

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.09.032

引用格式:仲家颐,赛毛措,刘勇,等.混作比例和刈割期对油菜-燕麦混作饲草生产性能的影响[J].草地学报,2026,34(9):3486—3495

ZHONG Jia-yi, Saimaocuo, LIU Yong, et al. The Effects of Intercropping Ratio and Cutting Period on the Forage Production Performance of Rape and Oat Intercropping[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(9):3486—3495

混作比例和刈割期对油菜-燕麦混作饲草生产性能的影响

仲家颐¹, 赛毛措¹, 刘勇¹, 罗生虎², 马晓萍², 秦燕^{1*}

(1. 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; 2. 门源回族自治县草原站, 青海 门源 810300)

摘要:为探究混作比例和刈割时期对油菜(*Brassica napus* L.)-燕麦(*Avena sativa* L.)混作系统饲草生产性能的影响,本试验对油菜(‘青油21号’)-燕麦(‘林纳’)混作系统9个混作比例、3个刈割时期下的饲草产量和品质指标进行了测定分析。结果表明:油菜开花末期(A₂)和油菜角果乳熟期(A₃)的干草产量显著高于油菜盛花期(A₁)($P<0.05$), A₃相对饲用价值显著高于A₁和A₂($P<0.05$)。在油菜角果乳熟期,油菜和燕麦混作比例为5:5处理(A₃R₅O₅)土地当量比最高,为2.21。TOPSIS-多准则决策模型分析表明:在油菜角果乳熟期,油菜和燕麦混作比例为7:3处理(A₃R₇O₃)贴合度最高,为0.75,其干草产量和土地当量比较高,分别为454.16 kg·hm⁻²和2.16,酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维含量较低,分别为69.19%和38.64%,是适宜研究区推广的农艺措施。

关键词:混作比例;刈割时期;油菜-燕麦混作;生物量;饲草品质;种间竞争

中图分类号:S54

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)09-3486-10

The Effects of Intercropping Ratio and Cutting Period on the Forage Production Performance of Rape and Oat Intercropping

ZHONG Jia-yi¹, Saimaocuo¹, LIU Yong¹, LUO Sheng-hu², MA Xiao-ping², QIN Yan^{1*}

(1. Academy of Animal and Veterinary Sciences, Qinghai University (Qinghai Academy of Animal Science and Veterinary Medicine), Key Laboratory of Superior Forage Germplasm in the Qinghai-Tibetan Plateau, Xining, Qinghai Province 810016, China; 2. The Grassland Station of Menyuan Hui Autonomous County, Menyuan, Qinghai Province 810300, China)

Abstract: To investigate the effects of intercropping ratios and cutting periods on forage production performance in a rapeseed-oat mixed cropping system, this trial measured and analyzed forage yield and quality indicators across nine mixing ratios and three cutting periods for the rapeseed (‘Qingyou No. 21’)-oat (‘Lena’) system. Results indicated that dry hay yields at the late rapeseed flowering stage (A₂) and the rapeseed pod milk stage (A₃) were significantly higher than at the peak rapeseed flowering stage (A₁) ($P<0.05$). The relative feed value at A₃ was significantly higher than at A₁ and A₂ ($P<0.05$). At A₃, the 5:5 rapeseed-oat mixture (A₃R₅O₅) exhibited the highest land equivalent ratio of 2.21. TOPSIS multi-criteria decision analysis indicated that during A₃, the 7:3 rapeseed-oat mixture (A₃R₇O₃) achieved the highest fit index of 0.75. This treatment exhibited comparatively high hay yield (454.16 kg·hm⁻²) and land equivalent (2.16), with lower acid-detergent fiber (69.19%) and neutral-detergent fiber (38.64%) content. This constitutes an agronomic practice suitable for promotion within the study area.

Key words: Intercropping ratio; Mowing period; Mixed cultivation of rape and oat; Biomass; Forage quality; Interspecies competition

收稿日期:2025-10-30;修回日期:2025-12-30

基金项目:现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-34)资助

作者简介:仲家颐(2001-),女,汉族,甘肃酒泉人,硕士研究生,主要从事牧草育种与栽培研究,E-mail:1751164992@qq.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail:mule119@163.com

青海省地处青藏高原东北部,是我国重要的畜牧业生产基地。目前,青海省油菜(*Brassica napus* L.)种植面积已稳定在 14.6 万~15.4 万 hm^2 ,油菜成为青海省第一大作物^[1]。门源县作为青海油菜产业的核心产区,其“百里油菜花海”景区为生态旅游的典型代表。然而,受冷凉气候、无霜期短和长期连作等因素影响,门源油菜普遍出现产量下降和品质变劣的现象^[2-3],严重制约了生产效益与产业的可持续发展。

混作是指两种或多种作物在同一田块、按一定比例与结构组合的种植模式,该模式通过利用物种间的生态位互补或协同效应,实现高产、稳产及资源的高效利用^[4]。李学博等研究发现,内蒙古巴彦淖尔地区油菜与燕麦(*Avena sativa* L.)混播并于作物生长旺盛期收获能够降低油菜含水量,提高干物质产量^[5]。袁英良等认为吉林白城地区油菜结荚期油菜与燕麦混播比例为 60:70(油菜 $9.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、燕麦 $154\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)时生产性能及品质较高,干草产量分别较单播提高 30.24% 和 31.77%,可用于干草加工利用^[6]。可见,混作比例及刈割时期是影响生产性能的重要因素,并因气候、海拔等因素表现出差异性。

团队前期研究表明油菜-燕麦混作模式在不影响油菜观赏价值的同时提高产量及品质,是适宜门源地区油菜间作的种植模式^[1,3],但对于其最适混作比例尚未作探究。混作比例对该混作系统种间关系、饲草产量、品质的协同调控效应仍缺乏系统研究。前期研究表明,‘青油 21 号’具有丰产、耐寒、抗倒伏性较强等特点^[7],‘林纳’具有适应性广、抗倒伏性强等特点^[8],因此本试验选用当地主推优良品种油菜‘青油 21 号’和燕麦‘林纳’为试验材料,探究刈割时期、混作比例对油菜-燕麦混作系统饲草生产性能的影响,筛选出适宜研究区生态条件的最佳种植模式,为该混作体系的科学种植利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验设置在青海省门源县泉口镇后沟村脑山区($37^{\circ}23'25''\text{N}$, $101^{\circ}50'23''\text{E}$,海拔 3170 m),年均日照时数为 2575 h,年降雨量 350~550 mm, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温为 $530^{\circ}\text{C}\sim 710^{\circ}\text{C}$,气候冷凉,无绝对无霜期。土壤类型为栗钙土,土壤有机质含量为 5.76%,土壤 pH 值为 7.88。前茬作物为青稞。

1.2 试验材料与方法

供试油菜(‘青油 21 号’)和燕麦(‘林纳’)种子千粒重分别为 2.8 g 和 30.3 g,发芽率为 97.80% 和 98.80%,分别由门源县绿源种子经营部和青海省畜牧兽医科学院提供。

