DOI: 10. 11686/cyxb2025382
http://cyxb. magtech. com. cn
张琪琳, 王小军, 李晶, 等. 环青海湖地区燕麦与一年生豆科牧草混播组配研究. 草业学报, 2026, 35(9): 198－210.
ZHANG Qi-lin, WANG Xiao-jun, LI Jing, *et al*. Mixed sowing with different combinations of oat and annual leguminous forages in the Qinghai Lake area. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(9): 198－210.

环青海湖地区燕麦与一年生豆科牧草混播组配研究

张琪琳, 王小军, 李晶, 程重庆, 梁国玲, 刘文辉, 琚泽亮, 贾志锋, 马祥, 李文*
(青海大学畜牧兽医科学院, 青海省畜牧兽医科学院, 青海省青藏高原优良牧草种质资源利用重点实验室, 青海 西宁 810016)

摘要: 针对环青海湖地区人工草地生产力低下、饲草品质不佳的问题, 为提升该地区饲草生产的产量与品质, 本研究开展‘青燕 4 号’燕麦分别与‘青建 1 号’饲用豌豆、箭筈豌豆及‘A-61’饲用豌豆资源按不同比例混播的试验。分析不同混播组配处理对饲草农艺性状、营养组分、相对饲喂价值及经济效益的影响, 以筛选出适宜环青海湖地区饲草生产的最佳混播组配。结果表明: 在同一混播比例下, ‘青燕 4 号’与‘A-61’混播饲草整体表现优于其他混播组合; 在同一混播组合下, 饲草总干草产量与净收益随‘青燕 4 号’比例增多整体呈上升趋势, 而粗蛋白含量则随‘青燕 4 号’比例的增加呈下降趋势; 其中, 饲草总干草产量和净收益在‘青燕 4 号’与‘A-61’饲用豌豆资源按 4∶6 混播处理下最高, 分别为 11458. 7 kg·hm^{-2}和 6316. 5 元·hm^{-2}; 饲草粗蛋白含量在‘青燕 4 号’与‘A-61’饲用豌豆资源按 1∶9 混播处理下显著最高($P<0.05$), 为 21. 0%。结构方程模型表明, 混播组合、混播比例及其交互作用主要通过影响豆科产量对饲草营养品质产生间接影响。灰色关联分析综合评价表明, ‘青燕 4 号’与‘A-61’饲用豌豆资源按 4∶6 混播是高产、优质与高效益的最佳混播组配, 可在环青海湖地区推广应用于高产优质饲草生产。

关键词: 环青海湖地区; 燕麦; 饲用豌豆; 箭筈豌豆; 农艺性状; 营养品质

Mixed sowing with different combinations of oat and annual leguminous forages in the Qinghai Lake area

ZHANG Qi-lin, WANG Xiao-jun, LI Jing, CHENG Chong-qing, LIANG Guo-ling, LIU Wen-hui, JU Ze-liang, JIA Zhi-feng, MA Xiang, LI Wen*
Academy of Animal and Veterinary Sciences, Qinghai University, Qinghai Academy of Animal and Veterinary Sciences, Key Laboratory of Superior Forage Germplasm in the Qinghai-Tibetan Plateau, Xining 810016, *China*

Abstract: Forage plants in artificial grassland in the Qinghai Lake area exhibit low productivity and poor quality. The aim of this work, therefore, was to improve the yield and quality of forage production in this area. To this end, we conducted an experiment to evaluate the effects of mixed sowing with *Avena sativa* ‘Qingyan No. 4’ with *Pisum sativum* ‘Qingjian No. 1’, *Vicia sativa*, and *P. sativum* ‘A-61’ at different ratios. The effects of different mixed sowing combinations on agronomic traits, nutritional components, relative feeding value, and economic benefits of forage were analyzed to identify the best mixed sowing combination for forage production in the Qinghai Lake area. The results show that under the same mixture ratio, ‘Qingyan No. 4’ and ‘A-61’ mixed forage exhibited better production performance than other mixed sowing combinations. Under the same mixed sowing combination, the total hay yield and net profit of forage showed an overall upward trend as the proportion of ‘Qingyan No. 4’

收稿日期: 2025-09-23; 改回日期: 2025-11-10
基金项目: 国家重点研发计划(2022YFD1602307)资助。
作者简介: 张琪琳(2001－), 女, 甘肃武山人, 在读硕士。E-mail: zqlhkfg@163. com
*通信作者 Corresponding author. E-mail: lw@qhu. edu. cn

increased, while the crude protein content showed a downward trend. The highest forage hay yield (11458.7 kg·ha^{-1}) and net profit (6316.5 CNY·ha^{-1}) were in the mixed sowing treatment of 'Qingyan No. 4' and 'A-61' at a ratio of 4∶6. The highest crude protein content of forage (21.0%) was in the mixed sowing treatment of 'Qingyan No. 4' and 'A-61' at a ratio of 1∶9, and was significantly higher ($P<0.05$) in this treatment than in the other treatments. The structural equation model showed that mixed sowing combination, mixture ratio, and their interaction had an indirect effect on forage nutritional quality, mainly by affecting legume yield. A multivariate evaluation based on grey correlation analysis showed that the best mixed sowing treatment in terms of high yield, high quality, and high benefit was 'Qingyan No. 4' and 'A-61' at a ratio of 4∶6. This mixed sowing combination should be applied in practice to achieve high-yielding and high-quality forage production in the Qinghai Lake area.

Key words: Qinghai Lake area; oat; field pea; common vetch; agronomic traits; nutritional quality

环青海湖地区位于青藏高原、祁连山脉、黄土高原西部三大自然地理单元的过渡带[1],地势较高,阻挡了西部荒漠向东的扩张趋势,具有极为重要的生态地位[2]。但高强度的放牧和气候变化导致该区域部分草地植被盖度降低、草地退化加快,加重了草畜供需矛盾,阻碍着该地区畜牧业和经济社会的可持续发展[3]。发展人工草地可以弥补天然草地的供给不足,有效缓解该区域的生态压力、保障饲草供给。然而,受自然条件及栽培管理措施的影响,环青海湖地区人工草地的生产力水平较低、饲草品质较差。因此,在该地区生产高产优质的饲草,提高饲草产量与营养品质,缓解草畜供需矛盾非常重要。

禾豆混播草地不仅能提高饲草产量,增加蛋白质含量,提升饲草品质,优化饲草口感,还能充分发挥豆科牧草根瘤菌的固氮作用,降低氮肥的使用量,改善土壤的物理化学特性[4-9]。燕麦(*Avena sativa*)适应性强、抗逆性好、生育期短、产量高、家畜喜食,是一种高产饲草[10-12]。饲用豌豆(*Pisum sativum*)和箭筈豌豆(*Vicia sativa*)具有适口性好、产量高、抗逆性强、生长迅速、易于消化等特性,营养价值高,为优质蛋白饲草[13-15]。赵保文等[16]研究发现,燕麦与箭筈豌豆混播不仅使饲草农艺性状和品质都优于燕麦单播,还提高了土地利用率;柳茜等[17]在凉山的研究表明,燕麦与饲用豌豆按1∶1混播是适宜凉山种植的混播比例;冯廷旭等[18]在三江源的试验表明,在高寒地区燕麦与箭筈豌豆按7∶3混播为三江源区的最佳混播组配;马文艳等[19]发现,在柴达木盆地'青饲麦2号'小黑麦(*Triticosecale* 'Qingsimai No. 2')与'青建1号'饲用豌豆(*P. sativum* 'Qingjian No. 1')按7∶3混播饲草产量最佳。受传统种植观念影响及缺乏科学种植技术指导,目前环青海湖地区燕麦饲草生产主要以传统单播为主,而燕麦与一年生豆科牧草混播种植较为罕见。燕麦单播种植虽也能获取较高的饲草产量,但饲草营养品质普遍较低,能解决家畜的饱腹问题,但不利于家畜营养改善。燕麦与豆科牧草混播不仅能提高饲草产量和营养品质,还能有效解决家畜"吃饱吃好"的问题,是缓解高寒牧区草畜失衡矛盾的有效措施。然而适宜环青海湖地区燕麦与豆科牧草混播种植的最佳组合及其比例尚不明确。同时,以往的试验多从单一禾豆混播组合开展研究,且设置的禾豆混播比例较少,混播比例梯度跨度较大,这可能导致所筛选出的混播比例存在局限性。此外,以往的研究也未深入探究混播组合、混播比例及其交互作用对饲草营养品质的作用路径与效应强度。这制约着对禾豆混播技术理论及其作用机制的深入理解。

