DOI: 10. 11686/cyxb2025377 http://cyxb. magtech. com. cn
李慧婷, 李中利, 水清明, 等. 混播比例和施氮模式对黄土高原紫花苜蓿-无芒雀麦混播草地产量和水氮利用效率的影响. 草业学报, 2026, 35(9): 180－197.
LI Hui-ting, LI Zhong-li, SHUI Qing-ming, *et al*. Effects of grass-legume sowing ratio and nitrogen application mode on yield and water and nitrogen use efficiency of alfalfa-*Bromus inermis* mixed stands on the Loess Plateau. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(9): 180－197.

混播比例和施氮模式对黄土高原紫花苜蓿-无芒雀麦混播草地产量和水氮利用效率的影响

李慧婷[1,2], 李中利[1,2], 水清明[3], 蒋丛泽[1,2], 魏恺全[1,2], 杨宪龙[1,2*]
(1. 兰州大学草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730020; 2. 兰州大学草种创新与草地农业生态系统全国重点实验室, 甘肃 兰州 730020; 3. 定西市农业科学研究院, 甘肃 定西 744300)

摘要: 为确定陇中黄土高原半干旱区紫花苜蓿－无芒雀麦适宜的混播比例及施氮模式, 以紫花苜蓿单播($A_{10}S_0$)和无芒雀麦单播(A_0S_{10})为对照, 设置3∶7(A_3S_7)、5∶5(A_5S_5)、7∶3(A_7S_3)3个混播比例, 同时在每种混播比例下设置4种施氮模式: 不施氮肥(U_0)、普通尿素施氮 100 kg N·hm^{-2}(U_{100})、普通尿素施氮 50 kg N·hm^{-2}＋有机肥 3.75 t·hm^{-2}(U_{50}＋OF)、缓释尿素施氮 50 kg N·hm^{-2}(CU_{50}), 对建植第2年的混播草地进行产量、水氮利用和种间竞争的研究。结果表明: 与单播模式相比, 混播模式更具产量优势, A_3S_7、A_5S_5、A_7S_3的干草产量较A_0S_{10}分别显著提高44.2%、35.4%、43.8%, A_3S_7、A_7S_3的干草产量较$A_{10}S_0$分别显著提高19.4%、19.0%。A_3S_7、A_5S_5、A_7S_3、$A_{10}S_0$的粗蛋白产量较A_0S_{10}分别显著增加69.1%、54.6%、68.9%、56.8%。混播处理干物质水分利用效率及氮肥偏生产力均显著高于A_0S_{10}处理, A_3S_7、A_5S_5、A_7S_3的干物质水分利用效率较A_0S_{10}分别显著提高58.3%、44.9%、55.5%。CU_{50}的氮肥偏生产力较U_{100}、U_{50}＋OF处理分别显著提高86.6%、97.8%。各处理土地当量比、紫花苜蓿竞争率、紫花苜蓿相对产量、相对产量总值均大于1, U_{100}下紫花苜蓿竞争率、紫花苜蓿相对产量显著高于其他施氮处理, U_{100}下土地当量比、相对产量总值显著高于U_0、CU_{50}。雷达图综合分析结果表明, 在陇中黄土高原半干旱区, A_7S_3-U_{100}处理下的综合表现最好, 适宜在该地区推广种植。本研究通过系统探究豆禾混播比例与施氮模式的生产效应, 为陇中黄土高原半干旱区的饲草高效栽培提供了技术支撑。

关键词: 黄土高原; 豆禾混播; 施氮模式; 产量; 水氮利用; 种间竞争

Effects of grass-legume sowing ratio and nitrogen application mode on yield and water and nitrogen use efficiency of alfalfa-*Bromus inermis* mixed stands on the Loess Plateau

LI Hui-ting[1,2], LI Zhong-li[1,2], SHUI Qing-ming[3], JIANG Cong-ze[1,2], WEI Kai-quan[1,2], YANG Xian-long[1,2*]
1. *College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou* 730020, *China*; 2. *State Key Laboratory of Herbage Improvement and Grassland Agro-ecosystems, Lanzhou University, Lanzhou* 730020, *China*; 3. *Academy of Agricultural Science in Dingxi, Dingxi* 744300, *China*

Abstract: To determine the ideal mixed sowing ratio and nitrogen application mode for alfalfa (*Medicago sativa*)-*Bromus inermis* stands in the semi-arid area of the Loess Plateau in central Gansu, alfalfa monoculture ($A_{10}S_0$) and *B.*

收稿日期: 2025-09-16; 改回日期: 2025-11-12
基金项目: 国家牧草产业技术体系(CARS-34)资助。
作者简介: 李慧婷(2002－), 女, 黑龙江黑河人, 在读硕士。E-mail: liht2024@lzu. edu. cn
*通信作者 Corresponding author. E-mail: yangxianl@lzu. edu. cn

inermis monoculture (A_0S_{10}) plots were used as the control, and three mixed sowing ratios of 3∶7 (A_3S_7), 5∶5 (A_5S_5), and 7∶3 (A_7S_3) were set up. Four nitrogen application modes were also set up under each mixed sowing ratio: no nitrogen fertilizer (U_0), standard urea nitrogen application of 100 kg N·ha^{-1} (U_{100}), standard urea nitrogen application of 50 kg N·ha^{-1}+organic fertilizer 3.75 t·ha^{-1} (U_{50}+OF), and slow-release urea nitrogen application of 50 kg N·ha^{-1} (CU_{50}). The yield, water and nitrogen utilization and interspecific competition of the mixed stands in the second year of planting were observed and analyzed. It was found that compared with the two monocultures, mixed sowing had several yield advantages. The hay yields of A_3S_7, A_5S_5 and A_7S_3 were, respectively, 44.2%, 35.4% and 43.8% higher ($P<0.05$) than that of A_0S_{10}. A_3S_7 and A_7S_3 were, respectively, 19.4% and 19.0% higher ($P<0.05$) than that of $A_{10}S_0$. The crude protein yields of A_3S_7, A_5S_5, A_7S_3 and $A_{10}S_0$ were, respectively, 69.1%, 54.6%, 68.9% and 56.8% higher ($P<0.05$) than that of A_0S_{10}. The dry matter water use efficiency and nitrogen partial factor productivity of mixed sowing treatments were significantly higher than those of monocultures. The dry matter water use efficiency of A_3S_7, A_5S_5 and A_7S_3 was, respectively, 58.3%, 44.9% and 55.5% higher ($P<0.05$) than that of A_0S_{10}. The partial factor productivity of nitrogen fertilizer in CU_{50} was significantly increased ($P<0.05$) by 86.6% and 97.8%, respectively, compared with U_{100} and U_{50}+OF. The land equivalent ratio, alfalfa competition rate, alfalfa relative yield and total relative yield of each mixed sowing treatment were all greater than 1. The alfalfa competition rate and relative yield of U_{100} were significantly higher than those of A_0S_{10} treatment. The land equivalent ratio and total relative yield of U_{100} were significantly higher than those of U_0 and CU_{50}. Multi-trait radar map result analysis showed that the overall performance of the A_7S_3-U_{100} treatment performed best in this experiment, and was therefore the recommended planting regime in the Longzhong semi-arid area of the Loess Plateau in central Gansu. This study systematically explored the production of different legume-grass mixed sowing ratios and nitrogen application modes, thereby providing technical support for efficient forage cultivation in this region.

Key words: the Loess Plateau; legume-grass mixtures; nitrogen application mode; yield; water and nitrogen utilization; interspecific competition

草畜供需矛盾突出是中国农业系统结构性失衡的典型体现,表现为日益增长的草食畜产品需求与滞后的饲草供给体系之间的矛盾。随着居民膳食结构升级,牛羊肉及奶制品消费量持续增长,草食畜牧业养殖规模不断扩大,但我国却面临优质饲草总量严重不足和依赖进口的困境。《“十四五”全国饲草产业发展规划》[1]明确指出,目前中国优质饲草尚有5000万t·a^{-1}的缺口。因此,亟需通过优化人工草地种植模式,提高饲草产量和品质,以保障优质饲草安全供给。

豆科与禾本科牧草进行合理的混播有助于建立产量高、抗逆性强且营养互补的优质草地,该技术在我国北方地区得到了广泛的推广和应用[2]。豆科牧草通过生物固氮作用可以将部分氮素转移至禾本科牧草中,提升生产性能,减少氮肥施用,降低环境污染[3]。紫花苜蓿(*Medicago sativa*)是豆科多年生草本植物,具有抗逆性强、产草量高[4]、对环境变化及土壤条件适应力强等优点,现已被广泛用于生态系统修复、优质饲草基地建设和土壤地力培肥中[5]。无芒雀麦(*Bromus inermis*)具有营养价值高、刈割后再生能力强和适口性好等特征,是各类家畜所喜食的牧草。研究发现,在陇西黄土高原地区,扁蓿豆(*Medicago ruthenica*)与无芒雀麦以7∶3的比例混播可获得较高的产量和营养品质,该比例下干草产量较单播处理显著增加了51.2%[6];有研究表明,饲用豌豆(*Pisum sativum*)和小黑麦(×*Triticosecale*)的最佳混播比例为6∶4,与小黑麦单播相比,该比例下牧草的干草产量显著增加了59.0%,同时混播还能提高土壤肥力[7];另有学者选取鸭茅(*Dactylis glomerata*)、多年生黑麦草(*Lolium perenne*)、白三叶(*Trifolium repens*)、红三叶(*Trifolium pratense*)进行混播组合研究,结果表明豆禾牧草混播草地生物量最高的比例均为5∶5,生物量显著高于单播处理[3]。可见,豆禾混播模式的稳定性和增产效果取决于科学的混播比例。

施氮可以提高饲草产量,改善饲草营养品质。然而,施氮量在调节作物生长方面具有阈值效应,过量施氮不

仅会降低氮肥利用效率,增加生产成本,还会抑制豆科牧草的固氮潜力,最终导致产量和效益下降[8-10]。普通尿素是农业生产中使用最广泛的速效氮肥,肥效快,但氮素释放集中,易通过氨挥发、硝化-反硝化及淋溶等途径损失[11]。相比之下,有机肥是一种环保且营养全面的肥料种类,不仅能供给作物所需的各种养分,还能增强土壤微生物活性,改善土壤质量[12]。缓释氮肥具有养分释放周期长、肥效持久等特点,能提高作物的氮素利用率,降低氮素损失,从而提升作物产量[13-15]。因此,确定合理的施氮量和施氮模式,是协调牧草高产与环境保护的关键。截至目前,前人开展的研究多集中于探究豆禾混播比例对混播群落稳定性和生产性能的影响,或多关注不同施肥模式对牧草生产和氮素利用效率的影响。将混播比例和施肥视为一个协同因素,进而探讨最佳混播比例及其与氮肥施用的协同增效机制的研究尚不多见,亟待开展相关研究。鉴于此,本研究以紫花苜蓿和无芒雀麦单播作为对照,设置3种混播比例和4种施氮模式,探讨不同混播比例和施氮模式对陇中半干旱区紫花苜蓿-无芒雀麦混播草地的生产性能、水氮利用和种间关系的影响,确定陇中黄土高原半干旱区适宜的豆禾混播比例和施氮模式,以期为紫花苜蓿和无芒雀麦高产优质栽培提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究在甘肃省定西市安定区香泉镇(35°43′ N,104°50′ E)开展,该地区位于陇中黄土高原半干旱区,属温带大陆性气候,光照充足,降水短缺。多年平均降水量380 mm,年潜在蒸发量1526 mm。海拔1850 m,年平均气温8.6 ℃,年平均日照数2500 h左右,无霜期122~160 d。试验地0~20 cm土层土壤基本理化性质见表1,2024年和多年(2020-2023年)的降水量及平均月气温如图1所示。