试验设置 9 个混作比例(表 1),每个处理 3 次重复,采用随机区组排列,小区面积为 $20\text{ m}^2(4\text{ m}\times 5\text{ m})$ 。播种方式为间行混播,播深为 3~5 cm,行距为 12.5 cm。基肥为尿素 $40\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-3}$,磷酸二铵 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。苗期进行一次人工除杂。试验于 5 月 4 日进行布设,分别于油菜盛花期、燕麦拔节期(7 月 6 日, A_1),油菜开花末期、燕麦孕穗期(7 月 21 日, A_2),油菜角果乳熟期、燕麦开花期(8 月 15 日, A_3)进行 3 次观测取样。

表 1 试验处理

Table 1 Experimental treatments

处理编号 Treatment number	混作比例 Mixed sowing ratio	播种量 Seeding rate/ $(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$	
		油菜 Rape	燕麦 Oat
O	0:10	0	225
R	10:0	30	0
R ₂ O ₈	2:8	6	180
R ₃ O ₇	3:7	9	158
R ₄ O ₆	4:6	12	135
R ₅ O ₅	5:5	15	113
R ₆ O ₄	6:4	18	90
R ₇ O ₃	7:3	21	68
R ₈ O ₂	8:2	24	45

1.3 测定指标及数据统计分析

测定鲜重、干重、中性洗涤纤维(Neutral detergent fiber, NDF)及酸性洗涤纤维(Acid detergent fiber, ADF)等指标^[1]。

生物量:分别于 A_1 , A_2 , A_3 等 3 个时期在每个小区随机收获 5 个 1 m 样段植株,留茬 3~5 cm,分物种称量鲜重后置风干袋阴干,于烘箱 65°C 烘干至恒重后记录干重。

中性洗涤纤维(NDF)/酸性洗涤纤维(ADF):准确称取 1 g 植物粉碎样品,过 0.425 mm 筛后置于烧杯中,加入 100 mL 中性(酸性)洗涤剂 and 数滴十氢化萘及 0.5 g 无水亚硫酸钠;将烧杯套上冷凝装置于电炉煮沸,并保持微沸 60 min 后,转移到玻璃坩埚中,用抽滤装置进行过滤;用两倍于残渣的沸水冲洗玻璃坩埚与残渣后,再用 20 mL 丙酮冲洗两次至液体无色透明;将玻璃坩埚置于 105°C 烘箱中烘 2 h 后,在干燥器中冷却 30 min 并称重,至恒重时记录数据。

相对饲用价值(Relative feeding value, RFV)反映了饲草营养成分的相对效率。计算公式如下:

$$RFV = \frac{120}{NDF} \times \frac{88.9 - 0.779ADF}{1.29}$$

式中: NDF 为中性洗涤纤维含量(%), ADF 为酸性洗涤纤维含量(%).

相对产量(Relative yield, RY): 用于评价物种对已占有资源量的利用程度。计算公式如下:

$$RY_r = \frac{Y_{ro}}{pY_r}$$

$$RY_o = \frac{Y_{or}}{qY_o}$$

式中: RY_r 为油菜相对产量, Y_{ro} 为混作时油菜的单位面积产量, Y_r 为单播时油菜的单位面积产量, p 和 q 分别为油菜和燕麦在混作草地中的混作比例。将 RY 值按照竞争模式图表达^[9], 判断各处理在混作地当中的竞争优势及随处理的变化, 详细描述见图1。

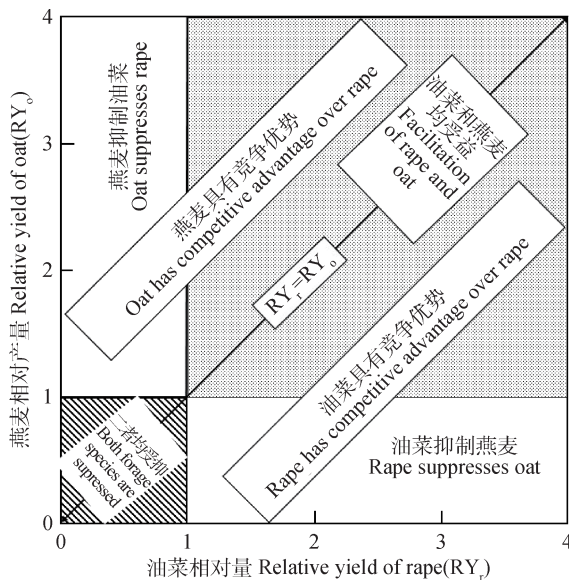


图1 两物种竞争实验结果模式图

Fig. 1 Model diagram of experimental results of competition between two species

土地当量比(Land equivalent ratio, LER): 用于衡量混作产量优势的指标。计算公式如下:

$$LER = PLER_r + PLER_o = \frac{Y_{ro}}{Y_r} + \frac{Y_{or}}{Y_o}$$

式中: $PLER_r$ 和 $PLER_o$ 分别代表油菜和燕麦的偏土地当量比。若 $LER > 1.0$, 表明混作体系相对于油菜、燕麦单播有优势, 且该值越大, 混作产量优势越明显。 $LER < 1.0$, 表明混作劣势。 $PLER$ 表示混作中每种作物对于单播的生物学产量优势和土地利用效率, $PLER$ 大于混作体系中作物净占面积占混作总面积的比例时, 表示作物混作比单播有优势; $PLER$ 小于混作体系中作物净占面积占混作总

面积的比例时, 表示作物混作比单播表现劣势。

竞争比率(Competitive ratio, CR): 用于评价饲草资源利用效率的高低(图2)。计算公式如下:

$$CR_r = \frac{PLER_r}{PLER_o} \times \frac{q}{p}$$

式中: 当 $0 < CR_r < 1.0$, $CR_o > 1.0$ 时, 燕麦竞争力大于油菜, 燕麦具有竞争优势; 当 $CR_o = CR_r = 1.0$ 时, 表示混作中两物种竞争力相等; 当 $0 < CR_o < 1.0$, $CR_r > 1.0$ 时, 表示油菜的竞争力大于燕麦。

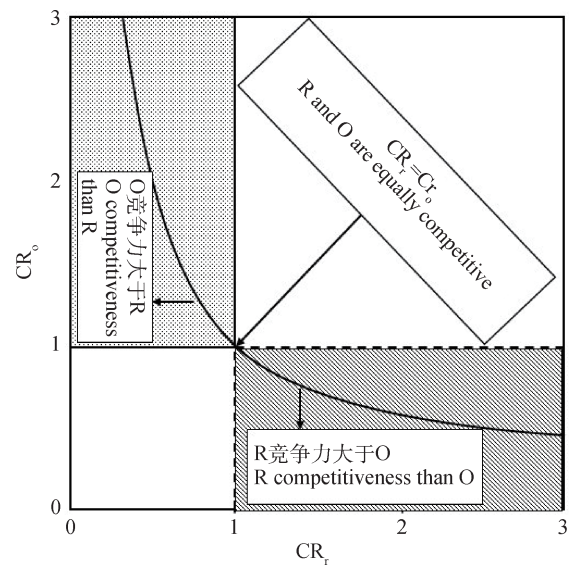


图2 混作两物种竞争力结果模式图

Fig. 2 Graphic representation of the outcome of a competition between two species in mixed-sowing

