7 日收获, 2022 年 5 月 20 日播种、9 月 14 日收获。供试材料详细信息如表 1 所示。

1.3 测定项目与计算方法

1.3.1 株高 在本试验中, 青贮玉米拔节期(jointing stage, V6)、大喇叭口期(large trumpet stage, V12)、吐丝期(silking stage, R1)和灌浆期(grain filling stage, R2)分别对应拉巴豆分枝期(branching stage, B1)、现蕾期(budding stage, B2)、始花期(initial flowering stage, R1)和盛花期(peak flowering stage, R2)。于青贮玉米拔节期, 在小区内随机选取长势均

表 1 供试材料信息
Table 1 Information on experimental materials

材料名称 Material name	品种 Variety	纯净度 Purity (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	来源 Source
青贮玉米 Silage maize	先玉 1321 Xianyu 1321	99.0	373.00	宁夏农垦茂盛草业科技有限公司 Ningxia Nongken Maosheng Grass Technology Ltd.
拉巴豆 Lablab	高值 High	98.0	189.50	北京百斯特草业有限公司 Beijing Best Grass Ltd.

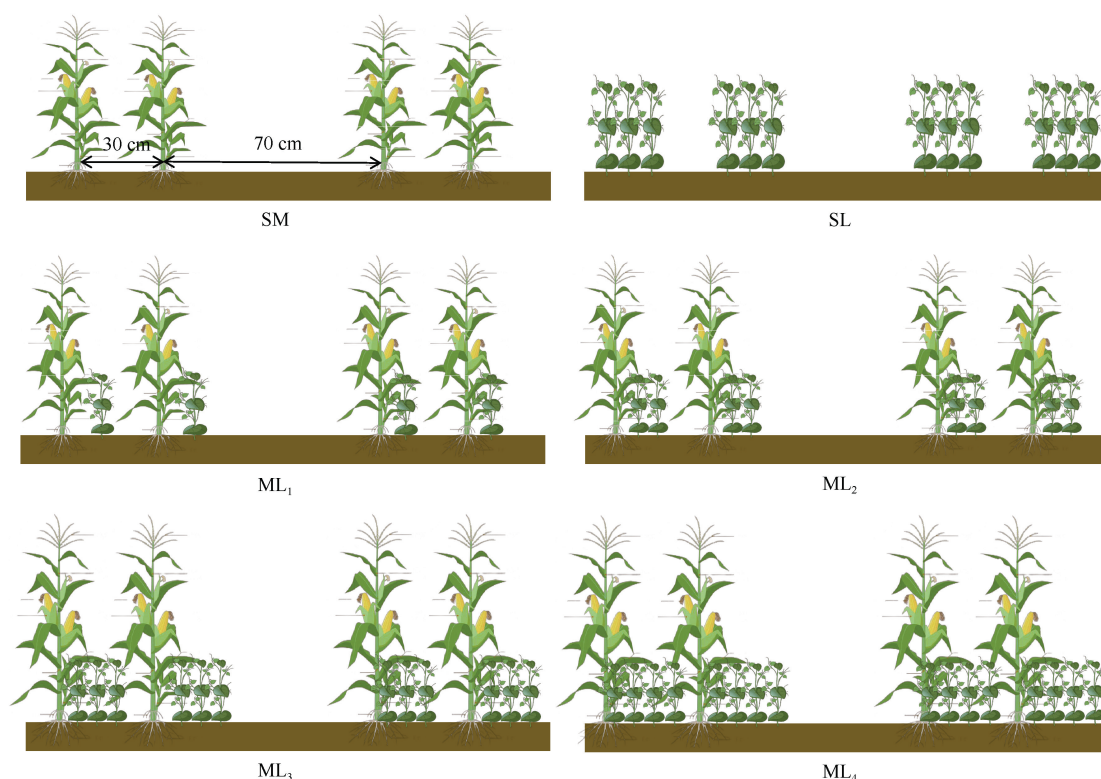


图2 青贮玉米和拉巴豆间作的田间种植模式图

Fig. 2 Field planting pattern diagram for intercropping silage maize and lablab

SM: 单作青贮玉米; SL: 单作拉巴豆; ML₁: 青贮玉米与每穴1粒拉巴豆间作; ML₂: 青贮玉米与每穴2粒拉巴豆间作; ML₃: 青贮玉米与每穴3粒拉巴豆间作; ML₄: 青贮玉米与每穴4粒拉巴豆间作。

SM: monoculture of silage maize; SL: monoculture of lablab; ML₁: intercropping of silage maize with one lablab per hole; ML₂: intercropping of silage maize with two lablab per hole; ML₃: intercropping of silage maize with three lablab per hole; ML₄: intercropping of silage maize with four lablab per hole.

匀的10株青贮玉米和拉巴豆进行标记,在不同生育时期测定株高,拉巴豆的株高为测定其攀援在青贮玉米的自然高度,取10株株高的平均值。

1.3.2 干物质积累及作物产量 青贮玉米、拉巴豆干物质动态监测:在不同生育时期从小区随机选取6株青贮玉米和拉巴豆测定干物质积累量;在青贮玉米收获期,从每个小区随机选取连续5株玉米与拉巴豆植株进行齐地面刈割,6次重复,然后将青贮玉米与拉巴豆分开,带回实验室茎叶分离,然后进行称重,测定青贮玉米与拉巴豆的鲜草产量。所有的样品自然阴干后称量干重,最后换算为每公顷干草产量。

利用全自动凯氏定氮仪测定饲草氮含量(g kg⁻¹),氮含量乘6.25为粗蛋白含量。

粗蛋白产量(t hm⁻²)=干草产量(t hm⁻²)×粗蛋白含量(%)^[20] (1)

1.3.3 间作群体土地利用效率及相对种间竞争能力

土地当量比(land equivalent ratio, LER)主要用于评价间作产量优势,计算方法如下^[9]:

$$LER = LER_M + LER_L = \frac{Y_{IM}}{Y_M} + \frac{Y_{IL}}{Y_L} \quad (2)$$

式中, Y_M和 Y_L分别为青贮玉米和拉巴豆单作的地上生物量, Y_{IM}和 Y_{IL}分别为青贮玉米和拉巴豆间作系统中的地上生物量。当 LER > 1 时,表示青贮玉米与拉巴豆具有间作优势;当 LER = 1 时,表示青贮玉米与拉巴豆间作后与其对应的单播产量相当;当 LER < 1 时则表示青贮玉米与拉巴豆为间作劣势。

相对种间竞争能力(relative interspecific competitiveness, RC)是基于单间作处理的作物生物量,用于确定间作作物对资源的竞争能力,计算公式为^[21]:

$$RC = (Y_{IM} \times Z_M / Y_M) - (Y_{IL} \times Z_L / Y_L) \quad (3)$$

式中, Z_M代表青贮玉米在间作中所占的面积比例, Z_L代表拉巴豆在间作中所占的面积比例。若 RC > 0,表明间作青贮玉米的竞争能力高于间作拉巴豆,值越大,竞争力越强,反之亦然。