表1 试验地0~20 cm土层土壤基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of 0-20 cm soil layer in the test plot

土层深度 Soil depth (cm)	容重 Bulk density ($g\cdot cm^{-3}$)	田间持水量 Field moisture capacity (%)	全氮 Total nitrogen ($g\cdot kg^{-1}$)	硝态氮 Nitrate nitrogen ($mg\cdot kg^{-1}$)	速效钾 Available potassium ($mg\cdot kg^{-1}$)	速效磷 Available phosphorus ($mg\cdot kg^{-1}$)	有机质 Organic matter ($g\cdot kg^{-1}$)	pH
0~20	1.6	14.6	0.5	8.6	79.3	19.3	7.4	7.9

1.2 试验设计

本研究采用双因素随机区组试验设计,共设置5个比例:紫花苜蓿单播($A_{10}S_0$),无芒雀麦单播(A_0S_{10}),以及紫花苜蓿(A)与无芒雀麦(S)以3∶7(A_3S_7)、5∶5(A_5S_5)、7∶3(A_7S_3)混播;同时在每种混播比例下设置4种施氮模式,分别为不施氮肥(U_0)、普通尿素100 kg N·hm^{-2}(U_{100})、普通尿素50 kg N·hm^{-2}+有机肥3.75 t·hm^{-2}(U_{50}+OF)、缓释尿素50 kg N·hm^{-2}(CU_{50})。本研究共20个处理,3次重复,共60个小区,小区面积为9 m^2(3 m×3 m),区组间距0.5 m,试验处理如表2所示。

混播草地于2023年5月建植,当年刈割收获1次,2024年刈割收获3次。供试紫花苜蓿品种为'中苜1号',无芒雀麦品种为'原野'。两种牧草采用同行混播,行距为20 cm,其单播量分别

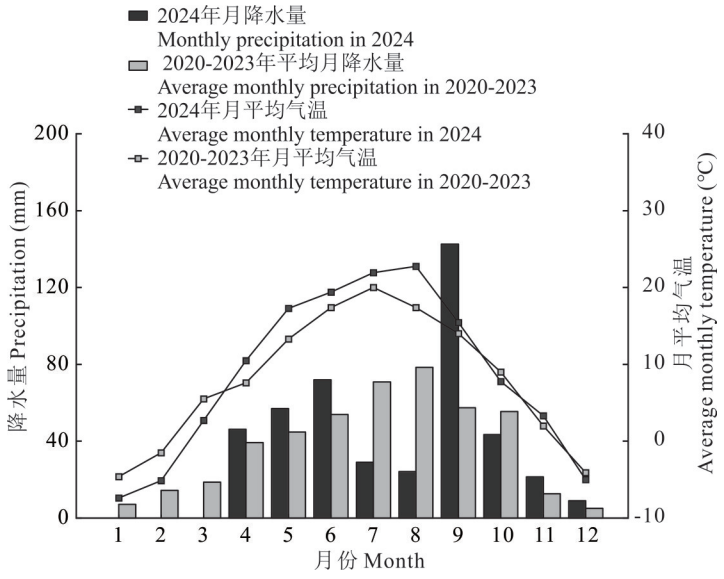


图1 试验区2024年和2020-2023年的降水量及月平均气温

Fig. 1 The precipitation and average monthly temperature of the test area in 2024 and 2020-2023

为 22.5、30.0 kg·hm^{-2}，不同混播比例下两种牧草的播量根据各自在混播草地中的占比、单播量和种用价值计算。尿素（普通尿素含 N 46%，缓释尿素含 N 44%）分基肥和 2 次追肥施用，2024 年基肥追肥比例设置为 3∶7，基肥于牧草返青期施入，占总施氮量的 30%，追肥于第 1 次和第 2 次刈割后施入，施肥量分别占 40% 和 30%。磷、钾肥分别为过磷酸钙（含 P_2O_5 12%）和硫酸钾（含 K_2O 52%），施用量分别为 100 kg P_2O_5·hm^{-2}、100 kg K_2O·hm^{-2}。使用商品有机肥，其中有机质含量≥40%，总养分（N+P_2O_5+K_2O）≥5%，施用量为 3750 kg·hm^{-2}。磷肥、钾肥、有机肥作为基肥于牧草返青期一次性施入。试验期间定期进行人工除草，不做灌溉处理。

表 2　试验处理

Table 2　Experiment treatments

混播比例 Mixed sowing ratios	紫花苜蓿播种量 Alfalfa seeding rate (kg·hm^{-2})	无芒雀麦播种量 *B. inermis* seeding rate (kg·hm^{-2})	施氮模式 Nitrogen application modes	处理代号 Code of treatment
10∶0	22.5	0.0	不施氮肥 No nitrogen fertilizer	$A_{10}S_0$-U_0
	22.5	0.0	普通尿素 100 kg N·hm^{-2} Common urea of 100 kg N·ha^{-1}	$A_{10}S_0$-U_{100}
	22.5	0.0	普通尿素 50 kg N·hm^{-2}+有机肥 3.75 t·hm^{-2} Common urea of 50 kg N·ha^{-1}+organic fertilizer of 3.75 t·ha^{-1}	$A_{10}S_0$-U_{50}+OF
	22.5	0.0	缓释尿素 50 kg N·hm^{-2} Slow-release urea of 50 kg N·ha^{-1}	$A_{10}S_0$-CU_{50}
0∶10	0.0	30.0	不施氮肥 No nitrogen fertilizer	A_0S_{10}-U_0
	0.0	30.0	普通尿素 100 kg N·hm^{-2} Common urea of 100 kg N·ha^{-1}	A_0S_{10}-U_{100}
	0.0	30.0	普通尿素 50 kg N·hm^{-2}+有机肥 3.75 t·hm^{-2} Common urea of 50 kg N·ha^{-1}+organic fertilizer of 3.75 t·ha^{-1}	A_0S_{10}-U_{50}+OF
	0.0	30.0	缓释尿素 50 kg N·hm^{-2} Slow-release urea of 50 kg N·ha^{-1}	A_0S_{10}-CU_{50}
3∶7	6.8	21.0	不施氮肥 No nitrogen fertilizer	A_3S_7-U_0
	6.8	21.0	普通尿素 100 kg N·hm^{-2} Common urea of 100 kg N·ha^{-1}	A_3S_7-U_{100}
	6.8	21.0	普通尿素 50 kg N·hm^{-2}+有机肥 3.75 t·hm^{-2} Common urea of 50 kg N·ha^{-1}+organic fertilizer of 3.75 t·ha^{-1}	A_3S_7-U_{50}+OF
	6.8	21.0	缓释尿素 50 kg N·hm^{-2} Slow-release urea of 50 kg N·ha^{-1}	A_3S_7-CU_{50}
5∶5	11.3	15.0	不施氮肥 No nitrogen fertilizer	A_5S_5-U_0
	11.3	15.0	普通尿素 100 kg N·hm^{-2} Common urea of 100 kg N·ha^{-1}	A_5S_5-U_{100}
	11.3	15.0	普通尿素 50 kg N·hm^{-2}+有机肥 3.75 t·hm^{-2} Common urea of 50 kg N·ha^{-1}+organic fertilizer of 3.75 t·ha^{-1}	A_5S_5-U_{50}+OF
	11.3	15.0	缓释尿素 50 kg N·hm^{-2} Slow-release urea of 50 kg N·ha^{-1}	A_5S_5-CU_{50}
7∶3	15.8	9.0	不施氮肥 No nitrogen fertilizer	A_7S_3-U_0
	15.8	9.0	普通尿素 100 kg N·hm^{-2} Common urea of 100 kg N·ha^{-1}	A_7S_3-U_{100}
	15.8	9.0	普通尿素 50 kg N·hm^{-2}+有机肥 3.75 t·hm^{-2} Common urea of 50 kg N·ha^{-1}+organic fertilizer of 3.75 t·ha^{-1}	A_7S_3-U_{50}+OF
	15.8	9.0	缓释尿素 50 kg N·hm^{-2} Slow-release urea of 50 kg N·ha^{-1}	A_7S_3-CU_{50}

1.3　测定指标及方法

1.3.1　产量　在紫花苜蓿初花期收获取样，每个小区内随机选择 2 个 50 cm 长的样段，距地面 3～4 cm 处刈割。其中一个样段的样本需要将紫花苜蓿和无芒雀麦分开称鲜重，在 105 ℃烘箱中杀青 30 min，之后在 75 ℃烘箱中烘干至恒重，计算干鲜比和二者干物质在混播群体中的占比；另一个样段的样品烘干粉碎后过 1.0 mm 筛，装入塑封袋待测品质指标。同时，将小区整体刈割收获测其鲜重，利用干鲜比换算得出每 hm^2 的干草产量。

1.3.2　营养品质　混播草地样品粗蛋白（crude protein，CP，%）含量按照 GB/T 6432－2018 测定[16]。中性洗涤纤维（neutral detergent fiber，NDF，%）和酸性洗涤纤维（acid detergent fiber，ADF，%）含量采用范氏洗涤纤维分析法测定[17]。相对饲喂价值（relative feed value，RFV）和相对牧草质量（relative forage quality，RFQ）的计算公

式[18]如下：

$$RFV = DMI \times DDM / 1.29 \tag{1}$$

$$RFQ = 1.9499 \times RFV - 67.038 \tag{2}$$

$$DMI = 120 / NDF \tag{3}$$

$$DDM = 88.9 - 0.779 \times ADF \tag{4}$$

式中：DMI表示干物质采食量(dry matter intake)；DDM表示可消化干物质(digestible dry matter)。

1.3.3 水氮资源利用　　耗水量(evapotranspiration，E_T，mm)的计算公式[19]如下：

$$E_T = P + CR + I + \triangle SWS - DP - R \tag{5}$$

式中：P为生育期降水量(mm)；CR为地下水向上补给量(mm)；I为灌溉量(mm)；ΔSWS为混播草地播种前与收获后0～200 cm土层土壤贮水量的变化量(mm)；DP为深层渗漏量(mm)；R为地表径流量(mm)。由于本试验无灌溉，且该研究区地势平坦，地下水深埋，无深层渗漏，所以生育期内I、CR、DP和R可忽略不计。因此，生育期耗水量计算方程可简化为下式：

$$E_T = P + \triangle SWS \tag{6}$$

干物质水分利用效率(water use efficiency of dry matter，WUE，kg·hm^{-2}·mm^{-1})的计算公式如下：

$$WUE = \frac{Y}{E_T} \tag{7}$$

式中：Y为不同处理牧草的干物质产量(kg·hm^{-2})。

氮肥偏生产力(nitrogen partial factor productivity，PFP_N，kg·kg^{-1})计算公式如下：

$$PFP_N = \frac{Y_N}{N} \tag{8}$$

式中：Y_N为施氮处理下牧草干物质产量(kg·hm^{-2})，N为施氮量(kg·hm^{-2})。

1.3.4 种间竞争　　土地当量比(land equivalent ratio，LER)是衡量混播系统土地利用率的重要指标。计算公式[20]如下：

$$LER = \frac{Y_{AS}}{Y_{AA}} + \frac{Y_{SA}}{Y_{SS}} \tag{9}$$

式中：Y_{AS}和Y_{SA}分别代表混播系统中紫花苜蓿和无芒雀麦的产量；Y_{AA}和Y_{SS}分别代表紫花苜蓿单播和无芒雀麦单播的产量；当$LER>1$，表明混播有优势；当$LER<1$时，表明混播有劣势。

