



高薇薇,王斌,苏煜钊,王腾飞,张译尹,兰剑. 不同播量一年生苜蓿与燕麦混播对草地生产性能和营养价值的影响[J]. 中国农业大学学报,2026,31(03):97-109.
GAO Weiwei, WANG Bin, SU Yuzhao, WANG Tengfei, ZHANG Yiyin, LAN Jian. Effects of different sowing rates of annual *Medicago scutellata* and *Avena sativa* mixed sowing on grassland productivity and nutritional value[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(03): 97-109.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.03.09

不同播量一年生苜蓿与燕麦混播对草地生产性能和 营养价值的影响

高薇薇^{1,2} 王斌¹ 苏煜钊^{1,2} 王腾飞¹ 张译尹¹ 兰剑^{1*}

(1. 宁夏大学 林业与草业学院, 银川 750021;

2. 环县畜牧兽医局, 甘肃 庆阳 745707)

摘要 为探究适宜西北灌区的一年生苜蓿与燕麦混播最佳播种量及其对草地生产力和营养价值的影响,于2024年在宁夏引黄灌区开展田间试验,试验设置燕麦播种量固定为120.0 kg/hm²,与一年生苜蓿的6个播种量(12.0、18.0、24.0、30.0、36.0和42.0 kg/hm²,分别记为IM₁、IM₂、IM₃、IM₄、IM₅和IM₆处理)进行混播,以一年生苜蓿单播(SM, 30.0 kg/hm²)和燕麦单播(SO, 180.0 kg/hm²)作为对照。通过2茬播种与收获,系统测定草地生产性能、营养品质及种间关系等指标。结果表明:1)燕麦和苜蓿混播显著提高了草地生产力,其中IM₄处理表现最佳,2茬干草总产量达20.93 t/hm²,较燕麦单播增产24.2%,粗蛋白产量提升44.7%(达2.36 t/hm²);IM₄处理的土地当量比为1.33,土地利用率提高了33%。2)尽管IM₆处理的粗蛋白含量与相对饲喂价值最高(较单播分别提高25.3%和12.6%),但IM₄处理在产量(20.93 t/hm²)与品质(粗蛋白含量11.48%)之间取得了更优平衡。综上,在燕麦播种量120.0 kg/hm²的基础上配以一年生苜蓿30.0 kg/hm²进行混播,能够协同实现高产、优质与土地资源高效利用,为干旱灌区生态农牧系统的构建提供了理论基础和实践可行的种植方案。

关键词 燕麦与一年生苜蓿混播; 灌区; 混播比例; 生产力; 土地当量比

中图分类号 S544.9; S541.9

文章编号 1007-4333(2026)03-0097-13

文献标志码 A

Effects of different sowing rates of annual *Medicago scutellata* and *Avena sativa* mixed sowing on grassland productivity and nutritional value

GAO Weiwei^{1,2}, WANG Bin¹, SU Yuzhao^{1,2}, WANG Tengfei¹, ZHANG Yiyin¹, LAN Jian^{1*}

(1. College of Forestry and Grassland, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. Animal Husbandry and Veterinary Bureau of Huan County, Qingyang 745707, China)

Abstract To investigate the optimal seeding rates of annual *Medicago scutellata* and *Avena sativa* mixed sowing suitable for the irrigation areas in Northwest China and their effects on grassland productivity and nutritional value, a field trial was conducted in the Yellow River diversion irrigation area of Ningxia in 2024. *A. sativa* seeding rate was fixed at 120.0 kg/hm² and were mixed with six different seeding rates for annual *M. scutellata* (12.0, 18.0, 24.0, 30.0, 36.0 and 42.0 kg/hm², designated as IM₁, IM₂, IM₃, IM₄, IM₅ and IM₆). Monoculture of annual *M. scutellata* (SM, 30.0 kg/hm²) and monoculture of *A. sativa* (SO, 180.0 kg/hm²) served as controls. Grassland

收稿日期: 2025-04-14; 接受日期: 2025-05-28

基金项目: 宁夏高等学校一流学科建设(草学学科)项目(NXYLXK2017A01); 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2021BBF02001); 宁夏农林科学院科技协作项目(NGSB-2021-15-02)

第一作者: 高薇薇(ORCID:0009-0005-3377-8342), 硕士研究生, E-mail: 1416042825@qq.com

通讯作者: 兰剑(ORCID:0009-0007-5994-2608), 教授, 主要从事牧草栽培与育种研究, E-mail: ndlanjian@163.com

productivity, nutritional quality, and interspecific relationships were systematically determined through two successive crop cycles of sowing and harvesting. The results indicated that: 1) Mixed cropping significantly enhanced grassland productivity. Among all the treatments, IM₄ performed the best, with the highest total dry matter production (20.93 t/hm²) across two harvests, representing a 24.2% increase over *A. sativa* monoculture and a 44.7% rise in crude protein yield (2.36 t/hm²). This treatment achieved land equivalency ratio of 1.33, and had 33% increase in land utilization efficiency. 2) While the IM₆ treatment had the highest crude protein content and relative feeding value (25.3% and 12.6% higher than monoculture respectively), the IM₄ treatment achieved a better balance between yield (20.93 t/hm²) and quality (11.48% crude protein content). In summary, mixed sowing of 30.0 kg/hm² of annual *M. scutellata* with 120.0 kg/hm² *A. sativa* can synergistically achieve a high yield and superior quality while efficiently utilization land resources. This approach provides a theoretical foundation and practical planting solution for establishing ecological agro-pastoral systems in arid irrigated areas.

Keywords mixed sowing of annual *Medicago scutellata* and *Avena sativa*; irrigation area; the proportion of mixed sowing; productivity; land equivalent ratio

优质饲草有效供给与高效利用是实现畜牧业可持续发展的关键。近年来,由于生活水平和消费水平的不断提升,城乡居民对肉蛋奶等畜产品的需求每年上升2.7%~3.2%,促进了草畜产业快速发展,致使我国对优质饲草的需求呈“刚性”增长趋势^[1-2]。宁夏地处我国干旱、半干旱地区,随着当地奶产业和牛羊肉主导产业的发展,对优质饲草的需求日趋紧缺^[3]。因此,探寻合理的饲草种植方式,是保障我国食物安全和提高资源利用率的重要途径。

豆/禾混播是我国现代农业中备受青睐的种植模式^[4],不仅能够有效提高作物产量和土地利用效率,还有助于改善土壤结构与肥力^[5]。在混播系统中,豆科作物通过固氮作用为禾本科作物提供必要的氮素,减少化学氮肥的使用,促进禾本作物生长^[6]。同时,科学合理的混播模式可利用其在时间及空间上的集约化特性使种植系统具有明显的产量优势。侯钰荣等^[7]研究表明,光叶紫花苜蓿(*Vicia villosa*)与多年生黑麦草(*Lolium multiflorum*)混播后饲草产量较单播提高了14.08%~43.19%,土地利用效率增加了27%。独双双等^[8]研究发现,红豆草(*Onobrychis viciifolia*)与垂穗披碱草(*Elymus nutans*)混播时草地总生物产量较对应单播分别提高了65.52%和50%,表现出积极的混播效应。张永亮等^[9]研究表明,豆/禾混播比例对饲草生长发育具有一定影响,合理的混播比例有利于发挥种间促进作用,提高资源利用率,增加草地生产性能 and 改善饲草品质。曹雪乔等^[10]研究发现,饲用燕麦与紫花苜蓿在2:1的混播比例下总干草产量显著提高,在我国北方农牧交错带具有较大的生产优势。刘

泽宇等^[11]研究表明,燕麦与饲用豌豆在60:40的混播比例下土地当量比达到1.19,且鲜草产量最高(29.79 t/hm²)。由此可见,在人工草地建植过程中,通过合理的混播方式和混播比例可以有效调控不同饲草种内和种间竞争,从而实现对生境资源的高效利用,并保持较高生产力和稳定性。