1.3.4 间作群体产量的多样性效应 预期产量(expected yield, Y_{exp}):采用加权平均的方法,将2种单作作物在间作中所占比例的加权平均,计算公式如下^[22]:

$$Y_{\text{exp}} = Y_M \times Z_M + Y_L \times Z_L \quad (4)$$

增产率(overyielding, OY): 评估间作相较单作产量和生物量增加或降低的程度, 计算公式如下^[23]:

$$OY_M(\%) = \frac{Y_{IM} - P \times Y_M}{P \times Y_M} \times 100\% \quad (5)$$

$$OY_L(\%) = \frac{Y_{IL} - P \times Y_L}{P \times Y_L} \times 100\% \quad (6)$$

式中, OY_M , OY_L 分别代表青贮玉米和拉巴豆的增产率。

按照 Loreau 等^[14]的方法, 将间作模式中产量的多样性净效应(net biodiversity effect, NE) 分解为补偿效应(complementarity effect, CE)和选择效应(selection effect, SE), 其计算公式如下^[14]:

$$NE = Y_{IM} + Y_{IL} - Y_{\text{exp}} \quad (7)$$

$$CE = (LER - 1) \times (Y_M + Y_L) \quad (8)$$

$$SE = NE - CE \quad (9)$$

$NE > 0$, 表示多样性对间作体系生产力产生正效应, $NE < 0$, 表示产生负效应; 较高的补偿效应表示间作体系中存在生态位分异与种间促进作用; 选

择效应的正负表示间作体系中获利较多的是高产物种还是低产物种, $SE > 0$, 表示高产物种在间作中增产, 并高于低产物种的产量增加, $SE < 0$, 低产物种在间作中增产。

1.4 数据处理

采用 Excel 2019 软件整理数据, 利用 SPSS Statistics 25.0 软件进行方差分析、多重比较和相关性分析, 并确定年份和处理效果的显著性及其交互作用。用 Origin 2021 作图。使用 R 4.3.1 中的“LinkET”和“ggplot2”软件包进行 Mantel 检验, 以进一步分析补偿效应和选择效应与干草产量、粗蛋白产量、土地当量比、相对种间竞争力、预期产量、增产率以及净效应之间的关系。

2 结果与分析

2.1 青贮玉米和拉巴豆生育期内生长动态变化

2021—2022 年拉巴豆和青贮玉米在不同生育时期株高动态变化见图 3。结果表明, 生育期内拉巴豆

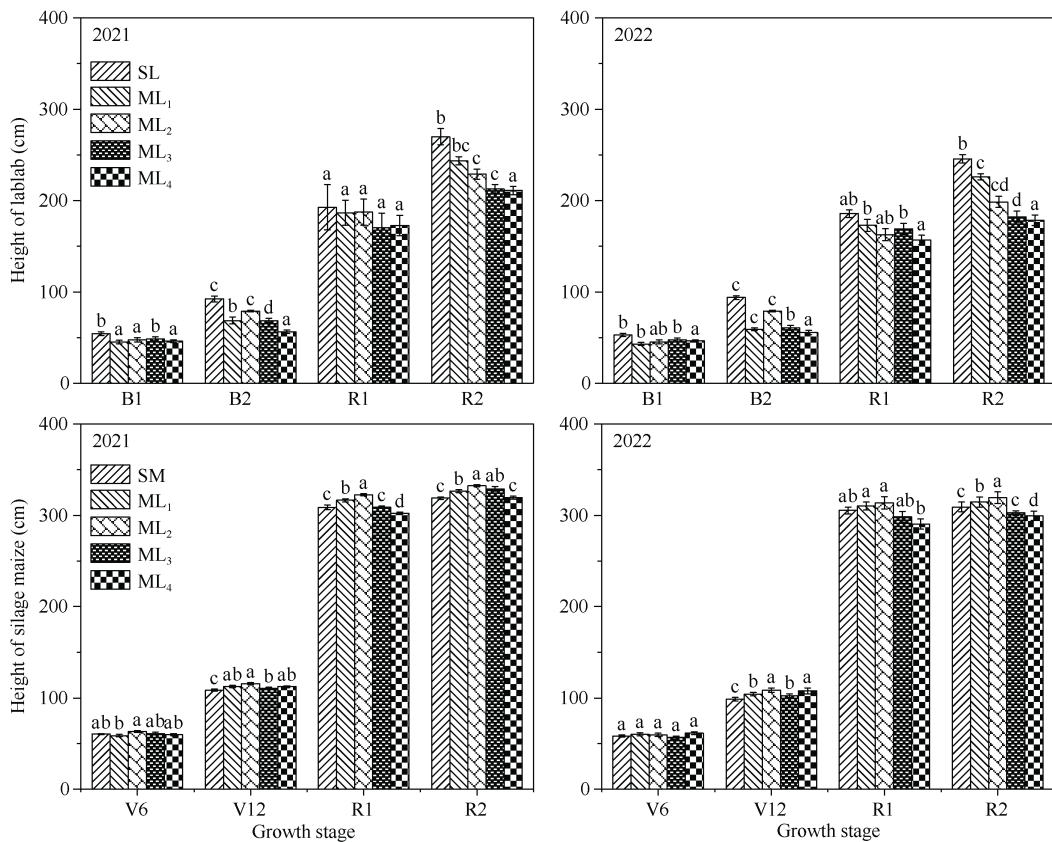


图 3 不同间作模式对青贮玉米、拉巴豆株高的影响

Fig. 3 Effects of different intercropping patterns on plant height of silage maize and lablab

处理同图 2。图中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。V6、V12、R1、R2 分别代表青贮玉米拔节期、大喇叭口期、吐丝期和灌浆期, 分别对应拉巴豆分枝期(B1)、现蕾期(B2)、始花期(R1)和盛花期(R2)。

Treatments are the same as those given in Fig. 2. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$). V6, V12, R1, and R2 represent the jointing stage, large trumpet stage, silking stage, and grain filling stage of silage maize, respectively, corresponding to the branching (B1), budding (B2), initial flowering (R1), and full flowering (R2) stages of lablab, respectively.

株高呈增加趋势,但不同年际间存在差异,且间作显著降低了拉巴豆株高,2021年和2022年间作处理4个生育时期的平均值较单作分别降低15.52%和18.64%。相反,拉巴豆与青贮玉米间作促进了青贮玉米生长,2年间作处理青贮玉米株高4个生育时期的平均值较单作分别提高1.60%和1.31%,其中吐丝期至灌浆期青贮玉米株高对不同间作比例的响应差异明显。2年数据显示,ML₂处理在灌浆期的株高达到最大值,较单作青贮玉米分别提高2.06%和1.42% ($P < 0.05$)。

2.2 青贮玉米和拉巴豆生育期内干物质积累动态变化

图4显示2021—2022年不同间作模式下拉巴豆

和青贮玉米的干物质积累量存在显著差异。随着生育期的推进,拉巴豆干物质积累量逐渐增加并在盛花期达到最大值。2年数据表明,青贮玉米间作显著降低了拉巴豆干物质积累量(2021年和2022年分别降低55.21%和54.09%),但在间作处理中,拉巴豆干物质积累量随种植比例增加而上升,其中ML₄处理的降幅最小。对于青贮玉米,间作拉巴豆显著促进了其干物质积累,灌浆期产量最高,2021年和2022年分别比单作提高3.97%和3.11%。此外,2022年吐丝期至灌浆期青贮玉米干物质积累对不同间作模式的响应存在明显差异,2年试验中ML₂处理在收获期的干物质积累量均最高,且与SM和SL处理差异显著($P < 0.05$)。