侵占力(Aggressivity, AG): 指混作系统中一种作物相对于另一种作物对水分、养分等与产量形成有关资源的竞争能力。计算公式如下:

$$AG_r = RY_r - RY_o$$

式中: AG_r 为油菜相对于燕麦的竞争能力。 $AG_r > 0$, 表示油菜占优势; $AG_r = 0$, 表示油菜与燕麦的竞争力相当。

综合评价方式采用 TOPSIS-多准则决策模型^[10], 通过计算欧式距离, 确定被评价混作组合与理想混作组合的贴近程度, 最贴近理想解的混作组合为最优选择。

1.4 数据处理

利用 Microsoft Excel 2016 进行数据的整理, 使用 SPSS 25.0 对饲草生产性能进行双因素方差分析, 对土地当量比进行单样本 t 检验。参考胡鹏飞及尤越等人的分析方法^[11-12]对生物量及营养品质进行刈割时期的分析: 仅考虑刈割时期对生物量和营养品质的影响, 各刈割时期内生物量和营养品质求

均值后进行单因素分析。最后利用 Origin 2024 及 R 语言绘图。图表数据为“平均值±标准误”。

2 结果与分析

2.1 草地生物量

方差分析表明(表2),混作比例间、刈割时期间及混作比例×刈割时期交互作用间均存在极显著差异($P<0.01$)。

刈割时期 A_3 鲜草产量和鲜干比显著高于 A_1 和 A_2 ($P<0.05$); A_2 及 A_3 干草产量显著高于 A_1 ($P<0.05$)(表3)。

A_1 时 R 处理鲜草产量显著高于其他处理($P<0.05$),较 O 提高 83.87%; A_2 时 R_5O_5 处理鲜草产量显著高于其他处理($P<0.05$),较 R 和 O 分别提高 15.78%,27.99%; A_3 时 R_3O_7 及 R_2O_8 鲜草产量显著高于其他处理($P<0.05$),较 R 分别提高 49.67% 和 31.74%,较 O 分别提高 31.83% 和 16.03%(表3)。

A_1 时 R_5O_5 干草产量显著高于 O($P<0.05$),较 O 提高 48.52%; A_2 各处理干草产量无显著差异; A_3 时 R、O 和 R_2O_8 处理干草产量显著低于其他处理($P<0.05$), R_5O_5 处理混作系统的干草产量较高,为 $466.87\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,较 R 和 O 分别提高 105.68%,

表2 混作系统生物量因子的方差分析(F值)

Table 2 Analysis of variance of biomass in mixed systems

处理 Treatment	鲜草产量 Fresh hay yield	干草产量 Dry hay yield	鲜干比 Fresh-to-dry ratio
混作比例 Mixing ratio	135.56**	9.41**	8.51**
刈割时期 Mowing period	32689.58**	235.07**	156.32**
混作比例×刈割时期 Mixing ratio×Mowing period	163.38**	4.84**	8.74**

注:*表示在 0.05 水平下差异显著($P<0.05$),**表示在 0.01 水平下差异显著($P<0.01$),下同

Note: *indicates a significant difference at the 0.05 level ($P<0.05$), ** indicates a significant difference at the 0.01 level ($P<0.01$), the same applies below

表3 不同混作比例及刈割时期对混作系统生物量的影响

Tab. 3 Effect of different mixing ratios and mowing periods on biomass in mixed cropping systems

处理 Treatment	鲜草产量 Fresh hay yield/(kg·hm ⁻²)	干草产量 Dry hay yield/(kg·hm ⁻²)	鲜干比 Fresh-to-dry ratio	
A ₁	R	1316.90±23.78 ^{aC}	133.86±12.99 ^{abB}	9.90±1.00 ^{aB}
	O	716.23±82.68 ^{eC}	117.48±27.26 ^{bB}	6.22±0.82 ^{bB}
	R ₂ O ₈	684.70±54.10 ^{eC}	128.72±13.31 ^{abC}	5.33±0.19 ^{bB}
	R ₃ O ₇	1046.77±45.4 ^{bcdC}	168.34±24.01 ^{abB}	6.28±0.71 ^{bB}
	R ₄ O ₆	954.93±35.11 ^{cdC}	161.35±9.45 ^{abB}	5.93±0.47 ^{bB}
	R ₅ O ₅	1136.07±31.49 ^{bC}	174.48±26.74 ^{aB}	6.60±0.91 ^{hAB}
	R ₆ O ₄	943.23±15.08 ^{dC}	142.89±19.04 ^{abB}	6.69±0.95 ^{bB}
	R ₇ O ₃	955.93±82.62 ^{cdC}	161.79±54.24 ^{abB}	6.32±1.95 ^{bB}
	R ₈ O ₂	1094.07±36.44 ^{bcC}	153.53±24.68 ^{abB}	7.27±1.30 ^{bB}
平均值 Average	983.20±28.59 ^C	149.16±17.01 ^B	6.73±0.69 ^B	
A ₂	R	1993.47±47.78 ^{cB}	369.54±57.13 ^{aA}	5.47±0.77 ^{aB}
	O	1803.40±51.06 ^{dB}	344.05±64.66 ^{aA}	5.35±0.88 ^{aB}
	R ₂ O ₈	2185.93±43.19 ^{bB}	392.71±36.42 ^{aA}	5.59±0.39 ^{aB}
	R ₃ O ₇	2136.10±43.80 ^{bB}	371.84±29.66 ^{aA}	5.76±0.38 ^{aB}
	R ₄ O ₆	2141.80±24.00 ^{bB}	379.47±30.94 ^{aA}	5.67±0.44 ^{aB}
	R ₅ O ₅	2308.13±23.30 ^{aB}	392.27±48.42 ^{aA}	5.95±0.85 ^{aB}
	R ₆ O ₄	2209.63±63.83 ^{bB}	389.69±14.97 ^{aA}	5.67±0.10 ^{aB}
	R ₇ O ₃	2126.93±43.36 ^{bB}	386.99±35.05 ^{aA}	5.53±0.50 ^{aB}
	R ₈ O ₂	1989.87±39.09 ^{cB}	355.78±61.84 ^{aA}	5.71±1.00 ^{aB}
平均值 Average	2099.47±11.37 ^B	375.82±9.28 ^A	5.63±0.13 ^B	
A ₃	R	3550.00±30.00 ^{gA}	226.98±65.68 ^{bB}	16.47±4.33 ^{bcA}
	O	4033.33±64.29 ^{eA}	194.98±50.46 ^{bB}	21.51±4.75 ^{aA}
	R ₂ O ₈	4680.00±62.45 ^{aA}	272.73±35.86 ^{bB}	17.36±2.24 ^{abA}
	R ₃ O ₇	5313.33±61.10 ^{aA}	431.23±66.55 ^{aA}	12.51±1.88 ^{cdA}
	R ₄ O ₆	4150.00±62.45 ^{fA}	432.48±74.96 ^{aA}	9.77±1.47 ^{dA}
	R ₅ O ₅	3680.00±20.00 ^{bA}	466.87±49.90 ^{aA}	7.94±0.80 ^{dA}
	R ₆ O ₄	4596.67±55.08 ^{bA}	448.75±63.74 ^{aA}	10.40±1.70 ^{dA}
	R ₇ O ₃	4413.33±40.41 ^{cA}	454.16±42.51 ^{aA}	9.77±0.79 ^{dA}
	R ₈ O ₂	4065.00±35.36 ^{deA}	414.74±30.57 ^{aA}	9.84±0.75 ^{dA}
平均值 Average	4275.74±15.01 ^A	371.44±26.16 ^A	12.84±1.75 ^A	