竞争率(competition ratio，CR)是反映混播群体中植物竞争能力的指标，其计算公式[21]如下：

$$CR_A = \frac{PLER_A}{PLER_S} \times \frac{Z_S}{Z_A} \tag{10}$$

$$CR_S = \frac{PLER_S}{PLER_A} \times \frac{Z_A}{Z_S} \tag{11}$$

式中：$PLER_A$和$PLER_S$分别为混播系统中紫花苜蓿和无芒雀麦的偏土地当量比；Z_A和Z_S分别为紫花苜蓿和无芒雀麦在混播系统中所占的比例；CR_A和CR_S分别为紫花苜蓿和无芒雀麦的竞争能力，$CR_A>1$说明紫花苜蓿在混播系统中竞争能力大。

相对产量(relative yield，RY)和相对产量总和(relative yield total，RYT)可以反映混播系统中各牧草的竞争优势，其计算公式[22]如下：

$$RY_A = \frac{Y_{AS}}{Z_A \times Y_{AA}} \tag{12}$$

$$RY_S = \frac{Y_{SA}}{Z_S \times Y_{SS}} \tag{13}$$

$$RYT = RY_A \times Z_A + RY_S \times Z_S \tag{14}$$

式中：RY_A和RY_S分别为紫花苜蓿和无芒雀麦的相对产量，$RY_S<1$，表明无芒雀麦的种内竞争与种间竞争相似；$RY_S>1$则表明无芒雀麦的种内竞争大于其种间竞争。当$RYT<1$时，表明物种间存在激烈的资源竞争，当

$RYT>1$时，表明物种间在一定程度上避免了部分竞争，发生了某种生态位分离。

1.3.5 经济效益　　生产资料投入包括种子、肥料；劳动力投入包括除杂草、牧草收获的用工费用；紫花苜蓿和无芒雀麦干草价格以2024年甘肃省的市场价为准，分别为2.2、1.8 CNY·kg^{-1}，混播处理的干草价格根据两种牧草的干物质占比和各自干草价格进行换算。净利润和产投比的计算公式如下：

$$\text{净利润} = \text{作物总产值} - \text{总生产成本} \tag{15}$$

$$\text{产投比} = \text{作物总产值}/\text{总生产成本} \tag{16}$$

1.3.6 综合评价　　雷达图法是典型的图形评价方法，可全面、直观地反映评价对象的综合表现以及各评价指标的均衡程度[23]。本研究选取干草产量、粗蛋白产量、耗水量、干物质水分利用效率、RFV、RFQ、LER、CR、RY等指标作为正向指标，对其标准化处理的公式为：

$$r_{ij} = \frac{r'_{ij}}{r'_{ij\max}} \tag{17}$$

式中：i为该评价系统中评价对象的个数；j为评价指标个数；ij表示第i个评价对象第j项评价指标；r'_{ij}为各评价指标数值；$r'_{ij\max}$为数值的最大值；r_{ij}为各评价指标转换值。

在由n个评价指标组成的雷达图中，雷达图的面积由n个三角形组成。每个三角形由相邻的两个指标轴构成，相邻两轴之间的夹角为360°除以n。以雷达图的面积(S_i)和周长(L_i)作为特征向量，构成一个二维特征向量，以此来计算综合评价函数值。S_i和L_i计算公式分别如下：

$$S_i = \frac{n\sum_{p=1}^{n-1}\sum_{p<1}^{n}\frac{1}{2}r_{ip}r_{iq}\sin\alpha}{C_n^2} \tag{18}$$

$$L_i = \frac{n\sum_{p=1}^{n-1}\sum_{p<1}^{n}\sqrt{r_{ip}^2 + r_{iq}^2 - 2r_{ip}r_{iq}\cos\alpha}}{C_n^2} \tag{19}$$

式中：n为评价指标个数；r_{ip}和r_{iq}为第i个评价对象第p和q个指标转换值；α为相邻数轴之间的夹角。

构造一个评价向量$V_i(V_{i1}, V_{i2})$来反映各处理下评价对象的综合表现以及各指标间的均衡程度。

$$V_{i1} = S_i/S_{\max} \tag{20}$$

$$V_{i2} = \frac{S_i}{\left[\pi\left(\frac{L_i^2}{2\pi}\right)\right]} = \frac{4\pi S_i}{L_i^2} \tag{21}$$

式中：$S_{\max}$为雷达图最大面积值；V_{i1}为面积评价值，表示第i个评价对象雷达图的面积与最大面积的比值，其数值越大说明该评价对象综合表现越好，反之则越差；V_{i2}为周长评价值，表示雷达图面积与具有相同周长的圆面积的比值，其数值越大，说明该评价对象各指标的均衡协调程度越好，反之越差。

最后通过评价向量构造评价函数Y，并对该评价体系进行综合评价，评价值Y计算公式为：

$$Y = \sqrt{V_{i1} \times V_{i2}} \tag{22}$$

式中：评价值Y越大，表明该评价对象综合表现越好，各个评价指标的均衡性越强。

1.4 数据统计与分析

采用Excel 2019对数据进行初步的整理和统计，采用Origin 2024软件进行图表制作，用SPSS 27.0软件进行双因素(ANOVA)方差分析，若交互作用或主效应达到显著水平，则进一步采用邓肯(Duncan)法对差异显著的因子进行多重比较，最后采用雷达图法进行综合评价。

2 结果与分析

2.1 不同混播比例及施氮模式对混播系统干草产量的影响

整体而言，混播比例对混播系统干草产量具有极显著影响($P<0.001$)，但施氮模式及其与混播比例的交互作用对混播系统干草产量无显著影响($P>0.05$，图2)。第1茬，A_0S_{10}、A_3S_7、A_5S_5、A_7S_3之间的干草产量无显著差异，但A_3S_7、A_7S_3干草产量较$A_{10}S_0$分别显著增加26.5%、26.0%(图2b)；第2茬，A_3S_7、A_5S_5、A_7S_3、$A_{10}S_0$之间的干

草产量无显著差异，但较A_0S_{10}分别显著增加260.4%、217.9%、238.0%、210.9%(图2d)；第3茬，A_3S_7、A_5S_5、A_7S_3、$A_{10}S_0$之间的干草产量无显著差异，但较A_0S_{10}分别显著增加45.5%、50.6%、60.1%、37.7%(图2f)。总产量方面，A_3S_7和A_7S_3处理的干草产量均显著高于$A_{10}S_0$和A_0S_{10}(图2h)。

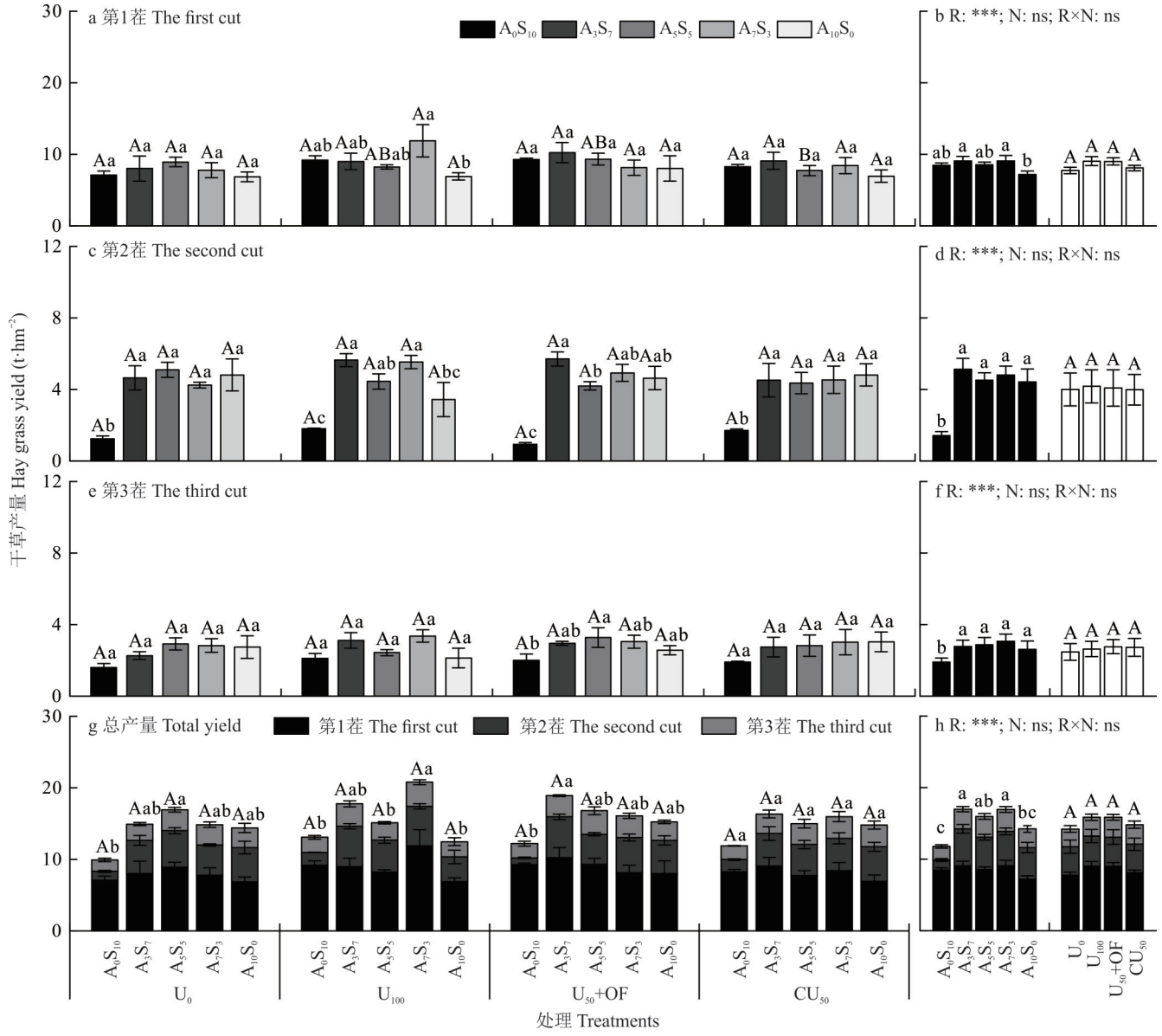


图2 不同混播比例及施氮模式对混播系统饲草产量的影响

Fig. 2 Effects of different mixed sowing ratios and nitrogen application modes on the yield of forage grass in mixed sowing system

R：混播比例 Mixed sowing ratio；N：施氮模式 Nitrogen application mode；***：$P<0.001$；ns：$P>0.05$. 不同大写字母表示不同施氮模式处理间差异显著，不同小写字母表示在混播比例处理间差异显著，下同。Different uppercase letters showed significant differences among different nitrogen application mode, and different lowercase letters showed significant differences among different mixed sowing ratio, the same below.