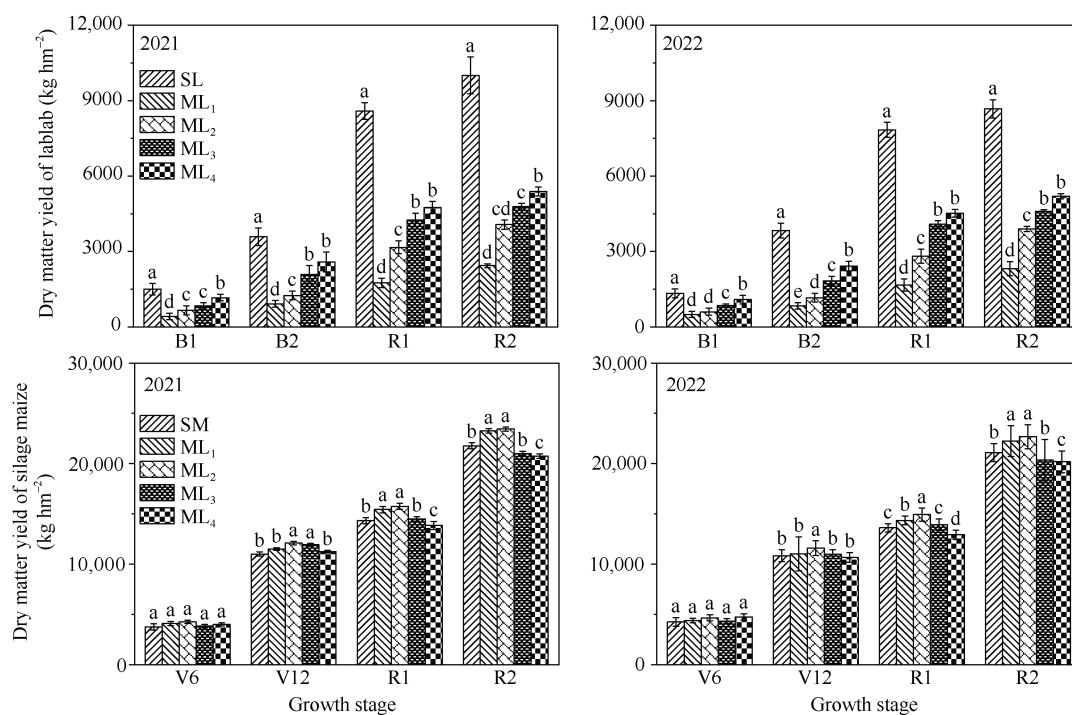


图4 不同间作模式对青贮玉米、拉巴豆干物质产量的影响

Fig. 4 Effect of different intercropping patterns on dry matter yield of silage corn and lablab

处理同图2。图中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。V6、V12、R1、R2分别代表青贮玉米拔节期、大喇叭口期、吐丝期和灌浆期,分别对应拉巴豆分枝期(B1)、现蕾期(B2)、始花期(R1)和盛花期(R2)。

Treatments are the same as those given in Fig. 2. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$). V6, V12, R1, and R2 represent the jointing stage, large trumpet stage, silking stage, and grain filling stage of silage maize, respectively, corresponding to the branching (B1), budding (B2), initial flowering (R1), and full flowering (R2) stages of lablab, respectively.

2.3 系统生产力变化

如表2所示,青贮玉米与拉巴豆间作明显提高了草地总生产性能,2年试验数据显示,2021年的总干草产量和粗蛋白产量均高于2022年。2年试验结果表明,间作显著增加了总干草产量,其中2021年ML₁、ML₂、ML₃和ML₄处理较SM分别提高了

16.22%、29.01%、14.96%和10.52%,2022年分别提高了16.15%、27.94%、15.11%和14.39%。从粗蛋白产量可以看出,2年均均在ML₂处理下达到最高,且与其他处理差异显著($P < 0.05$)。其中2021年和2022年ML₂处理较SM分别显著提高了64.36%和64.92%。

表 2 不同间作模式对系统干草产量和粗蛋白产量的影响
Table 2 Effect of different intercropping patterns on system hay yield and crude protein yield

年份 Year	处理 Treatment	青贮玉米干草产量 Silage maize hay yield (t hm ⁻²)	拉巴豆干草产量 Lablab hay yield (t hm ⁻²)	总干草产量 Total hay yield (t hm ⁻²)	粗蛋白产量 Crude protein yield (t hm ⁻²)
2021	SM	27.76±0.27 c	—	27.76±0.27 d	2.02±0.02 d
	ML ₁	29.43±0.27 b	2.83±0.29 d	32.26±0.46 b	2.77±0.04 c
	ML ₂	31.43±0.35 a	4.39±0.09 c	35.82±0.43 a	3.32±0.04 a
	ML ₃	26.85±0.27 d	5.07±0.27 bc	31.91±0.07 b	2.96±0.01 b
	ML ₄	25.18±0.21 e	5.50±0.11 b	30.68±0.14 c	2.99±0.01 b
	SL	—	10.42±0.43 a	10.42±0.43 e	1.55±0.06 e
2022	SM	27.01±1.67 ab	—	27.01±0.68 c	1.91±0.05 d
	ML ₁	28.82±1.71 ab	2.56±0.14 d	31.38±0.72 b	2.59±0.06 c
	ML ₂	30.40±0.79 a	4.16±0.12 c	34.56±0.69 a	3.15±0.06 b
	ML ₃	26.23±1.05 ab	4.86±0.16 b	31.09±0.88 b	2.98±0.08 a
	ML ₄	25.73±0.68 b	5.16±0.18 b	30.90±0.81 b	2.98±0.08 a
	SL	—	9.95±0.36 a	9.95±0.36 d	1.47±0.05 a
年份 Year (Y)		*	*	*	NS
种植方式 Planting patterns (P)		**	**	***	***
Y×P		NS	NS	NS	NS

处理同图 2。表中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$), “—”表示无产量。*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$; NS 表示差异不显著。
Treatments are the same as those given in Fig. 2. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$), “—” indicates no yield. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$; NS represents no significant difference.

2.4 土地当量比

如图 5-A 所示, 青贮玉米与拉巴豆间作显著提高了土地利用效率。2 年试验数据显示, 青贮玉米对总土地当量比(LER)的贡献显著高于拉巴豆(2021 年分别为 1.35 和 0.34, 2022 年分别为 1.30 和 0.32)。其中, ML₂间作处理在 2021 年和 2022 年分别达到最大土地当量比 1.55 和 1.57。与青贮玉米单作相比, 所有间作处理的土地当量比均大于 1, 表明该间作模式能够有效提升耕地资源利用效率, 充分发挥土地生产潜力。
从相对种间竞争能力来看(图 5-B), 不同处理间均存在显著差异($P < 0.05$)。2021—2022 年均 ML₁ 处理下达到最大, 分别为 0.66、0.68, 2021 年 ML₁ 较 ML₂、ML₃、ML₄ 分别高 0.15、0.42、0.47, 2022 年 ML₁ 较 ML₃、ML₄ 分别高 0.43、0.46。
2.5 作物增产率以及选择和补偿效应
对青贮玉米 || 拉巴豆系统中作物的增产率变化进行分析(图 6), 结果表明, 不同处理间青贮玉米增产率差异显著($P < 0.05$), 拉巴豆增产率在 2021 和 2022 年无显著差异($P > 0.05$)。青贮玉米增产率随拉巴豆播量增加呈先增加后减小的趋势, 其中 ML₃ 处理的青贮玉米增产率最大, 但该处理拉巴豆增产率