注:同列不同小写字母表示同一刈割时期不同混作比例下系统产量差异显著($P<0.05$);同列不同大写字母表示同一混作比例不同刈割时期下系统产量差异显著($P<0.05$),下同

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$) in system yield at different mixing rates for the same mowing period; different uppercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$) in system yield at different mowing rates for the same mixing rate, the same applies below

139.45%(表3)。

A₁时R处理鲜干比显著高于其他处理($P<0.05$);A₂时各处理间鲜干比无显著差异;A₃时O和R₂O₈处理鲜干比显著高于其他处理($P<0.05$)(表3)。

2.2 饲草营养品质

方差分析表明(表4),除NDF含量在混作比例、混作比例×刈割时期交互作用下存在显著差异($P<0.05$)外,其余指标在混作比例、刈割时期两者主效应及交互作用下存在极显著差异($P<0.01$)。

表4 饲草营养品质因子的方差分析(F 值)

Table 4 Analysis of variance for forage nutritional quality

处理 Treatment	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber	相对饲喂价值 Relative feeding value
混作比例 Mixing ratio	5.40**	2.62*	3.88**
刈割时期 Mowing period	41.27**	134.40**	116.81**
混作比例×刈割时期 Mixing ratio×Mowing period	3.41**	1.95*	3.55**

各处理间ADF含量随生育期推进呈降低趋势,且A₃的ADF含量显著低于A₁和A₂($P<0.05$)。A₁时R、R₇O₃和R₈O₂的ADF含量显著低于O和R₂O₈(P

<0.05);A₂时各处理间无显著差异;A₃时R₇O₃的ADF含量显著高于其他处理($P<0.05$),ADF含量变化范围为49.78%(R₃O₇)~69.19%(R₇O₃)(表5)。

表5 不同混作比例及刈割时期对系统营养品质的影响

Table 5 Effect of different mixing ratios and mowing periods on the nutritional quality of the system

处理 Treatment	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber/%	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber/%	相对饲喂价值 Relative feeding value/%
A ₁ R	62.05±1.77 ^{bcA}	54.09±2.22 ^{abA}	69.77±0.50 ^{aB}
O	72.83±5.57 ^{aA}	59.01±3.17 ^{aA}	50.85±1.87 ^{cC}
R ₂ O ₈	73.51±2.12 ^{aA}	54.89±3.29 ^{abA}	53.86±6.19 ^{bcC}
R ₃ O ₇	69.81±7.57 ^{abA}	49.08±6.03 ^{aA}	65.47±3.73 ^{abC}
R ₄ O ₆	64.77±2.59 ^{abcA}	52.13±4.66 ^{abA}	69.17±2.18 ^{aB}
R ₅ O ₅	66.79±4.22 ^{abcA}	51.85±3.39 ^{abA}	66.43±5.51 ^{abB}
R ₆ O ₄	67.05±8.36 ^{abcA}	56.75±5.27 ^{abA}	59.80±4.87 ^{abcB}
R ₇ O ₃	56.98±0.83 ^{bcB}	59.65±1.98 ^{aA}	69.44±1.30 ^{aB}
R ₈ O ₂	61.82±4.15 ^{bcA}	52.00±1.77 ^{abA}	72.84±3.31 ^{aB}
平均值 Average	66.65±1.97 ^A	54.52±2.41 ^A	63.43±3.07 ^C
A ₂ R	54.24±4.71 ^{cdAB}	44.80±2.64 ^{aB}	97.35±4.85 ^{aA}
O	63.72±3.40 ^{aB}	41.36±2.06 ^{abB}	88.58±1.81 ^{aB}
R ₂ O ₈	64.65±4.66 ^{aB}	40.59±0.71 ^{abB}	88.32±3.44 ^{aB}
R ₃ O ₇	63.93±1.70 ^{aA}	37.41±0.66 ^{bB}	97.29±4.86 ^{aB}
R ₄ O ₆	61.21±0.75 ^{abA}	39.29±3.76 ^{abB}	98.14±1.72 ^{aA}
R ₅ O ₅	53.72±1.88 ^{dB}	41.06±2.23 ^{abB}	106.71±3.14 ^{aA}
R ₆ O ₄	60.09±5.69 ^{abcA}	40.64±3.56 ^{abB}	96.53±5.27 ^{aA}
R ₇ O ₃	56.91±2.74 ^{bcdB}	44.09±5.50 ^{aB}	95.12±3.94 ^{aA}
R ₈ O ₂	53.29±1.38 ^{dA}	42.80±4.70 ^{abB}	103.82±5.08 ^{aAB}
平均值 Average	59.08±0.95 ^B	41.34±0.78 ^B	96.87±2.43 ^B
A ₃ R	51.72±2.65 ^{bcB}	44.95±1.62 ^{aB}	100.74±0.83 ^{bcA}
O	51.02±4.00 ^{bcC}	32.83±4.30 ^{cC}	141.83±4.59 ^{aA}
R ₂ O ₈	49.82±3.36 ^{cC}	33.13±4.59 ^{cC}	143.11±1.85 ^{aA}
R ₃ O ₇	49.78±3.70 ^{cB}	35.13±1.49 ^{bB}	133.02±2.62 ^{abA}
R ₄ O ₆	51.91±3.38 ^{bcB}	38.11±3.49 ^{abB}	119.35±7.45 ^{abcA}
R ₅ O ₅	49.95±5.51 ^{cB}	39.18±2.69 ^{abB}	119.50±4.30 ^{abcA}
R ₆ O ₄	58.14±1.42 ^{bA}	36.46±5.47 ^{bB}	113.03±2.08 ^{abcA}
R ₇ O ₃	69.19±2.32 ^{aA}	38.64±1.15 ^{abB}	84.23±1.85 ^{cAB}
R ₈ O ₂	53.63±5.12 ^{bcA}	38.88±3.52 ^{abB}	113.91±6.88 ^{abcA}
平均值 Average	54.03±0.94 ^C	37.25±1.35 ^C	119.13±6.92 ^A

A₃混作体系的NDF含量显著低于A₁和A₂($P<0.05$)。A₁,A₂时期各混作处理间无显著差异。A₃时O和R₂O₈处理NDF含量显著低于其他处理($P<0.05$),NDF含量变化范围为32.83%(O)~

44.95%(R)(表5)。

A₃混作体系的RFV显著高于A₁,A₂($P<0.05$)。A₁时O及R₂O₈处理RFV显著低于其他处理($P<0.05$),RFV变化范围为50.85%(O)~

72.84% (R_8O_2); A_2 时各处理间RFV无显著差异, RFV变化范围为88.32% (R_2O_8) ~ 106.71% (R_5O_5); A_3 时 R , R_4O_6 , R_5O_5 , R_6O_4 , R_7O_3 , R_8O_2 的RFV显著低于其他处理 ($P < 0.05$), RFV变化范围为84.23% (R_7O_3) ~ 143.11% (R_2O_8) (表5)。