燕麦(*Avena sativa*)作为一年生禾本科饲草,因其生育期短,生物量大,且具有耐寒、耐旱的特性^[12],在我国大面积推广和应用^[13-14]。一年生苜蓿(*Medicago scutellata*)是引进品种,不仅产量高而且营养价值丰富,作为优质饲草在地中海东部广泛种植,可有效解决饲草短缺问题^[15]。目前,关于燕麦与毛苕子(*Vicia villosa*)和箭筈豌豆(*Vicia sativa*)混播草地在土壤理化性质、群落结构特征、水肥利用效率及产量优势等方面均有研究^[16]。然而,提高饲草产量和改善营养品质仍然是人工混播草地建植的核心^[17]。如何在降低成本的前提下扩大草地经济效益成为发展人工草地的重要方向。鉴于此,本研究拟在宁夏引黄灌区开展不同播量一年生苜蓿与燕麦混播试验,通过测定混播草地生产性能、饲草营养品质以及种间关系,探索一年生苜蓿与燕麦混播的可行性,确定与燕麦混播的适宜一年生苜蓿播量,旨在为宁夏草畜产业可持续发展提供有力支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2024年在宁夏茂盛草业有限公司宁夏大学试验基地(38°55' N, 106°06' E, 海拔1 135 m)开展,该地区属典型温带大陆性气候,四季分明,昼

夜温差大,年均气温 10.65℃,年日照时数 2 693 h,年均降雨 203.1 mm,降水主要集中在 3—9 月,年均无霜期 170 d 左右。试验地土壤类型为灰钙土,田间持水量 19.17%,容重 1.52 g/cm³,土壤总孔隙度 38.25%,土壤有机质、全氮、全磷和全钾分别为 9.55、1.18、0.75 和 19.48 g/kg。

1.2 试验材料

参试的燕麦为皮燕麦(*A. sativa*)‘喜韵’,购于宁夏西北农林牧生态科技有限公司;一年生苜蓿(*M. scutellata*)品种是‘Robinson’,购于北京百斯特草业有限公司。

1.3 试验设计及田间管理

试验采用单因素随机区组设计,共设置 8 个处理组,包括 6 个混播处理,即一年生苜蓿播量 12.0 (IM₁)、18.0 (IM₂)、24.0 (IM₃)、30.0 (IM₄)、36.0 (IM₅)和 42.0 kg/hm²(IM₆)分别与燕麦(120.0 kg/hm²)进行混播,以及一年生苜蓿单播(SM,30.0 kg/hm²)和燕麦单播(SO,180.0 kg/hm²),混播方式为间行混播。小区面积 18 m²(6 m×3 m),每个处理 3 个重复,总计 24 个小区。小区间隔 1 m,设 2 m 保护行。在前茬小黑麦收获后,第 1 茬燕麦与一年生苜蓿于 2024 年 5 月 18 日以条播方式进行播种,第 2 茬燕麦与一年生苜蓿于 2024 年 7 月 22 日播种,同种作物行距为 30 cm,播深 3~4 cm。试验地灌水方式采用地面滴灌,滴灌带间隔 60 cm,滴头间隔 20 cm。每茬作物生长季灌水 3 次,每次灌水量为 450 m³/hm²,拔节期尿素 150 kg/hm²(总氮≥46%)和磷酸二铵 150 kg/hm²(P₂O₅≥46%)作为基肥施用,生育期内人工除草 1 次。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 混播饲草生长参数测定

1)株高测定。在每个小区内随机选取 10 株燕麦和一年生苜蓿测量自然高度,取平均值。

2)叶绿素含量(Chlorophyll content, SPAD)测定。使用叶绿素测定仪(TYS-B,浙江托普云农科技股份有限公司)于收获期分别取各处理的燕麦和一年生苜蓿各 10 株,测定叶片的 SPAD 值。测定部位为叶片的中间部位(避开叶片的叶脉部位)。

3)叶面积指数(Leaf area index, LAI)测定。采用植物冠层分析仪 LAI-2000 (LI-COR Biosciences)在饲草收获期测定 LAI(在日出或日落时测定,避免阳光直射),每个小区随机选择 6 个测定点,每个测

定点在冠层上方记录了 6 个散射辐射读数。

1.4.2 混播饲草生产力测定

1)干草产量测定。在每个小区内随机取 3 个 1 m²(1.0 m×1.0 m)的样方,将所采集的燕麦和一年生苜蓿鲜草分开风干至恒重后称量干重,最后换算为每公顷干草产量。

2)粗蛋白产量测定。粗蛋白产量=干草产量×粗蛋白含量。利用全自动凯氏定氮仪测定饲草氮含量,粗蛋白含量为饲草氮含量乘 6.25^[18]。

1.4.3 混播群体营养品质指标测定

在每个小区内分别随机取燕麦和一年生苜蓿混合鲜草样品 500 g,在通风处自然阴干至恒重。将阴干的燕麦和一年生苜蓿草样粉碎,过 0.45 mm 筛。参照《饲料分析及饲料质量检测技术》^[19]测定粗灰分(Crude ash, Ash)、粗蛋白(Crude protein, CP)、粗脂肪(Ether extract, EE)、中性洗涤纤维(Neutral detergent fiber, NDF)和酸性洗涤纤维(Acid detergent fiber, ADF)含量。依据中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量计算饲草相对饲喂价值(Relative feed value, RFV)、粗饲料干物质随意采食量(Dry matter intake ad-libitum, DMI)和可消化干物质(Digestible dry matter, DDM),计算公式如下^[20]:

$$RFV = \frac{120}{NDF} \times \frac{(88.9 - 0.77 \times ADF)}{1.29} \quad (1)$$

$$DMI = 120 / NDF \quad (2)$$

$$DDM = 88.9 - 0.779 \times ADF \quad (3)$$

式中:120 为 NDF 含量达到体重 1.2% 时的最大采食量;88.9 为 ADF 与 DDM 关系的截距;0.77 为斜率系数;1.29 为校正系数。

1.4.4 间作群体种间关系测算

土地当量比(Land equivalent ratio, LER)可衡量间作中的土地利用优势,LER 计算公式如下^[21]:

$$LER = LER_M + LER_O = \frac{Y_{IM}}{Y_M} + \frac{Y_{IO}}{Y_O} \quad (4)$$

式中:LER_M和 LER_O分别为一年生苜蓿和燕麦在间作下的偏土地当量比;Y_{IM}和 Y_{IO}分别为间作下一年生苜蓿和燕麦的全年干草产量, t/hm²;Y_M和 Y_O分别为单作下一年生苜蓿和燕麦的全年干草产量, t/hm²。当 LER>1,表示相同的土地面积上间作的产量高于单作,具有间作优势;当 LER<1,表示间作体系降低了资源利用效率,具有间作劣势;LER

值越大,产量优势越明显。

1.5 数据处理及分析

使用 Microsoft Excel 2016 软件整理数据, SPSS 27.0 统计软件进行方差分析(ANOVA)和多重比较(Duncan), Origin 2022 软件制图。

2 结果与分析

2.1 一年生苜蓿混播量对株高的影响

由表 1 可知,不同处理下燕麦株高存在显著差异($P<0.05$),茬次间存在极显著差异($P<0.001$),但二者交互作用差异不显著($P>0.05$);不同处理

极显著影响一年生苜蓿株高($P<0.01$)。不同处理燕麦和一年生苜蓿的株高如图 1 所示,混播燕麦株高大于单播(除第 2 茬 IM₆处理),不同混播比例对燕麦株高具有影响,第 1 茬 IM₃处理的燕麦株高最高,显著高于燕麦单播($P<0.05$),增幅为 10.93%;第 2 茬 IM₄处理的燕麦株高最高,与燕麦单播差异不显著($P>0.05$)。混播一年生苜蓿株高小于单播,且与一年生苜蓿混播量成反比,第 1 茬除 IM₁外其他混播处理均显著低于单播($P<0.05$),其中 IM₆较 SM 显著降低 28.75%($P<0.05$);第 2 茬一年生苜蓿混播株高均低于单播,但差异不显著($P>0.05$)。

表 1 茬次和处理间交互作用下株高、SPAD、叶面积指数和土地当量比方差分析

Table 1 Analysis of variance of plant height, SPAD, leaf area index and land equivalent ratio under the interaction of crop rotation stubble and treatments