为负值, 表现为减产; ML₁、ML₂、ML₃ 和 ML₄ 处理的青贮玉米增产率 2 年平均分别为 54%、91%、96% 和 89% (图 6-B, E), 拉巴豆增产率分别为 -11%、6%、-0.5%和 6% (图 6-C, F); 青贮玉米 || 拉巴豆系统总体表现为增产, 其中青贮玉米受拉巴豆播量影响大, 拉巴豆受影响较小。表明青贮玉米 || 拉巴豆系统中拉巴豆的播量影响青贮玉米增产, 并且随播量的增加差异减小。
如图 7 所示, 净效应和补偿效应受播量影响极显著($P < 0.05$), 不受年份、年份×播量处理的影响($P > 0.05$), 选择效应受播量显著影响($P < 0.05$)。在所有处理中, 补偿效应、选择效应和净效应均大于 0, ML₁ 和 ML₂ 补偿效应大于选择效应, ML₃ 和 ML₄ 选择效应大于补偿效应, 说明青贮玉米 || 拉巴豆间作系统高产作物青贮玉米增产, 拉巴豆播量较小的 2 个处理主要依赖补偿效应, ML₃ 和 ML₄ 增产主要依赖于选择效应。2 年试验数据发现, ML₂ 的净效应(图 7-A, D)、选择效应(图 7-C, F)均最大, 2 年平均为 20.83 t hm⁻²、10.38 t hm⁻²; 青贮玉米 || 拉巴豆间作系统中拉巴豆播量的增加, 使得该系统由补偿效应主导转变为选择效应主导。

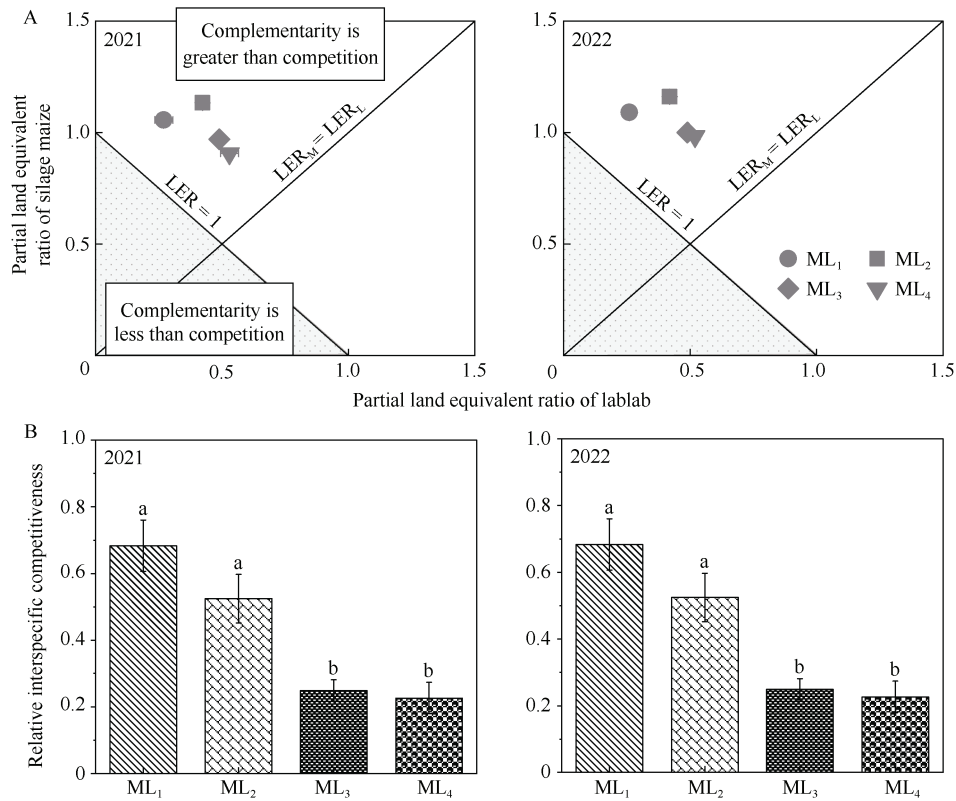


图 5 不同间作模式对土地当量比的影响

Fig. 5 Effect of different intercropping patterns on land equivalent ratio

处理同图 2。LER: 土地当量比。A: 2021–2022 土地当量比; B: 2021–2022 相对种间竞争能力。图中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Treatments are the same as those given in Fig. 2. LER: land equivalent ratio. A: land equivalent ratio for 2021–2022; B: relative interspecific competitiveness for 2021–2022. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$).

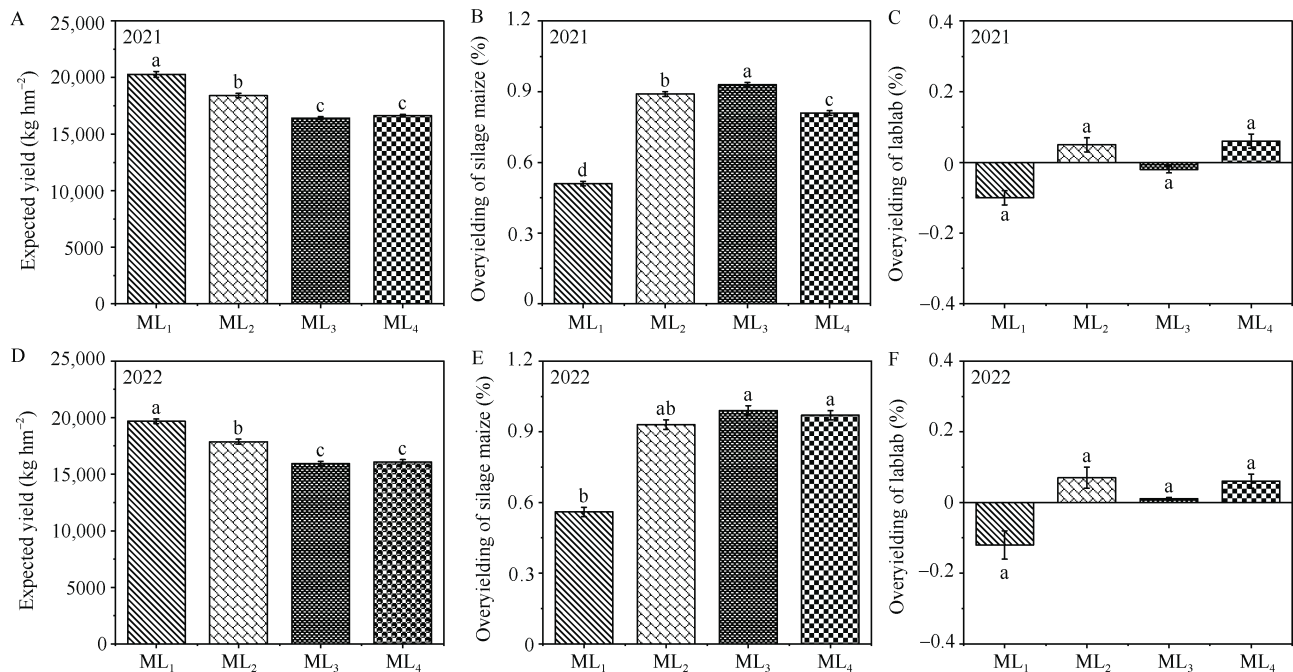


图 6 不同间作模式对作物增产率和产量优势的影响

Fig. 6 Effect of different intercropping patterns on crop overyielding and yield advantage

处理同图 2。图中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Treatments are the same as those given in Fig. 2. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$).