2.3 种间关系

2.3.1 侵占力和竞争比率 A_1 (图3A₁、图4a)及 A_3 (图3A₃、图4c)时期 R_2O_8 , R_3O_7 , R_4O_6 , R_5O_5 的AG值均位于 $AG_r > 0$, $AG_o < 0$ 的区域内, 且 $CR_r > 1$, $0 < CR_o < 1$, 油菜竞争力大于燕麦竞争力。 R_6O_4 , R_7O_3 , R_8O_2 的AG值均位于 $AG_r < 0$, $AG_o > 0$ 的区域内, 且 $0 < CR_r < 1$, $CR_o > 1$, 燕麦竞争力大于油菜竞争力。

A_2 时期 (图3A₂、图4b) R_2O_8 , R_3O_7 , R_4O_6 , R_7O_3 的AG值均位于 $AG_r > 0$, $AG_o < 0$ 的区域内, 且 $CR_r > 1$, $0 < CR_o < 1$, 油菜竞争力大于燕麦竞争力。 R_5O_5 , R_6O_4 , R_8O_2 的AG值均位于 $AG_r < 0$, $AG_o > 0$ 的区域内, 且 $0 < CR_r < 1$, $CR_o > 1$, 燕麦竞争力大于油菜竞争力。

A_3 时期 (图3A₃、图4c) R_2O_8 , R_3O_7 , R_4O_6 , R_5O_5 的AG值均位于 $AG_r > 0$, $AG_o < 0$ 的区域内, 且 $CR_r > 1$, $0 < CR_o < 1$, 油菜竞争力大于燕麦竞争力。 R_6O_4 , R_7O_3 , R_8O_2 的AG值均位于 $AG_r < 0$, $AG_o > 0$ 的区域内, 且 $0 < CR_r < 1$, $CR_o > 1$, 燕麦的竞争力大于油菜的竞争力。

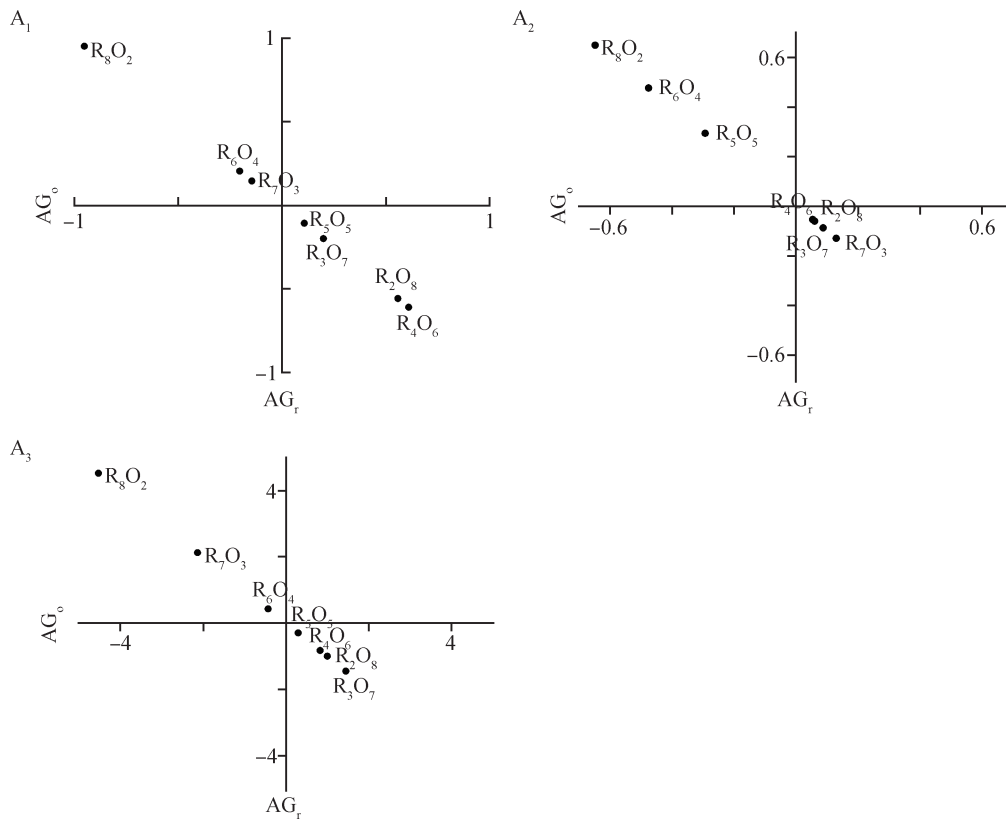


图3 不同处理对混作草地侵占力的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on the aggressivity of mixed grasslands

2.3.2 相对产量 A_1 时期 (图5a)仅 R_2O_8 处理 $RY_r > 1$, $0 < RY_o < 1$, 油菜较燕麦具有竞争优势, 对燕麦具有显著抑制作用 ($P < 0.05$)。 R_3O_7 , R_4O_6 , R_5O_5 处理的相对产量点位于 $RY_r = RY_o$ 等值线与 $RY_o = 1$ 之间, 油菜较燕麦具有竞争优势。 R_6O_4 , R_7O_3 , R_8O_2 相对产量点均分布在 $RY_r = RY_o$ 等值线与 $RY_r = 1$ 之间, 燕麦较油菜具有竞争优势。

A_2 时期 (图5b) R_2O_8 , R_3O_7 , R_4O_6 处理油菜和燕麦的相对产量点分布在 $RY_r = RY_o$ 等值线与 $RY_o = 1$

之间, 油菜较燕麦具有竞争优势。 R_5O_5 , R_6O_4 , R_8O_2 处理 RY 值均在 $RY_r = RY_o$ 斜率以上, $RY_o = 1$ 到 $RY_r = 1$ 的范围内, RY_r 分别为 0.96, 0.90, 0.86, 燕麦在混作系统中具有竞争优势, 燕麦对油菜具有显著的抑制作用 ($P < 0.05$)。 R_7O_3 处理中 $RY_r > 1$, $0 < RY_o < 1$, 油菜相较于燕麦具有竞争优势, 对燕麦具有显著抑制作用 ($P < 0.05$)。

A_3 时期 (图5c) R_2O_8 , R_3O_7 , R_4O_6 , R_5O_5 的相对产量点均分布在 $RY_r = RY_o$ 等值线与 $RY_o = 1$ 之间, 油