本研究在环青海湖地区设置'青燕4号'('Qingyan No. 4')燕麦+'青建1号'饲用豌豆、'青燕4号'+箭筈豌豆和'青燕4号'+'A-61'饲用豌豆资源3种禾豆混播组合,各混播组合分别按'青燕4号'与豆科牧草种子质量比1∶9、2∶8、3∶7、4∶6、5∶5、6∶4、7∶3、8∶2、9∶1设置9种混播比例,并以'青燕4号'单播和豆科牧草单播为对照,基于结构方程模型分析混播组合、混播比例及其交互作用对饲草营养品质的作用路径与效应强度。对不同混播组配处理下饲草农艺性状、营养组分及经济效益进行综合评价,从而筛选出适合环青海湖地区种植的最佳混播组配,以期为环青海湖地区及相似生态区建植禾豆混播草地、优化饲草料生产体系提供科学依据与数据支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于青海省海南藏族自治州共和县倒淌河镇(36°40′ N,100°17′ E),属典型高原大陆性气候,昼夜温差大,空气干燥,四季明显,年均降水量338 mm,降水多集中在7—9月,可占全年降水的80%以上,年平均气温4.1 ℃,7月温度为一年中最高,平均温度可达15 ℃,牧草生长期约为130 d。草地类型为高寒草甸,土壤类型为黑钙土,表层土壤有机质含量为83.57 g·kg^{-1},全氮含量为5.95 g·kg^{-1},全磷含量为5.24 g·kg^{-1}[20]。

1.2 供试材料

燕麦品种为环青海湖地区最适种植的'青燕4号'[20],种子纯净度95.8%,发芽率93%,种子用价为89.1%;饲用豌豆品种分别为'青建1号'与'A-61'饲用豌豆资源,纯净度分别为94.0%和96.4%,发芽率分别为93.3%和95.2%,种子用价分别为87.7%和91.8%;箭筈豌豆品种为'西牧333A'(*V. sativa* 'Ximu 333A'),种子纯净度92.8%,发芽率93.7%,种子用价为87.0%。上述饲草种子均来自青海大学。

1.3 试验设计

采用随机区组试验设计,设置'青燕4号'燕麦+'青建1号'饲用豌豆(M_1)、'青燕4号'燕麦+箭筈豌豆(M_2)、'青燕4号'燕麦+'A-61'饲用豌豆资源(M_3)3种混播组合,各混播组合分别按'青燕4号'与豆科牧草种子质量比1∶9(R_1)、2∶8(R_2)、3∶7(R_3)、4∶6(R_4)、5∶5(R_5)、6∶4(R_6)、7∶3(R_7)、8∶2(R_8)、9∶1(R_9)设置9种混播比例,并以'青燕4号'单播(O)和豆科牧草单播(P)为对照,共11个处理,各处理重复3次,各混播组合33个小区,共99个小区,小区面积3 m×5 m,小区间距1 m,区组间距2 m。于2024年5月下旬人工条播种植,行距为25 cm,播深为3~4 cm。种植前施底肥(150 kg·hm^{-2}磷酸二铵和75 kg·hm^{-2}尿素[20]),旱作,仅在分蘖/分枝期人工除杂草,此后再无灌溉、施肥和除杂等管理措施。各处理播种量见表1。

表1 各混播处理理论播种量

Table 1 Theoretical seeding rate of each mixed sowing treatment (kg·hm^{-2})

燕麦与豆科牧草种子质量比 Seed mass ratio of oat and legumes	M_1		M_2		M_3	
	'青燕4号'燕麦 *A. sativa* 'Qingyan No. 4'	'青建1号'饲用豌豆 *P. sativum* 'Qingjian No. 1'	'青燕4号'燕麦 *A. sativa* 'Qingyan No. 4'	箭筈豌豆 *V. sativa*	'青燕4号'燕麦 *A. sativa* 'Qingyan No. 4'	'A-61'饲用豌豆资源 *P. sativum resource* 'A-61'
10∶0(燕麦单播 Oat unicast, O)	225.00	0.00	225.00	0.00	225.00	0.00
0∶10(豆科单播 Legumes unicast, P)	0.00	112.00	0.00	120.00	0.00	112.00
1∶9(R_1)	22.50	100.80	22.50	108.00	22.50	100.80
2∶8(R_2)	45.00	89.60	45.00	96.00	45.00	89.60
3∶7(R_3)	67.50	78.40	67.50	84.00	67.50	78.40
4∶6(R_4)	90.00	67.20	90.00	72.00	90.00	67.20
5∶5(R_5)	112.50	56.00	112.50	60.00	112.50	56.00
6∶4(R_6)	135.00	44.80	135.00	48.00	135.00	44.80
7∶3(R_7)	157.50	33.60	157.50	36.00	157.50	33.60
8∶2(R_8)	180.00	22.40	180.00	24.00	180.00	22.40
9∶1(R_9)	202.50	11.20	202.50	12.00	202.50	11.20

1.4 野外观测及样品采集

于2024年9月下旬开展野外观测及样品采集。首先剪除各试验小区边行及两端各20 cm饲草消除边际效应,然后在各试验小区随机选取健康无病害的'青燕4号'及豆科牧草植株各18株,测定植株绝对高度(植株拉直后从根颈到最顶端的距离),后将其完整挖出,分别记录分蘖数与分枝数;在各试验小区随机布设6个1 m×1 m的样方,齐地面剪取地上部生物量,人工拣除杂草后将'青燕4号'和豆科牧草分装保存;于105 ℃烘箱中烘30

min，转 75 ℃烘干至恒重，称干重，计算茎叶比（茎干重/叶干重）。群落茎叶比为燕麦和豆科的总茎干重/燕麦和豆科的总叶干重。

烘干后的植物样品（混合草样）粉碎过筛，依据《土壤农化分析》[21]试验方法，用凯氏定氮法测定粗蛋白（crude protein，CP）含量，索氏提取法测定粗脂肪（crude fat，CF）含量，蒽酮比色法测定可溶性糖（soluble sugar，SS）含量，范氏纤维分析法测定酸性洗涤纤维（acid detergent fiber，ADF）和中性洗涤纤维（neutral detergent fiber，NDF）含量，计算相对饲喂价值（relative feeding value，RFV）[22]。

1.5　数据分析

用 Microsoft Excel 2016 软件整理数据。用 R 4.0.2（R Development Core Team）软件分析数据。绘图软件为 Origin 2024。