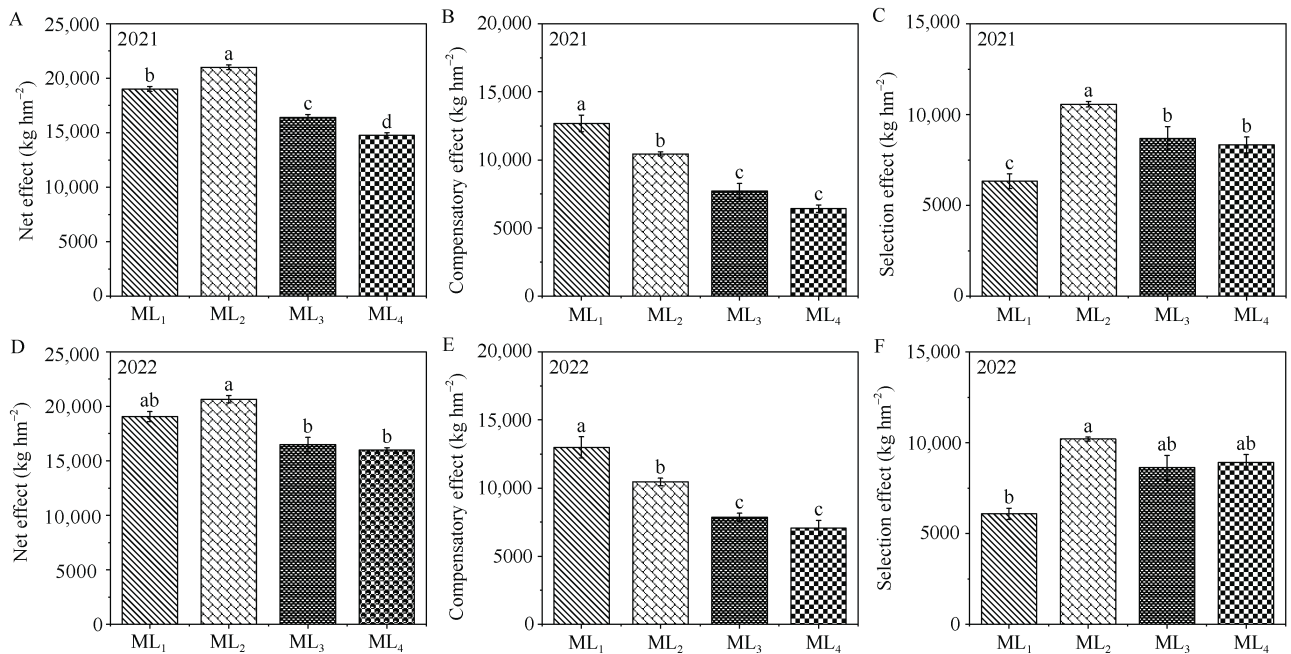


图 7 不同间作模式对选择效应与补偿效应的影响

Fig. 7 Effect of different intercropping patterns on selection and compensation effects

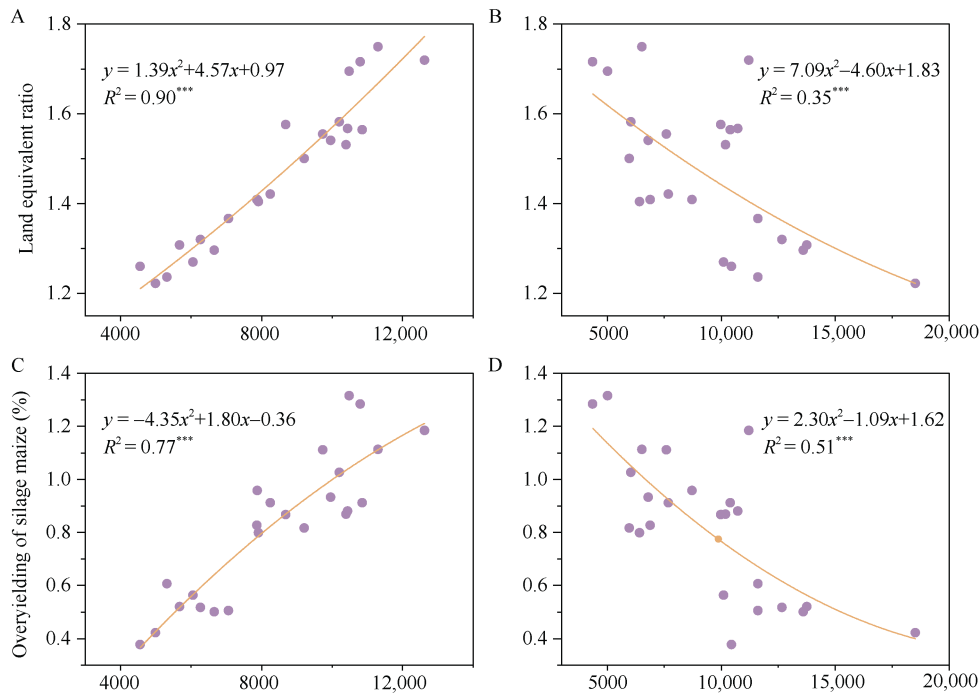
处理同图 2。图中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Treatments are the same as those given in Fig. 2. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$).

2.6 相关性分析

如图 8 所示, 在青贮玉米 || 拉巴豆 4 个系统中, 土地当量比 (LER) 随补偿效应的增加呈上升趋势 (图 8-A), 经非线性拟合, 拟合方程为 $y = 1.39x^2 + 4.57x + 0.97$ ($R^2 = 0.90^{***}$); 选择效应与 LER 间呈非线性相关 (图 8-B), 拟合方程为 $y = 7.09x^2 - 4.60x + 1.83$ ($R^2 = 0.35^{***}$); 与选择效应呈

显著正相关 ($R^2 = 0.35^{***}$)。进一步分析补偿效应和选择效应与间作作物增产率之间的关系, 结果表明青贮玉米增产率与补偿效应呈显著正相关 ($P < 0.001$), 与选择效应呈显著负相关 (图 8-C, D)。拉巴豆增产率与补偿效应呈显著正相关 (图 8-E), 拟合方程为 $y = -2.19x^2 + 7.35x - 0.45$ ($R^2 = 0.45^{***}$); 与选择效应呈



(图 8)

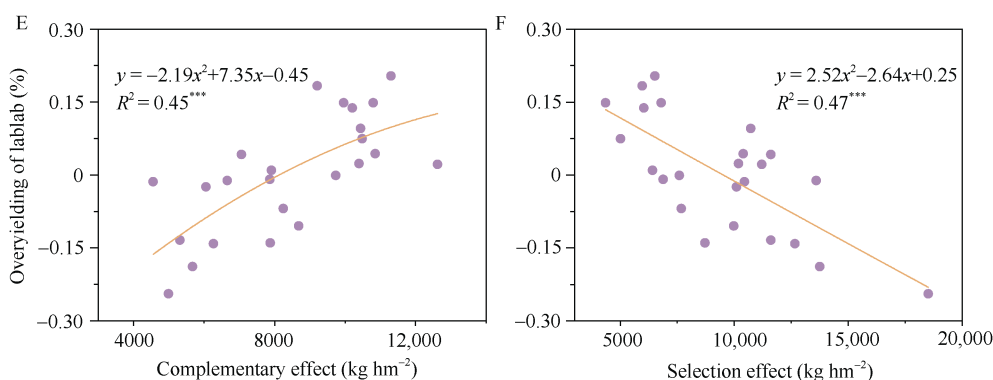


图8 补偿效应、选择效应与间作优势及作物增产率的关系

Fig. 8 Compensatory effect, selection effect in relation to intercropping advantages and crop overyielding

