

DOI: 10.11686/cyxb2024139

http://cyxb.magtech.com.cn

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 Jiang-ping, ZHANG Yi-yin, WANG Teng-fei, et al. Interspecific relationship and forage productivity effects in mixed sowings of *Sorghum bicolor* and *Dolichos lablab*. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(3): 111-122.

## 饲用高粱与拉巴豆混播对种间关系 及草地生产力的影响

马江萍<sup>1</sup>, 张译尹<sup>1</sup>, 王腾飞<sup>1</sup>, 王斌<sup>1</sup>, 兰剑<sup>1,2\*</sup>

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏草业工程研究中心, 宁夏 银川 750021)

**摘要:** 豆/禾混播量是影响混播草地生产性能和营养价值的关键因素, 研究宁夏引黄灌区适宜与饲用高粱混播的拉巴豆播量对于缓解该地区饲草料供给不足等问题具有重要意义。设置4个不同拉巴豆播量(SL<sub>1</sub>: 16.5 kg·hm<sup>-2</sup>; SL<sub>2</sub>: 33.0 kg·hm<sup>-2</sup>; SL<sub>3</sub>: 49.5 kg·hm<sup>-2</sup>; SL<sub>4</sub>: 66.0 kg·hm<sup>-2</sup>)与饲用高粱混播, 以及拉巴豆和饲用高粱单播(L<sub>0</sub>: 49.5 kg·hm<sup>-2</sup>和S<sub>0</sub>: 18.0 kg·hm<sup>-2</sup>), 对混播草地生产性能、种间竞争以及经济效益进行研究。2年试验结果表明, 饲用高粱与拉巴豆混播草地的总干草产量与粗蛋白产量显著高于单播(P<0.05), 其中在SL<sub>2</sub>处理下达到最大, 较饲用高粱单播分别提高了63.66%和9.13%。所有混播处理的土地当量比均大于1, 且在SL<sub>2</sub>处理下达到最高(1.26), 表明该处理增产效益明显。混播群落中饲用高粱的侵占强度大于0, 且竞争比率大于拉巴豆, 说明饲用高粱的竞争实力强于拉巴豆, 饲用高粱为竞争优势作物。系统生产力指数随拉巴豆播量的增加呈逐渐增加趋势, 且在SL<sub>2</sub>处理下两年净收入均达到最高(37469.45和38284.09元·hm<sup>-2</sup>)。综合混播草地生产性能、土地当量比、货币优势指数以及净收入等指标, 饲用高粱与拉巴豆在SL<sub>2</sub>混播处理中表现最优。因此建议在宁夏引黄灌区拉巴豆与饲用高粱混播的最佳播量为33.0 kg·hm<sup>-2</sup>。

**关键词:** 饲用高粱; 拉巴豆; 混播草地; 种间竞争; 生产性能

## Interspecific relationship and forage productivity effects in mixed sowings of *Sorghum bicolor* and *Dolichos lablab*

MA Jiang-ping<sup>1</sup>, ZHANG Yi-yin<sup>1</sup>, WANG Teng-fei<sup>1</sup>, WANG Bin<sup>1</sup>, LAN Jian<sup>1,2\*</sup>

1. College of Forestry and Grassland, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Ningxia Grassland and Pasture Engineering Research Center, Yinchuan 750021, China

**Abstract:** The seeding rate of *Sorghum bicolor* and *Dolichos lablab* in mixed sowings is a key factor affecting the yield and nutritional value of mixed sowings. It is of high relevance to evaluate the optimal seeding rates of *D. lablab* and *S. bicolor* in mixed sowings in the Ningxia Yellow River Irrigation Area, to alleviate the shortage of forage supply in this area. In this study, *D. lablab* was sown at four different seeding rates in mixtures (SL<sub>1</sub>: 16.5 kg·ha<sup>-1</sup>, SL<sub>2</sub>: 33.0 kg·ha<sup>-1</sup>, SL<sub>3</sub>: 49.5 kg·ha<sup>-1</sup>, SL<sub>4</sub>: 66.0 kg·ha<sup>-1</sup>), sown together with *S. bicolor* at 18.0 kg·ha<sup>-1</sup> in each case. The experiment also included *D. lablab* and *S. bicolor* monocultures (L<sub>0</sub>: 49.5 kg·ha<sup>-1</sup> and S<sub>0</sub>: 18.0 kg·ha<sup>-1</sup>). The aim was to investigate the yield, interspecific competition indexes and economic benefits of the two

收稿日期: 2024-04-23; 改回日期: 2024-07-09

基金项目: 宁夏高等学校一流学科建设(草业学科)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(2020BBF02001)资助。

作者简介: 马江萍(1998-), 女, 甘肃定西人, 在读硕士。E-mail: 15193473869@163.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: ndlanjian@163.com

monocultures and the mixed-sown combinations. The results for two years confirm that the total hay yield and crude protein yield from mixed sowings of *S. bicolor* and *D. lablab* were significantly higher than those of monocultures ( $P < 0.05$ ), and were maximized in the  $SL_2$  treatment. For yield and crude protein, respectively, values were 63.66% and 9.13% higher than those of *D. lablab* sown alone. The land equivalent ratio of all mixtures was greater than 1 and was highest for the  $SL_2$  treatment (1.26), making the yield increase of this treatment was obvious. The aggressivity of *S. bicolor* in the mixed sowings was greater than 0, and the competitive ratio was greater than that of *D. lablab*, indicating that the competitive strength of *S. bicolor* was stronger than that of *D. lablab*, and *S. bicolor* is a competitive advantage crop. The system productivity index increased progressively with increase in the seeding rate of *D. lablab*, and the net income over the two years under the  $SL_2$  treatment was the highest (37469.45 and 38284.09 yuan·ha<sup>-1</sup>) among the treatments. Based on the yield, land equivalent ratio, monetary advantage index and net income of the mixed swards, the performance of *S. bicolor* and *D. lablab* in  $SL_2$  mixed seeding treatment was the best. Therefore, it is recommended that the optimum seeding rate of *D. lablab* and *S. bicolor* in the Yellow River Irrigation Area of Ningxia is 33.0 kg·ha<sup>-1</sup>.

**Key words:** *Sorghum bicolor*; *Dolichos lablab*; mixed grassland; interspecific competition; production performance

近年来,宁夏地区草食家畜饲养量呈逐年增长趋势,牧草需求量大,但受当地自然条件和种植技术水平的限制,该地区出现牧草产量较低的问题,致使草畜不平衡的矛盾日益突出<sup>[1]</sup>。因此,探寻合理的牧草生产方式以提高饲草料供给能力,对于缓解该地区牧草短缺具有重要保障作用。研究表明,混播种植是提高牧草产量的重要途径之一<sup>[2]</sup>。其中豆/禾混播模式可以通过不同作物对生长资源生态位的差异而形成物种间的互补关系,最终提高混播群体生产<sup>[3-4]</sup>。此外,禾本科牧草可以促进豆科牧草根瘤固氮效率,同时豆科牧草向禾本科牧草氮转移<sup>[5-7]</sup>,以此来避免单播造成土地的过度消耗和退化,进而提升其生态功能。然而,在混播草地中,混播比例是影响豆禾混播牧草生长的重要因素,尤其混播作物产量的高低很大程度上取决于作物的混播比例,而适宜的混播比例可降低牧草种间竞争和提高资源利用效率<sup>[8]</sup>。