2.2 不同混播比例及施氮模式对混播系统饲草粗蛋白产量的影响

整体而言，混播比例对混播系统饲草粗蛋白产量具有显著影响($P<0.05$)，但施氮模式以及其与混播比例的交互作用对混播系统饲草粗蛋白产量无显著影响(第1茬除外，图3)。第1茬，A_3S_7、A_7S_3、$A_{10}S_0$之间的粗蛋白产量无显著差异，但较A_0S_{10}分别显著增加33.0%、36.7%、27.4%；U_{100}处理的粗蛋白产量较U_0、CU_{50}处理显著增加33.3%、23.1%(图3b)；第2茬，A_3S_7、A_5S_5、A_7S_3、$A_{10}S_0$之间的粗蛋白产量无显著差异，但较A_0S_{10}分别显著增加288.5%、239.4%、251.8%、244.3%(图3d)；第3茬，A_3S_7、A_5S_5、A_7S_3之间的粗蛋白产量无显著差异，但较A_0S_{10}分

别显著增加 38.3%、43.9%、48.8%(图 3f)。A_3S_7、A_5S_5、A_7S_3、$A_{10}S_0$之间的总粗蛋白产量无显著差异,但均显著高于A_0S_{10}。

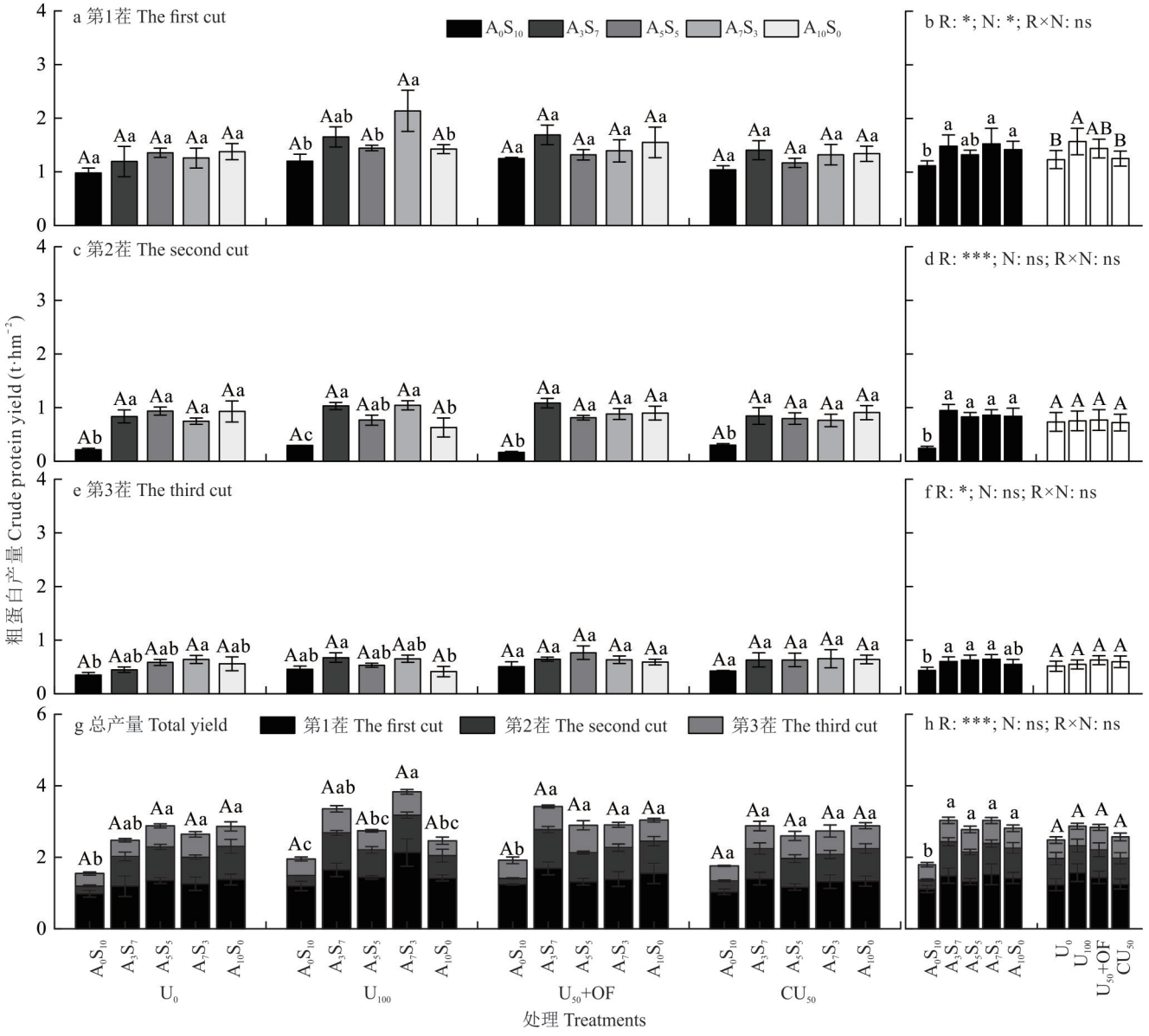


图 3　不同混播比例及施氮模式对混播系统饲草粗蛋白产量的影响

Fig. 3　Effects of different mixed sowing ratios and nitrogen application modes on the crude protein yield of forage grass in mixed sowing system

*: $P<0.05$. 下同 The same below.

2.3　不同混播比例及施氮模式对混播系统饲草干物质采食量(DMI)、相对饲喂价值(RFV)、相对牧草质量(RFQ)的影响

整体而言,混播比例对混播系统 3 茬饲草的 DMI、RFV 以及 RFQ 具有显著影响($P<0.05$),但施氮模式以及其与混播比例的交互作用对混播系统饲草的以上 3 个指标无显著影响(表 3)。DMI 平均值结果显示,$A_{10}S_0$较A_0S_{10}、A_3S_7、A_5S_5、A_7S_3分别显著提高 28.0%、14.3%、14.3%、10.3%。RFV 平均值结果显示,$A_{10}S_0$较A_0S_{10}、A_3S_7、A_5S_5、A_7S_3显著提高 42.7%、16.2%、17.5%、11.9%。RFQ 平均值结果显示,$A_{10}S_0$较A_0S_{10}、A_3S_7、A_5S_5、A_7S_3显著提高 58.9%、20.9%、22.6%、15.2%。在所有混播处理中,A_7S_3处理 DMI、RFV、RFQ 的平均值均达到最高。4

种施氮处理对以上3个指标无显著影响。

2.4 不同混播比例及施氮模式对混播系统饲草耗水量及干物质水分利用效率的影响

混播比例对混播系统饲草耗水量、干物质水分利用效率具有显著影响($P<0.05$),施氮模式及其与混播比例的交互作用对混播系统饲草以上两个指标无显著影响($P>0.05$)。A_0S_{10}处理混播草地的生育期耗水量较A_3S_7、A_5S_5、A_7S_3、$A_{10}S_0$处理分别显著提高10.3%、7.2%、7.9%、8.6%。A_3S_7、A_5S_5、A_7S_3、$A_{10}S_0$的干物质水分利用效率分别较A_0S_{10}显著提高58.3%、44.9%、55.5%、32.4%,A_3S_7、A_7S_3的干物质水分利用效率较$A_{10}S_0$分别显著提高19.5%、17.4%(图4)。

2.5 不同混播比例及施氮模式对混播系统饲草氮肥偏生产力的影响

混播比例及施氮模式对混播系统饲草氮肥偏生产力具有极显著影响($P<0.001$),二者交互作用对混播系统饲草氮肥偏生产力无显著影响(图5)。A_3S_7、A_5S_5、A_7S_3之间氮肥偏生产力无显著差异,但较A_0S_{10}分别显著提高41.1%、25.6%、40.4%。CU_{50}氮肥偏生产力较U_{100}、U_{50+OF}分别显著提高了86.6%、97.8%。

2.6 不同混播比例及施氮模式对混播系统饲草种间关系的影响

各混播处理LER均>1,表明相较于单播,混播模式具有显著的增产优势和更高的土地利用效率。CR_A均>1,这说明在混播系统中,紫花苜蓿竞争能力大于无芒雀麦(表4)。除第1茬A_3S_7、A_5S_5处理的CR_S>1外,不同混播处理CR_S均<1,RY_A均>1,说明紫花苜蓿的种内竞争大于其种间竞争;混播系统的RYT均>1,说明豆科、禾本科牧草之间在一定程度上避免了部分竞争,存在种间互补效应(表5)。3茬平均值结果显示:U_{100}处理的LER、RYT显著高于U_0、CU_{50}处理,U_{100}处理的CR_A、RY_A显著高于其他施氮处理,4种施氮处理对CR_S、RY_S无显著差异。

表3 不同混播比例及施氮模式下各处理的饲草干物质采食量、相对饲喂价值和相对牧草质量

Table 3 Dry matter intake, relative feeding value and relative forage quality under different mixed sowing ratios and nitrogen application modes treatments

项目 Item	处理 Treatments	干物质采食量 Dry matter intake (DMI)				相对饲喂价值 Relative feeding value (RFV)				相对牧草质量 Relative forage quality (RFQ)			
		第1茬 The first cut	第2茬 The second cut	第3茬 The third cut	平均 Average	第1茬 The first cut	第2茬 The second cut	第3茬 The third cut	平均 Average	第1茬 The first cut	第2茬 The second cut	第3茬 The third cut	平均 Average
混播比例 Mixed sowing ratios (R)	A_0S_{10}	2.2±0.1d	2.4±0.1b	2.9±0.2b	2.5±0.2c	113.5±3.0d	117.8±7.4b	146.1±10.8b	125.8±11.4c	154.3±5.8d	162.6±14.5b	217.8±21.1b	178.2±22.2c
	A_3S_7	2.5±0.1c	2.8±0.2a	3.2±0.2ab	2.8±0.2b	136.8±7.2c	145.0±10.1a	181.8±14.3a	154.5±15.7b	199.6±14.0c	215.7±19.8a	287.4±27.9a	234.2±30.7b
	A_5S_5	2.4±0.1c	2.9±0.1a	3.2±0.3ab	2.8±0.3b	130.0±6.1c	148.4±9.4a	180.1±18.1a	152.8±17.1b	186.4±12.0c	222.3±18.3a	284.2±35.2a	231.0±33.4b
	A_7S_3	2.7±0.1b	2.8±0.1a	3.3±0.2a	2.9±0.2b	149.6±7.8b	145.6±7.2a	185.9±11.1a	160.4±13.7b	224.8±15.3b	216.9±14.0a	295.4±21.6a	245.7±26.7b
	$A_{10}S_0$	3.4±0.1a	2.9±0.1a	3.4±0.2a	3.2±0.2a	192.9±7.7a	153.3±8.2a	192.4±13.5a	179.5±14.7a	309.1±15.1a	232.0±16.0a	308.2±26.3a	283.1±28.8a
施氮模式 Nitrogen application modes (N)	U_0	2.7±0.2A	2.8±0.2A	3.1±0.2A	2.9±0.3A	144.5±15.7A	146.2±12.1A	170.7±16.0A	153.8±18.1A	214.7±30.7A	218.0±23.5A	265.9±31.3A	232.9±35.3A
	U_{100}	2.7±0.3A	2.8±0.2A	3.3±0.3A	2.9±0.3A	146.7±17.4A	140.8±10.8A	179.7±19.8A	155.7±18.1A	219.0±34.0A	207.5±21.0A	283.3±38.7A	236.6±35.3A
	U_{50}+OF	2.6±0.2A	2.7±0.1A	3.2±0.2A	2.8±0.2A	143.2±14.7A	140.9±8.8A	177.9±13.9A	154.0±16.1A	212.2±28.8A	207.7±17.1A	279.9±0.2A	233.3±31.5A
	CU_{50}	2.7±0.3A	2.7±0.2A	3.3±0.2A	2.9±0.3A	143.9±20.3A	140.2±11.5A	180.7±15.5A	154.9±18.9A	213.5±39.6A	206.3±22.5A	285.3±0.2A	235.0±36.8A
R		***	***	*	***	***	*	***	***	***	*	***	***
N		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
R×N		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