采用 R 4.0.2 对不同混播组配处理下‘青燕 4 号’和豆科牧草的农艺性状、营养组分和相对饲喂价值在 0.05 水平上进行单因素方差分析（One-way ANOVA）和双因素方差分析（Two-way ANOVA）。用 R 4.0.2 的结构方程模型探讨混播组合、混播比例及其交互作用对饲草营养品质的作用路径与效应强度。采用灰色关联分析对不同组配饲草的农艺性状、营养组分和净收益进行综合评价，以筛选出适合环青海湖地区种植的最佳混播组配。

所有处理的原始观测值形成比较数列矩阵 $X=\{X_i(k)\}(i=1, 2, 3, \cdots, m$，表示第 i 个处理；$k=1, 2, 3, \cdots, n$，表示第 k 项评价指标），挑选各指标的最优值为参考序列 $X_0=\{X_0(k)\}(k=1, 2, 3, \cdots, n)$[18]。

$$X_i'(k)=\frac{X_i(k)}{\bar{X}_k} \tag{1}$$

$$\xi_i(k)=\frac{\min\Delta+\rho\max\Delta}{\Delta_i(k)+\rho\max\Delta} \tag{2}$$

$$\gamma_i=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\xi_i(k) \tag{3}$$

式中：$\bar{X}_k$ 为第 k 项指标的平均值；$X_i'(k)$ 为 $X_i(k)$ 无量纲化处理后的值；$\Delta_i(k)=|X_0'(k)-X_i'(k)|$，$X_0'(k)$ 为 $X_0(k)$ 无量纲化处理后的值；minΔ 为 $\Delta_i(k)$ 中的最小值；maxΔ 为 $\Delta_i(k)$ 中的最大值；ρ 为分辨系数，本试验取值为 0.5。

为计算经济效益，根据青海当地燕麦种子 4 元·kg^{-1}、饲用豌豆种子 14 元·kg^{-1}、箭筈豌豆种子 10 元·kg^{-1}、磷酸二铵 4.3 元·kg^{-1}、尿素 2 元·kg^{-1}、机械播种 1200 元·hm^{-2}、机械收割 900 元·hm^{-2}、人工 750 元·hm^{-2}、地租 4500 元·hm^{-2} 计算所需成本，以青海当地燕麦青干草 1.3 元·kg^{-1}、豌豆青干草 1.6 元·kg^{-1} 计算总收益，净收益＝总收益－成本。

2　结果与分析

2.1　不同混播组配处理下饲草的农艺性状特征

双因素方差分析结果显示（表 2），混播组合、混播比例及其交互作用对‘青燕 4 号’与豆科牧草的株高和分蘖/分枝数均影响显著（$P<0.05$）。单因素方差分析结果表明，在同一混播组合下，饲草总干草产量随‘青燕 4 号’比例增多整体呈上升趋势；在同一比例下，饲用豌豆的株高和干草产量整体上高于箭筈豌豆，而箭筈豌豆的分枝数较饲用豌豆多（图 1）。其中，‘青燕 4 号’和豆科牧草株高均在 M_3R_1 处理下最高，‘青燕 4 号’株高为 120.4 cm，豌豆株高为 90.8 cm（图 1a）；‘青燕 4 号’分蘖数在 M_3R_9 处理下最高，为 10.0 枝·株$^{-1}$，豆科牧草分枝数在 M_2R_5 处理下最高，为 4.7 枝·株$^{-1}$（图 1b）；‘青燕 4 号’干草产量在 M_2R_9 处理下最高，为 9683.3 kg·hm^{-2}，豆科牧草干草产量在 M_3R_1 处理下较高，为 4406.0 kg·hm^{-2}（图 1c）；饲草总干草产量在 M_3R_4 处理下最高，为 11458.7 kg·hm^{-2}（图 1e）；‘青燕 4 号’茎叶比在 M_1R_4 处理下较低，为 0.5，豆科牧草茎叶比在 M_3R_2 处理下较低，为 0.6（图 1d）；群落茎叶比在 M_2R_8 处理下较低，为 0.5（图 1f）。

2.2　不同混播组配处理下饲草的营养品质特征

双因素方差分析结果表明（表 3），混播组合、混播比例及其交互作用均显著影响饲草的粗蛋白、粗脂肪和酸性洗涤纤维含量（$P<0.05$）。在同一混播组合下，‘青燕 4 号’比例增加导致饲草粗脂肪、可溶性糖、酸性洗涤纤维

表2 混播组合、混播比例及其交互作用对饲草农艺性状影响的双因素方差分析

Table 2 Two-way analysis of variance of the effects of mixed sowing combination, mixture ratio and their interaction on agronomic traits of forage

项目 Item	因素 Factor	自由度 Degrees of freedom	*P*	项目 Item	因素 Factor	自由度 Degrees of freedom	*P*
燕麦株高 Oat plant height	混播组合 Mixed sowing combination	2	0.00	豆科牧草产量 Leguminous forage yield	混播组合 Mixed sowing combination	2	0.00
	混播比例 Mixture ratio	10	0.00		混播比例 Mixture ratio	10	0.00
	组合×比例 Combination×ratio	20	0.04		组合×比例 Combination×ratio	20	0.23
豆科牧草株高 Leguminous forage plant height	混播组合 Mixed sowing combination	2	0.00	总产量 Total yield	混播组合 Mixed sowing combination	2	0.04
	混播比例 Mixture ratio	10	0.00		混播比例 Mixture ratio	10	0.00
	组合×比例 Combination×ratio	20	0.00		组合×比例 Combination×ratio	20	0.68
燕麦分蘖数 Number of tillers of oat	混播组合 Mixed sowing combination	2	0.01	燕麦茎叶比 Stem-leaf ratio of oat	混播组合 Mixed sowing combination	2	0.46
	混播比例 Mixture ratio	10	0.00		混播比例 Mixture ratio	10	0.00
	组合×比例 Combination×ratio	20	0.00		组合×比例 Combination×ratio	20	0.00
豆科牧草分枝数 Branch number of leguminous forage	混播组合 Mixed sowing combination	2	0.00	豆科牧草茎叶比 Stem-leaf ratio of leguminous forage	混播组合 Mixed sowing combination	2	0.00
	混播比例 Mixture ratio	10	0.00		混播比例 Mixture ratio	10	0.00
	组合×比例 Combination×ratio	20	0.00		组合×比例 Combination×ratio	20	0.10
燕麦产量 Oat yield	混播组合 Mixed sowing combination	2	0.22	群落茎叶比 Stem-leaf ratio of community	混播组合 Mixed sowing combination	2	0.13
	混播比例 Mixture ratio	10	0.00		混播比例 Mixture ratio	10	0.38
	组合×比例 Combination×ratio	20	0.74		组合×比例 Combination×ratio	20	0.02

及中性洗涤纤维含量呈上升趋势，而粗蛋白含量则呈下降趋势。在同一混播比例下，‘青燕4号’与‘A-61’饲用豌豆资源混播的营养品质整体上优于其他混播组合（图2）。其中，饲草粗蛋白含量在M_3R_1处理下显著最高（$P<0.05$），为21.0%（图2a）；饲草粗脂肪含量在M_3R_7处理下较高，为4.0%（图2b）；饲草可溶性糖含量在M_3R_9处理下较高，为14.8%（图2c）；饲草酸性洗涤纤维含量在M_1R_1处理下较低，为25.9%（图2d）；饲草中性洗涤纤维含量在M_3R_1处理下较低，为38.0%（图2e）；饲草相对饲喂价值在M_3R_1处理下较高，为152.0（图2f）。

2.3 不同混播组配处理下饲草经济效益特征

为进一步分析不同混播组配处理下饲草经济效益特征，根据青海当地市场价格计算饲草经济效益，结果表明，在M_1和M_3组合下，饲草净收益随燕麦比例增加呈先升后降趋势，M_2组合饲草净收益随燕麦占比升高呈上升趋势；在同一混播比例下，M_3组合的净收益整体上优于其他组合。其中M_3R_4处理下饲草净收益最高，为6316.5元·hm^{-2}（表4）。