研究表明,优化禾本科与豆科牧草的混播比例可以避免种间对光、二氧化碳、水分和肥料等的竞争<sup>[9]</sup>。在两种或两种以上作物组成的复合系统中,作物间竞争与互补是影响产量的重要原因,也是多熟种植体系的重要研究内容<sup>[10]</sup>。在自然生态系统中,物种间竞争是调控植物群落结构和生态系统功能的重要因素,直接影响群落资源供应和分配<sup>[11]</sup>。刘启宇等<sup>[12]</sup>研究表明,混播比例及所选物种对混播草地的种间竞争关系和产量有直接影响。权欣等<sup>[13]</sup>研究发现小黑麦(*Triticosecale*)和箭筈豌豆(*Vicia sativa*)在混播时,其竞争小,种间相容性稳定,具有混播优势。任文等<sup>[14]</sup>对红豆草(*Onobrychis viciifolia*)和垂穗披碱草(*Elymus nutans*)的混播草地研究表明,第2年生长季中,当红豆草和垂穗披碱草混播比例为7:3时,总土地当量比(land equivalent ratio, LER)在整个生长季均大于1,表现出产量优势。郭川等<sup>[15]</sup>通过分析不同种植比例下各组合混播与单播的草地生产力发现,混播均能提高土地当量比,其中豆禾在5:5混播比例下土地当量比最高,达到1.41。由此可见,在人工草地建植过程中,合理控制混播牧草的混播比例以及选择适宜的混播组合,可以有效调节和减弱牧草种内和种间竞争,进而能够更有效地利用环境资源,维持长期较高的生产力和稳定性<sup>[9]</sup>。因此,如何合理利用现有资源筛选出适宜宁夏地区高效生产的豆禾混播比例,对于宁夏畜牧业可持续发展具有重要意义。

拉巴豆(*Dolichos lablab*)作为一年生豆科植物,其主根发达,侧根多,茎缠绕,具有固氮作用,常被用作轮茬作物、间套作模式植物来提升土壤利用率<sup>[2]</sup>。饲用高粱(*Sorghum bicolor*)为一年生禾本科牧草,光合利用效率高,生物产量和经济产量大<sup>[5]</sup>。已有研究发现,饲用高粱与拉巴豆混播对杂草和病虫害等抑制力增强,减少了自然灾害的损失,从而提高了草地生产性能<sup>[16]</sup>。目前,关于饲用高粱与拉巴豆混播的研究主要侧重于混播组合、方式及比例等对牧草生产性能和营养品质的影响,而对混播种间关系及经济效益的研究报道较少,因此,有必要研究混播草地对种间关系和经济效益的影响。鉴于此,本研究以饲用高粱与拉巴豆为试验材料,探究混播量对草地种间关系、生产性能以及经济效益的影响,确定宁夏引黄灌区饲用高粱与拉巴豆混播的适宜播量,以期为宁夏草畜业

稳定可持续发展提供理论依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

本试验于2022—2023年在宁夏银川市宁夏茂盛草业有限公司宁夏大学试验基地(38°55' N, 106°06' E, 海拔1135 m)开展, 2022和2023年该区域月平均降水量和气温如图1所示。该地区属典型温带大陆性气候, 四季分明, 昼夜温差大, 年均气温11.15℃, 年日照时数2687.3 h, 年降水量分别为146.3和261.4 mm, 降水主要集中在3—9月, 年无霜期170 d左右。土壤类型为灰钙土, 田间持水量19.17%, 容重 $1.52 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 土壤总孔隙度38.25%, 土壤有机质 $9.55 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 土壤全氮 $1.18 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 土壤全磷 $0.75 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 土壤全钾 $19.48 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

### 1.2 试验设计与田间管理

试验于2022年5月20日—2023年9月16日进行, 采用单因素随机区组设计, 共设置4个混播模式以及饲用高粱单播( $S_0$ )和拉巴豆单播( $L_0$ )共计6个处理, 其中在饲用高粱/拉巴豆混播模式中, 拉巴豆设置4个播种量, 分别为 $16.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  ( $SL_1$ )、 $33.0 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  ( $SL_2$ )、 $49.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  ( $SL_3$ )、 $66.0 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  ( $SL_4$ ), 单播拉巴豆播种量为 $49.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 混播和单播饲用高粱播种量均为 $18.0 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。每个处理重复3次, 总计18个小区, 小区面积为 $70 \text{ m}^2$  ( $10 \text{ m}\times 7 \text{ m}$ )。采用穴播方式播种, 宽窄行种植, 其中宽行70 cm, 窄行30 cm, 播深4~5 cm, 小区间隔1 m, 设2 m保护行。根据拉巴豆播种量和千粒重可计算出在饲用高粱穴间以5种比例(0、1、2、3、4粒)点播拉巴豆, 用匀式多功能点播机(2BFG-2×7, 山东临沂强农机械厂)点播拉巴豆。

试验地采用地面滴灌, 滴灌带间隔60 cm, 滴头间隔25 cm。在饲用高粱拔节期追施尿素 $225 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  (总氮 $\geq 46\%$ )、磷酸二铵 $180 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  ( $P_2O_5 \geq 46\%$ )、硫酸钾 $150 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  ( $K_2O \geq 50\%$ ), 生育期内人工除草2次。

### 1.3 测定指标与方法

**1.3.1 干草产量** 在每个小区内随机选取9个1 m样段, 将所采集的饲用高粱和拉巴豆鲜草分开风干至恒重后称量干草重量, 换算为每 $\text{hm}^2$ 干草产量。

**1.3.2 粗蛋白产量(crude protein yield, CPY)** 计算公式<sup>[17]</sup>如下:

$$\text{CPY} = \text{CP} \times \text{DM}$$

式中: CP为牧草粗蛋白(crude protein, %); DM为干物质产量(dry matter yield,  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ )。

**1.3.3 竞争指数** 竞争指数包括土地当量比、相对拥挤系数、竞争强度、侵占强度、竞争比率、真实产量损失和系统生产力指数这几个指标, 具体计算公式如下。

1) 土地当量比(land equivalent ratio, LER): 是评价间作系统具有产量优势的重要指标, 是混播群落中不同物种与单播群落中不同物种的产量比值。具体计算公式如下:

$$\text{LER} = \text{LER}_s + \text{LER}_d$$

$$\text{LER}_s = Y_{sd} / Y_s$$

$$\text{LER}_d = Y_{ds} / Y_d$$

式中:  $Y_s$ 和 $Y_d$ 分别为饲用高粱和拉巴豆单播时的产量;  $Y_{sd}$ 和 $Y_{ds}$ 分别为饲用高粱和拉巴豆混播时的产量;  $\text{LER}_s$ 和 $\text{LER}_d$ 分别表示饲用高粱和拉巴豆的土地当量比, LER为总土地当量比。当 $\text{LER} > 1$ 时, 表明该混播群落空间格局具有土地利用优势; 当 $\text{LER} = 1$ 时, 表明混播群落中物种与单播群落中物种产量相当; 当 $\text{LER} < 1$ 时, 表明该混播系统无土地利用优势<sup>[18]</sup>。

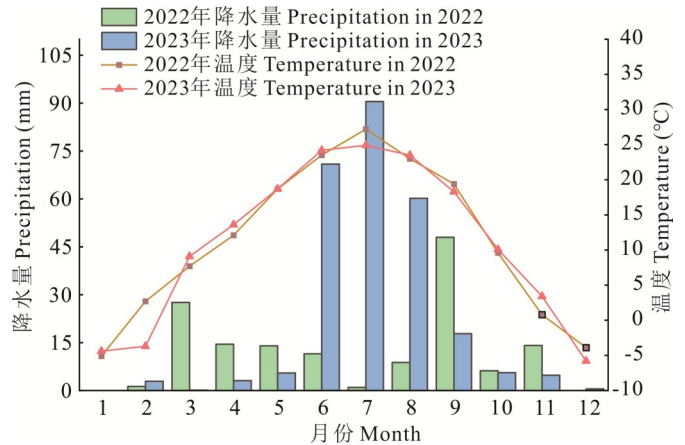


图1 2022–2023年试验区不同月份降水量和温度

Fig. 1 Precipitation and temperature in different months of the pilot area in 2022–2023