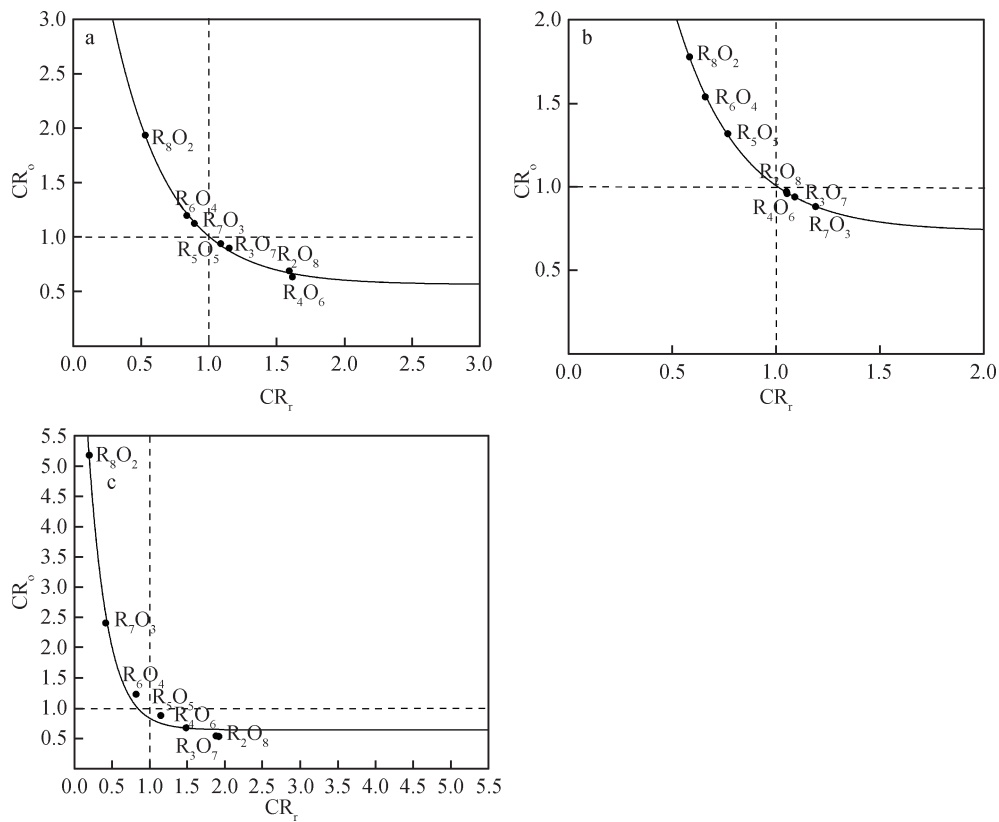


图 4 不同处理对混作草地竞争比率的影响

Fig. 4 Effects of different treatments on competitive ratio in mixed grasslands

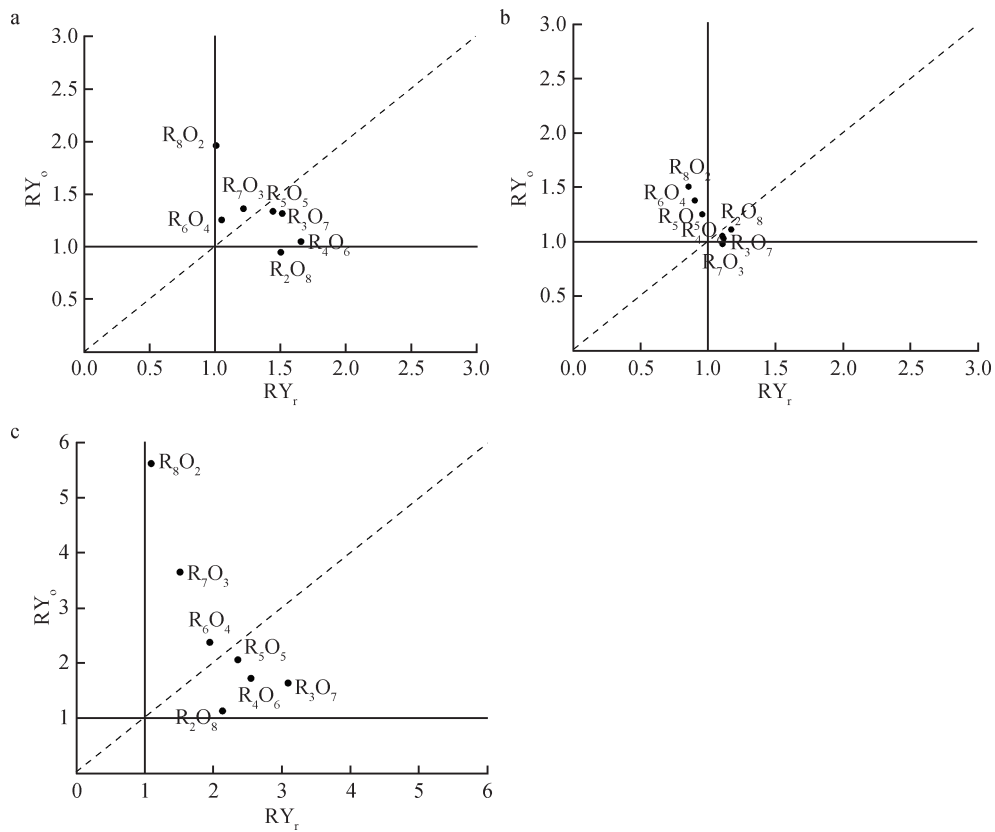


图 5 不同处理对混作草地相对产量的影响

Fig. 5 Effects of different treatments on relative yields in mixed grasslands

菜较燕麦具有竞争优势。 R_6O_4 、 R_7O_3 、 R_8O_2 的相对产量点均分布在 $RY_r=RY_o$ 等值线与 $RY_r=1$ 之间,燕麦具有竞争优势。

2.3.3 土地当量比 不同混作比例及刈割时期期间的土地当量比具有显著差异($P<0.05$),且随生育期推进呈增加趋势(图6)。除 $A_2R_8O_2$ 外,其他20个处理LER均高于1.0,说明混作组合较相应单播在相同的土地面积下能生产更多的饲草,且这20个处理中混作饲草占有不同的生态位,一定程度上避免了部分竞争,较单播更具有提高生产力的潜力。

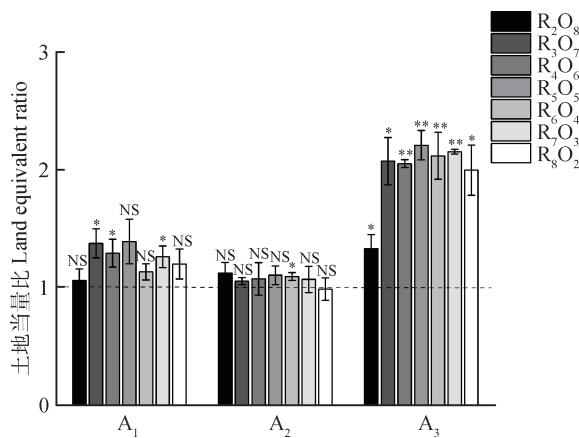


图6 不同混作比例及刈割时期下的土地当量比

Fig. 6 Land equivalence ratio under different mixed cropping ratios and cutting periods

注: *表示 LER 与 1.0 差异显著($P<0.05$); NS 表示 LER 与 1.0 无显著差异

Note: *indicates LER had a significant difference with 1.0 at the 0.05 level; NS indicates LER had no significant difference with 1.0 at the 0.05 level

2.4 综合评价

利用 TOPSIS-多准则决策模型对 3 个刈割时期混作草地干草产量、ADF 及 NDF 的综合效益进行评价分析(图7),计算欧式距离,确定被评价混作组合与理想混作组合的贴近程度。结果显示,所有处理中 $A_3R_7O_3$ 的贴合度值最高(0.75), A_3O 的贴合度最低(0.19),表明混作方式远离参考组合,综合性状表现较差。所有处理贴合度值由高到低排序为 $A_3R_7O_3>A_3R_6O_4>A_3R_5O_5>A_2R_2O_8>A_3R_4O_6>A_2R_7O_3>A_2R_6O_4>A_3R_8O_2>A_2R_4O_6>A_2R_5O_5>A_3R_3O_7>A_2R>A_2R_3O_7>A_2O>A_2R_8O_2>A_3R_2O_8>A_1O>A_1R_7O_3>A_1R_2O_8>A_1R_5O_5>A_1R_6O_4>A_3R>A_1R_3O_7>A_1R_4O_6>A_1R_8O_2>A_1R>A_3O$ 。因此,综合饲草的生产性能及营养品质, $A_3R_7O_3$ 处理优于其他 26 个处理。