***: $P<0.001$; *: $P<0.05$; ns: $P>0.05$. 不同大写字母表示不同施氮模式处理间差异显著,不同小写字母表示不同混播比例处理间差异显著,下同。Different uppercase letters showed significant differences among different nitrogen application mode, and different lowercase letters showed significant differences among different mixed sowing ratio, the same below.

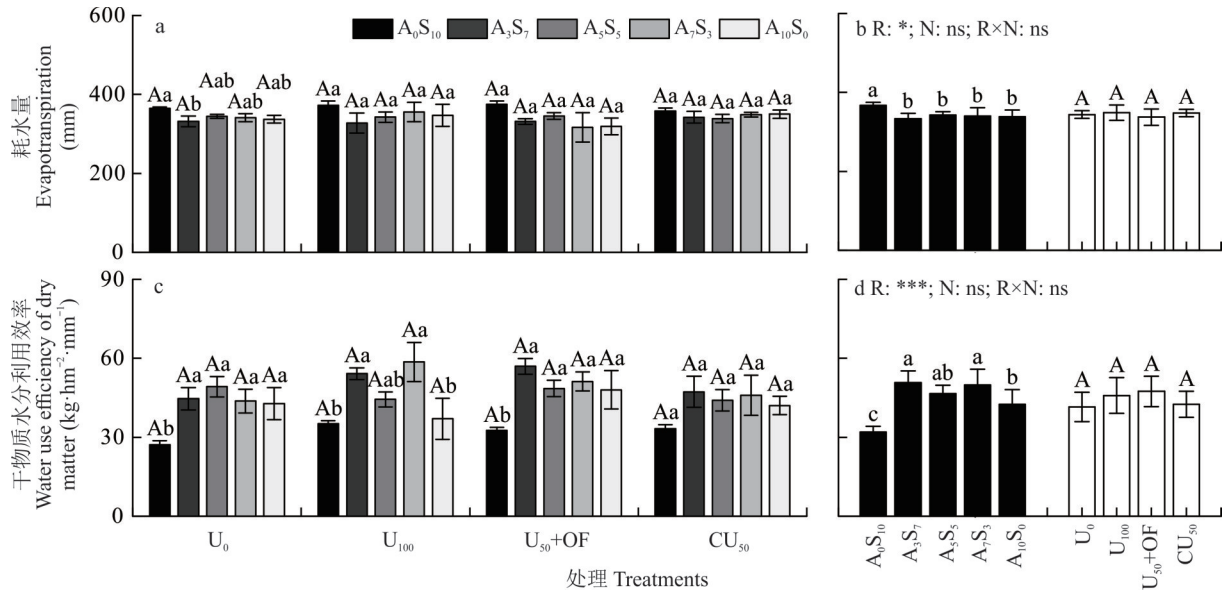


图 4　不同混播比例及施氮模式对混播系统饲草耗水量和干物质水分利用效率的影响

Fig. 4　Effects of different mixed sowing ratios and nitrogen application modes on evapotranspiration and water use efficiency of dry matter of forage grass in mixed sowing system

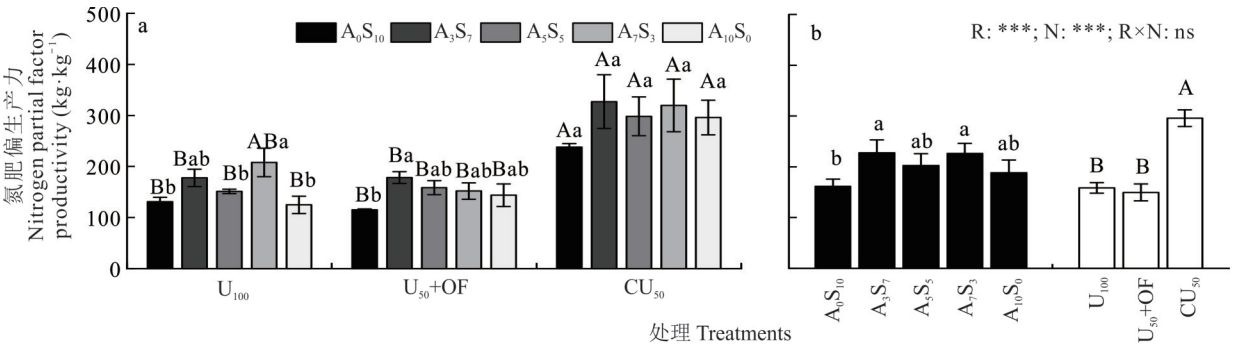


图 5　不同混播比例及施氮模式对混播系统饲草氮肥偏生产力的影响

Fig. 5　Effects of different mixed sowing ratios and nitrogen application modes on nitrogen partial factor productivity of forage grass in mixed sowing system

2.7　经济效益分析

混播比例对混播系统总产出、净利润以及产投比具有极显著影响($P<0.001$),但施氮模式以及其与混播比例的交互作用对以上 3 个指标无显著影响(表 6)。A_3S_7、A_5S_5、A_7S_3、$A_{10}S_0$处理之间的总产出无显著差异,但较A_0S_{10}处理显著增加 64.8%、55.5%、67.8%、47.7%;A_3S_7、A_5S_5、A_7S_3、$A_{10}S_0$处理之间的净利润无显著差异,但较A_0S_{10}处理显著增加 355.4%、301.2%、366.8%、250.8%;A_3S_7、A_5S_5、A_7S_3、$A_{10}S_0$处理之间的产投比无显著差异,但较A_0S_{10}处理显著增加 63.1%、53.3%、64.8%、43.4%。

2.8　混播系统适宜混播比例及施氮模式的确定

不同混播比例及施氮模式下饲草在产量、水氮利用以及种间关系方面表现出差异(图 6),A_3S_7、A_5S_5、A_7S_3处理的干草产量、土地当量比、相对产量总值较单播处理明显增高,RFV、RFQ、WUE 随着紫花苜蓿比例的增加表现出上升的趋势。综合排序结果下A_7S_3-U_{100}处理最高,即在A_7S_3-U_{100}处理下的综合表现最好(表 7)。

3　讨论

3.1　混播比例及施氮模式对混播草地产量的影响

牧草产量是评价草地生产力和经济效益的重要指标。合理的混播群落结构可使牧草高效利用环境资源,从

表4 不同混播比例及施氮模式下各处理的土地当量比和竞争率

Table 4 Land equivalent ratio and competition rate under different mixed sowing ratios and nitrogen application modes treatments

项目 Item	处理 Treatments	土地当量比 Land equivalent ratio (LER)				紫花苜蓿竞争率 Alfalfa competition rate (CR_A)				无芒雀麦竞争率 *B. inermis* competition rate (CR_S)			
		第1茬 The first cut	第2茬 The second cut	第3茬 The third cut	平均 Average	第1茬 The first cut	第2茬 The second cut	第3茬 The third cut	平均 Average	第1茬 The first cut	第2茬 The second cut	第三茬 The third cut	平均 Average
混播比例 Mixed sowing ratios (R)	A_3S_7	1.2± 0.1a	1.7± 0.1a	1.3± 0.2a	1.4± 0.1a	1.4± 0.2a	2.7± 0.5a	2.2± 0.5a	2.0± 0.3a	1.1± 0.3a	0.7± 0.2a	0.6± 0.1a	0.8± 0.3a
	A_5S_5	1.2± 0.1a	1.5± 0.1a	1.3± 0.1a	1.3± 0.1a	1.6± 0.4a	3.7± 0.3a	3.2± 0.7a	2.2± 0.3a	1.1± 0.2a	0.8± 0.2a	0.4± 0.1a	0.8± 0.1a
	A_7S_3	1.2± 0.1a	1.5± 0.1a	1.4± 0.2a	1.4± 0.1a	2.5± 0.4a	4.2± 0.6a	3.4± 0.8a	2.9± 0.5a	0.6± 0.1a	0.5± 0.1a	0.4± 0.1a	0.5± 0.2a
施氮模式 Nitrogen application modes (N)	U_0	1.2± 0.1A	1.5± 0.1BC	1.2± 0.1AB	1.3± 0.1B	2.1± 0.5A	1.7± 0.3B	2.1± 0.3B	2.0± 0.3B	0.7± 0.2A	0.8± 0.2A	0.6± 0.1A	0.7± 0.1A
	U_{100}	1.3± 0.1A	1.9± 0.1A	1.7± 0.3A	1.6± 0.1A	1.9± 0.4A	3.9± 0.8A	4.8± 0.3A	3.5± 0.7A	0.7± 0.1A	0.4± 0.1A	0.3± 0.1A	0.5± 0.1A
	U_{50}+OF	1.1± 0.1A	1.7± 0.1AB	1.3± 0.1AB	1.4± 0.1AB	1.7± 0.5A	1.5± 0.2B	2.3± 0.3B	1.8± 0.2B	1.0± 0.2A	1.0± 0.3A	0.5± 0.1A	0.8± 0.2A
	CU_{50}	1.1± 0.1A	1.2± 0.1C	1.1± 0.1B	1.1± 0.1B	1.5± 0.4A	2.0± 0.3B	2.6± 0.4AB	2.1± 0.2B	1.3± 0.4 A	0.6± 0.1A	0.5± 0.1A	0.8± 0.1A
R		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
N		ns	**	ns	*	ns	**	ns	*	ns	ns	ns	ns
R×N		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

**: $P<0.01$. 下同 The same below.

表5 不同混播比例及施氮模式下各处理的相对产量

Table 5 Relative yield under different mixed sowing ratios and nitrogen application modes treatments