因素 Factor	株高 Plant height		SPAD		叶面积指数 Leaf area index	土地当量比 Land equivalent ratio
	燕麦	一年生苜蓿	燕麦	一年生苜蓿		
	<i>Avena sativa</i>	<i>Annual Medicago scutellata</i>	<i>Avena sativa</i>	<i>Annual Medicago scutellata</i>		
S	46.49***	1.41 ^{ns}	0.28 ^{ns}	4.55*	193.49***	6.36*
T	3.24*	4.71**	2.99*	4.97***	44.86***	1.84 ^{ns}
S×T	0.64 ^{ns}	0.52 ^{ns}	0.85 ^{ns}	1.44 ^{ns}	11.27***	0.47 ^{ns}

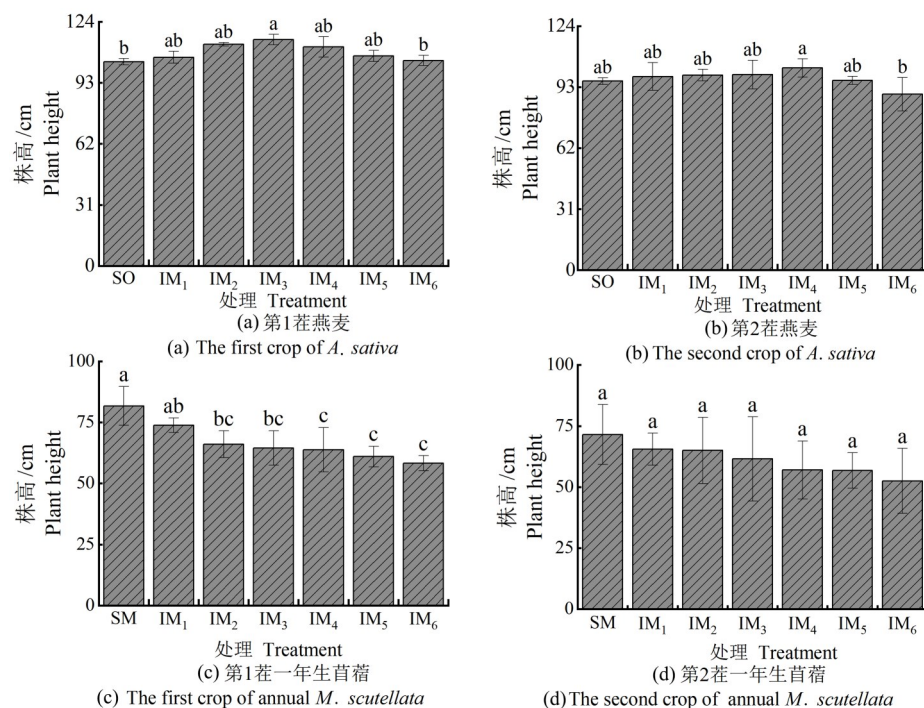
注:S为茬次,T为处理,S×T为茬次与处理的交互效应。*,**和***分别表示在0.05,0.01和0.001水平上差异显著,ns表示无显著差异。下同。
Note: S denotes crop rotation, T denotes treatment, and S×T denotes the interaction effect between stubble and treatment. *, ** and *** indicate significant differences at the 0.05, 0.01 and 0.001 levels, respectively, while ns indicates no significant difference. The same below.

2.2 一年生苜蓿混播量对 SPAD 的影响

茬次显著影响一年生苜蓿 SPAD($P<0.05$);处理显著影响燕麦 SPAD($P<0.05$),极显著影响一年生苜蓿 SPAD($P<0.001$)(表 1)。不同处理一年生苜蓿和燕麦的 SPAD 如图 2 所示,混播后第 1 茬燕麦 SPAD(除 IM₁和 IM₃外)均显著大于单播($P<0.05$),第 2 茬各处理差异均不显著($P>0.05$)。2 茬燕麦 SPAD 最大值均为 IM₄处理,相比于 SO 处理,第 1 茬 IM₄处理 SPAD 显著增加 27.84%($P<0.05$),第 2 茬增加 16.82%。一年生苜蓿表现出相反的趋势,混播后均小于单播,总体趋势为一年生苜蓿混播量越大,SPAD 与单播差异越小。其中,IM₆的 SPAD 在 2 茬混播处理中均最大,且与 SM 差异均不显著($P>0.05$),相比 SM 处理,第 1 茬和第 2 茬 SPAD 分别降低 16.28%和 5.19%。

2.3 一年生苜蓿混播量对叶面积指数和土地当量比的影响

由表 1 所示的方差分析可知,茬次、处理及二者交互作用极显著影响叶面积指数($P<0.001$),土地当量比受茬次显著影响($P<0.05$)。不同处理叶面积指数和偏土地当量比分别如图 3 和图 4 所示,混播叶面积指数大于单播,第 1 茬和第 2 茬均在 IM₄处理获得最大叶面积指数,第 1 茬相较 SO 和 SM 分别显著增加 46.38%和 51.30%($P<0.05$),第 2 茬较 SO 和 SM 分别显著增加 22.46%和 19.54%($P<0.05$)。不同混播处理土地当量比均 >1 ,显著提高土地利用效率,且燕麦偏土地当量比大于一年生苜蓿,是混播优势物种,其中 IM₄处理的土地当量比在 2 茬中均最大,分别为 1.38 和 1.27,土地利用效率显著增加 38%和 27%。



SO为燕麦单播(180.0 kg/hm²), SM为一年生苜蓿单播(30.0 kg/hm²), IM₁~IM₆分别为一年生苜蓿播量12.0、18.0、24.0、30.0、36.0和42.0 kg/hm²与燕麦(120.0 kg/hm²)混播。柱子上方相同字母表示差异不显著($P>0.05$), 不同字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

SO indicates monoculture of *A. sativa* (180.0 kg/hm²), SM indicates monoculture of annual *M. scutellata* (30.0 kg/hm²), IM₁ to IM₆ represent 12.0, 18.0, 24.0, 30.0, 36.0 and 42.0 kg/hm² of annual *M. scutellata* mixed with *A. sativa* (120.0 kg/hm²), respectively. The same letter in the figure indicates that the difference is not significant ($P>0.05$), and different letters indicate a significant difference ($P<0.05$). The same below.

图1 不同处理的燕麦和一年生苜蓿株高

Fig. 1 Plant height of *A. sativa* and annual *M. scutellata* under different treatments

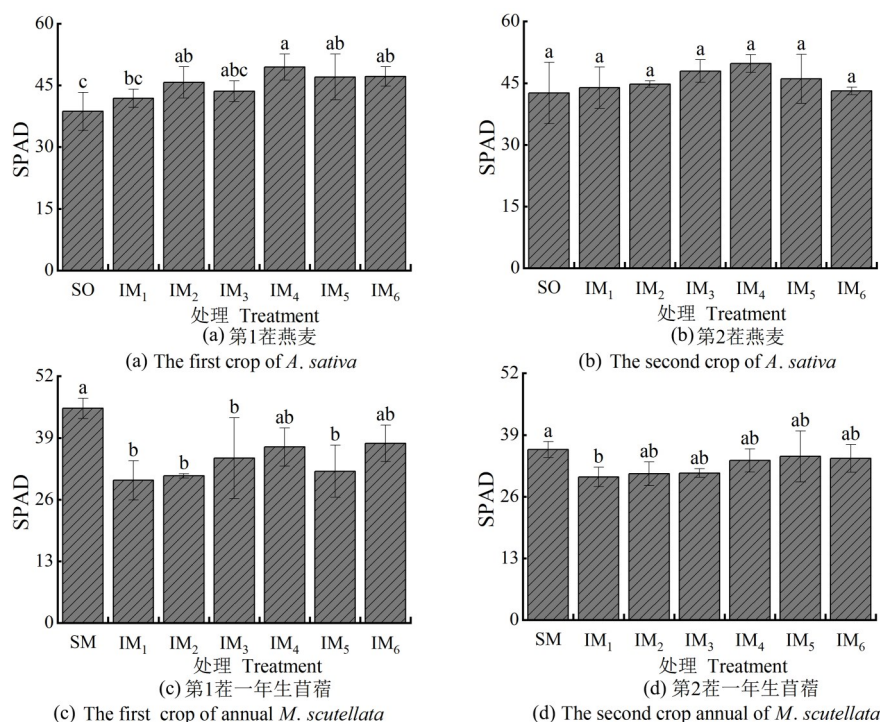


图2 不同处理的燕麦和一年生苜蓿 SPAD

Fig. 2 SPAD values of *A. sativa* and annual *M. scutellata* under different treatments