2.4 不同混播组配处理下饲草农艺性状、营养组分及净收益综合评价

采用灰色关联分析综合评价不同混播组配处理下饲草的农艺性状、营养组分和净收益，结果表明，混播饲草在M_3R_4处理下关联度最高，为0.6684，在M_1R_6处理下关联度最低，为0.4900（表5）。因此，M_3R_4处理下干草产量和净经济收益最高，且饲草营养品质较高，是适宜环青海湖地区高产、优质饲草生产的最佳混播组配。

2.5 混播组合、混播比例及其交互作用对饲草营养品质的作用路径与效应强度

采用结构方程模型系统分析各因子对饲草营养品质的作用路径及效应强度（图3）。结果表明，该模型拟合度良好（$P=0.964$，Fisher's $C=0.073$），混播比例可直接对饲草营养品质产生极显著影响（$P<0.01$），路径系数为−0.0999；混播组合、混播比例及其交互作用还通过影响豆科叶片生物量、燕麦叶片生物量、燕麦产量、豆科产量和群落茎叶比对饲草营养品质产生间接影响；而豆科叶片生物量、燕麦产量、豆科产量和群落茎叶比均可对饲草营养品质产生直接影响，其中豆科产量对饲草营养品质影响的路径系数最大，为0.3612。通过总效应计算可知，豆科产量对饲草营养品质产生的总效应最高，为0.3816。

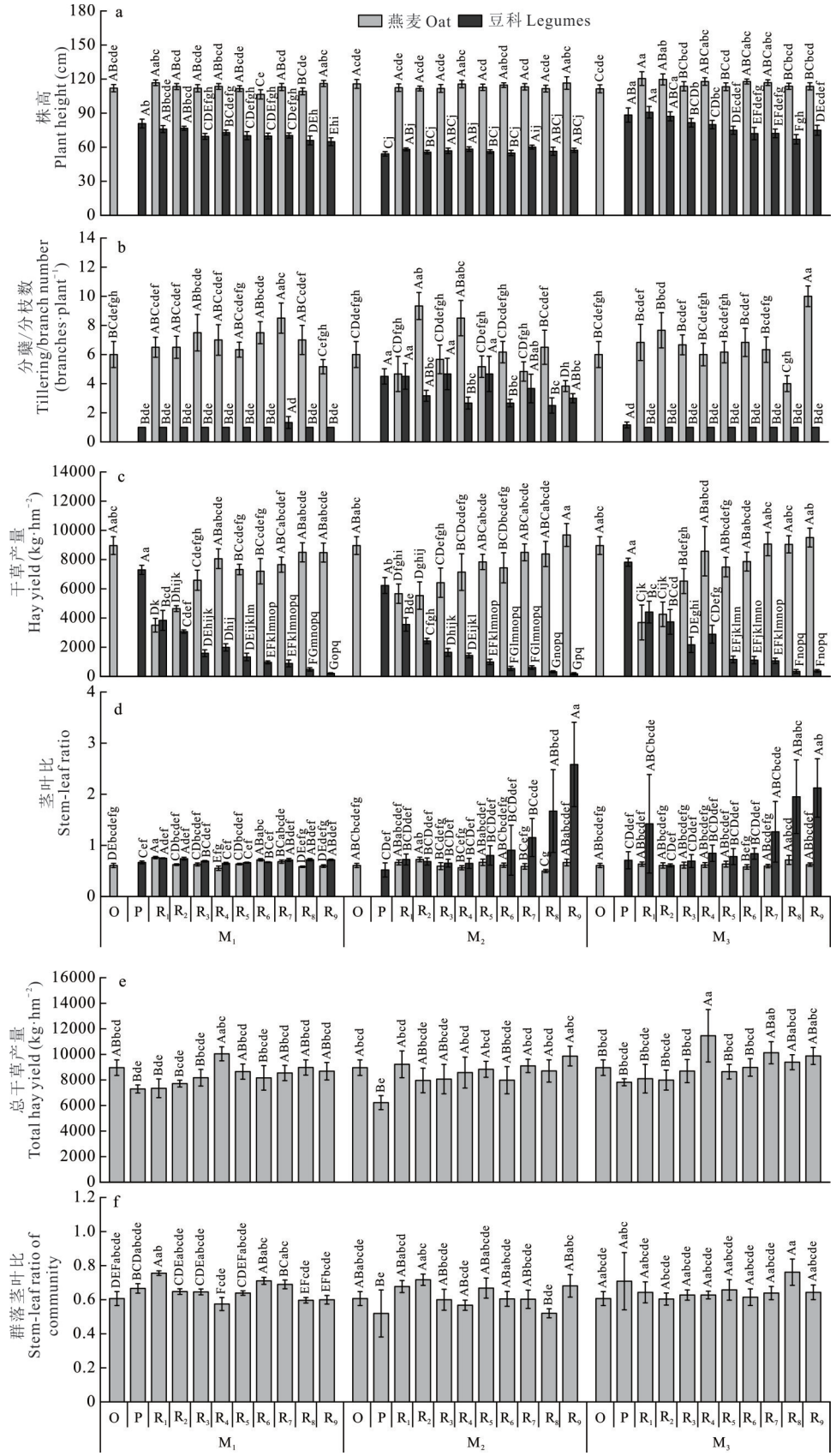


图 1　不同混播组配处理下饲草的农艺性状特征

Fig. 1　Agronomic traits characteristics of forage under different mixed sowing treatments

不同大写字母表示同一混播组合不同混播比例之间差异显著（$P<0.05$），不同小写字母表示所有处理之间差异显著（$P<0.05$），下同。Different capital letters indicate that significant differences among different mixture ratios of the same mixed sowing combination ($P<0.05$), and different lowercase letters indicate significant differences among all treatments ($P<0.05$), the same below.

表3 混播组合、混播比例及其交互作用对饲草营养品质的双因素方差分析

Table 3 Two-way analysis of variance of the effects of mixed sowing combination, mixture ratio and their interaction on nutritional quality of forage

营养品质 Nutritional quality	因素 Factor	自由度 Degrees of freedom	*P*	营养品质 Nutritional quality	因素 Factor	自由度 Degrees of freedom	*P*
粗蛋白 Crude protein	混播组合 Mixed sowing combination	2	0.00	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber	混播组合 Mixed sowing combination	2	0.00
	混播比例 Mixture ratio	10	0.00		混播比例 Mixture ratio	10	0.00
	组合×比例 Combination×ratio	20	0.00		组合×比例 Combination×ratio	20	0.00
粗脂肪 Crude fat	混播组合 Mixed sowing combination	2	0.04	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber	混播组合 Mixed sowing combination	2	0.97
	混播比例 Mixture ratio	10	0.00		混播比例 Mixture ratio	10	0.00
	组合×比例 Combination×ratio	20	0.00		组合×比例 Combination×ratio	20	0.00
可溶性糖 Soluble sugar	混播组合 Mixed sowing combination	2	0.48	相对饲喂价值 Relative feed value	混播组合 Mixed sowing combination	2	0.00
	混播比例 Mixture ratio	10	0.00		混播比例 Mixture ratio	10	0.00
	组合×比例 Combination×ratio	20	1.00		组合×比例 Combination×ratio	20	0.00