2) 相对拥挤系数(relative crowing coefficient,  $K$ ):混播系统中一种物种相对于另一种物种优势度的度量,反映种间相对竞争能力。具体计算公式如下:

$$K = K_s \times K_D$$

$$K_s = \frac{Y_{DS} \times Y_{SD}}{Y_s - Y_{SD}} \times Z_{SD}$$

$$K_D = \frac{Y_{DS} \times Y_{SD}}{Y_D - Y_{DS}} \times Z_{DS}$$

式中: $Z_{SD}$ 、 $Z_{DS}$ 分别为饲用高粱和拉巴豆混播时的真实占比; $K_s$ 、 $K_D$ 分别表示饲用高粱和拉巴豆的相对拥挤系数。当 $K > 1$ ,表示混播有产量优势,当 $K = 1$ ,则表示没有产量优势,当 $K < 1$ ,混播相比单播存在产量劣势<sup>[19]</sup>。

3) 竞争强度(competitive intensity,  $CI$ ):反映两个物种个体之间对资源的竞争能力。具体计算公式如下:

$$CI = (Z_{DS} \times Y_s + Z_{SD} \times Y_D) / (Y_{DS} + Y_{SD}) - 1$$

式中:当 $CI > 0$ 时表明物种间竞争强度大于种内竞争;当 $CI < 0$ 时表明物种间竞争强度小于种内竞争<sup>[20]</sup>。

4) 侵占强度(aggressivity,  $A$ ):表示混合群落中一个物种相对于另一个物种的相对产量增加或减少。具体计算公式如下:

$$A_s = \frac{Y_{SD}}{Y_s \times Z_{SD}} - \frac{Y_{DS}}{Y_D \times Z_{DS}}$$

$$A_D = \frac{Y_{DS}}{Y_D \times Z_{DS}} - \frac{Y_{SD}}{Y_s \times Z_{SD}}$$

式中: $A_s$ 、 $A_D$ 分别表示饲用高粱和拉巴豆的侵占强度。当 $A > 0$ 时,表明在混播群落中一个物种表现出强烈的竞争;当 $A = 0$ 时,两个物种之间的竞争相当<sup>[21]</sup>。

5) 竞争比率(competitive ratio,  $CR$ ):反映植物在混播群落中的竞争强度。具体计算公式如下:

$$CR_s = \frac{LER_s}{LER_D} \times \frac{Z_{DS}}{Z_{SD}}$$

$$CR_D = \frac{LER_D}{LER_s} \times \frac{Z_{SD}}{Z_{DS}}$$

式中: $LER_s$ 、 $LER_D$ 分别为饲用高粱和拉巴豆的土地当量比; $CR_s$ 、 $CR_D$ 分别表示饲用高粱和拉巴豆的竞争比率。 $CR$ 越大则物种的竞争实力越强<sup>[22]</sup>。

6) 真实产量损失(actual yield loss,  $AYL$ ):根据每一株植物的产量来更加精确地反映植物群体中不同植物的竞争特性。具体计算公式如下:

$$ALY = ALY_s + ALY_D$$

$$ALY_s = \frac{Y_{SD} \times Z_{SD}}{Y_s} - 1$$

$$ALY_D = \frac{Y_{DS} \times Z_{DS}}{Y_D} - 1$$

式中: $ALY_s$ 、 $ALY_D$ 分别表示饲用高粱和拉巴豆的真实产量损失。 $ALY > 0$ 和 $ALY < 0$ 分别表示产量增加和产量损失<sup>[23]</sup>。

7) 系统生产力指数(system productivity index,  $SPI$ ):从优势作物(如饲用高粱)方面统一混播作物(如拉巴豆)的产量从而评价混播的一个指数<sup>[24]</sup>。具体计算公式如下:

$$SPI = Y_{SD} \times Z_{SD} + Y_{DS} \times Z_{DS}$$

**1.3.4 经济指数** 根据 Dhima 等<sup>[25]</sup>和 Ghosh<sup>[19]</sup>的方法计算混播优势(mixed advantage,  $MA$ )和货币优势指数(monetary advantage index,  $MAI$ ), $MAI$ 越高,对混播种植系统越有利。具体计算公式如下:

$$MA = MA_s + MA_D$$

$$MA_s = ALY_s \times P_s$$

$$MA_D = ALY_D \times P_D$$

$$MAI = (Y_{SD} \times P_s + Y_{DS} \times P_D) \times \frac{(LER - 1)}{LER}$$

式中： $MA_s$ 、 $MA_D$ 分别表示饲用高粱和拉巴豆的真实产量损失； $P_s$ 为饲用高粱经济价格， $P_D$ 为拉巴豆经济价格（目前所考虑地区饲用高粱和拉巴豆价格分别为 1500 和 2200 元·t<sup>-1</sup>）。

**1.3.5 经济效益分析** 在收获季节对饲用高粱和拉巴豆进行测产，计算单位面积产量，通过市场调查以及官方统计等方式了解市场价格（表 1），计算单位面积的总收入及净收入。

**1.4 数据处理与分析**

采用 Excel 2019 软件整理数据，利用 SPSS Statistics 25.0 软件进行方差分析，用单因素方差分析比较不同播量下的差异，用 Origin 2022 作图。

**2 结果与分析**

**2.1 不同混播处理对牧草干草产量的影响**

由图 2 可知，不同处理的饲用高粱干草产量存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。其中两年饲用高粱干草产量在  $S_0$  处理下均达到最高，分别为 28.00 和 28.92 t·hm<sup>-2</sup>，在  $SL_4$  处理下均最低，分别为 25.39 和 25.41 t·hm<sup>-2</sup>， $S_0$  与  $SL_4$  二者分别相差 2.61 和 3.51 t·hm<sup>-2</sup>；两年拉巴豆干草产量变化范围分别是 2.74~11.18 t·hm<sup>-2</sup> 和 2.43~10.97 t·hm<sup>-2</sup>，单播拉巴豆干草产量显著高于混播，且与其他处理差异显著 ( $P < 0.05$ )，其中在  $L_0$  处理下均达到最高，分别为 11.18 和 10.97 t·hm<sup>-2</sup>，在  $SL_1$  处理下均最低，分别为 2.74 和 2.43 t·hm<sup>-2</sup>， $SL_1$  较  $L_0$  分别降低了 75.49% 和 77.85%；两年总干草产量分别为 11.18~30.19 t·hm<sup>-2</sup> 和 10.97~30.77 t·hm<sup>-2</sup>，其中在  $SL_2$  处理下均达到最大，分别为 30.19 和 30.77 t·hm<sup>-2</sup>，在  $L_0$  处理下均为最小，分别为 11.18 和 10.97 t·hm<sup>-2</sup>，两年  $SL_2$  较  $L_0$  分别提高了 62.97% 和 64.35%。

表 1 投入与产出项目及饲草价格

Table 1 Input and output categories and forage prices

项目 Item	单价 Unit price
饲用高粱种子 <i>S. bicolor</i> seed (yuan·kg <sup>-1</sup> )	50
拉巴豆种子 <i>D. lablab</i> seed (yuan·kg <sup>-1</sup> )	40
灌溉 Irrigation (yuan·hm <sup>-2</sup> )	1500
肥料 Fertilizer (yuan·hm <sup>-2</sup> )	1860
人工 Labor (yuan·hm <sup>-2</sup> )	3000
机械 Machinery (yuan·hm <sup>-2</sup> )	750
收割 Harvest (yuan·hm <sup>-2</sup> )	750
饲用高粱饲草 <i>S. bicolor</i> forage (yuan·t <sup>-1</sup> )	1500
拉巴豆饲草 <i>D. lablab</i> forage (yuan·t <sup>-1</sup> )	2200

注：价格按当地正常市场价格估算，饲草价格为两年平均价格。

Note: The price is estimated according to the local normal market price, and the forage price is the average price of two years.