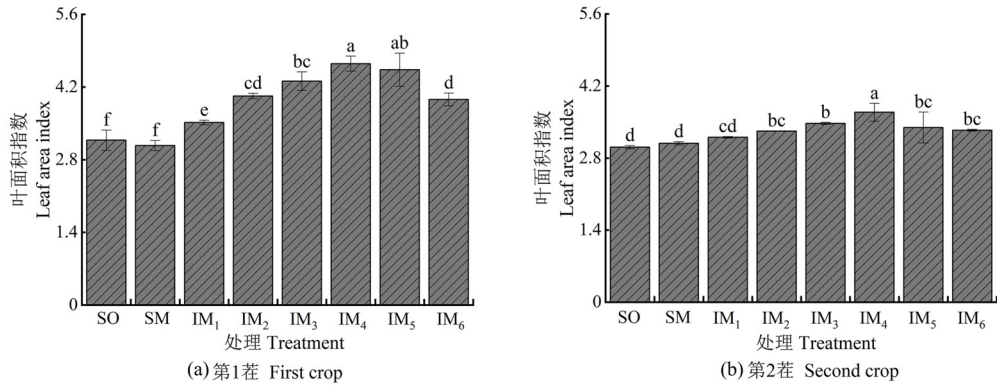


图3 不同处理的叶面积指数
Fig. 3 Leaf area index under different treatments

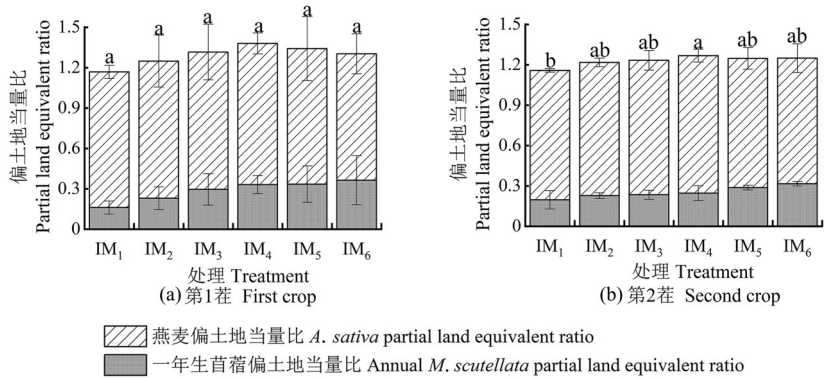


图4 不同处理燕麦与一年生苜蓿的偏土地当量比
Fig. 4 Partial land equivalence ratio for different treatments of *A. sativa* and annual *M. scutellata*

不同混播处理竞争模式如图5所示,燕麦与一年生苜蓿混播对土地利用有明显改善。燕麦对总土地当量比的贡献高于一年生苜蓿(燕麦与一年生苜蓿的偏土地当量比第1茬分别为1.01和0.29,第2茬分别为0.98和0.25)。混播下,2茬IM₄处理的土地当量比均最高,说明燕麦与一年生苜蓿混播可充分提高土地利用效率,最大发挥耕地资源。

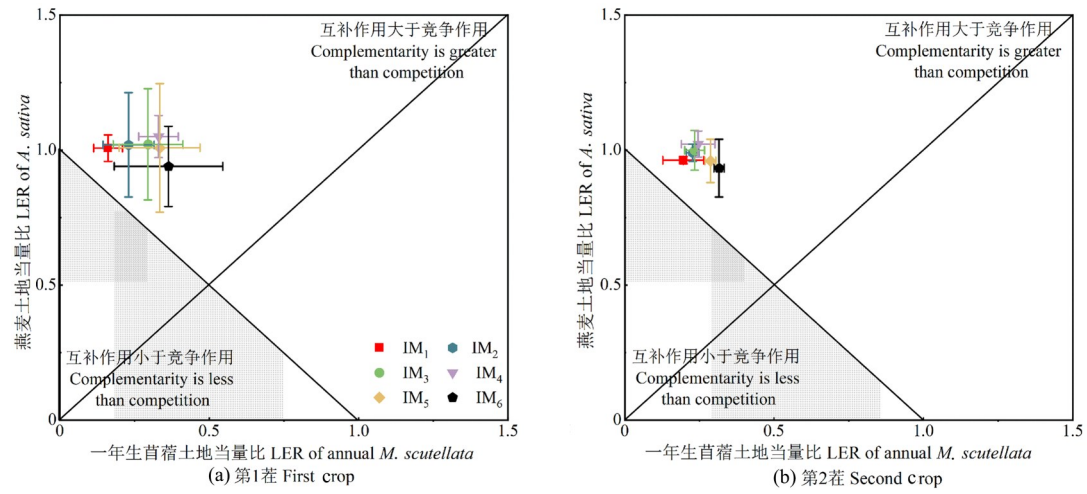


图5 不同混播处理的土地当量比
Fig. 5 Land equivalent ratio under different mixed sowing treatments

2.4 一年生苜蓿混播量对干草产量和粗蛋白产量的影响

由表2可知,燕麦产量受刈割茬次极显著影响($P<0.01$),而苜蓿产量受茬次($P<0.001$)、处理($P<0.001$)及其交互作用($P<0.05$)的共同影响,处理极显著影响二者总产量($P<0.001$);粗蛋白产量受茬次($P<0.05$)、处理($P<0.001$)及其交互作用($P<0.001$)的共同影响。不同处理干草产量和粗蛋白产量如表3所示,混播后燕麦干草产量第1茬均大于单播(IM₆除外),第2茬仅IM₄大于单播;混播一年生苜蓿2茬干草产量均小于单播,随着混播量增加,产量也相应提高,但增幅逐渐下降。2茬干草总产量表现为混播显著大于单播($P<0.05$),而混

播处理间差异不显著($P>0.05$)。2茬干草总产量均为IM₄处理最高,相比SO和SM处理,第1茬分别提高24.22%和113.54%,第2茬分别提高24.18%和38.21%。混播粗蛋白产量均高于燕麦单播,2茬均在IM₆处理达到最高值,分别为1 256.13和1 241.92 kg/hm²,第1茬中IM₆与IM₁处理之间有显著差异($P<0.05$),与其他混播处理间无显著差异;第2茬中IM₆与IM₁、IM₂和IM₅处理之间有显著差异($P<0.05$),与其他混播处理间无显著差异。

2.5 一年生苜蓿混播量对粗灰分、粗脂肪、粗蛋白和中性洗涤纤维的影响

由表4可知,茬次、处理及交互作用均极显著影响粗灰分和粗脂肪含量($P<0.001$),茬次和处理均

表2 茬次和处理间交互作用下干草产量和粗蛋白产量方差分析

Table 2 Analysis of variance for hay yield and crude protein yield under the interaction of crop rotation and treatments

因素 Factor	干草产量/(t/hm ²) Hay yield			粗蛋白产量/(kg/hm ²) Crude protein yield
	燕麦 <i>A. sativa</i>	一年生苜蓿 <i>Annual M. scutellata</i>	总计 Total	
S	9.66**	22.69***	0.86 ^{ns}	5.66*
T	0.49 ^{ns}	86.02***	18.56***	15.69***
S×T	0.04 ^{ns}	4.30**	2.22 ^{ns}	5.96***

表3 不同茬次和处理的干草和粗蛋白产量

Table 3 Hay yield and crude protein yield of different crop rotation and treatments