3 讨论

3.1 不同混播组配处理下饲草农艺性状和营养品质特征

禾豆混播饲草的农艺性状和营养品质整体上优于单播草地[23]，这不仅和植物自身遗传特性有关[24]，也与混播组配密切相关，适宜的混播组配能有效缓解饲草的种间竞争，提升光照、水分、养分等自然资源的利用效率，优化牧草生长的环境条件[25]。本研究中，‘青燕4号’与饲用豌豆混播种植，饲草的各项指标整体上优于‘青燕4号’与箭筈豌豆的组合，其中‘青燕4号’与‘A-61’饲用豌豆资源混播干草产量整体上随‘青燕4号’比例增加呈上升趋势，其中与‘A-61’饲用豌豆资源按4∶6混播达到最高产，为11458.7 kg·hm^{-2}，较‘青燕4号’单播和‘A-61’饲用豌豆资源单播分别显著提高了27.9%和46.5%（$P<0.05$），这与刚永和等[26]发现小黑麦与饲用豌豆按4∶6混播可以提高青海省东部农区草地产草量的结果相似。这主要是因为‘A-61’饲用豌豆资源株型高大，茎秆健壮，叶片质地肥厚，能获取较多的饲草产量，而箭筈豌豆植株矮小、长势较弱（箭筈豌豆株高相较‘A-61’饲用豌豆资源降低了18.8%～63.1%）。此外，这可能是因为燕麦与饲用豌豆按4∶6混播时能通过种间养分、生态位互补的协同效应减少资源竞争[27]，优化光能利用效率，协调水分供给，调控养分输入，提高饲草产量[28]。本研究表明，相较于‘青燕4号’单播，‘青燕4号’与豆科牧草混播显著提高了饲草的粗蛋白含量（$P<0.05$），其中，‘青燕4号’与‘A-61’饲用豌豆资源混播粗蛋白含量为7.5%～21.0%，较‘青燕4号’单播高出了1.1%～183.5%；随着豆科牧草占比的提高，饲草粗蛋白含量呈上升趋势，而饲草粗脂肪、可溶性糖、酸性洗涤纤维及中性洗涤纤维含量均呈下降趋势，这与齐文嘉等[29]发现在混播草地中饲草CP含量随箭筈豌豆比例的提高显著上升，而ADF与NDF含量却显著下降的结果相似。这主要是因为燕麦自身粗蛋白含量较低而纤维含量较高，与富含蛋白质的豆科牧草混播能够通过根瘤菌固氮提高土壤有效氮含量，促进饲草叶片发育，提高叶部比例，进而导致饲草中蛋白质含量上升而纤维含量下降[30]。此外，‘A-61’饲用豌豆叶片多、茎秆柔软，而箭筈豌豆叶片少、植株低矮，在与燕麦混播时，燕麦与饲用豌豆的生物学特性互补及种间协同效应实现资源利用效率最大化，提升饲草的产量和品质[31]。

3.2 混播组合、混播比例及其交互作用对饲草营养品质的作用路径与效应强度

本研究结构方程模型显示，混播组合、混播比例及其交互作用主要通过影响豆科产量对饲草营养品质产生间接影响。这是因为合理的混播组配能够实现饲草对光能、水分及土地空间的高效协同利用，从而显著提升光合作用效率，光合产物增加，进一步使豆科牧草的产量达到最高，从而使饲草粗蛋白含量增加，酸性洗涤纤维与中性洗涤纤维的比例下降，进而提高饲草营养品质[32]。灰色关联分析综合评价表明，‘青燕4号’与‘A-61’饲用豌豆资源按4∶6混播饲草干草产量和净经济收益均最高，且饲草营养品质较高，是适宜环青海湖地区高产、优质饲草生产的最佳混播组配。这是因为‘青燕4号’和饲用豌豆能适应青海的气候与土壤，存在遗传优势，生长性能优越，产

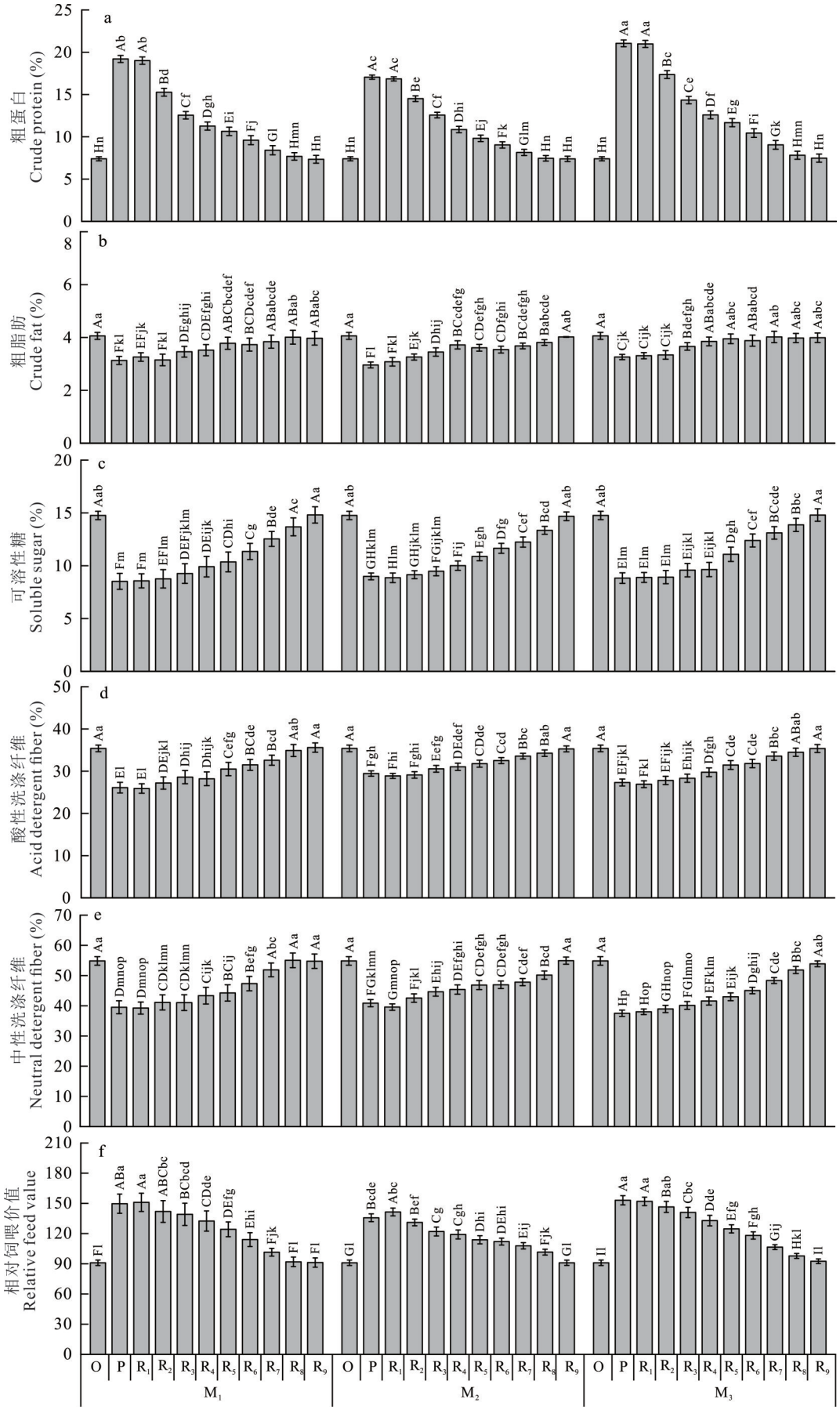


图 2　不同混播组配处理下饲草的营养品质特征

Fig. 2　Nutritional quality characteristics of forage under different mixed sowing treatments