***: $P < 0.001$.

非线性相关($R^2 = 0.47^{***}$, $P < 0.001$) (图 8-F), 随选择效应的增加, 青贮玉米增产率逐渐降低。

由 Mantel 分析可知, 补偿效应与粗蛋白产量、LER、预期产量、青贮玉米增产率、拉巴豆增产率和净效应具有显著相关性; 选择效应与干草产量、LER、相对种间竞争力、预期产量、青贮玉米增产率、拉巴豆增产率和净效应具有显著相关性。干草产量与粗蛋白产量、预期产量和净效应呈显著正相关; LER 与青贮玉米增产率、拉巴豆增产率呈显著正相关, 与预期产量呈显著负相关; 相对种间竞争力

与净效应呈显著正相关; 预期产量与青贮玉米增产率、拉巴豆增产率呈显著负相关, 与净效应呈显著负相关(图 9)。

3 讨论

3.1 不同间作模式下饲草干物质积累和系统产量的变化

大量关于多样化种植系统的研究表明, 豆科作物与禾本科作物间作能够显著提高后者的产量^[24]。例如, 在玉米 || 豇豆系统中, 玉米产量提高了 25%^[25]。

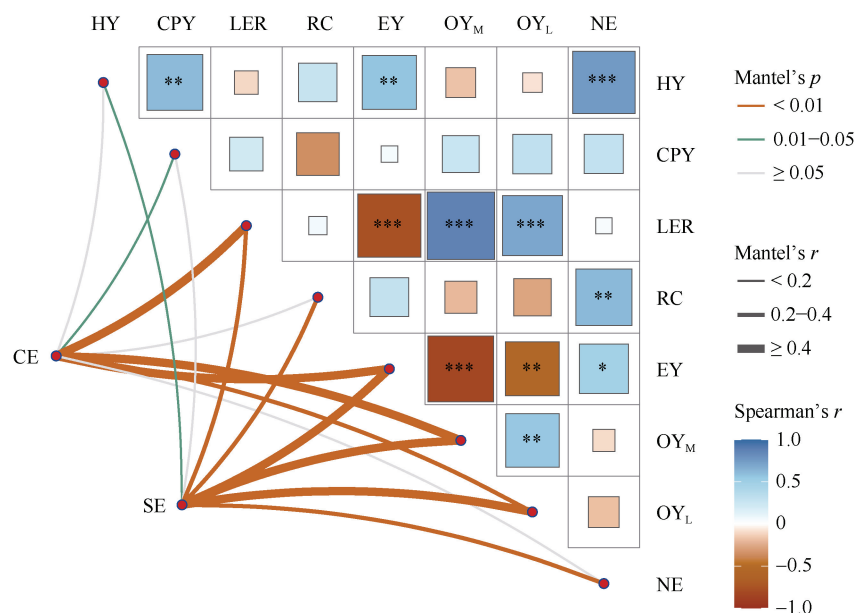


图9 补偿效应、选择效应与生产性能、竞争关系相关性分析

Fig. 9 Correlation analysis of compensation and selection effects with productivity and interspecific competitiveness

HY: 干草产量; CPY: 粗蛋白产量; LER: 土地当量比; RC: 相对种间竞争力; EY: 预期产量; OY_M: 青贮玉米增产率; OY_L: 拉巴豆增产率; NE: 净效应; CE: 补偿效应; SE: 选择效应。***: $P < 0.001$; **: $P < 0.01$; *: $P < 0.05$ 。

HY: hay yield; CPY: crude protein yield; LER: land equivalent ratio; RC: relative interspecific competitiveness; EY: expected yield; OY_M: overyielding of silage maize; OY_L: overyielding of lablab; NE: net effect; CE: complementary effect; SE: selection effect. ***: $P < 0.001$; **: $P < 0.01$; *: $P < 0.05$.

在玉米||大豆模式下,玉米产量提高了 22%^[26]。同样,小麦与大豆间作使小麦产量提高了 29%^[27]。本研究进一步证实,间作模式显著影响青贮玉米在吐丝期、灌浆期和收获期的干物质积累量。具体而言,在灌浆期和收获期,ML₁和 ML₂处理的青贮玉米干物质积累量均高于单作,分别增加 5.91%和 9.23%,而 ML₃和 ML₄处理则低于单作。这一结果与前人研究存在差异,表明适宜的青贮玉米||拉巴豆空间配置能够更高效地获取养分,减少植株间竞争,促进青贮玉米生长,有利于生产性能提升^[28]。此外,不同间作模式对拉巴豆干物质积累量也产生显著影响,ML₁、ML₂、ML₃和 ML₄处理的拉巴豆干物质积累量均低于单作,且随拉巴豆播种比例增加呈上升趋势。从种间竞争的角度分析,随着拉巴豆播种量的增加,青贮玉米与拉巴豆对水分、光照等自然资源的竞争加剧,导致青贮玉米生长空间受限、产量下降,而拉巴豆生物量则相应增加。Liu 等^[9]研究发现,玉米与大豆间作可使玉米增产 32.99%,大豆减产 13.92%,但系统总产量增加 25.50%。本研究得出了类似结论,通过 2 年大田试验,间作显著提高了系统干草产量,较青贮玉米单作分别增加 10.53%~23.24%。这主要是因为青贮玉米作为 C₄作物,其直立茎秆为拉巴豆提供了立体生长空间,二者生态位互补,有利于拉巴豆叶片获取更多光资源,从而提高群体叶面积指数,促进光能转化与利用,最终提升饲草产量^[29]。此外,氮素作为饲草间竞争或互补利用的关键元素,间作体系通过拉巴豆固氮作用促进自身氮素吸收与积累,同时为青贮玉米提供更多氮素,促进有机物合成,从而提高饲草产量^[30]。本研究还发现草地总干草产量随拉巴豆播种比例增加呈现先升后降的趋势,在拉巴豆播种量为 2 粒时达到峰值。这可能是因为增加拉巴豆种植密度造成与青贮玉米相互遮蔽,影响养分与有机物积累,从而导致产量下降^[31]。从产量优势来源分析,2 年试验中青贮玉米平均增产率为 0.82,且随拉巴豆播量增加呈先升后降趋势,拉巴豆增产率为 0.01,青贮玉米||拉巴豆系统总体表现为增产。然而,董志晓等^[32]研究表明,52,500 株 hm⁻²的玉米与 112,500 株 hm⁻²的拉巴豆混播综合评价最优。这与本研究结果存在差异,主要原因是成都平原以湿润温和为特征,而西北灌区以干旱、昼夜温差大和依赖灌溉为特点,二者气候、土壤类型、降雨等方面存在差异。