项目 Item	处理 Treatments	紫花苜蓿相对产量 Alfalfa relative yield (RY_A)				无芒雀麦相对产量 *B. inermis* relative yield (RY_S)				相对产量总值 Total relative yield (RYT)			
		第1茬 The first cut	第2茬 The second cut	第3茬 The third cut	平均 Average	第1茬 The first cut	第2茬 The second cut	第3茬 The third cut	平均 Average	第1茬 The first cut	第2茬 The second cut	第3茬 The third cut	平均 Average
混播比例 Mixed sowing ratios (R)	A_3S_7	2.1± 0.2a	3.6± 0.5a	2.9± 0.6a	2.9± 0.3a	0.8± 0.1b	0.9± 0.1b	0.6± 0.1b	0.8± 0.1b	1.2± 0.1a	1.7± 0.1a	1.3± 0.2a	1.4± 0.1a
	A_5S_5	1.3± 0.2b	1.8± 0.2b	1.8± 0.2ab	1.6± 0.1b	1.0± 0.1ab	1.2± 0.2ab	0.7± 0.1b	1.0± 0.1b	1.2± 0.1a	1.5± 0.1a	1.3± 0.1a	1.3± 0.1a
	A_7S_3	1.2± 0.1b	1.5± 0.2b	1.5± 0.3b	1.4± 0.2b	1.3± 0.2a	1.5± 0.1a	1.2± 0.1a	1.3± 0.1a	1.2± 0.1a	1.5± 0.1a	1.4± 0.2a	1.4± 0.1a
施氮模式 Nitrogen application modes (N)	U_0	1.6± 0.2AB	1.9± 0.2B	1.8± 0.3AB	1.8± 0.2B	0.9± 0.1A	1.3± 0.2AB	0.9± 0.1A	1.1± 0.1A	1.2± 0.1A	1.5± 0.1BC	1.2± 0.1AB	1.3± 0.1B
	U_{100}	1.7± 0.2A	3.3± 0.7A	3.0± 0.8A	2.7± 0.5A	1.1± 0.2A	0.9± 0.1B	0.7± 0.1A	0.9± 0.1A	1.3± 0.1A	1.9± 0.1A	1.7± 0.1A	1.6± 0.1A
	U_{50}+OF	1.5± 0.4AB	2.2± 0.4B	1.9± 0.2AB	1.9± 0.3B	1.1± 0.1A	1.6± 0.3A	0.9± 0.1A	1.2± 0.1A	1.1± 0.1A	1.7± 0.1AB	1.3± 0.1AB	1.4± 0.1AB
	CU_{50}	1.3± 0.2B	1.8± 0.3B	1.6± 0.2B	1.6± 0.2B	1.1± 0.2A	1.0± 0.2AB	0.7± 0.1A	1.0± 0.1A	1.1± 0.1A	1.2± 0.1C	1.1± 0.1B	1.1± 0.1B
R		**	***	*	***	*	*	***	***	ns	ns	ns	ns
N		ns	**	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	*
R×N		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

表 6　不同混播比例及施氮模式下各处理的经济效益比较

Table 6　Comparison of economic benefits under different mixed sowing ratios and nitrogen application modes treatments

项目 Item	处理 Treatments	总产出 Total output (CNY·hm^{-2})	种子投入 Seed input (CNY·hm^{-2})	肥料投入 Fertilizer input (CNY·hm^{-2})	劳动力投入 Labor input (CNY·hm^{-2})	净利润 Net profit (CNY·hm^{-2})	产投比 Input-output ratio
混播比例 Mixed sowing ratios (R)	A_0S_{10}	21199.5±759.8b	1600.0	6059.2	9722.3	3818.1±734.6b	1.2±0.04b
	A_3S_7	34928.4±1970.4a	1759.0	6059.2	9722.3	17387.9±1990.7a	2.0±0.1a
	A_5S_5	32963.6±1315.3a	1865.1	6059.2	9722.3	15317.0±1390.8a	1.9±0.1a
	A_7S_3	35575.7±2467.3a	1971.1	6059.2	9722.3	17823.2±2477.6a	2.0±0.1a
	$A_{10}S_0$	31304.9±1963.7a	2130.2	6059.2	9722.3	13393.3±1939.0a	1.8±0.1a
施氮模式 Nitrogen application modes (N)	U_0	29609.2±2025.3A	2331.4	5479.2	9722.3	12542.7±1997.6A	1.7±0.1A
	U_{100}	33286.0±2257.2A	2331.4	5941.1	9722.3	15757.6±2239.2A	1.9±0.1A
	U_{50}+OF	31369.7±1950.4A	2331.4	5710.1	9722.3	14072.3±1944.6A	1.8±0.1A
	CU_{50}	30512.8±2096.4A	2331.4	7106.4	9722.3	11819.0±2074.9A	1.6±0.1A
R		***	—	—	—	***	***
N		ns	—	—	—	ns	ns
R×N		ns	—	—	—	ns	ns

—：种子、肥料及劳动力投入为各处理的汇总数据，无生物学重复，故未进行方差分析及差异显著性标记。Seed, fertilizer and labor input were the summary data of each treatment, and there was no biological repetition, so no analysis of variance and significant difference markers were performed.

而获得较高的产量[24]。本试验表明，A_3S_7、A_5S_5、A_7S_3处理下混播系统产量显著高于无芒雀麦单播，A_3S_7、A_7S_3处理产量显著高于紫花苜蓿单播，紫花苜蓿单播产量显著高于无芒雀麦单播。刘启宇等[25]的研究也发现相同的规律，苜蓿与3种多年生禾草混播后的产量在不同茬次均高于单播处理，且土地当量比、相对产量总值均大于1，说明豆禾混播在形态和生理上存在互补效应，增产效果明显。形态上，豆科植物较深的根系可以吸收土壤深层的水分和养分[26]，生理上，豆科牧草通过与根瘤菌的共生固氮作用将大气氮转化为植物可利用的形态，其中部分氮素转移至禾本科牧草中，减少了资源同质化竞争，提高了混播牧草产量。然而，独双双等[27]研究表明，建植第3年苜蓿单播草地干草产量最高，显著高于老芒麦(*Elymus sibiricus*)单播及其与苜蓿混播草地的干草产量，本试验的研究结果与其不完全一致，原因可能与栽培地气候特征、牧草种类、建植年限、试验施肥处理等多种因素有关。值得注意的是，本研究第1茬牧草刈割时无芒雀麦单播产量与各混播处理产量无显著性差异，但在第2和3茬刈割时各混播处理及紫花苜蓿单播产量显著高于无芒雀麦单播，这与张永亮等[28]的研究结果相似。这是因为第1次刈割时无芒雀麦竞争率大于1，而第2、3次刈割无芒雀麦竞争率均小于1，无芒雀麦的竞争率随刈割次数的增加呈降低趋势。土地当量比是评价混播系统对土地资源利用效率的指标，本研究中混播处理土地当量比、相对产量总值均＞1，表明混播系统通过种间互补实现了更高的土地利用率，维持了更稳定的生产力。这与郭川等[3]的研究结果一致。竞争率可以反映出两种牧草在混播模式下的竞争强度，本研究中紫花苜蓿竞争率均＞1，这表明紫花苜蓿在种间竞争中占优势，抑制无芒雀麦的生长，这与张永亮等[28]和兰吉勇等[29]的研究结果一致。

施用氮肥是实现牧草提质增产的重要措施。然而，本试验中4种施氮模式的干草产量无显著差异，这可能是因为试验区降水量偏少、潜在蒸发量高、土壤水分不足等因素限制了作物对肥料养分的有效吸收，从而削弱了施肥的增产效应。本试验结果表明，U_{100}处理的干草产量和U_{50}+OF、CU_{50}无显著差异，但有研究证实了有机－无机肥配施可以显著提高苜蓿的干草产量[30-31]；有机－无机肥配施的增产效果取决于有机肥替代化肥的比例，单施有机肥时，产量反而显著降低16%[32]；在氮肥用量不变的情况下，有机肥替代部分化肥可以保证产量不降低[33]；在减少30%氮肥用量的情况下，单施缓释氮肥仍能维持玉米(*Zea mays*)产量稳定[34]；缓释氮肥减氮25%处理的作物产量显著高于普通尿素高氮模式，产量增幅达10.3%～12.0%[35]。这些研究结果均证明了有机－无机肥配施、

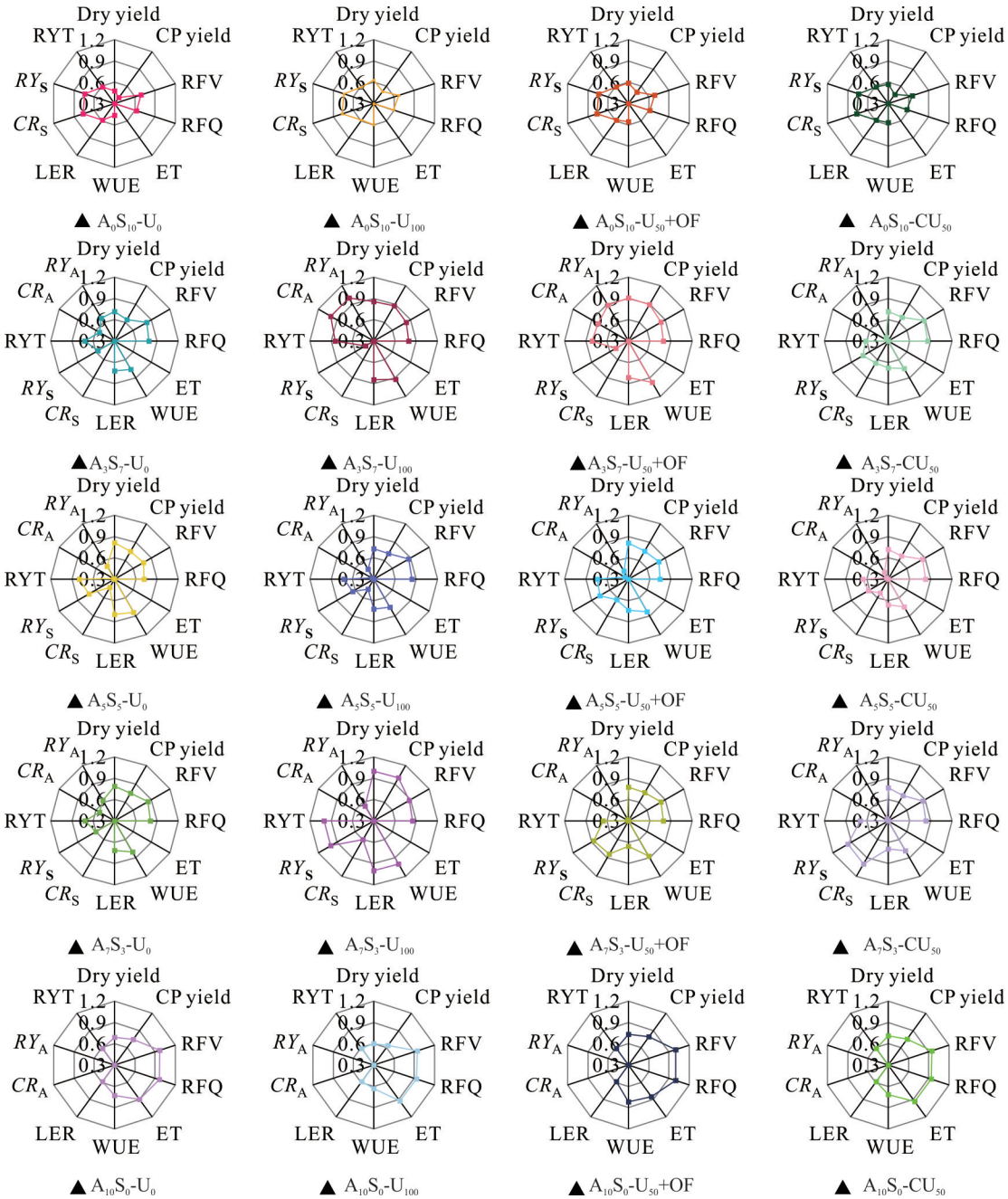


图6 不同处理下饲草主要指标的雷达图

Fig. 6 Radar chart of forage main indexes under different treatments

Dry yield: 干物质产量 Dry matter yield; CP yield: 粗蛋白产量 Crude protein yield; RFV: 相对饲喂价值 Relative feed value; RFQ: 相对牧草质量 Relative forage quality; ET: 耗水量 Evapotranspiration; WUE: 干物质水分利用效率 Water use efficiency of dry matter; LER: 土地当量比 Land equivalent ratio; CR_A: 紫花苜蓿竞争率 Alfalfa competition rate; CR_S: 无芒雀麦竞争率 *B. inermis* competition rate; RY_A: 紫花苜蓿相对产量 Alfalfa relative yield; RY_S: 无芒雀麦相对产量 *B. inermis* relative yield; RYT: 相对产量总值 Total relative yield.