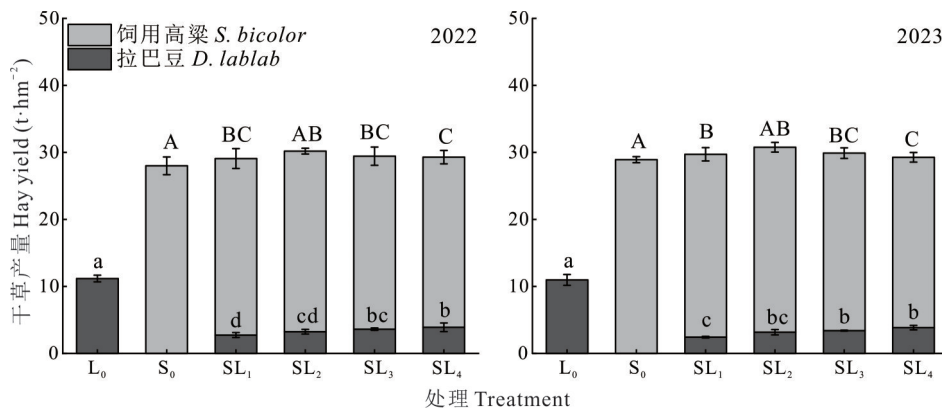


图 2 不同处理对饲用高粱、拉巴豆干草产量及总干草产量的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on *S. bicolor*, *D. lablab* hay yield and total hay yield

不同大写字母表示饲用高粱在不同处理间差异显著，不同小写字母表示拉巴豆在不同处理间有显著性差异 ( $P < 0.05$ )。Different uppercase letters indicate significant differences among *S. bicolor* treatments, and different lowercase letters indicate significant differences among *D. lablab* treatments ( $P < 0.05$ ).

## 2.2 不同混播处理对牧草粗蛋白产量的影响

由图3可知,不同处理间的粗蛋白产量存在显著差异( $P<0.05$ )。两年粗蛋白产量分别为 $1.59\sim 3.39\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $1.58\sim 3.42\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,随着拉巴豆播种量的增加,粗蛋白产量均呈先升高后降低的趋势;2年粗蛋白产量由低到高排序均为 $\text{SL}_4>\text{SL}_2>\text{SL}_3>\text{SL}_1>\text{S}_0>\text{L}_0$ ,其中在 $\text{SL}_4$ 处理下两年粗蛋白产量均达到最高,在 $\text{L}_0$ 处理下均为最低, $\text{SL}_4$ 较 $\text{L}_0$ 分别提高了53.10%和53.80%。

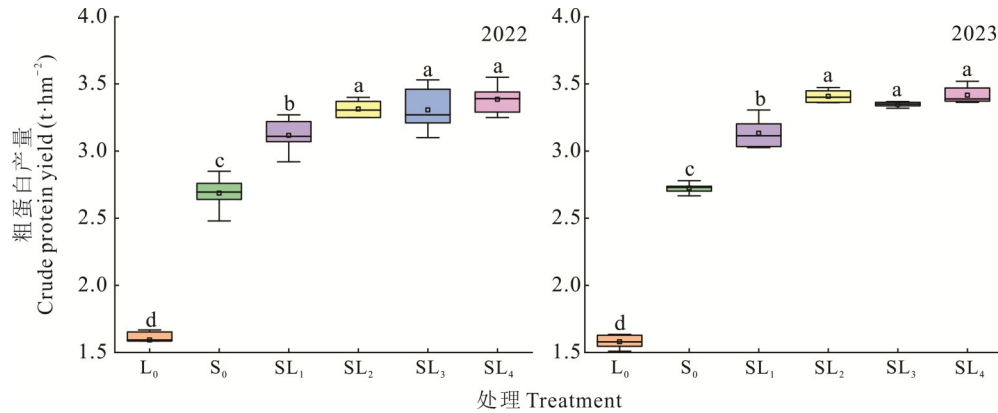


图3 不同处理对粗蛋白产量的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on crude protein yield

不同小写字母表示不同处理间在0.05水平差异显著( $P<0.05$ ),下同。Different lowercase letters indicate significant differences ( $P<0.05$ ) among different treatments at the 0.05 level, the same below.

## 2.3 不同混播处理对土地生产力的影响

由图4可知,两年LER变化范围分别为 $1.19\sim 1.26$ 和 $1.16\sim 1.24$ ,其中2022年在 $\text{SL}_4$ 处理下土地当量比达到最大,2023年在 $\text{SL}_2$ 处理下土地当量比达到最大,两年土地当量比均在 $\text{SL}_1$ 处理下最小,2022年 $\text{SL}_1$ 较 $\text{SL}_4$ 低5.56%,2023年 $\text{SL}_1$ 较 $\text{SL}_2$ 低6.45%。两年LER值均大于1,表明混播草地提高了土地利用效率,且LER值均在 $\text{LER}_s=\text{LER}_0$ 的左侧,即 $\text{LER}_s>\text{LER}_0$ ,这表明饲用高粱在混播草地中占据优势地位。

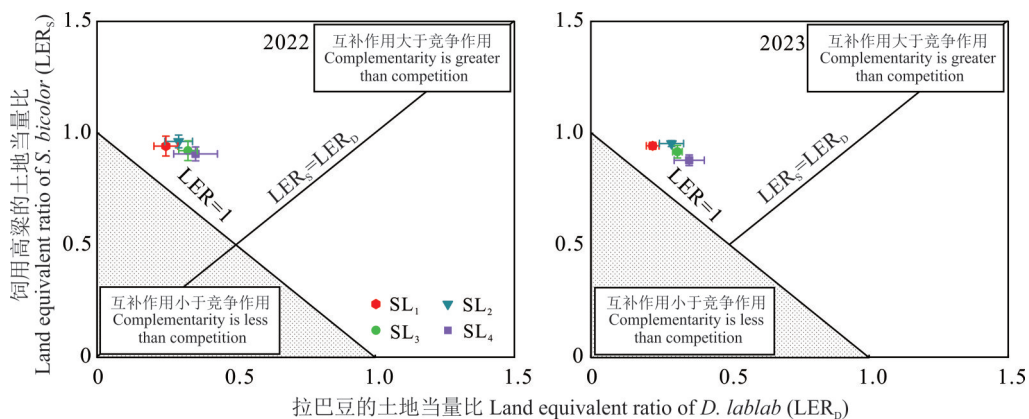


图4 不同处理对土地当量比的影响

Fig. 4 Effects of different treatments on land equivalent ratio

## 2.4 不同混播处理对牧草种间竞争的影响

由图5a可知,不同处理间的相对拥挤系数存在显著差异( $P<0.05$ )。两年饲用高粱K值除 $\text{SL}_1$ 外,其他处理均大于1,其中两年 $K_s$ 值分别在 $\text{SL}_3$ 和 $\text{SL}_2$ 处理下达到最大,分别为22.95和26.46,在 $\text{SL}_1$ 和 $\text{SL}_4$ 处理下为最小,分别是-3.97和10.75,2022年 $\text{SL}_3$ 和 $\text{SL}_1$ 相差26.92,2023年 $\text{SL}_2$ 和 $\text{SL}_4$ 相差15.71。随着拉巴豆播种比例的增加,

两年 K 值均呈先降低后升高的趋势, 分别表现为  $K_3 > K_4 > K_2 > K_1$  和  $K_2 > K_3 > K_1 > K_4$ , 综合表现为饲用高粱竞争力较强。