3.2 不同间作模式下饲草的产量优势和种间相互作用

间作种植模式通过科学配置共生作物在时空维度上的协同关系,实现了资源利用效率和土地生产力的协同提升。研究表明,在特定生态条件下,间作系统地下部根系的互作效应及土壤养分-水分动态运移过程较地上部相互作用具有更显著的生态学意义,其中生态位分化理论构成了间作优势形成的核心生态机制^[33]。间作作物通过在时间、空间和营养元素吸收利用等方面形成的生态位分离,实现了对资源的高效利用,表现出间作优势^[34]。土地当量比(LER)是衡量间作产量优势的关键指标,其值大于 1 表明间作体系具有显著的产量优势。偏土地当量比则反映了间作组分作物相对于单作的间作优势,通过绘制偏土地当量比散点图可以直观展示间作组分作物的优势分布^[24]。在本研究中,青贮玉米具有间作优势而拉巴豆处于劣势,青贮玉米的平均偏土地当量比为 0.88,而拉巴豆的偏土地当量比为 0.35,说明青贮玉米在间作系统中表现为优势作物,拉巴豆则为劣势作物。这一现象主要归因于青贮玉米植株高大、茎秆粗壮,相较于拉巴豆更容易获取光资源和空间资源。此外,青贮玉米||拉巴豆间作系统的总 LER 值为 1.34~1.57,表明间作显著提高了土地利用效率,即与间作相比,青贮玉米单作需要增加 34%~57%的土地面积才能达到相同产量。

在间作系统中,不同作物共享生长空间和资源的过程中,竞争与互补关系始终并存,且二者的动态平衡会随作物生长阶段而变化^[21]。当种间互补效应超越竞争作用时,该种植体系能够更高效地利用环境资源,从而产生协同增效现象,这种资源利用效率的提升最终会转化为群体生产力的增长^[12]。本研究显示,在不同种植模式下,青贮玉米均展现出显著的种间互补效应,而拉巴豆则普遍呈现种间竞争态势。具体而言,青贮玉米的相对种间竞争力均值为 0.55,显著优于拉巴豆,表明青贮玉米在间作系统中占据竞争优势地位,拉巴豆则处于竞争劣势。这一发现与已有研究中禾本科作物在间作系统中通常作为优势物种的结论相吻合^[35]。此外,物种间竞争强度不仅取决于其自身竞争力,还与群落密度和混播比例密切相关^[36]。本研究表明,青贮玉米的相对种间竞争力随拉巴豆播种比例增加呈下降趋势,说明选择适宜的青贮玉米||拉巴豆空间配置可

促进种间相容性,进而形成较高生产力和维持系统稳定性的潜力。

3.3 补偿效应、选择效应与间作优势及土地生产力的关系

学者们通过将净效应分解为补偿效应和选择效应来解析间作产量优势的形成机制。其中,补偿效应表征间作体系在经历竞争后表现出的恢复补偿能力,而选择效应则量化了高产作物对间作体系产量优势的贡献程度^[15]。研究表明,在玉米||大豆体系中,选择效应在促进间作作物氮素吸收增加方面起主导作用^[37]。然而,补偿效应和选择效应的相对重要性会因时空资源利用差异和物种配置的不同发生变化^[16]。本研究中,4种不同间作模式的净效应均大于0,表明与单作相比,间作对系统生产力均产生了正向效应。研究发现,间作系统中补偿效应和选择效应的相对重要性受作物共生期长短的影响:当补偿效应显著时,通常表现为较短的共生期;而当选择效应显著时,则表现为较长的共生期^[38]。本研究表明,间作处理的补偿效应值较为显著,说明青贮玉米||拉巴豆系统存在强烈的种间竞争以及竞争后的恢复效应。这一结果与前人研究一致,青贮玉米与拉巴豆同时播种,较短的共生期为青贮玉米后期生长和拉巴豆前期生长提供了充足的时空恢复补偿机会。补偿效应与青贮玉米增产率和拉巴豆增产率均呈正相关关系,进一步证实了补偿效应对2种作物增产的促进作用。此外,本研究发现,青贮玉米与1粒拉巴豆间作的补偿效应值最高,随着拉巴豆播种比例的增加补偿效应呈下降趋势;而选择效应随着拉巴豆播种比例的增加呈先升高后降低趋势,说明在拉巴豆高播种比例下间作产量优势主要来源于拉巴豆增产。同时,补偿效应与LER呈正相关,而选择效应与LER呈显著负相关,表明间作体系的生产力提升主要来源于补偿效应,这得益于青贮玉米与拉巴豆的生态位互补,降低了种间竞争,增强了补偿效应来促进间作产量优势的发挥^[13]。进一步分析发现,净效应随拉巴豆播种量的增加呈先升后降趋势,在ML₂间作模式下达峰值。这表明,在禾本科与豆科间作体系中,合理的种间配置能够促进补偿效应和选择效应的发挥,从而增强间作体系的产量优势。因此,在青贮玉米||拉巴豆系统中,产量优势在拉巴豆低播种比例下(ML₁和ML₂)主要来源于补偿效应,而在拉巴豆高播种比例下(ML₃和ML₄)则主要依赖于选择效应。

4 结论

青贮玉米||拉巴豆通过优化两物种间的促进与竞争关系,显著提升了饲草生产性能和土地利用效率。间作模式的补偿效应和选择效应均大于0,且产量优势随拉巴豆播量增加由补偿效应转为选择效应。其中,ML₂处理的总饲草产量和粗蛋白产量最高,较SM分别提高28.48%和64.64%。因此,ML₂处理是西北灌区青贮玉米||拉巴豆的适宜种植模式。