茬次 Crop rotation	处理 Treatment	干草产量/(t/hm ²) Hay yield			粗蛋白产量/(kg/hm ²) Crude protein yield
		燕麦 <i>A. sativa</i>	一年生苜蓿 <i>Annual M. scutellata</i>	总计 Total	
第1茬 First crop	SO	8.63±0.25 a	—	8.63±1.25 b	810.48±117.74 c
	SM	—	5.02±0.30 a	5.02±0.30 c	717.87±42.26 c
	IM ₁	8.69±0.42 a	0.81±0.24 c	9.50±0.40 ab	995.89±42.30 b
	IM ₂	8.79±0.67 a	1.16±0.43 bc	9.95±1.43 ab	1 076.28±155.17 ab
	IM ₃	8.81±0.78 a	1.48±0.59 b	10.30±1.71 a	1 118.41±186.30 ab
	IM ₄	9.06±0.67 a	1.66±0.33 b	10.72±0.89 a	1 167.92±97.04 ab
	IM ₅	8.70±0.21 a	1.68±0.18 b	10.38±1.72 a	1 155.12±191.35 ab
	IM ₆	8.11±0.28 a	1.83±0.19 b	9.94±1.46 ab	1 256.13±184.20 a
第2茬 Second crop	SO	7.98±0.26 a	—	7.98±0.32 b	819.08±32.35 e
	SM	—	7.17±0.16 a	7.17±0.61 b	1 210.43±102.36 ab
	IM ₁	7.75±0.17 a	1.41±0.09 c	9.08±0.11 a	954.34±11.03 d
	IM ₂	7.92±0.21 a	1.63±0.15 bc	9.53±0.25 a	1 036.12±27.49 cd
	IM ₃	7.97±0.48 a	1.68±0.03 bc	9.65±0.58 a	1 092.05±66.19 bc
	IM ₄	8.11±0.32 a	1.76±0.04 bc	9.91±0.38 a	1 197.57±46.28 ab
	IM ₅	7.74±0.55 a	2.06±0.13 bc	9.72±0.64 a	1 240.13±81.94 a
	IM ₆	7.58±0.75 a	2.27±0.12 b	9.71±0.85 a	1 241.92±109.07 a

表4 茬次和处理间交互作用下粗灰分、粗脂肪、粗蛋白和中性洗涤纤维方差分析

Table 4 Variance analysis of crude ash, crude fat, crude protein and neutral detergent fiber under the interaction between crop rotation and treatments

因素 Factor	粗灰分 Coarse ash	粗脂肪 Crude fat	粗蛋白 Crude protein	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber
S	19.06***	454.44***	18.29***	2.92 ^{ns}
T	53.54***	48.62***	38.10***	9.64***
S×T	12.21***	10.01***	2.46*	0.28 ^{ns}

极显著影响粗蛋白含量($P<0.001$),茬次和处理的交互作用显著影响粗蛋白含量($P<0.05$),处理极显著影响中性洗涤纤维含量($P<0.001$)。由图6可知,燕麦单播粗灰分含量最低,一年生苜蓿单播粗灰分含量最高。在混播处理中,粗脂肪含量和粗蛋白含量变化趋势均随着一年生苜蓿播种量增加而增

加,其中IM₆处理的粗蛋白含量在2茬中均最高,第1茬和第2茬分别为12.64%和12.79%(图6(c))。中性洗涤纤维变化则相反,燕麦单播最高,一年生苜蓿单播最低,并随一年生苜蓿播种量增加而减小,其中IM₆处理的中性洗涤纤维含量均为2茬最低,第1茬和第2茬分别为46.39%和44.24%(图6(d))。

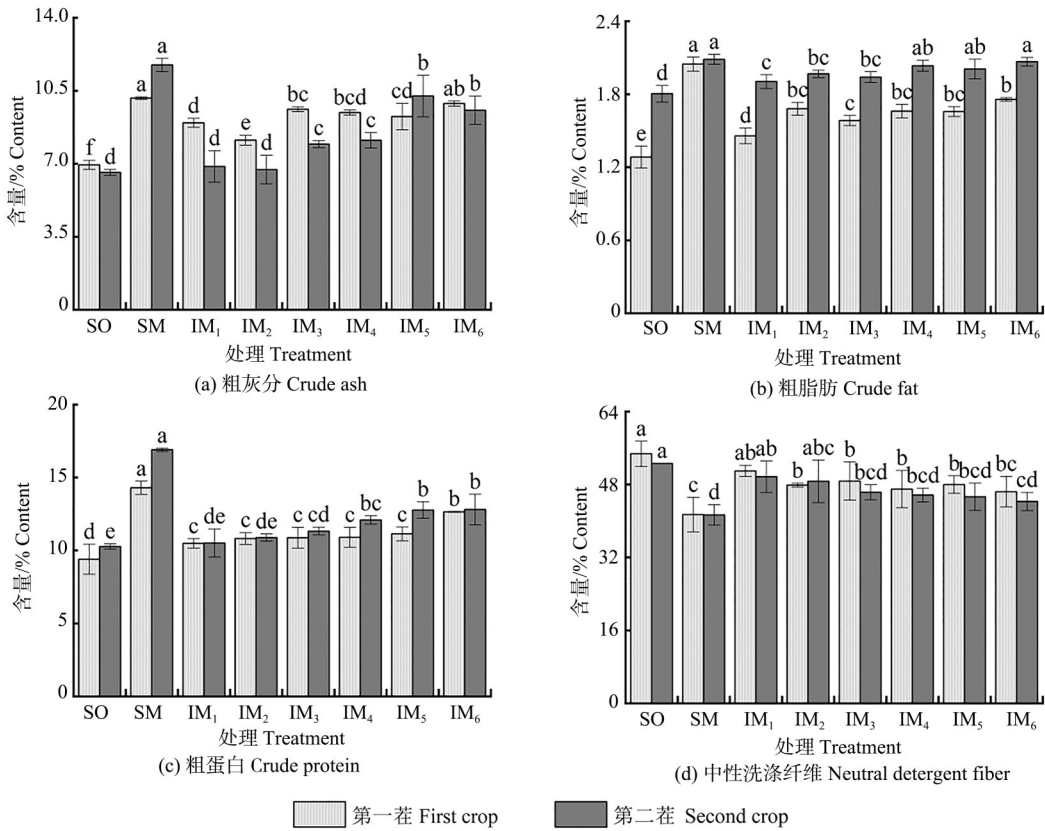


图6 不同处理对粗灰分、粗脂肪、粗蛋白和中性洗涤纤维的影响

Fig. 6 Effects of different treatments on crude ash, crude fat, crude protein and neutral detergent fiber

2.6 一年生苜蓿混播量对酸性洗涤纤维、相对饲喂价值、总可消化养分和相对饲喂质量的影响

由表5可知,处理极显著影响酸性洗涤纤维含

量($P<0.001$);茬次显著影响相对饲喂价值和相对饲喂质量($P<0.05$),处理对其影响极显著($P<0.001$);茬次、处理及其交互作用均极显著影响总可消化养分($P<0.001$)。不同处理的酸性洗涤纤

维、相对饲喂价值、总可消化养分和相对饲喂质量如图7所示,酸性洗涤纤维含量在燕麦单播处理下最大,一年生苜蓿单播最小,并随一年生苜蓿播种量增加而减小,其中IM₆处理的酸性洗涤纤维含量在2茬中均最低,第1茬和第2茬含量分别为29.68%和26.94%(图7(a))。相对饲喂价值、总

可消化养分和相对饲喂质量变化趋势均相同,均表现为燕麦单播最低,一年生苜蓿单播最高,并随一年生苜蓿播种量增加而增加,IM₆处理的相对饲喂价值、总可消化养分和相对饲喂质量在2茬中均最高,2茬平均分别为137.72%、64.80%和201.23%(图7(b)、(c)和(d))。

表5 茬次和处理间交互作用下酸性洗涤纤维、相对饲喂价值、总可消化养分和相对饲喂质量方差分析

Table 5 Analysis of variance of acid detergent fiber, relative feeding value, total digestible nutrient and relative feeding quality under the interaction between crop rotation and treatments

因素 Factor	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber	相对饲喂价值 Relative feeding value	总可消化养分 Total digestible nutrient	相对饲喂质量 Relative feeding quality
S	33.42 ^{ns}	8.33 [*]	92.53 ^{***}	8.33 [*]
T	14.59 ^{***}	13.16 ^{***}	6.83 ^{***}	13.16 ^{***}
S×T	1.09 ^{ns}	0.18 ^{ns}	6.83 ^{***}	0.18 ^{ns}