表4 不同混播组配处理下饲草经济效益特征

Table 4 Economic benefit characteristics of forage under different mixed sowing treatments

处理 Treatment	干草产量 Hay yield (kg·hm^{-2})		干草价格 Hay price (CNY·kg^{-1})		成本 Cost (CNY·hm^{-2})			总收益 Total profit (CNY·hm^{-2})	净收益 Net profit (CNY·hm^{-2})	排序 Sort
	燕麦 Oat	豆科 Legumes	燕麦 Oat	豆科 Legumes	种子 Seeds	其他 Other	合计 Total			
M_1O	8958.7	0.0	1.3	1.6	900.0	8145.0	9045.0	11646.3	2601.3	12
M_1P	0.0	7294.0	1.3	1.6	1568.0	8145.0	9713.0	11670.4	1957.4	24
M_1R_1	3507.3	3839.3	1.3	1.6	1501.2	8145.0	9646.2	10702.5	1056.3	32
M_1R_2	4642.8	3072.0	1.3	1.6	1434.4	8145.0	9579.4	10950.8	1371.4	31
M_1R_3	6586.0	1587.3	1.3	1.6	1367.6	8145.0	9512.6	11101.5	1588.9	28
M_1R_4	8057.3	1987.3	1.3	1.6	1300.8	8145.0	9445.8	13654.3	4208.5	3
M_1R_5	7320.0	1331.3	1.3	1.6	1234.0	8145.0	9379.0	11646.1	2267.1	19
M_1R_6	7200.0	962.7	1.3	1.6	1167.2	8145.0	9312.2	10900.3	1588.1	29
M_1R_7	7654.7	890.0	1.3	1.6	1100.4	8145.0	9245.4	11375.1	2129.7	23
M_1R_8	8496.0	477.7	1.3	1.6	1033.6	8145.0	9178.6	11809.1	2630.5	11
M_1R_9	8478.7	204.7	1.3	1.6	966.8	8145.0	9111.8	11349.7	2237.9	20
M_2O	8958.7	0.0	1.3	1.6	900.0	8145.0	9045.0	11646.3	2601.3	12
M_2P	0.0	6225.3	1.3	1.6	1200.0	8145.0	9345.0	9960.5	615.5	33
M_2R_1	5664.7	3557.3	1.3	1.6	1170.0	8145.0	9315.0	13055.8	3740.8	6
M_2R_2	5534.0	2426.7	1.3	1.6	1140.0	8145.0	9285.0	11076.9	1791.9	26
M_2R_3	6417.3	1648.0	1.3	1.6	1110.0	8145.0	9255.0	10979.3	1724.3	27
M_2R_4	7143.0	1431.3	1.3	1.6	1080.0	8145.0	9225.0	11576.0	2351.0	17
M_2R_5	7839.6	992.7	1.3	1.6	1050.0	8145.0	9195.0	11779.7	2584.7	15
M_2R_6	7436.0	544.0	1.3	1.6	1020.0	8145.0	9165.0	10537.2	1372.2	30
M_2R_7	8492.7	606.0	1.3	1.6	990.0	8145.0	9135.0	12010.1	2875.1	8
M_2R_8	8384.0	318.0	1.3	1.6	960.0	8145.0	9105.0	11408.0	2303.0	18
M_2R_9	9683.3	180.7	1.3	1.6	930.0	8145.0	9075.0	12877.4	3802.4	5
M_3O	8958.7	0.0	1.3	1.6	900.0	8145.0	9045.0	11646.3	2601.3	12
M_3P	0.0	7820.0	1.3	1.6	1568.0	8145.0	9713.0	12512.0	2799.0	9
M_3R_1	3692.0	4406.0	1.3	1.6	1501.2	8145.0	9646.2	11849.2	2203.0	22
M_3R_2	4254.7	3734.0	1.3	1.6	1434.4	8145.0	9579.4	11505.5	1926.1	25
M_3R_3	6527.3	2166.7	1.3	1.6	1367.6	8145.0	9512.6	11952.2	2439.6	16
M_3R_4	8572.0	2886.7	1.3	1.6	1300.8	8145.0	9445.8	15762.3	6316.5	1
M_3R_5	7486.7	1162.0	1.3	1.6	1234.0	8145.0	9379.0	11591.9	2212.9	21
M_3R_6	7862.7	1117.3	1.3	1.6	1167.2	8145.0	9312.2	12009.2	2697.0	10
M_3R_7	9062.0	1066.0	1.3	1.6	1100.4	8145.0	9245.4	13486.2	4240.8	2
M_3R_8	9042.7	344.0	1.3	1.6	1033.6	8145.0	9178.6	12305.9	3127.3	7
M_3R_9	9506.0	370.7	1.3	1.6	966.8	8145.0	9111.8	12950.9	3839.1	4

其他成本包括磷酸二铵、尿素、机械播种、机械收割、人工、地租。Other costs include diammonium phosphate, urea, mechanical sowing, mechanical harvesting, labor, and land rent.

量稳定,且‘A-61’饲用豌豆资源富含蛋白质,其混播比例增加可提升饲草的蛋白质含量,并降低饲草整体纤维含量。然而,若‘A-61’比例过高,虽可进一步提高饲草蛋白质含量,却可能导致纤维含量不足,无法满足反刍动物

表 5　不同混播组配处理下饲草农艺性状、营养组分及净收益综合评价

Table 5　Comprehensive evaluation of forage of agronomic traits, nutritional components and net profit under different mixed sowing treatments

处理 Treatment	关联度 Correlation degree	排序 Sort	处理 Treatment	关联度 Correlation degree	排序 Sort	处理 Treatment	关联度 Correlation degree	排序 Sort	处理 Treatment	关联度 Correlation degree	排序 Sort
M_1O	0.5430	18	M_1R_8	0.5480	16	M_2R_6	0.4926	30	M_3R_4	0.6684	1
M_1P	0.5210	23	M_1R_9	0.5559	11	M_2R_7	0.5170	25	M_3R_5	0.5446	17
M_1R_1	0.5773	7	M_2O	0.5430	18	M_2R_8	0.5641	10	M_3R_6	0.5551	12
M_1R_2	0.5345	20	M_2P	0.5035	28	M_2R_9	0.5664	9	M_3R_7	0.5830	5
M_1R_3	0.5265	21	M_2R_1	0.5545	13	M_3O	0.5430	18	M_3R_8	0.5242	22
M_1R_4	0.5817	6	M_2R_2	0.5349	19	M_3P	0.5508	15	M_3R_9	0.6128	3
M_1R_5	0.5205	24	M_2R_3	0.5147	27	M_3R_1	0.6427	2			
M_1R_6	0.4900	31	M_2R_4	0.5527	14	M_3R_2	0.5968	4			
M_1R_7	0.5160	26	M_2R_5	0.5024	29	M_3R_3	0.5711	8			