References

- [1] Brooker R W, Karley A J, Newton A C, et al. Facilitation and sustainable agriculture: a mechanistic approach to reconciling crop production and conservation. *Funct Ecol*, 2016, 30: 98–107.
- [2] Zhang Z X, Whish J P M, Bell L W, et al. Forage production, quality and water-use-efficiency of four warm-season annual crops at three sowing times in the Loess Plateau region of China. *Eur J Agron*, 2017, 84: 84–94.
- [3] Zhang F S, Li L. Using competitive and facilitative interactions in intercropping systems enhances crop productivity and nutrient-use efficiency. *Plant Soil*, 2003, 248: 305–312.
- [4] Wang Z K, Zhang X M, Ma Q H, et al. Seed mixture of oats and common vetch on fertilizer and water-use reduction in a semi-arid alpine region. *Soil Tillage Res*, 2022, 219: 105329.
- [5] Li C J, Hoffland E, Kuyper T W, et al. Syndromes of production in intercropping impact yield gains. *Nat Plants*, 2020, 6: 653–660.
- [6] Daryanto S, Fu B J, Zhao W W, et al. Ecosystem service provision of grain legume and cereal intercropping in Africa. *Agric Syst*, 2020, 178: 102761.
- [7] Wang Z K, Jiang H L, Shen Y Y. Forage production and soil water balance in oat and common vetch sole crops and intercrops cultivated in the summer-autumn fallow season on the Chinese Loess Plateau. *Eur J Agron*, 2020, 115: 126042.
- [8] Xu R X, Zhao H M, Liu G B, et al. Alfalfa and silage maize intercropping provides comparable productivity and profitability with lower environmental impacts than wheat–maize system in the Lower China Plain. *Agric Syst*, 2022, 195: 103305.
- [9] Liu X D, Meng L B, Yin T J, et al. Maize/soybean intercrop over time has higher yield stability relative to matched monoculture under different nitrogen-application rates. *Field Crops Res*, 2023, 301: 109015.
- [10] Su Y, Yu R P, Xu H S, et al. Crop cultivar mixtures stabilize productivity, partly via facilitation, when conditions are less benign. *Field Crops Res*, 2023, 302: 109046.
- [11] Tan Y, Hu F L, Chai Q, et al. Expanding row ratio with lowered nitrogen fertilization improves system productivity of maize/pea strip intercropping. *Eur J Agron*, 2020, 113: 125986.
- [12] Gong X W, Dang K, Lyu S M, et al. Interspecific root interactions and water-use efficiency of intercropped proso millet and mung bean. *Eur J Agron*, 2020, 115: 126034.
- [13] 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. *作物学报*, 2022, 48: 2588–2596.
- [14] 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. *Acta Agron Sin*, 2022, 48: 2588–2596 (in Chinese with English abstract).
- [14] Loreau M, Hector A. Partitioning selection and complementarity in biodiversity experiments. *Nature*, 2001, 412: 72–86.
- [15] 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. 中国农业大学博士学位论文, 北京, 2018.
- Li C J. Mechanisms of Interspecific Interaction Regulating Crop Growth and Nitrogen and Phosphorus Absorption in Wheat/broad Bean Intercropping System. PhD Dissertation of China Agricultural University, Beijing, China, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [16] Cahill J F Jr, McNickle G G, Haag J J, et al. Plants integrate information about nutrients and neighbors. *Science*, 2010, 328: 1657.
- [17] Li X F, Wang C B, Zhang W P, et al. The role of complementarity and selection effects in P acquisition of intercropping systems. *Plant Soil*, 2018, 422: 479–493.
- [18] Zuo X A, Cheng H, Zhao S L, et al. Observational and experimental evidence for the effect of altered precipitation on desert and steppe communities. *Glob Ecol Conserv*, 2020, 21: e00864.
- [19] 魏正业, 张海星, 石薇, 等. 种植方式与施氮对西北旱区饲草作物产量、品质 and 水分利用的影响. *作物学报*, 2022, 48: 2638–2653.
- Wei Z Y, Zhang H X, Shi W, et al. Effects of planting methods and nitrogen application on forage crop yield, quality and water use in arid area of northwest China. *Acta Agron Sin*, 2022, 48: 2638–2653 (in Chinese with English abstract).
- [20] Wang B, Deng J Q, Wang T F, et al. Optimizing nitrogen application rates to maximize productivity while reducing environmental risk by regulating nitrogen and water utilization in mixed cropping systems. *Agric Water Manag*, 2024, 303: 109053.
- [21] 任家兵, 张梦瑶, 肖靖秀, 等. 小麦||蚕豆间作提高间作产量的优势及其氮肥响应. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28: 1890–1900.
- Ren J B, Zhang M Y, Xiao J X, et al. Wheat and faba bean intercropping to improve yield and response to nitrogen. *Chin J Eco-Agric*, 2020, 28: 1890–1900 (in Chinese with English abstract).
- [22] Gazola B, Mariano E, Andrade M G O, et al. Fate of fertilizer N applied to maize intercropped with forage grass and recovery of residual N by soybean in a double cropping system. *Plant Soil*, 2024, 496: 205–219.
- [23] 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. *Plant Soil*, 2011, 339: 147–161.
- [24] Wang B, Deng J Q, Wang T F, et al. Effect of seeding options on interspecific competition in oat (*Avena sativa* L.) – common vetch (*Vicia sativa* L.) forage crops. *Agronomy*, 2022, 12: 3119.
- [25] Latati M, Blavet D, Alkama N, et al. The intercropping cowpea-maize improves soil phosphorus availability and maize yields in an alkaline soil. *Plant Soil*, 2014, 385: 181–191.
- [26] Zhang W P, Gao S N, Li Z X, et al. Shifts from complementarity to selection effects maintain high productivity in maize/legume intercropping systems. *J Appl Ecol*, 2021, 58: 2603–2613.
- [27] 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. *Field Crops Res*, 2001, 71: 173–181.
- [28] Umesh M R, Angadi S, Begna S, et al. Intercropping and species interactions on physiological and light use characteristics of forage cereals-legumes combinations in semi-arid regions. *Field Crops Res*, 2023, 290: 108755.
- [29] 马江萍, 张译尹, 王腾飞, 等. 饲用高粱与拉巴豆混播对种间关系及草地生产力的影响. *草业学报*, 2025, 34(3): 111–122.
- Ma J P, Zhang Y Y, Wang T F, et al. Interspecific relationship and forage productivity effects in mixed sowings of *Sorghum bicolor* and *Dolichos lablab*. *Acta Pratac Sin*, 2025, 34(3): 111–122 (in Chinese with English abstract).
- [30] Yan J Y, Ren T, Wang K K, et al. Improved crop yield and phosphorus uptake through the optimization of phosphorus fertilizer rates in an oilseed rape–rice cropping system. *Field Crops Res*, 2022, 286: 108614.
- [31] 王腾飞, 王斌, 邓建强, 等. 宁夏干旱区滴灌条件下拉巴豆不同播种量与甜高粱混播饲草生产性能研究. *草业学报*, 2023, 32(3): 30–40.
- Wang T F, Wang B, Deng J Q, et al. Effect of sowing rate on yield and forage quality of a dolichos *lablab*-*Sorghum bicolor* mixture under drip irrigation in arid areas of Ningxia. *Acta Pratac Sin*, 2023, 32(3): 30–40 (in Chinese with English abstract).
- [32] 董志晓, 何润濠, 况鉴洋, 等. 成都平原青贮玉米间作拉巴豆对混合饲草产量及品质的影响. *草业科学*, 2021, 38: 1587–1595.
- Dong Z X, He R H, Kuang J Y, et al. Effects of intercropping dolichos *lablab* with silage maize on the yield and quality of mixed forage in the Chengdu Plain, China. *Pratac Sci*, 2021, 38: 1587–1595 (in Chinese with English abstract).
- [33] Duchene O, Vian J F, Celette F. Intercropping with legume for agroecological cropping systems: complementarity and facilitation processes and the importance of soil microorganisms: a review. *Agric Ecosyst Environ*, 2017, 240: 148–161.
- [34] 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. *Plant Prod Sci*, 2017, 20: 1–11.
- [35] Li R, Zhang Z X, Tang W, et al. Effect of row configuration on yield and radiation use of common vetch-oat strip intercropping on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Eur J Agron*, 2021, 128: 126290.
- [36] Ren W, Zhang Z X, Shen Y Y, et al. Adjusting spatial use to establish productive and stable *Elymus nutans* monocultures and mixed sowing systems. *Field Crops Res*, 2023, 302: 109091.
- [37] Zhang R Z, Meng L B, Li Y, et al. Yield and nutrient uptake dissected through complementarity and selection effects in the maize/soybean intercropping. *Food Energy Secur*, 2021, 10: 379–393.
- [38] 张润芝. 氮肥调控玉米/大豆间作生产力及养分吸收和土壤微生物作用机理的研究. 东北农业大学博士学位论文, 黑龙江哈尔滨, 2020.
- Zhang R Z. Study on Productivity, Nutrient Uptake and Mechanism of Soil Microbial Activity in Maize/Soybean Intercropping by Nitrogen Fertilizer. PhD Dissertation of Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang, China, 2020 (in Chinese with English abstract).