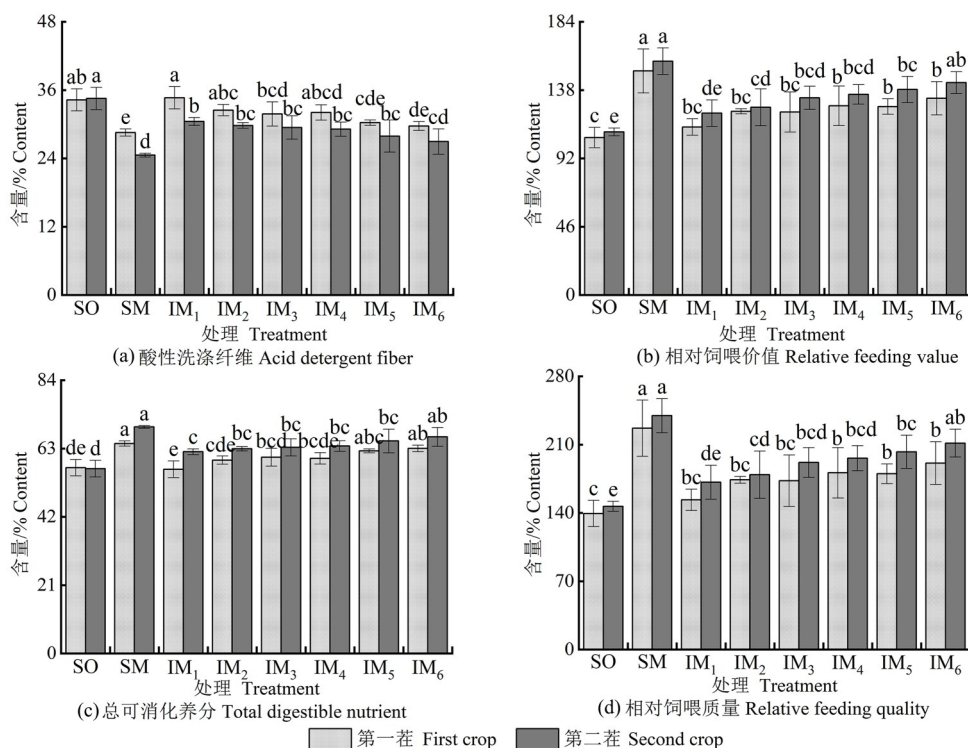


图7 不同处理对酸性洗涤纤维、相对饲喂价值、总可消化养分和相对饲喂质量的影响

Fig. 7 Effects of different treatments on acid detergent fiber, relative feeding value, total digestible nutrient and relative feeding quality

3 讨论

3.1 不同种植模式对草地生产性能的影响

株高是衡量饲草生产性能的重要指标^[22]。禾

本科作物植株高大,豆科的攀缘茎攀附在禾本科直立茎上可以高效利用光能等自然资源。本研究表明,混播处理下的燕麦株高随着一年生苜蓿播种量的增加呈先升高后降低趋势,混播系统中一

年生苜蓿的株高均低于其单播。这主要是因为一年生苜蓿作为豆科饲草,根瘤菌所产生的氮素为燕麦生长提供物质基础,促进燕麦对氮素的吸收^[23],其中,第1茬燕麦株高在IM₃处理下达到最大值(115.0 cm),而第2茬株高则在IM₄处理下最大(102.7 cm)。在豆/禾混播系统中,禾本科饲草一般是竞争优势种,豆科饲草呈生长劣势^[24]。本研究结果显示,随着一年生苜蓿播种量的增加,其株高较单播降低。总体来看,混播模式下的饲草总生产力高于对应的单播^[25]。郭川等^[26]在西南山地丘陵区进行混播研究表明,豆禾比例为5:5时地上生物量、相对总产量均达到最高。本研究表明,燕麦与一年生苜蓿混播显著提高了干草产量和粗蛋白产量,这主要是因为燕麦茎秆直立为一年生苜蓿提供了充足的立体空间,生态位互补,有助于促进叶片吸收更多光资源促使其群体叶面积指数提高,促进了饲草对光能的转化与利用,最终达到提高饲草产量的效果^[27]。此外,在所有混播处理中,IM₄模式的草地生产性能最高,第1茬分别比燕麦单播和一年生苜蓿单播提高24.22%和113.54%,第2茬分别提高24.18%和38.21%,说明合理的混播比例是饲草增产的关键,相较于豆科,禾本科更具有竞争力,豆/禾混播系统中,禾本科所占的比例越大,相应的产量愈高^[28]。

3.2 不同间作模式对饲草种间相互作用和产量优势的影响

种间相互作用是混播群体发挥产量优势的关键,种间相互作用包括种间竞争和种间促进,当种间竞争作用小于种间促进作用时,种间相互作用即表现为混播优势^[29]。LER是衡量混播系统产量优势的重要指标,其值>1表明混播系统具有明显产量优势;偏土地当量比反映了混播组分作物相对单作的间作优势,以偏土地当量比绘制散点图可直观反映混播组分作物产量提升的优势^[30]。本研究中,通过混播竞争模式分析可知,燕麦具有混播产量优势而一年生苜蓿具有混播劣势,混播处理均表现为互补作用。本研究2茬试验结果表明,燕麦/一年生苜蓿混播的LER值分别为1.17~1.38和1.16~1.27,混播具有明显提高土地利用效率的优势,即燕麦单播相较于混播需要增加19%~26%的土地面积二者才能达到相同的产量。然而,Baxevanos等^[31]研究发现,燕

麦/豌豆混合种植系统的LER值低于1.0,这主要是由于燕麦的种内竞争大于种间竞争。此外,本研究发现,2茬燕麦的偏土地当量比均>0.88,一年生苜蓿的偏土地当量比均<0.35,说明燕麦在混播系统中表现为优势作物,一年生苜蓿则为劣势作物,可能是因为燕麦植株较高,叶量丰富,相对一年生苜蓿更容易获取光资源和空间资源。然而,Gong等^[21]认为,优化豆科与禾本科作物行比配置可以明显促进种间相互作用,进而提高生产力。因此,今后研究中将通过最佳的一年生苜蓿播量进一步探究适宜的行比配置,为饲草高效生产奠定基础。

3.3 不同种植模式对饲草营养品质的影响

饲草营养价值的高低影响家畜的采食量和消化率,进而影响畜产品质量。随着纤维含量的升高,饲草的适口性和消化率均下降,营养也会降低,粗蛋白含量高且纤维含量低的饲草品质更优。王腾飞等^[13]研究表明,燕麦与毛苕子混播相较于燕麦单播,粗蛋白含量显著提高29.92%。在饲用高粱与拉巴豆混播研究中发现,混播可改善饲草营养品质,相对饲喂价值较饲用高粱单播显著提高18.9%^[6]。本研究中,与单播燕麦相比,燕麦与一年生苜蓿混播提高了牧草粗蛋白含量,改善了饲草营养品质,这主要取决于一年生苜蓿作为豆科牧草其粗蛋白含量明显高于燕麦单播,因此混播后的牧草粗蛋白含量整体高于燕麦单播。此外,本研究发现,粗灰分含量随着一年生苜蓿播种量的增加呈上升趋势,粗脂肪和粗蛋白变化趋势与粗灰分基本一致,均在IM₆混播处理下达到最高,说明在混播系统中增加一年生苜蓿的种植密度有利于改善饲草品质。不同作物种间或种内存在竞争,混播比例的不同也是导致饲草品质出现差异的重要原因。中性洗涤纤维含量越低,饲草适口性越好。冯廷旭等^[32]研究表明,小黑麦与饲用豌豆以70:30比例混播显著降低了酸性与中性洗涤纤维含量;Neugschwandtner等^[33]研究表明,燕麦/箭筈豌豆以1:3的比例同行混播处理的饲草品质较优,其中酸性与中性洗涤纤维含量低于单播燕麦。本试验中,IM₆处理的酸性与中性洗涤纤维含量均为最低,相对饲喂价值和总可消化养分均达到最高,说明在豆/禾混播系统中豆科牧草的生物量