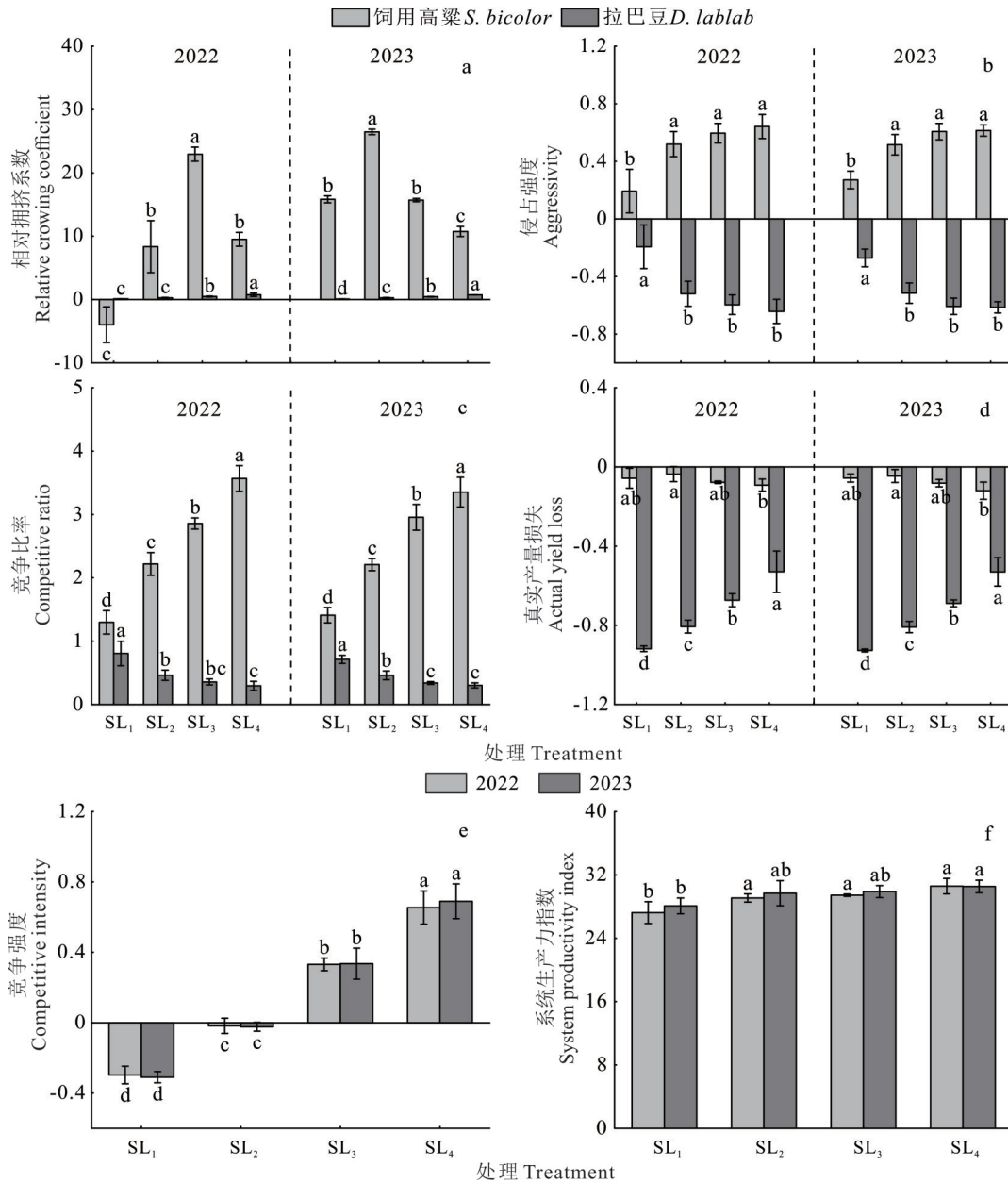


图 5 不同处理对饲用高粱和拉巴豆竞争指数的影响

Fig. 5 Effects of different treatments on competition index of *S. bicolor* and *D. lablab*

由图 5b 可知, 两年侵占强度均表现为  $A_s > 0 > A_D$ , 两年饲用高粱侵占强度最高的处理均为 SL<sub>4</sub>, 分别为 0.64 和 0.61, 在 SL<sub>1</sub> 处理下均最小, 仅为 0.19 和 0.27; SL<sub>1</sub> 较 SL<sub>4</sub> 分别降低了 70.31% 和 55.74%, 随着拉巴豆播种比例的增加, 饲用高粱的侵占强度呈逐渐上升的趋势, 拉巴豆的变化趋势与之相反。

由图 5c 可知, 两年竞争比率均表现为  $CR_s > 1 > CR_D$ ; 随着拉巴豆播种比例的增加, 饲用高粱竞争比率均呈上升趋势, 拉巴豆竞争比率均逐渐减小; 综合 A 值, 表明饲用高粱在混播群落中竞争力较强, 为优势种, 与 K、LER 结果一致。

由图 5d 可知, 两年  $AYL_s$  均存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。其中  $AYL_s$  在 SL<sub>2</sub> 处理均达到最高, 分别为 -0.04 和 -0.05, 在 SL<sub>4</sub> 处理下均最低, 分别为 -0.09 和 -0.12, SL<sub>4</sub> 与 SL<sub>2</sub> 分别相差 -0.05 和 -0.07;  $AYL_D$  最高的处理是

SL<sub>4</sub>,均为-0.53,在SL<sub>1</sub>处理下均最低,分别为-0.92和-0.93,SL<sub>4</sub>较SL<sub>1</sub>分别提高42.39%和43.01%,其中SL<sub>4</sub>均显著高于其他处理,且各处理间差异显著( $P<0.05$ );两年AYL由高到低的顺序均为AYL<sub>4</sub>>AYL<sub>3</sub>>AYL<sub>2</sub>>AYL<sub>1</sub>。

由图5e可知,两年竞争强度随着拉巴豆播种比例的增加,均呈逐渐上升的趋势。在SL<sub>1</sub>处理下均最小,分别为-0.30和-0.31,SL<sub>2</sub>次之,均为-0.02,二者分别相差-0.28和-0.29,且显著小于SL<sub>3</sub>和SL<sub>4</sub>处理( $P<0.05$ )。

由图5f可知,两年SPI值分别为27.24~30.58和28.09~30.53,其中在SL<sub>4</sub>处理下两年系统生产力均达到最高,在SL<sub>1</sub>处理下均为最低,两年SL<sub>1</sub>较SL<sub>4</sub>分别降低了10.92%和8.0%。

## 2.5 不同混播处理对草地经济效益的影响

由图6可知,两年混播优势均表现为MA<sub>s</sub>>MA<sub>D</sub>。其中MA<sub>s</sub>在SL<sub>2</sub>处理下均达到最高,分别是-0.05和-0.07,在SL<sub>4</sub>处理下均最小,分别是-0.14和-0.18,SL<sub>2</sub>较SL<sub>4</sub>分别提高了64.29%和61.11%,其中SL<sub>2</sub>显著高于SL<sub>4</sub>( $P<0.05$ );MA<sub>D</sub>分别为-2.02~-1.17和-2.04~-1.17,其中在SL<sub>4</sub>处理下均达到最高,在SL<sub>1</sub>处理下均最小,SL<sub>4</sub>与SL<sub>1</sub>两者分别相差-0.85和-0.87,其中SL<sub>4</sub>显著高于其他处理,且各处理间差异显著( $P<0.05$ );两年MA分别为-2.07~-1.31和-2.11~-1.35,均表现为MA<sub>4</sub>>MA<sub>3</sub>>MA<sub>2</sub>>MA<sub>1</sub>。