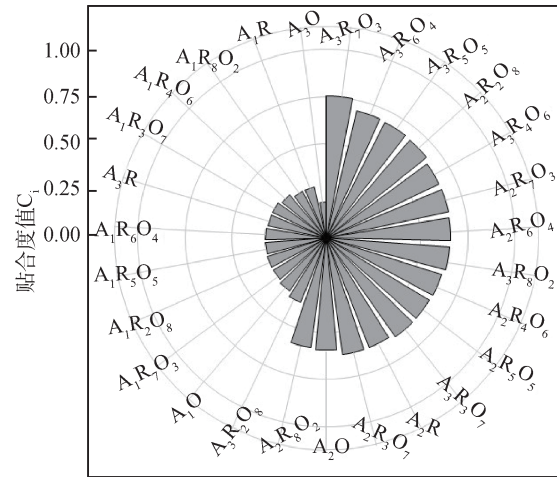


图7 不同混作比例及刈割时期综合评价

Fig. 7 Comprehensive evaluation of different mixing ratios and mowing periods

3 讨论

本研究从产量、营养品质及种间关系等角度探讨混作比例及刈割时期对油菜-燕麦混作系统饲草生产性能的影响,并利用 TOPSIS-多准则决策模型对各研究处理进行了综合评价。

3.1 混作比例及刈割时期对饲草产量的影响

混作草地的资源利用效率与混作组分的种间关系密切相关,种间关系因混作比例和生育期发生变化,使混作系统在维持草地高产和增加优质饲草供给方面具有显著优势^[13-16]。马乃娇^[17]研究表明油菜与燕麦的播种比例为 7:3 时饲草鲜草产量、干草产量最高;胡宇^[18]通过研究紫云英(*Astragalus sinicus* L.)与绿肥油菜混作时氮磷养分利用情况发现,混作时紫云英油菜系统干重较单播有显著升高。本研究发现混作比例及刈割时期对系统产量影响显著($P<0.05$)。产量表现方面,混作处理的产量普遍优于单播处理。本试验中 $A_3R_3O_7$ 处理混作体系鲜草产量最高,较单播提高 31.74%~49.67%; $A_3R_5O_5$ 处理混作体系干草产量达到最高。这表明合理的混作比例能充分发挥群落的生产潜力^[13]。生育期动态方面:饲草鲜、干重随刈割时期的变化趋势并不一致。鲜草产量随生育期呈先增后减的趋势,这主要是由于油菜进入角果成熟后期,植物失水枯萎,而干草产量则随生育期推进持续增加,反映了干物质的不断积累,这与前人的研究结果一致^[3]。 A_3 时期鲜干比显著高于 A_1 、 A_2 ($P<0.05$),可能是由于燕麦处于由营养生长到生殖生长过渡的关键期,此时燕麦快速生长,光

合产物部分分配到茎叶,混作延长了燕麦绿叶期及光合作用时间、后期竞争压力降低等因素共同作用^[19-20]。种间关系方面:本研究中20个混作处理的LER均大于1.0,且在A₃时期达到最高,说明混作系统具有明显的生产优势和较高的土壤利用效率^[21],且该混作系统充分利用了地上光资源。本试验AG, CR, RY均表明3个刈割时期初期油菜具有竞争优势,但随混作系统内油菜混作比例的增加竞争优势逐渐向燕麦转移,这可能是由于随油菜混作比例的增加其种内竞争加剧,光合效率降低,产量增益不再显著^[4],而燕麦此时处于快速生长的开花期,能够利用油菜根系分布层之外的水分和氮素,实现时空上的资源互补^[22-23],保障系统后期的产量增益。

3.2 混作比例及刈割时期对饲草营养品质的影响

饲草的营养品质主要由纤维(ADF, NDF)含量及相对饲用价值(RFV)决定,降低纤维含量是提高饲草营养品质的重要手段^[24]。本试验结果显示,混作及刈割时期对饲草酸性洗涤纤维(ADF)含量和中性洗涤纤维(NDF)含量均有显著影响($P < 0.05$)。混作处理较单播降低了饲草的ADF和NDF含量,随油菜混作比例的增加,ADF及NDF含量呈降低趋势,与Shoaib等人的研究结果一致^[25],这说明油菜的引入有效克服了燕麦单播纤维含量较高的缺点。混作改变了系统内木质素组成(降低了酸不溶木质素和总木质素含量,增加了可溶性糖、半纤维素和纤维素含量^[26]),使混作体系的RFV优于单播。随着生育期推进,系统内ADF和NDF含量逐渐降低,RFV随之增加。原因在于:一方面系统内燕麦比例的增加及植物生理成熟度的提高有利于纤维含量的降低,优化了整体营养结构;另一方面此时燕麦处于营养生长向生殖生长过渡的关键期,光合产物开始向籽实大量积累^[27]。冯廷旭^[28]通过研究禾豆混播比例对饲草营养品质的影响发现,混播草地饲草饲用价值高于单播;王腾飞等^[29]研究表明燕麦混播处理的饲草品质优于单播。本试验得到与上述研究一致的结果。

本研究结果基于单一年度的数据分析,仅为初步发现,其普适性与稳定性仍需通过多年度、多地点的重复试验进一步验证。

4 结论

混作比例、刈割时期显著影响油菜-燕麦混作系

统饲草生产性能。TOPSIS-多准则决策模型分析表明:混作处理中A₃R₇O₃能够兼顾干草产量与营养品质,是混作最佳组合。因此,‘青油21号’油菜和‘林纳’燕麦以7:3的比例混作(油菜、燕麦播种量分别为21 kg·hm⁻²和68 kg·hm⁻²),且在油菜角果乳熟期刈割是适宜研究区油菜和燕麦混作进行饲草生产的配置比例和刈割时期。