越高,饲草品质越好。然而,不同混播比例下饲草价值的高低存在显著差异,究其原因主要是试验环境、土壤和种植方式等不同。因此,在选择适宜的豆/禾混播比例时,应综合考虑土壤特性、水肥环境和气候条件等因素。

4 结 论

燕麦与一年生苜蓿混播可不同程度提高草地生产性能和改善饲草品质,其中一年生苜蓿混播量为 30.0 kg/hm^2 处理的干草产量和粗蛋产量均达到最高,较燕麦单作分别提高了 $23.6\%\sim 38.9\%$ 和 $25.9\%\sim 42.3\%$ 。燕麦与一年生苜蓿混播明显改善了饲草品质,在混播模式下一年生苜蓿混播量为 42.0 kg/hm^2 处理的粗蛋白含量和相对饲喂价值较高,较燕麦单播分别提高了 25.3% 和 12.6% 。综合草地生产力、土地利用效率以及饲草营养价值,本研究认为一年生苜蓿播量为 30.0 kg/hm^2 可作为西北灌区燕麦/一年生苜蓿的最佳混播比例。

参考文献 References

- [1] Zhang Z X, Whish J P M, Bell L W, Nan Z B. Forage production, quality and water-use-efficiency of four warm-season annual crops at three sowing times in the Loess Plateau region of China[J]. *European Journal of Agronomy*, 2017, 84: 84-94
- [2] 南志标,王彦荣,贺金生,胡小文,刘志鹏,李春杰,聂斌,夏超.我国草种业的成就、挑战与展望[J]. *草业学报*, 2022, 31(6): 1-10
Nan Z B, Wang Y R, He J S, Hu X W, Liu Z P, Li C J, Nie B, Xia C. Achievements, challenges and prospects of herbage seeds industry in China[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(6): 1-10 (in Chinese)
- [3] 宋永永,米文宝,杨丽娜,张冠乐.宁夏沿黄经济区农业发展与空间布局研究[J]. *生态科学*, 2015, 34(2): 116-122
Song Y Y, Mi W B, Yang L N, Zhang G L. Study of agriculture development and spatial pattern in the economic zone along the Yellow River in Ningxia[J]. *Ecological Science*, 2015, 34(2): 116-122 (in Chinese)
- [4] Li C J, Hoffland E, Kuyper T W, Yu Y, Zhang C C, Li H G, Zhang F S, Van der Werf W. Syndromes of production in intercropping impact yield gains[J]. *Nature Plants*, 2020, 6(6): 653-660
- [5] 张永亮,滕泽,郝凤,于铁峰,张玉霞.苜蓿混播方式及比例对混播草地生产力和稳定性的影响[J]. *草业学报*, 2024, 33(2): 185-197
Zhang Y L, Teng Z, Hao F, Yu T F, Zhang Y X. Effects of different mixed sowing patterns and sowing ratios of alfalfa on grassland productivity and community stability in grass-legume mixtures[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(2): 185-197 (in Chinese)
- [6] 王斌,史佳梅,王腾飞,张译尹,马江萍,李佳旺,王小兵,邓建强,兰剑.施氮对饲用高粱/拉巴豆混播草地生产性能和氮肥贡献率的影响[J]. *草业学报*, 2025, 34(4): 53-63
Wang B, Shi J M, Wang T F, Zhang Y Y, Ma J P, Li J W, Wang X B, Deng J Q, Lan J. Effect of nitrogen application on production performance and nitrogen fertilizer contribution of forage sorghum/Lablab mixed cropping[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(4): 53-63 (in Chinese)
- [7] 侯钰荣,许莹月,兰吉勇,柯梅,魏鹏,徐雪娇,康帅,周齐,王玉祥.紫花苜蓿和冰草混播的根系适应策略探究[J/OL]. *草业科学*, 1-18. [2025-04-10]. <https://link.cnki.net/urlid/62.1069.S.20241119.1126.002>
Hou Y R, Xu Y Y, Lan J Y, Ke M, Wei P, Xu X J, Kang S, Zhou Q, Wang Y X. Study on root adaptation strategy of mixed sowing of *Medicago sativa* and *Agropyron cristatum*[J/OL]. *Pratacultural Science*, 1-18. [2025-04-10]. <https://link.cnki.net/urlid/62.1069.S.20241119.1126.002> (in Chinese)
- [8] 独双双,祁娟,李霞,路欣,贾燕伟,赛宁刚.苜蓿与老芒麦混播对牧草产量及土壤养分的影响[J]. *中国草地学报*, 2024, 46(2): 74-82
Du S S, Qi J, Li X, Lu X, Jia Y W, Sai N G. Effect of alfalfa and *Elymus sibiricus* mixture on forage yield and soil nutrients[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(2): 74-82 (in Chinese)
- [9] 张永亮,于铁峰,郝凤,程铭.施肥与混播比例对豆禾混播牧草生产性能的影响[J]. *中国草地学报*, 2020, 42(6): 115-124
Zhang Y L, Yu T F, Hao F, Cheng M. Effects of fertilization and mixed sowing ratio on the production performance of grass-alfalfa mixed forage[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2020, 42(6): 115-124 (in Chinese)
- [10] 曹雪乔,林悦,赵丽娟,苏布达,额尔登其木格,张玉山,郭书颖,赵美玲,刘志英.饲用燕麦与豆科牧草混播对饲草产量及茎叶比的影响[J]. *中国草地学报*, 2024, 46(11): 58-65
Cao X Q, Lin Y, Zhao L J, Su B D, Eerdengqimuge E, Zhang Y S, Guo S Y, Zhao M L, Liu Z Y. Effects of mixed sowing of forage oats and legumes on forage yield and stem-leaf ratio[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(11): 58-65 (in Chinese)
- [11] 刘泽宇,刘罡,张玉霞,王显国,王振国,崔凤娟,张庆昕,刘庭玉.氮肥用量和混播比例对麦豆混播草地饲草产量及种间关系的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2024, 42(5): 109-117
Liu Z Y, Liu G, Zhang Y X, Wang X G, Wang Z G, Cui F J, Zhang Q X, Liu T Y. Effects of nitrogen fertilizer application and mixing ratio on grass forage yield of oat-pea forage crops and interspecific relationship [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2024, 42(5): 109-117 (in Chinese)
- [12] 张靓,梁小玉,胡远彬,季杨,易军,汪辉.燕麦抗倒伏性研究进展[J]. *麦类作物学报*, 2024, 44(1): 74-81
Zhang J, Liang X Y, Hu Y B, Ji Y, Yi J, Wang H. Research progress on lodging resistance in oat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(1): 74-81 (in Chinese)
- [13] 王腾飞,马霞,刘金龙,王斌,张译尹,李佳旺,马江萍,王小兵,兰剑.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, Wang B, Zhang Y Y, Li J W, Ma J P, Wang X