两年MAI均为正值,分别为7.26~9.27和6.59~9.47,在SL<sub>2</sub>处理下MAI值均达到最高,在SL<sub>1</sub>处理下为最低,两年SL<sub>2</sub>较SL<sub>1</sub>分别提高了21.68%和30.41%。

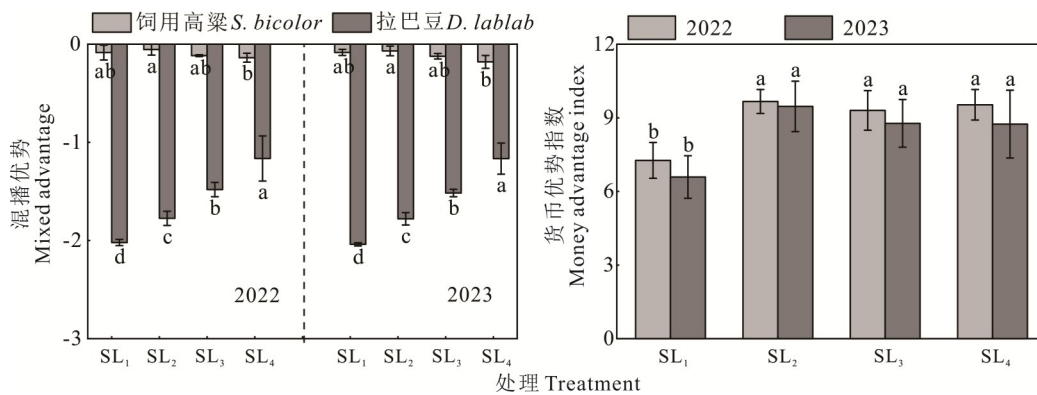


图6 不同处理下饲用高粱和拉巴豆的经济指数

Fig. 6 Economic index of *S. bicolor* and *D. lablab* under different treatments

## 2.6 不同混播处理对经济效益的影响

由表2可知,单播和混播处理均表现出正的净收入,其中混播处理的净收入均大于单播,且在SL<sub>2</sub>处理下获得最高的总收入(47549.45和48364.09元·hm<sup>-2</sup>)和净收入(37469.45和38284.09元·hm<sup>-2</sup>),两年净收入在SL<sub>2</sub>处理下较饲用高粱单播分别提高12.73%和10.58%,表明饲用高粱和拉巴豆混播模式平均经济效益较优,有利于增加收入。

## 3 讨论

### 3.1 不同混播处理对牧草生产性能的影响

豆科作物的比例对混播草地生产性能和稳定性有重要影响,但适宜的混播比例因研究区域有所差异,其产量和种间关系与牧草生长有一定的联系<sup>[26-27]</sup>。有学者研究发现,基于功能互补的豆禾混播可能是一种较传统的将豆科或禾本科作物单一种植更适合的播种方式,以此获得稳定的产量<sup>[28]</sup>,而合理的混播比例会影响牧草的生产性能<sup>[29]</sup>。董志晓等<sup>[30]</sup>研究发现,在成都平原甜高粱(*Sorghum bicolor* cv. Dochna)与拉巴豆混播较甜高粱单播产量显著提高了29.25%。刘彦培等<sup>[31]</sup>研究表明,小黑麦(T)/饲用豌豆(*Pisum sativum*, F)在混播比例为4:6时,混播

表2 不同混播处理的收益

Table 2 Benefits of different mixed sowing treatments

处理 Treatment	总收入 Total income (yuan·hm <sup>-2</sup> )		净收入 Net income (yuan·hm <sup>-2</sup> )		产投比 Ratio of income to cost	
	2022	2023	2022	2023	2022	2023
S <sub>0</sub>	41997.27	43381.36	33237.27	34621.36	3.79	3.95
L <sub>0</sub>	24592.00	24128.00	14752.00	14288.00	1.50	1.45
SL <sub>1</sub>	45537.91	46265.55	36117.91	36845.55	3.83	3.91
SL <sub>2</sub>	47549.45	48364.09	37469.45	38284.09	3.72	3.80
SL <sub>3</sub>	46690.00	47225.18	35950.00	36485.18	3.35	3.40
SL <sub>4</sub>	46666.27	46589.82	35266.27	35189.82	3.09	3.09

草地生产性能最好,且混播干草产量较小黑麦单播增加了59%。本研究表明,两年饲用高粱/拉巴豆混播产量较饲用高粱单播分别显著提高了7.25%和6.01%。这主要是因为饲用高粱混播草地中增加了拉巴豆的干草产量,进而使其总干草产量整体明显高于饲用高粱单播。其次是因为饲用高粱与拉巴豆之间会发生生态位互补,饲用高粱为高秆作物,它的茎秆直立为拉巴豆提供了充足的立体空间,有助于拉巴豆叶片吸收更多光资源促使其群体叶面积指数提高,促进了饲草对光能的转化与利用,最终达到提高饲草产量的效果。同时通过拉巴豆固定自身氮素的吸收与积累,提供给饲用高粱的氮素也相应增多,促进了饲用高粱对有机物的合成,进而提高饲草产量<sup>[30,32]</sup>。此外,本研究还发现草地总干草产量随着拉巴豆播种比例的增加呈先升高后降低的趋势,并在拉巴豆播种量为33.0 kg·hm<sup>-2</sup>时达到最高。造成这一现象的原因可能是随着拉巴豆播种量的增加,其与饲用高粱对水分、光等自然资源竞争激烈,种间竞争加剧,生长空间不足,致使产量下降<sup>[9]</sup>;此外,拉巴豆叶面积大且叶量丰富,与饲用高粱相互产生的遮蔽作用影响养分与有机物积累,从而造成产量下降<sup>[2]</sup>。然而,有学者研究表明,拉巴豆的播种量为49.5 kg·hm<sup>-2</sup>时与饲用高粱混播其干草产量达到最高<sup>[5]</sup>,本研究结果与之存在差异,主要原因是在本试验中,饲用高粱与拉巴豆是在饲用小黑麦收获(每年5月20日左右)后进行复种,与前人播种时间相差半个月,加之拉巴豆在生长前期冠层发育较快,超过适宜播量的拉巴豆会使得其与饲用高粱竞争激烈,造成生产力下降。

粗蛋白产量作为评价草地高产优质的主要指标,其数值的高低主要取决于干草产量和牧草粗蛋白含量<sup>[33-34]</sup>。本试验结果表明,两年饲用高粱混播粗蛋白产量较饲用高粱单播分别显著提高9.12%和9.93%,并在SL<sub>2</sub>处理下粗蛋白产量达到最高,表明混播相较于饲用高粱单播显著提高了混播牧草的营养价值。

### 3.2 不同混播处理对土地生产力和牧草种间竞争的影响

土地当量比(LER)是衡量土地生产力的重要指标,可用于评价复合种植方式下土地利用效率。郭常英等<sup>[35]</sup>在燕麦(*Avena sativa*)和饲用豌豆混播研究中表明,混播处理下LER为1.26~1.74,表明具有土地利用优势。任文等<sup>[14]</sup>对红豆草和垂穗披碱草的混播草地研究表明,第2年生长季末期,混播处理的LER为1.33~1.68,说明混播种植可以提高土地利用效率。本研究结果表明,饲用高粱/拉巴豆混播两年的LER分别为1.19~1.26和1.17~1.24,混播具有明显提高土地利用效率的优势。即单播相较于混播需要增加19%~26%和17%~24%的土地面积二者才能达到相同的产量<sup>[25]</sup>。同时,本研究发现,两年LER<sub>s</sub>均大于0.88,LER<sub>D</sub>均小于0.35,说明饲用高粱在混播系统中表现为优势作物,拉巴豆则为劣势作物,主要是因为饲用高粱植株个体高,茎秆粗壮,相对拉巴豆更容易获取光资源和空间资源,使其在与拉巴豆的竞争中占据优势<sup>[35]</sup>。