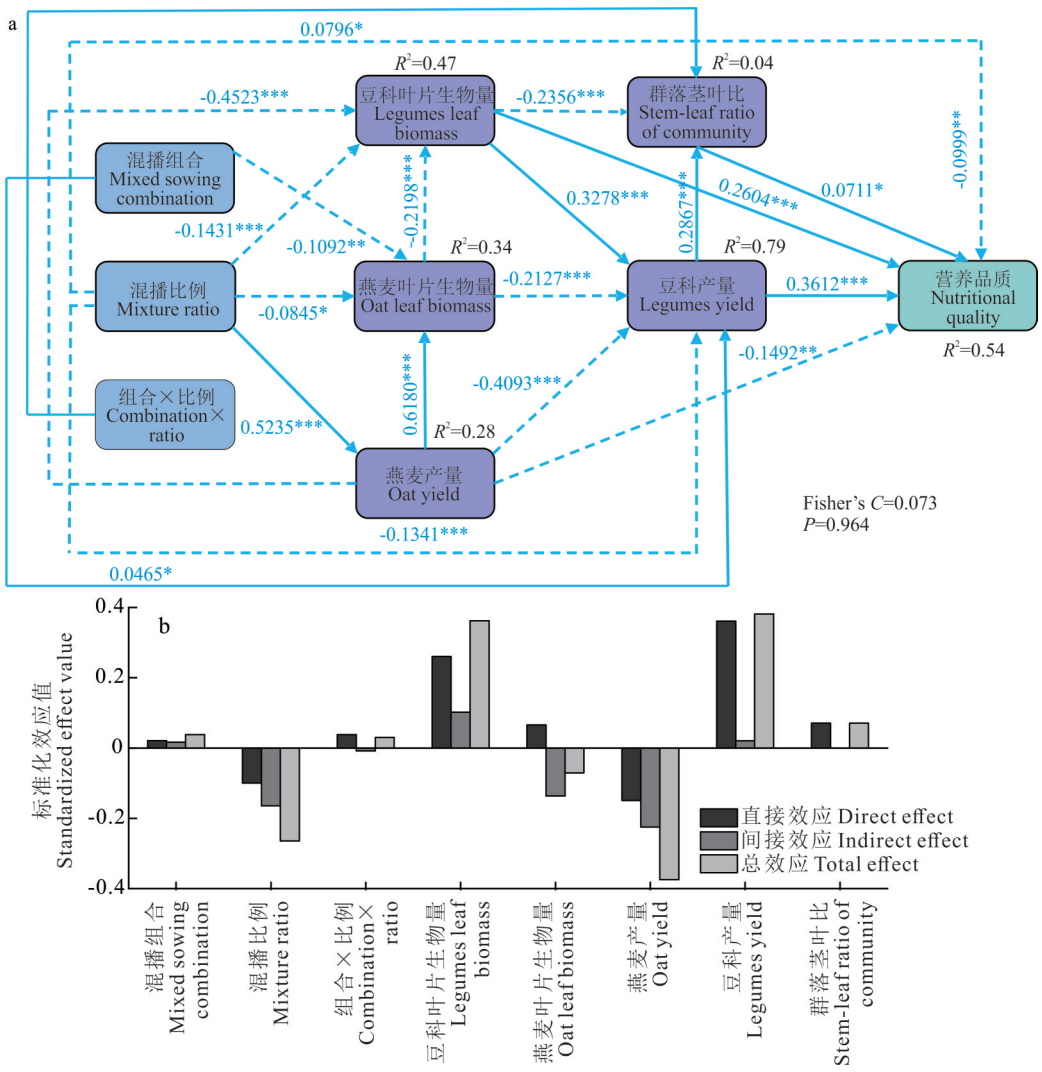


图 3　混播组合、混播比例及其交互作用对饲草营养品质的作用路径与效应强度及各因子的标准化效应值

Fig. 3　Effect path and effect strength of mixed sowing combination, mixed sowing ratio and their interaction on forage nutritional quality and the standardized effect value of each factor

实线表示二者间路径关系为正，虚线表示二者间路径关系为负，箭头方向表示二者间的影响方向，数字为标准化路径系数。The solid line indicates that the path relationship between the two is positive, the dotted line indicates that the path relationship between the two is negative, the arrow direction indicates the direction of influence between the two, and the number is the standardized path coefficient. *: $P<0.05$, **: $P<0.01$, ***: $P<0.001$.

对膳食纤维的需求，进而影响瘤胃健康[33]。因此，4∶6的混播比例种植，饲草空间分布均匀，禾豆根系深浅搭配，优化水肥吸收，可以对空间和土壤养分实现最大化利用，显著提高饲草产量与品质，实现收益最大化。

4 结论

在同一混播比例下，‘青燕4号’与‘A-61’混播饲草整体表现优于其他混播组合；在同一混播组合下，饲草总干草产量与净收益随‘青燕4号’比例增多整体呈上升趋势，而粗蛋白含量则随‘青燕4号’比例的增加呈下降趋势；其中，饲草干草产量和净收益在‘青燕4号’与‘A-61’饲用豌豆资源按4∶6混播处理下最高，分别为11458.7 kg·hm^{-2}和6316.5元·hm^{-2}；饲草粗蛋白含量在‘青燕4号’与‘A-61’饲用豌豆资源按1∶9混播处理下显著最高（$P<0.05$），为21.0%。结构方程模型表明，混播组合、混播比例及其交互作用主要通过影响豆科产量对饲草营养品质产生间接影响。灰色关联分析综合评价表明，‘青燕4号’与‘A-61’饲用豌豆资源按4∶6混播是高产、优质与高效益的最佳混播组配，可在环青海湖地区推广应用于高产优质饲草生产。

参考文献 References：

[1] Ding Z Y, Lu R J, Liu C, *et al*. Temporal change characteristics of climatic and its relationships with atmospheric circulation patterns in Qinghai Lake basin. Advances in Earth Science, 2018, 33(3): 281－292.
丁之勇, 鲁瑞洁, 刘畅, 等. 环青海湖地区气候变化特征及其季风环流因素. 地球科学进展, 2018, 33(3): 281－292.

[2] Chen D D, Tian L H, Zhang D S, *et al*. Research progress of land desertification in Qinghai－Tibet Plateau. Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry, 2023(4): 42－46.
陈冬冬, 田丽慧, 张登山, 等. 青藏高原土地沙化研究进展. 青海农林科技, 2023(4): 42－46.

[3] Shang Y C. Grassland ecology status and controlling measures in the area near the Qinghai Lake. Sichuan Grassland, 2006(6): 27－28.
尚永成. 环青海湖地区草地生态环境现状及治理对策. 四川草原, 2006(6): 27－28.

[4] Shan L, Xu B C. Discussion on construction of stable artificial grassland in semi-arid area of Loess Plateau. Acta Prataculturae Sinica, 2009, 18(2): 1－2.
山仑, 徐炳成. 黄土高原半干旱地区建设稳定人工草地的探讨. 草业学报, 2009, 18(2): 1－2.

[5] Silva D C, Rathor P, Poudel P H, *et al*. Effects of drought stress on red clover-grass mixed stands compared to grass monoculture stands in nitrogen-deficient systems. Nitrogen, 2023, 4(4): 382－396.

[6] Teng Z, Zhang Y L, Zhang Y X, *et al*. Grassland production performance and photosynthetic characteristics under different alfalfa densities and grass bean mixed sowing. Pratacultural Science, 2022, 39(8): 1618－1627.
滕泽, 张永亮, 张玉霞, 等. 紫花苜蓿密度及禾豆混播方式下草地生产性能及光合特性. 草业科学, 2022, 39(8): 1618－1627.

[7] Miao F, Yu X, Tang X K, *et al*. The responses of stem and leaf functional traits of *Medicago sativa* and *Bromus inermis* to different mixed planting patterns. Agronomy, 2023, 13(11): 1－15.

[8] Burris R H, Roberts G P. Biological nitrogen fixation. Annual Review of Nutrition, 1993, 13: 317－335.

[9] Ma X Y, Zhang Y C. Effects of intercropping oats and leguminous forage on root nodules and soil nutrients around Qinghai Lake. Qinghai Prataculture, 2024, 33(2): 9－13.
马兴赟, 张永超. 青海湖环湖地区燕麦与豆科饲草混播对根瘤及土壤养分的影响. 青海草业, 2024, 33(2): 9－13.