施用缓释肥可以实现减肥不减产的效果,是实现作物高产、环保且可持续发展的有效途径[36],也证明了科学调控施肥模式及氮肥用量是平衡生产效益与资源投入的关键[37]。

3.2 混播比例及施氮模式对牧草水氮资源利用的影响

在水分作为作物生长关键限制因子的半干旱地区,水分亏缺会显著抑制人工草地的生长发育,进而抑制草地生物量的有效积累[38]。有研究发现,小麦(*Triticum aestivum*)和苜蓿间套作较苜蓿单播增加了总生物量,降低了作物耗水量,从而提高了水分利用效率[39];紫花苜蓿－禾本科牧草混播草地的水分利用效率较禾本科牧草单作草

表 7　不同处理的综合评价结果

Table 7　Comprehensive evaluation results of different treatments

处理 Treatments	面积 Area	周长 Perimeter	V_{i1}	V_{i2}	Y	排序 Rank	处理 Treatments	面积 Area	周长 Perimeter	V_{i1}	V_{i2}	Y	排序 Rank
A_0S_{10}-U_0	1.17	4.44	0.55	0.75	0.64	13	A_7S_3-U_0	1.38	5.03	0.64	0.68	0.66	11
A_0S_{10}-U_{100}	1.30	4.50	0.61	0.81	0.70	8	A_7S_3-U_{100}	2.14	6.37	1.00	0.66	0.81	1
A_0S_{10}-U_{50}+OF	1.29	4.50	0.60	0.80	0.69	9	A_7S_3-U_{50}+OF	1.43	5.79	0.67	0.54	0.60	14
A_0S_{10}-CU_{50}	1.23	4.39	0.57	0.80	0.68	10	A_7S_3-CU_{50}	1.50	6.31	0.70	0.47	0.58	15
A_3S_7-U_0	1.40	4.66	0.65	0.81	0.73	6	$A_{10}S_0$-U_0	1.43	4.60	0.67	0.85	0.75	4
A_3S_7-U_{100}	1.77	6.56	0.83	0.52	0.65	12	$A_{10}S_0$-U_{100}	1.29	4.45	0.60	0.81	0.70	8
A_3S_7-U_{50}+OF	1.79	5.90	0.84	0.65	0.74	5	$A_{10}S_0$-U_{50}+OF	1.52	4.75	0.71	0.85	0.78	2
A_3S_7-CU_{50}	1.51	4.76	0.71	0.84	0.77	3	$A_{10}S_0$-CU_{50}	1.43	4.61	0.67	0.85	0.75	4
A_5S_5-U_0	1.49	4.94	0.70	0.77	0.73	6							
A_5S_5-U_{100}	1.43	4.69	0.67	0.82	0.74	5							
A_5S_5-U_{50}+OF	1.52	5.05	0.71	0.75	0.73	6							
A_5S_5-CU_{50}	1.36	4.58	0.64	0.81	0.72	7							

V_{i1}：面积评价值 Area evaluation value；V_{i2}：周长评价值 Perimeter evaluation value；Y：综合评价值 Comprehensive evaluation value.

地显著提高了 25%[40]。本研究中，A_3S_7、A_7S_3处理的干物质水分利用效率显著高于单播处理，这与张会丽等[41]和 Kang 等[42]的研究结果相似，一方面是因为无芒雀麦与紫花苜蓿混播时增加了叶面积指数，混播形成遮荫可减少地表水分蒸发，同时混播系统中紫花苜蓿比例的降低也有效减少了混播草地的耗水量。另一方面，A_3S_7、A_7S_3处理的干物质产量显著高于紫花苜蓿单播和无芒雀麦单播，这也使得干物质水分利用效率增加。因此，设置合理的种植模式可充分利用有限的降水资源，从而提高牧草的水分利用效率[43]。适量施氮可以促进作物根系生长并提高产量，从而提升水分利用效率。然而本研究中 U_{100}处理与减氮处理（U_{50}+OF、CU_{50}）的水分利用效率无显著差异，原因可能是试验地水分亏缺，氮素的增产效应难以实现。然而有研究发现，有机肥与化肥配施能显著提高旱地小麦的水分利用效率，且丰水年较干旱年水分利用效率更高[44]；还有研究表明，长期施用有机肥较单施化肥处理春小麦水分利用效率提升了 5.91%[45]，本试验研究结果与其不一致。这是因为本试验地处半干旱区，且处于混播草地建植的第 2 年，有机肥对混播系统土壤质量和草地生产力的提升效果还未充分展现，未来尚需通过长期定位试验探究有机肥施用的效果。

合理的牧草种植模式可以实现有限资源条件下的产量最大化。本研究中，A_3S_7、A_5S_5、A_7S_3处理的氮肥偏生产力显著高于 A_0S_{10}处理，这与汪爱霞等[26]的研究结果一致。这是因为豆禾混播牧草产量显著高于单播，从而显著提高了混播牧草的氮肥偏生产力。科学施用氮肥能够有效协调作物需求与土壤养分供应，实现产量最大化[46]。然而在干旱地区，降水量少导致氮素吸收与转移受阻，进而降低作物产量，从而导致氮肥偏生产力下降[47]。有研究发现，过量施氮会降低紫花苜蓿的氮肥偏生产力，并使土壤硝态氮大量积累，从而引起氮素损失及环境污染风险[48]；随着施氮量的增加，紫花苜蓿氮肥偏生产力逐渐降低[49]。本研究中，CU_{50}处理氮肥偏生产力较 U_{100}、U_{50}+OF 处理显著提高，可见当氮肥施用量过高时会降低氮肥偏生产力，导致氮素资源浪费严重。

4　结论

本研究结果表明，混播比例是影响紫花苜蓿－无芒雀麦混播草地产量、水分利用效率及种间关系的关键因素，而施氮模式显著调控氮肥偏生产力。紫花苜蓿与无芒雀麦 7∶3 进行混播，同时配施 100 kg N·hm^{-2}普通尿素（A_7S_3-U_{100}处理）时，混播系统可以获得较高的干草产量、粗蛋白产量、水分利用效率及总利润。雷达图综合评价结果表明该处理为紫花苜蓿－无芒雀麦最优的混播方案，可为陇中黄土高原半干旱区饲草高效生产提供技术支撑。

参考文献 References:

[1] Ministry of Agriculture and Rural Affairs. The 14th five-year plan for the development of forage industry in China. (2022-02-22) [2025-09-10]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/01/content_5676205.htm.
农业农村部. “十四五”全国饲草产业发展规划. (2022-02-22)[2025-09-10]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/01/content_5676205.htm.

[2] Wu S W, Nan L L, Chen X S, *et al*. Effects of different alfalfa-grass mixed sowing methods on hay yield and soil nutrients. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(3): 975-983.
吴世文, 南丽丽, 陈孝善, 等. 不同紫花苜蓿-禾草混播方式对干草产量及土壤养分的影响. 草地学报, 2025, 33(3): 975-983.

[3] 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.

[4] Fang R Y, Zeng H G, Zheng W J, *et al*. Study on the productivity of alfalfa and smooth bromegrass in mono-culture and mixed-culture under two drip irrigation methods. Journal of Grassland and Forage Science, 2023, 270(1): 40-44.
方瑞元, 曾翰国, 郑万菊, 等. 两种滴灌方式下紫花苜蓿与无芒雀麦单播与混播草地第1茬牧草生产力研究. 草学, 2023, 270(1): 40-44.

[5] Cui Z. Effects of artificial grasslands on soil quality and soil moisture of farmland in semi-arid areas. Yangling: Northwest A & F University, 2019.
崔增. 人工草地对半干旱区农田土壤质量改善及水分效应研究. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.

[6] 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.

[7] 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.

[8] Mon J, Bronson K F, Hunsaker D J, *et al*. Interactive effects of nitrogen fertilization and irrigation on grain yield, canopy temperature, and nitrogen use efficiency in overhead sprinkler-irrigated durum wheat. Field Crops Research, 2016, 191: 54-65.

[9] Wang H D, Wu L F, Cheng M H, *et al*. Coupling effects of water and fertilizer on yield, water and fertilizer use efficiency of drip-fertigated cotton in northern Xinjiang, China. Field Crops Research, 2018, 219: 169-179.

[10] Wang H Y, Zhang Y T, Chen A Q, *et al*. An optimal regional nitrogen application threshold for wheat in the north China plain considering yield and environmental effects. Field Crops Research, 2017, 207: 52-61.

[11] Chen J, Arafat Y, Wu L K, *et al*. Shifts in soil microbial community, soil enzymes and crop yield under peanut/maize intercropping with reduced nitrogen levels. Applied Soil Ecology, 2018, 124: 327-334.

[12] Liang G P. Nitrogen fertilization mitigates global food insecurity by increasing cereal yield and its stability. Global Food Security, 2022, 34: 100652.

[13] Sun Y B, Zhang M, Zheng W K, *et al*. Effects of controlled release nitrogen fertilizer on yield and soil nutrient regime of wheat-corn rotation system. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(4): 115-121.
孙云保, 张民, 郑文魁, 等. 控释氮肥对小麦-玉米轮作产量和土壤养分状况的影响. 水土保持学报, 2014, 28(4): 115-121.

[14] Zheng W K, Zhang M, Liu Z G, *et al*. Combining controlled-release urea and normal urea to improve the nitrogen use efficiency and yield under wheat-maize double cropping system. Field Crops Research, 2016, 197: 52-62.

[15] Li W W, Ahmad S, Liu D, *et al*. Subsurface banding of blended controlled-release urea can optimize rice yields while minimizing yield-scaled greenhouse gas emissions. The Crop Journal, 2023, 11: 914-921.