- B, Lan J. 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 (in Chinese)
- [14] 文兴金, 袁小情, 刘海平, 李小梅, 武齐丰, 辛亚芬, 范文涛, 张建波, 游明鸿, 季晓菲, 雷雄, 罗燕, 闫艳红. 成都平原燕麦与箭筈豌豆混播模式对饲草生产性能的影响[J]. 草地学报, 2025, 33(6): 2002-2012
- Wen X J, Yuan X Q, Liu H P, Li X M, Wu Q F, Xin Y F, Fan W T, Zhang J B, You M H, Ji X F, Lei X, Luo Y, Yan Y H. The effect of mixed sowing mode of *Avena sativa* and *Vicia sativa* on forage production performance in Chengdu Plain [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(6): 2002-2012 (in Chinese)
- [15] 任海龙, 魏臻武, 陈祥. 蒺藜苜蓿、天蓝苜蓿、金花菜基因组SNP穿梭标记开发[J]. 草业学报, 2017, 26(4): 188-195
- Ren H L, Wei Z W, Chen X. Cross-species markers developed from genome sequencing in *Medicago truncatula*, *Medicago lupulina* and *Medicago polymorpha* [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(4): 188-195 (in Chinese)
- [16] 冯琴, 王斌, 海艺蕊, 王腾飞, 倪旺, 邓建强, 李满有, 兰剑. 毛苕子不同播种量与燕麦混播对群落竞争及燕麦生物量分配的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(9): 2423-2429
- Feng Q, Wang B, Hai Y R, Wang T F, Ni W, Deng J Q, Li M Y, Lan J. Effects of mixed sowing of vetch and oat on community competition and biomass allocation of oats [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(9): 2423-2429 (in Chinese)
- [17] 马晓东, 孙金金, 汪鹏斌, 王琳, 贺有龙, 汪海波, 鱼小军. 青海三江源区燕麦与豆类混播对草产量和品质的影响[J]. 中国草地学报, 2021, 43(7): 21-27
- Ma X D, Sun J J, Wang P B, Wang L, He Y L, Wang H B, Yu X J. Effects of mixed sowing of *Avena sativa* and legumes on grass yield and quality in the Sanjiangyuan Region of Qinghai [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2021, 43(7): 21-27 (in Chinese)
- [18] 刘雨涵, 陈杨, 李海港, 卢勇鑫. 施氮量对不同品种苜蓿结瘤固氮和产量及粗蛋白含量的调控[J]. 中国土壤与肥料, 2024(6): 186-198
- Liu Y H, Chen Y, Li H G, Lu Y X. Regulation of nitrogen application rate on nodulation, nitrogen fixation, yield, and crude protein content of different alfalfa varieties [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2024(6): 186-198 (in Chinese)
- [19] 张丽英. 饲料分析及饲料质量检测技术[M]. 第4版. 北京: 中国农业大学出版社, 2016
- Zhang L Y. *Feed Analysis and Quality Test Technology* [M]. 4th ed. Beijing: China Agricultural University Press, 2016 (in Chinese)
- [20] 王斌, 李满有, 王欣盼, 董秀, 庞军宝, 兰剑. 深松浅旋对半干旱区退化紫花苜蓿人工草地改良效果研究[J]. 草业学报, 2022, 31(1): 107-117
- Wang B, Li M Y, Wang X P, Dong X, Pang J B, Lan J. Combined ploughing and tilling to improve degraded alfalfa (*Medicago sativa*) stands in a semi-arid region [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(1): 107-117 (in Chinese)
- [21] Gong X W, Dang K, Lv S M, Zhao G, Tian L X, Luo Y, Feng B L. Interspecific root interactions and water-use efficiency of intercropped proso millet and mung bean [J]. *European Journal of Agronomy*, 2020, 115: 126034
- [22] 王腾飞, 王斌, 邓建强, 李满有, 倪旺, 冯琴, 妥昀昀, 兰剑. 宁夏干旱区滴灌条件下拉巴豆不同播种量与甜高粱混播饲草生产性能研究[J]. 草业学报, 2023, 32(3): 30-40
- Wang T F, Wang B, Deng J Q, Li M Y, Ni W, Feng Q, Tuo Y Y, Lan J. Effect of sowing rate on yield and forage quality of a *Dolichos lablab*—*Sorghum bicolor* mixture under drip irrigation in arid areas of Ningxia [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(3): 30-40 (in Chinese)
- [23] Wang B, Deng J Q, Wang T F, Zhang Y Y, Lan J. Optimizing nitrogen application rates to maximize productivity while reducing environmental risk by regulating nitrogen and water utilization in mixed cropping systems [J]. *Agricultural Water Management*, 2024, 303: 109053
- [24] Caballero R, Goicoechea E L, Hernaiz P J. Forage yields and quality of common vetch and oat sown at varying seeding ratios and seeding rates of vetch [J]. *Field Crops Research*, 1995, 41(2): 135-140
- [25] Kermah, M, Franke A C, Adjei-Nsiah S, Ahiabor B D K, Abaidoo R C, Giller K E. Maize-grain legume intercropping for enhanced resource use efficiency and crop productivity in the Guinea savanna of northern Ghana [J]. *Field Crops Research*, 2017, 213: 38-50
- [26] 郭川, 赵艳兰, 李香君, 周冀琼, 刘琳, 孙飞达, 白彦福, 马骥毓. 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, Zhou J Q, Liu L, Sun F D, Bai Y F, Ma C Y. Effect of sowing ratio on interspecific relationships between species and grassland productivity in legume-grass mixtures [J]. *Pratacultural Science*, 2022, 39(11): 2307-2316 (in Chinese)
- [27] 许留兴, 李万荣, 王晓亚, 李鑫琴, 樊杨, 武丹, 张建国. 冬闲田混播小麦与豆科牧草对饲草产量、品质和土壤特性的影响[J]. 中国草地学报, 2022, 44(9): 66-74
- Xu L X, Li W R, Wang X Y, Li X Q, Fan Y, Wu D, Zhang J G. Effects of mixed sowing of wheat and legume on forage yield, quality and soil properties in winter fallow fields [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2022, 44(9): 66-74 (in Chinese)
- [28] Dhima K V, Lithourgidis A S, Vasilakoglou I B, Dordas C A. Competition indices of common vetch and cereal intercrops in two seeding ratio [J]. *Field Crops Research*, 2007, 100(2/3): 249-256
- [29] 孙建财, 邓得婷, 史惠兰. 人工草地种间竞争研究进展[J]. 生态科学, 2024, 43(3): 260-267
- Sun J C, Deng D T, Shi H L. Research progress of interspecies competition in artificial grassland [J]. *Ecological Science*, 2024, 43(3): 260-267 (in Chinese)
- [30] Lithourgidis A S, Vasilakoglou I B, Dhima K V, Dordas C A, Yiakoulaki M D. Forage yield and quality of common vetch mixtures with oat and triticale in two seeding ratios [J]. *Field Crops Research*, 2006, 99(2-3): 106-113
- [31] Baxevanos D, Tsialtas I T, Vlachostergios D N, Hadjigeorgiou I, Dordas C, Lithourgidis A. Cultivar competitiveness in pea-oat intercrops under Mediterranean conditions [J]. *Field Crops Research*, 2017: 94-103
- [32] 冯廷旭, 林伟山, 向雪梅, 李菲, 张琳, 魏希杰, 德科加. 三江源区适宜的小黑麦和饲用豌豆混播比例及施肥方法[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(8):

1539-1553

Feng T X, Lin W S, Xiang X M, Li F, Zhang L, Wei X J, De K J. Optimum fertilization method and mixed seeding ratio of *Triticale/Pisum sativa* in grassland of Sanjiangyuan area [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(8): 1539-1553 (in Chinese)

[33] Neugschwandtner R W, Kaul H P. Nitrogen uptake, use and utilization efficiency by oat-pea intercrops [J]. *Field Crops Research*, 2015, 179: 113-119

责任编辑: 申青苗



第一作者简介：高薇薇，宁夏大学林业与草业学院在读研究生。以第一、第二完成人申报发明专利3件；参与“一年两熟”人工草地可持续生产模式研究与示范项目，横向项目4项。曾获中国国际“互联网+”大学生创新创业大赛银奖。



通讯作者简介：兰剑，博士，教授，博士生导师。现任中国草学会牧草育种、草坪专业委员会常务理事，牧草种子、饲料生产专业委员会理事，宁夏回族自治区草原学会第一届监事，宁夏草业协会常务理事，宁夏回族自治区饲草良种繁育专家、宁夏回族自治区优质牧草产业副首席，宁夏回族自治区科创专员，宁夏芸峰农副产品有限公司科技副总等。主要从事牧草遗传育种、栽培与利用方面的教学科研工作。先后主持宁夏抗旱节水优质饲草新品种选育与良种繁育、“一年两熟”人工草地可持续生产模式研究与示范可行性研究等重点项目共8项，作为主要成员参加国家重点研发课题1项，承担各类横向项目30余项。发表论文近100篇，主编著作1部，参编著作、教材6部，受理发明专利5件，成果鉴定（登记）6项。指导硕士研究生于2022年获得宁夏回族自治区优秀论文，指导博士研究生于2025年获得宁夏大学优秀毕业论文。