[10] Zhang Z J, Hao X Y, Li F, *et al*. Effect of different variety and cutting time on yield and quality of forage oat in central and southern Heilongjiang Province. Pratacultural Science, 2024, 41(12): 2928－2938.
张仲鹃, 郝曦煜, 李峰, 等. 黑龙江中南部不同品种和刈割时期对燕麦饲草产量和品质的影响. 草业科学, 2024, 41(12): 2928－2938.

[11] Tang Y L, Wang L, Wang H D, *et al*. Phenotypic diversity analysis and comprehensive evaluation of oat germplasms. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2024, 30(6): 1236－1244.
唐有林, 王蕾, 王寒冬, 等. 燕麦种质资源表型多样性及综合评价. 应用与环境生物学报, 2024, 30(6): 1236－1244.

[12] Liu W H, Yan H B, Zhou Q P, *et al*. Comparative experiment of 6 oats in Xining area. Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Sciences, 2005, 35(1): 1－2.
刘文辉, 颜红波, 周青平, 等. 西宁地区六种燕麦品种比较试验. 青海畜牧兽医杂志, 2005, 35(1): 1－2.

[13] Guo C Y, Wang W, De K J, *et al*. Effects of sowing methods on yield and quality of oats and forage peas. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(7): 1882－1890.
郭常英, 王伟, 德科加, 等. 播种方式对燕麦和饲用豌豆饲草产量及品质的影响. 草地学报, 2022, 30(7): 1882－1890.

[14] Wang Y H, Zhang J F, Zhang J, *et al*. Effects of NaCl on interfacial properties of main common vetch seed storage proteins. Journal of Grassland and Forage Science, 2023(1): 27－32.
王宇慧, 张金凤, 张敬, 等. NaCl对箭筈豌豆主要贮藏蛋白界面性质的影响. 草学, 2023(1): 27－32.

[15] Pan D F, Zhang R B, Li D M, *et al*. Comprehensive evaluation of drought resistance in the *Vicia sativa* germplasm at the seedling stage. Pratacultural Science, 2023, 40(1): 188－199.
潘多锋, 张瑞博, 李道明, 等. 箭筈豌豆种质资源苗期抗旱性综合评价. 草业科学, 2023, 40(1): 188－199.

[16] Zhao B W, Zhan Y, Fang J Q, *et al*. Mixing ratios effects on production performance and quality in oat and common vetch intercropping systems. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(3): 81－90.
赵保文, 詹圆, 方嘉琪, 等. 混播比例对燕麦与箭筈豌豆生产性能的影响. 中国草地学报, 2024, 46(3): 81－90.

[17] Liu Q, Qiao X F, Tao Y, *et al*. Effects of mixed sowing of oats and forage peas on forage yield and quality. China Dairy Cattle, 2022(10): 62－66.
柳茜, 乔雪峰, 陶雅, 等. 燕麦与饲用豌豆混播对饲草产量和品质的影响. 中国奶牛, 2022(10): 62－66.

[18] Feng T X, De K J, Xiang X M, *et al*. Optimal combination and proportion of triticale and leguminous forage grass in established artificial grassland at Three-river Source Region. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2023, 32(2): 232－241.
冯廷旭, 德科加, 向雪梅, 等. 三江源区小黑麦与豆科饲草混播最佳组合及比例研究. 西北农业学报, 2023, 32(2): 232－241.

[19] Ma W Y, Cao D, Liu B L, *et al*. Analysis on difference of agronomic characters and nutritional quality of mixed sowing for triticale and pea in the Qaidam Basin. Journal of Biology, 2024, 41(6): 74－81.
马文艳, 曹东, 刘宝龙, 等. 柴达木盆地小黑麦与豌豆混播饲草农艺性状和营养品质差异分析. 生物学杂志, 2024, 41(6): 74－81.

[20] Wang X J, Wang J L, Ju Z L, *et al*. Comprehensive evaluation on production performance and nutritional quality of different varieties of forage oat in the Qinghai Lake area. Scientia Agricultura Sinica, 2024, 57(19): 3730－3742.
王小军, 王金兰, 琚泽亮, 等. 环青海湖地区不同饲用燕麦品种生产性能和营养品质综合评价. 中国农业科学, 2024, 57(19): 3730－3742.

[21] Bao S D. Agrochemical analysis of soil. Beijing: China Agriculture Press, 2001.
鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2001.

[22] Linn J G, Martin N P. Forage quality analyses and interpretation. Veterinary Clinics of North America Food－Animal Practice, 1991, 7(2): 509－523.

[23] Li F, De K J, Feng T X, *et al*. Research progress on productivity, soil nutrients and rhizosphere microorganisms of grass-legume mixed grassland. Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Sciences, 2024, 54(3): 39－47.
李菲, 德科加, 冯廷旭, 等. 禾豆混播草地生产力、土壤养分和根际微生物研究进展. 青海畜牧兽医杂志, 2024, 54(3): 39－47.

[24] Shao C H, Xu Q, Shi Z Q, *et al*. Studies on the forage yield of the mixture of triticale and legume in the farming-pastoral ecotone of Xiahe. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(10): 2791－2801.
邵春慧, 徐强, 史志强, 等. 夏河农牧交错区小黑麦与豆科牧草混播的生产性能研究. 草地学报, 2022, 30(10): 2791－2801.

[25] 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 Prataculturae Sinica, 2025, 34(3): 111－122.
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.

[26] Gang Y H, Zhang H B, Chen Y L, *et al*. Mixture combination and mixed ratio of triticale and legumes in the eastern agricultural region of Qinghai. Pratacultural Science, 2021, 38(11): 2274－2285.
刚永和, 张海博, 陈永珑, 等. 青海东部农区小黑麦与豆科牧草的混播组合与混播比例. 草业科学, 2021, 38(11): 2274－2285.

[27] Wang J N, Wei Y Q, Zhang L, *et al*. Alpine ecology study in the name of mountains. Pratacultural Science, 2024, 41(8): 1781－1787.

王金牛，魏彦强，张林，等．“以山为名”的高寒生态研究．草业科学，2024，41(8)：1781－1787.

[28] Liu W. Research on mechanism improving production efficiency of oats and peas on agronomic traits, silage quality and beef cattle performance. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2023.
刘温．燕麦－豌豆混播饲草型日粮调制对肉牛生产效率提升机制的研究．北京：中国农业科学院，2023.

[29] Qi W J, Du W H, Liu H B, *et al*. Study on the production performance and nutritive value of annual mixed grass-legume in the rainfed plateau area of Longdong. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(12): 42－50.
齐文嘉，杜文华，刘海波，等．陇东旱塬区一年生禾豆混播草地生产性能与营养价值研究．中国草地学报，2023，45(12)：42－50.

[30] Guo C Y, Xu C T, Pu X J, *et al*. Oat and forage pea mixed sowing improves soil chemical fertility and fresh and dry mass yield in light saline-alkali land: preliminary results. Agronomy, 2025, 15(2): 297.

[31] Luo F, Mi W B, Li W, *et al*. Effects of planting patterns on forage yield and nutritional quality in different alpine ecological regions. Pratacultural Science, 2024, 41(8): 1934－1947.
罗峰，米文博，李文，等．不同高寒草地生态区种植模式对饲草产量和营养品质的影响．草业科学，2024，41(8)：1934－1947.

[32] Wei K T, Xiang H, Liu Y F, *et al*. Mixed cropping of *Medicago ruthenica-Bromus inermis* exhibits higher yield and quality advantages in the Longxi loess plateau region of northwest China. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2024, 8: 1411687.

[33] Casler M D. Breeding forage crops for increased nutritional value. Advances in Agronomy, 2001, 71: 51－107.