[16] Xiao Z M, Fan X, Ma D X, *et al*. Determination of crude protein in feed: GB/T 6432-2018. Beijing: China Standard Press, 2018.
肖志明, 樊霞, 马东霞, 等. 饲料中粗蛋白的测定: GB/T 6432-2018. 北京: 中国标准出版社, 2018.

[17] Van Soest P J, Robertson J B, Lewis B A, *et al*. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and non-starch polysaccharides in relation to animal nutrition. Journal of Dairy Science, 1991, 74(10): 3583-3597.

[18] Lou S N, Hou F J, Ren J Z. Evaluation of grassland agricultural productivity by food equivalent unit. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(12): 1－16.
娄珊宁, 侯扶江, 任继周. 用食物当量评价草地农业的生产力. 草业学报, 2019, 28(12): 1－16.

[19] Gao W, Shou N, Jiang C Z, *et al*. Effect of nitrogen application rate on dry matter accumulation, allocation and water use efficiency of forage sorghum. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(9): 26－35.
高玮, 受娜, 蒋丛泽, 等. 施氮量对饲用高粱干物质积累、分配及水分利用效率的影响. 草业学报, 2022, 31(9): 26－35.

[20] Cai Q, Sun Z X, Wang W B, *et al*. Yield and water use of maize/soybean intercropping systems in semi-arid western Liaoning. Chinese Journal of Agrometeorology, 2022, 43(7): 551－562.
蔡倩, 孙占祥, 王文斌, 等. 辽西半干旱区玉米大豆间作对作物产量及水分利用的影响. 中国农业气象, 2022, 43(7): 551－562.

[21] 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, 2006, 100(2/3): 249－256.

[22] Fowler N. Competition and coexistence in a North Carolina grassland: Ⅲ. mixtures of component species. The Journal of Ecology, 1982, 70(1): 77－92.

[23] Wu S H, Li X, Yang Y F, *et al*. Reduction in chemical fertilizer rates by applying bio-organic fertilizer for optimization yield and quality of *Hemerocallis citrina* Baroni. Agronomy, 2024, 14(8): 1627.

[24] Wang X, Zeng Z H, Zhu B, *et al*. Effect of different intercropping and mixture modes on forage yield and quality of oat and common vetch. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(11): 1892－1895.
王旭, 曾昭海, 朱波, 等. 箭筈豌豆与燕麦不同间作混播模式对产量和品质的影响. 作物学报, 2007, 33(11): 1892－1895.

[25] 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.

[26] Wang A X, Ma Y L, Qi G P, *et al*. Water and nitrogen regulation patterns for productivity improvement of *Bromus inermis* and alfalfa mixed grassland. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 322－330.
汪爱霞, 马彦麟, 齐广平, 等. 无芒雀麦与苜蓿混播草地生产力提升的水氮调控模式. 水土保持学报, 2022, 36(2): 322－330.

[27] Du S S, Qi J, Li X, *et al*. Effect of alfalfa and *Elymus sibiricus* mixture on forage yield and soil nutrients. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(2): 74－82.
独双双, 祁娟, 李霞, 等. 苜蓿与老芒麦混播对牧草产量及土壤养分的影响. 中国草地学报, 2024, 46(2): 74－82.

[28] Zhang Y L, Luo X M, Wu M H, *et al*. Effect of alfalfa-grass mix combinations on the forage productivity during the sowing year in the Horqin Sandy Land. Pratacultural Science, 2018, 35(4): 882－890.
张永亮, 骆秀梅, 吴明浩, 等. 科尔沁沙地苜蓿－禾草混播组合对播种当年牧草生产性能的影响. 草业科学, 2018, 35(4): 882－890.

[29] Lan J Y, Zhang X Z, Zhang L P, *et al*. Analysis of interspecific competition in community of mixedly-sown alfalfa and awnless brome. Acta Agriculturae Jiangxi, 2016, 28(8): 13－17.
兰吉勇, 张学洲, 张丽萍, 等. 混播紫花苜蓿与无芒雀麦群落种间竞争分析. 江西农业学报, 2016, 28(8): 13－17.

[30] Cai L, Luo Z Z, Wang L L, *et al*. Meta-analysis on response of soil moisture, nutrients, and alfalfa yield to fertilization based on location test data. Pratacultural Science, 2021, 38(1): 160－170.
才璐, 罗珠珠, 王林林, 等. 施肥对苜蓿土壤水分、养分和产量的影响:基于定位试验数据的Meta分析. 草业科学, 2021, 38(1): 160－170.

[31] Yang Y Y, Gao Z L, Wang X J. Impacts of organic and inorganic fertilizations on alfalfa yield, soil nitrate and greenhouse gas emissions. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(3): 822－828.
杨园园, 高志岭, 王雪君. 有机、无机氮肥施用对苜蓿产量、土壤硝态氮和温室气体排放的影响. 应用生态学报, 2016, 27(3): 822－828.

[32] Hou L L, Wang W, Cui X J, *et al*. Effects of organic and inorganic combined application on yield, soil nutrients and enzyme activities of winter wheat. Xinjiang Agricultural Sciences, 2024, 61(8): 1845－1852.
候丽丽, 王伟, 崔新菊, 等. 有机无机肥配施对冬小麦产量和土壤养分及酶活性的影响. 新疆农业科学, 2024, 61(8): 1845－1852.

[33] Wei W L, Liu L, Qiu H H. Effects of different organic resources application combined with chemical fertilizer on yield and nitrogen use efficiency of main grain crops in China. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(8): 1384－1394.
魏文良, 刘路, 仇恒浩. 有机无机肥配施对我国主要粮食作物产量和氮肥利用效率的影响. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(8): 1384－1394.

[34] Guo J J, Zhang F C, Wang H D, *et al*. Effects of slow-release nitrogen fertilizer and urea blending on maize growth and nitrogen uptake under different nitrogen application rates. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(20): 3930－3943.
郭金金, 张富仓, 王海东, 等. 不同施氮量下缓释氮肥与尿素掺混对玉米生长与氮素吸收利用的影响. 中国农业科学, 2017, 50(20): 3930－3943.

[35] Du L N, Li W J, Wang X L, *et al*. Effect of slow-release nitrogen fertilizer with urea on yield and nitrogen use efficiency of winter wheat. Agricultural Research in the Arid Areas. (2025-10-13)[2025-11-09]. https://link. cnki. net/urlid/61. 1088. S. 20251013. 1352. 002.
杜璐宁, 李文净, 王小玲, 等. 缓释氮肥配施尿素对冬小麦产量和氮肥利用效率的影响. 干旱地区农业研究. (2025-10-13)[2025-11-09]. https://link. cnki. net/urlid/61. 1088. S. 20251013. 1352. 002.

[36] Zheng W K, Liu Z G, Zhang M, *et al*. Improving crop yields, nitrogen use efficiencies, and profits by using mixtures of coated controlled-released and uncoated urea in a wheat-maize system. Field Crops Research, 2017, 205: 106－115.

[37] Li S Y, Sun Y L, Zhao J W, *et al*. Effects of nitrogen addition on microbial quantity, enzyme activity in rhizosphere soil and alfalfa hay yield. Chinese Journal of Grassland, 2022, 44(4): 113－120.
李生仪, 孙延亮, 赵俊威, 等. 施氮对苜蓿根际土壤微生物数量、酶活性及干草产量的影响. 中国草地学报, 2022, 44(4): 113－120.

[38] Lu J Y, Xiong J B, Zhang H S, *et al*. Effects of water stress on yield, quality and trace element composition of alfalfa. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(8): 126－133.
陆姣云, 熊军波, 张鹤山, 等. 水分胁迫对紫花苜蓿产量、品质和微量元素的影响. 草业学报, 2020, 29(8): 126－133.

[39] Li E H, Mu Y Y, He Y N, *et al*. Effects of wheat/alfalfa intercropping systems on soil moisture and water utilization efficiency. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(1): 54－58, 65.
李恩慧, 穆阳阳, 何亚男, 等. 小麦和苜蓿套作种植对土壤水分及作物水分利用效率的影响. 水土保持研究, 2020, 27(1): 54－58, 65.

[40] Dhakal M, West C P, Villalobos C, *et al*. Interseeding alfalfa into native grassland for enhanced yield and water use efficiency. Agronomy Journal, 2020, 112(3): 1931－1942.

[41] Zhang H L, Zhu L, Xu X. Effect of mixed sowing of graminaceous and leguminous forages under different water regimes in Ningxia central semi-arid belt. Pratacultural Science, 2017, 34(4): 777－787.
张会丽, 朱林, 许兴. 宁夏中部半干旱带不同灌溉量下的禾豆混播效果. 草业科学, 2017, 34(4): 777－787.

[42] Kang Y X, Qi G P, Jia Q, *et al*. Appropriate water-nitrogen regulation mode to improve productivity of mixed-sowing grassland of *Bromus inermis* and alfalfa. Water, 2023, 15(6): 1124.

[43] Li Q Q, Wang X Y, Li M H, *et al*. Effects of wheat/maize strip intercropping and nitrogen fertilizer on crops water consumption and water use. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2021, 30(6): 819－828.
李倩倩, 王星运, 李孟浩, 等. 小麦玉米间作和氮肥对作物耗水特性及水分利用的影响. 西北农业学报, 2021, 30(6): 819－828.

[44] Zhang J, Dang J Y, Zhang D Y, *et al*. Response of yield, quality and water use efficiency of wheat to different combinations of organic manures and chemical fertilizers under different yearly precipitations. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(9): 1625－1635.
张晶, 党建友, 张定一, 等. 不同降水年型下小麦产量、品质及水分利用效率对有机无机肥配施的响应. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(9): 1625－1635.

[45] Zhang P L, Guo T W, Liu X W, *et al*. Effects of long-term organic manure application on yield and water use efficiency of spring wheat and soil organic carbon in semi-arid area. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2024(1): 105－112.
张平良, 郭天文, 刘晓伟, 等. 长期施用有机肥对半干旱区春小麦产量及其水分利用效率和土壤有机碳的影响. 中国土壤与肥料, 2024(1): 105－112.

[46] Gu X B, Cai H J, Du Y D, *et al*. Effects of film mulching and nitrogen fertilization on rhizosphere soil environment, root growth and nutrient uptake of winter oilseed rape in northwest China. Soil and Tillage Research, 2019, 187(4): 194－203.

[47] Dugo V G, Durand J L, Gastal F. Water deficit and nitrogen nutrition of crops. Agronomy for Sustainable Development, 2010,

30(3): 529－544.

[48] Hu W, Zhang Y H, Li P, *et al*. Effects of water and nitrogen supply under drip irrigation on the production performance rate and water and nitrogen use efficiency of alfalfa. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(2): 41－50.
胡伟, 张亚红, 李鹏, 等. 水氮供应对地下滴灌紫花苜蓿生产性能及水氮利用效率的影响. 草业学报, 2019, 28(2): 41－50.

[49] Sun M, Yan A, Li J Y, *et al*. Effects of different water and nitrogen treatments on growth, quality and water and fertilizer use efficiency of alfalfa. Xinjiang Agricultural Sciences, 2024, 61(6): 1512－1526.
孙萌, 颜安, 李靖言, 等. 不同水氮处理对紫花苜蓿生长发育、品质及水肥利用效率的影响. 新疆农业科学, 2024, 61(6): 1512－1526.