在混播种植下,不同牧草之间在一定程度上存在着对环境资源的激烈竞争,这种竞争作用会影响牧草在混播群落中的作用与地位,进而对牧草的生长特性及群落结构的稳定性产生影响<sup>[36]</sup>。混播草地中,各作物主要竞争其生长空间资源以及土壤养分,生长空间资源的竞争主要表现为作物茎叶对光资源的竞争<sup>[9]</sup>。物种间竞争的激烈程度,除与自身的竞争力有关外,还与群落密度和混播比例有关<sup>[37]</sup>。本研究发现,SL<sub>1</sub>和SL<sub>2</sub>混播处理下的竞争强度(CI)均小于0,即饲用高粱与拉巴豆混播草地种内竞争大于种间竞争,说明适宜的密度配置下饲用高粱与拉巴豆种间相容性较好,因此具有形成较高生产力的潜力以及更为持久的稳定性。此外,在混播草地中,当种内竞争

强于种间竞争时,各物种能够在时间和空间上对共同的生长资源进行合理分配,最终表现出混播优势<sup>[9]</sup>。本研究结果表明,2022年除SL<sub>1</sub>外的其他混播处理和2023年所有混播处理均具有产量优势(K>1),两年试验结果出现差异的原因可能是2022年降水较少,且两种植物的生态位需求比较接近,竞争相对激烈,与张永亮等<sup>[26]</sup>的研究结果一致。此外,竞争比率可弥补土地当量比未考虑播种比例的不足,能够较好地衡量物种间的竞争能力,优于侵占强度和相对拥挤系数。已有研究表明,豆禾混播系统中,禾本科牧草通常被认为是优势作物<sup>[10]</sup>。在本试验中,相对于拉巴豆,饲用高粱在混播群落中具有较强的竞争优势(CR<sub>s</sub>值、A<sub>s</sub>值均较大),与上述研究结论一致。

### 3.3 不同混播处理对草地经济效益的影响

经济效益的高低通常用于评价一个种植模式的推广前景,而MA和MAI用于表征混播系统经济收益的可行性及组合品种间的混播优势。本研究结果表明,与饲用高粱和拉巴豆单播相比,混播处理均具有较高的经济总产值,即MAI均大于6.59,表明混播具有绝对产量优势,这与Lithourgidis等<sup>[38]</sup>的研究结果一致,即较高的K和LER值导致较高的MAI值,表明混播系统具有较高的经济效益。本研究两年试验条件下经济效益最高的处理均为SL<sub>2</sub>。净收入常用于评价采用新的播种方式的主要因素。有学者研究发现,混播种植相较于单播具有经济优势<sup>[39]</sup>。本研究结果表明,与饲用高粱和拉巴豆单播相比,所有混播处理均具有较高的净收入,且在SL<sub>2</sub>处理下两年经济总产值均高于其他处理,其净收入较饲用高粱和拉巴豆单播分别提高11.63%和160.86%,表明在饲用高粱与拉巴豆混播种植体系中,拉巴豆播量为33.0 kg·hm<sup>-2</sup>时,饲用高粱和拉巴豆能够有效协调作物群体和生长环境,充分利用共同生长资源,从而获得较高单位面积草产量和经济效益。

## 4 结论

饲用高粱与拉巴豆混播对草地生产性能、种间竞争均有显著影响。混播草地干草产量、粗蛋白产量、净收入均在SL<sub>2</sub>处理下最大,分别达到30.48 t·hm<sup>-2</sup>、2.99 t·hm<sup>-2</sup>、37876.77元·hm<sup>-2</sup>;综合各项指标发现,在拉巴豆播量为33.0 kg·hm<sup>-2</sup>(SL<sub>2</sub>)下,饲草产量以及种间竞争均达到最优效果。因此,在宁夏引黄灌区饲用高粱与拉巴豆混播适宜推广种植的拉巴豆播种量为33.0 kg·hm<sup>-2</sup>。

## 参考文献 References:

- [1] Ji B, He J L, Du J M, *et al.* Effects of different reseeding modes on soil organic carbon and nitrogen reserves in Ningxia desert steppe. *Chinese Journal of Grassland*, 2021, 43(3): 60–66.  
季波, 何建龙, 杜建明, 等. 不同补播配置模式对宁夏荒漠草原土壤有机碳和全氮储量的影响. *中国草地学报*, 2021, 43(3): 60–66.
- [2] Wang B, Dong X, Li M Y, *et al.* Effects of mixed planting of *Dolichos lablab* with different sowing rates and silage corn on grassland productivity and forage quality. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(4): 828–834.  
王斌, 董秀, 李满有, 等. 不同播量拉巴豆与青贮玉米混播对草地生产性能及牧草品质的影响. *草地学报*, 2021, 29(4): 828–834.
- [3] Lithourgidis A S, Vasilakoglou I B, Dhima K V, *et al.* Forage yield and quality of common vetch mixtures with oat and triticale in two seeding ratios. *Field Crops Research*, 2006, 99(2/3): 106–113.
- [4] Chen J, Engbersen N, Stefan L, *et al.* Diversity increases yield but reduces harvest index in crop mixtures. *Nature Plants*, 2021, 7(7): 893–898.
- [5] 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 Prataculturae Sinica*, 2023, 32(3): 30–40.  
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.
- [6] Peoples M B, Chalk P M, Unkovich M J, *et al.* Can differences in <sup>15</sup>N natural abundance be used to quantify the transfer of nitrogen from legumes to neighbouring non-legume plant species. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 87: 97–109.
- [7] He X, Xu M, Qiu G Y, *et al.* Use of <sup>15</sup>N stable isotope to quantify nitrogen transfer between mycorrhizal plants. *Journal of Plant Ecology*, 2009, 2(3): 107–118.
- [8] Zhang Y L, Yu T F, Hao F, *et al.* Effects of fertilization and mixed sowing ratio on the production performance of grass-alfalfa