参考文献

- [1] 秦燕,关佑君,王有良,等. 高寒区饲用油菜混作效应研究[J]. 草业科学,2019,36(10):2612-2621
QIN Y, GUAN Y J, WANG Y L, et al. Effects of fodder-rape intercropping in the Alpine region [J]. Pratacultural Science, 2019,36(10):2612-2621
- [2] 陈香正,马文奎. 门源县种植业发展现状及对策[J]. 青海农技推广,2023(2):31-33
CHEN X Z, MA W K. Present situation and countermeasures of planting industry development in Menyuan County [J]. Qinghai Agro-Technology Extension, 2023(2):31-33
- [3] 刘勇,马祥,秦燕. 油草混播种类对油菜生产和草地生产性能的影响[J]. 中国农学通报,2020,36(8):43-49
LIU Y, MA X, QIN Y. Rapeseed-grass mixed sowing patterns: effects on rapeseed production and grassland productivity [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020,36(8):43-49
- [4] 赵梦雨. 宁夏干旱区燕麦与豆科牧草混播对草地种间关系和生产性能的影响[D]. 银川:宁夏大学,2023:1-9
ZHAO M Y. Effects of mixed sowing of oats and legumes on grassland interspecific relationship and peoduction performance in arid area of Ningxia [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2023:1-9
- [5] 李学博,李立军,马乃娇. 油菜燕麦混播对饲草产量品质及土壤酶活性的影响[J]. 土壤通报,2020,51(4):897-904
LI X B, LI L J, MA N J. Effects of mixed planting of oat and rape on forage yield and quality and soil enzyme activities [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020,51(4):897-904
- [6] 袁英良,唐丹,鲁英,等. 吉林地区麦后复种饲用油菜与燕麦混播效应研究[J]. 草业学报,2021,30(7):167-178
YUAN Y L, TANG D, LU Y, et al. An investigation of multiple crop planting options when following wheat with mixed-cropped forage rape and oats in the Jilin area of Northeast China [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021,30(7):167-178
- [7] 安海梅. 油菜青油21号[Z]. 青海:青海省海北藏族自治州农业科学研究所,2012-11-19
AN H M. Rapeseed Qingyou No. 21 [Z]. Qinghai: Qinghai Province Haibei Tibetan Autonomous Prefecture Agricultural Science Research Institute, 2012-11-19
- [8] 周青平. 燕麦林纳新品种[Z]. 青海:青海省畜牧兽医科学院,2011-11-22
ZHOU Q P. New varieties of oat Lena [Z]. Qinghai: Qinghai academy of animal science and veterinary medicine, 2011-11-22
- [9] 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[J]. 草地学报,2022,30(9):2483-2491
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[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(9):2483-2491
- [10] 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[J]. *草业科学*, 2021, 38(7):1339-1350
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[J]. *Pratacultural Science*, 2021, 38(7): 1339-1350
- [11] 胡鹏飞. 宁夏地区不同比例紫花苜蓿和无芒雀麦混播效果的评价[D]. 银川:宁夏大学, 2025:25-29
HU P F. Evaluation of the mixed sowing effect of alfalfa and sativae in different proportions in Ningxia [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2025:25-29
- [12] 尤越. 施氮对燕麦/箭筈豌豆混播草地生产性能及氮肥利用效率的影响[D]. 银川:宁夏大学, 2025:25
YOU Y. Effects of nitrogen application on the production performance and nitrogen fertilizer use efficiency of oat/arrowend pea mixed grasslands [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2025:25
- [13] 李兴龙,师尚礼,黄宗昌,等. 黄土丘陵区不同饲草混播模式对种间关系的影响[J]. *草地学报*, 2021, 29(6):1318-1326
LI X L, SHI S L, HUANG Z C, et al. Effects of different forage mixed patterns on interspecific relationships in loess hilly areas[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(6):1318-1326
- [14] 刘锦昉. 中国混播草地生产力及牧草营养品质的影响因素分析[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2021:2
LIU J F. Analysis of factors influencing the productivity and forage nutrition quality of mixed grassland in China [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021:2
- [15] 李彩弟,张春平,俞畅,等. 高寒地区不同饲草单播及混播综合效益评价[J]. *草业科学*, 2023, 40(7):1875-1887
LI C D, ZHANG C P, YU Y, et al. Comprehensive benefit evaluation of monocropping and mixed cropping of different forages in the alpine region [J]. *Pratacultural Science*, 2023, 40(7):1875-1887
- [16] 杨晓华,孟根其木格,华桂兰,等. 豆禾混播比例对科尔沁地区退化草地修复效果的影响[J]. *草原与草业*, 2024, 36(4): 33-38
YANG X H, MENGGE Q M G, HUA G L, et al. Effects of sowing ratios of Legumes-Grasses mixture on the restoration effect of degraded grassland in Horqin area[J]. *Grassland and Prataculture*, 2024, 36(4):33-38
- [17] 马乃娇. 盐碱地油菜燕麦混播结合施肥对饲草产量和土壤性状的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2019:8-27
MA N J. Effects of mixed sowing and spplcation of rapeseed and oat on forage yield and soil characters in saline-alkali soil [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019:8-27
- [18] 胡宇. 紫云英/绿肥油菜混作体系氮磷养分利用特征研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2023:20-22
HU Y. Study on nitrogen and phosphorus utilization characteristics of Chinese milk vetch/green manure rapeseed mixed cropping [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023: 20-22
- [19] 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 [J]. *Agronomy*, 2025, 15(2):297
- [20] 郭孝,李建平,石志芳,等. 混播牧草生长特点和生产性能的研究[J]. *郑州牧业工程高等专科学校学报*, 2013, 33(1):1-3
GUO X, LI J P, SHI Z F, et al. Study on growth characteristics and production function of mixed sowing forage plants [J]. *Journal of Zhengzhou College of Animal Husbandry Engineering*, 2013, 33(1):1-3
- [21] 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[J]. *草业科学*, 2022, 39(11):2307-2316
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 [J]. *Pratacultural Science*, 2022, 39(11):2307-2316
- [22] JACOB C E. Evaluating the competitive ability of semi-leafless field pea (*Pisum sativum* L.) [D]. Saskatoon: University of Saskatchewan, 2015:52-72
- [23] BULLIED W J, VAN ACKER R C, MARGINET A M, et al. Agronomic and environmental factors influence weed composition and canola competitiveness in southern Manitoba [J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 2006, 86(2):591-599
- [24] 张春林,南金生,秦海英,等. 内蒙古半干旱冷凉地区燕麦与箭筈豌豆混播生产性能及营养价值评价[J]. *草业科学*, 2024, 41(5):1189-1200
ZHANG C L, NAN J S, QIN H Y, et al. Comprehensive evaluation of the productivity and quality of *Avena sativa* and *Vicia sativa* mixed sowing in semiarid and cold regions in Inner Mongolia [J]. *Pratacultural Science*, 2024, 41(5):1189-1200
- [25] SHOAIB M, AYUB M, SHEHZAD M, et al. Dry matter yield and forage quality of oat, barley and canola mixture [J]. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 51(2):433-439
- [26] 蒯婕,杜雪竹,胡曼,等. 共生期与种植密度对棉田套播油菜生长及产量的影响[J]. *作物学报*, 2016, 42(4):591-599
KUAI J, DU X Z, HU M, et al. Effect of symbiotic periods and plant densities on growth and yield of rapeseed intercropping cotton [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(4):591-599
- [27] 王彦超,宋磊,张凡凡,等. 不同燕麦品种生育期农艺性状、生产性能及品质的比较[J]. *新疆农业科学*, 2020, 57(2): 254-263
WANG Y C, SONG L, ZHANG F F, et al. Comparative study on production performance of 10 oat varieties [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2020, 57(2):254-263
- [28] 冯廷旭. 三江源区一年生禾豆混播草地配比生产性能与营养品质的影响研究[D]. 西宁:青海大学, 2022:15-18
FENG T X. Study on the influence of production performance and nutritional quality of annual gram-bean mixed grass ration in the Sanjiangyuan area [D]. Xining: Qinghai University, 2022:15-18
- [29] 王腾飞,马霞,刘金龙,等. 引黄灌区复种饲用燕麦种植模式产量、品质及经济效益分析[J]. *草业学报*, 2025, 34(4):27-37
WANG T F, MA X, LIU J L, et al. Analysis of the yield, quality and economic benefits from multiple cropping of fodder oats in the Yellow River irrigation area [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(4):27-37