- mixed forage. *Chinese Journal of Grassland*, 2020, 42(6): 115–124.
- 张永亮, 于铁峰, 郝凤, 等. 施肥与混播比例对豆禾混播牧草生产性能的影响. *中国草地学报*, 2020, 42(6): 115–124.
- [9] Xie K Y, Zhao Y, Li X L, *et al.* Relationships between grasses and legumes in mixed grassland. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(3): 284–296.
- 谢开云, 赵云, 李向林, 等. 豆—禾混播草地种间关系研究进展. *草业学报*, 2013, 22(3): 284–296.
- [10] 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(12): 85–94.
- [11] Yang C, Zhang Y X, Zhang H, *et al.* Recent advances in understanding the ecosystem functioning of diverse forage mixtures. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(9): 206–219.
- 杨策, 张玉雪, 张鹤, 等. 牧草混播生态系统功能研究进展. *草业学报*, 2022, 31(9): 206–219.
- [12] Liu Q Y, Yun L, Chen Y F, *et al.* The dynamic analysis of forage yield and interspecific competition in alfalfa-grass mixed pasture. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(3): 181–191.
- 刘启宇, 云岚, 陈逸凡, 等. 苜蓿—禾草混播草地牧草产量及种间竞争关系的动态研究. *草业学报*, 2022, 31(3): 181–191.
- [13] Quan X, Wu J X, Yang P Z, *et al.* Study on the relationship between productivity and species in grassland with mixed-sowed gramineous and leguminous forages in Lhasa river valley. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(3): 657–667.
- 权欣, 武俊喜, 杨培志, 等. 拉萨河谷禾豆混播草地生产力与种间关系研究. *草地学报*, 2023, 31(3): 657–667.
- [14] Ren W, Zhang Z X, Lin C X, *et al.* Effects of mixed seeding ratio on biomass allocation and competition of *Onobrychis viciifolia* and *Elymus nutans* under cold conditions in the Tianzhu alpine region. *Pratacultural Science*, 2020, 37(10): 2035–2048.
- 任文, 张志新, 蔺昶兴, 等. 混播比例对高寒草地红豆草—垂穗披碱草混播群落生物量分配与竞争的影响. *草业科学*, 2020, 37(10): 2035–2048.
- [15] Guo C, Zhao Y L, Li X J, *et al.* Effect of sowing ratio on interspecific relationships between species and grassland productivity in legume-grass mixtures. *Pratacultural Science*, 2022, 39(11): 2307–2316.
- 郭川, 赵艳兰, 李香君, 等. 不同豆禾混播比例对植物种间关系及草地生产力的影响. *草业科学*, 2022, 39(11): 2307–2316.
- [16] Li Y J, Ma P J, Wu J H, *et al.* Effects of interplanting with *Dolichos lablab* on agronomic traits and yield of two varieties of silage maize. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(9): 209–216.
- 李亚娇, 马培杰, 吴佳海, 等. 不同品种青贮玉米与拉巴豆套种对青贮玉米农艺性状及产量的影响. *草业学报*, 2019, 28(9): 209–216.
- [17] Ma X D, Sun J J, Wang P B, *et al.* Effects of mixed sowing of *Avena sativa* and legumes on grass yield and quality in the Sanjiangyuan region of Qinghai. *Chinese Journal of Grassland*, 2021, 43(7): 21–27.
- 马晓东, 孙学金, 汪鹏斌, 等. 青海三江源区燕麦与豆类混播对草产量和品质的影响. *中国草地学报*, 2021, 43(7): 21–27.
- [18] Willey R W. Resource use in intercropping systems. *Agricultural Water Management*, 1990, 17(1/3): 215–231.
- [19] Ghosh P K. Growth, yield, competition and economics of groundnut/cereal fodder intercropping systems in the semi-arid tropics of India. *Field Crops Research*, 2004, 88(2): 227–237.
- [20] Wilson J B. Shoot competition and root competition. *Journal of Applied Ecology*, 1988, 25(1): 279–296.
- [21] Mcgilchrist C A. Analysis of competition experiments. *Biometrics*, 1965, 21(4): 975–985.
- [22] Willey R W, Rao M R. A competitive ratio for quantifying competition between intercrops. *Experimental Agriculture*, 1980, 16(2): 117–125.
- [23] Banik P. Evaluation of wheat (*Triticum aestivum*) and legume intercropping under 1:1 and 2:1 row-replacement series system. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 1996, 176(5): 289–294.
- [24] Li Y Y, Yu C B, Sun J H, *et al.* Nitrogen environmental endurance and economically-ecologically appropriate amount of nitrogen fertilizer in faba bean/maize intercropping system. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008(3): 223–227.
- 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. *农业工程学报*, 2008(3): 223–227.
- [25] Dhima K V, Lithourgidis A S, Vasilakoglou I B, *et al.* Competition indices of common vetch and cereal intercrops in two seeding ratio. *Field Crops Research*, 2007, 100(2): 249–256.

- [26] Zhang Y L, Zhang L J, Yu T F, *et al.* Effects of grass-legume combinations and intercropping patterns on the forage yield and yield stability. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(5): 1410–1418.  
张永亮, 张丽娟, 于铁峰, 等. 禾豆组合与间作方式对牧草产量及产量稳定性的影响. *草地学报*, 2019, 27(5): 1410–1418.
- [27] Dou Z Y, Zheng W H, Tian Y Y, *et al.* Comprehensive comparison of production performance of annual mixed legume-grass pastures. *Pratacultural Science*, 2023, 40(10): 2639–2650.  
窦梓懿, 郑伟华, 田燕燕, 等. 一年生豆禾混播草地生产性能的综合比较. *草业科学*, 2023, 40(10): 2639–2650.
- [28] Hauggaard-Nielsen H, Gooding M, Ambus P, *et al.* Pea-barley intercropping for efficient symbiotic N<sub>2</sub>-fixation, soil N acquisition and use of other nutrients in European organic cropping systems. *Field Crops Research*, 2009, 113(1): 64–71.
- [29] Moreira N. The effect of seed rate and nitrogen fertilizer on the yield and nutritive value of oat-vetch mixtures. *The Journal of Agricultural Science*, 1989, 112(1): 57–66.
- [30] Dong Z X, He R H, Kuang J Y, *et al.* Effects of sweet sorghum intercropping with *Lablab purpureus* on yield and quality of mixed forage in Chengdu Plain, China. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(7): 1578–1583.  
董志晓, 何润濠, 况鉴洋, 等. 成都平原甜高粱间作拉巴豆对混合饲草产量及品质的影响. *草地学报*, 2021, 29(7): 1578–1583.
- [31] Liu Y P, Xue S M, Zhong S L, *et al.* Comprehensive evaluation of mixed grassland of triticale and feeding pea in high-elevation of Northwestern Yunnan. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(9): 2497–2504.  
刘彦培, 薛世明, 钟绍丽, 等. 滇西北高海拔地区小黑麦与饲用豌豆混播草地综合评价. *草地学报*, 2022, 30(9): 2497–2504.
- [32] Yong T W, Chen P, Liu X M, *et al.* Effects of reduced nitrogen on soil ammonification, nitrification and nitrogen fixation maize-soybean relay intercropping systems. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(10): 1485–1495.  
雍太文, 陈平, 刘小明, 等. 减量施氮对玉米-大豆套作系统土壤氮素氨化、硝化及固氮作用的影响. *作物学报*, 2018, 44(10): 1485–1495.
- [33] Anil L, Park J, Phipps R H, *et al.* The potential of forage-maize intercrops in ruminant nutrition. *Animal Feed Science and Technology*, 2000, 86(3): 157–164.
- [34] Ajayi F T, Babayemi O J, Taiwo A A, *et al.* Mineral solubility of *Panicum maximum* with four herbaceous forage legume mixtures incubated in the rumen of N’Dama steers. *Animal Science Journal*, 2009, 80(3): 250–257.
- [35] Guo C Y, Wang W, Pu X J, *et al.* Effects of sowing method and row spacing on production performance and interspecific relationship of oat/forage pea mixed grassland. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(9): 2483–2491.  
郭常英, 王伟, 蒲小剑, 等. 播种方式和行距对燕麦/饲用豌豆混播草地生产性能及种间关系的影响. *草地学报*, 2022, 30(9): 2483–2491.
- [36] Wang X J, Cao W X, Wang S L, *et al.* Effects of perennial legume-gramineae mixtures on forage yield and quality in the Hexi Corridor Region. *Pratacultural Science*, 2021, 38(7): 1339–1350.  
王小军, 曹文侠, 王世林, 等. 河西走廊多年生豆禾混播对牧草产量和品质的影响. *草业科学*, 2021, 38(7): 1339–1350.
- [37] Wang P, Zhou D W, Zhang B T. Coexistence and inter-specific competition in grass-legume mixture. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(5): 2560–2567.  
王平, 周道玮, 张宝田. 禾-豆混播草地种间竞争与共存. *生态学报*, 2009, 29(5): 2560–2567.
- [38] Lithourgidis A S, Vlachostergios D N, Dordas C A, *et al.* Dry matter yield, nitrogen content, and competition in pea-cereal Sadeghpour intercropping systems. *European Journal of Agronomy*, 2011, 34(4): 287–294.
- [39] Sadeghpour A, Jahanzad E, Esmaeili A, *et al.* Forage yield, quality and economic benefit of intercropped barley and annual medic in semi-arid conditions: Additive series. *Field Crops Research*, 2013, 148(3): 43–48.