

DOI:10.11686/cyxb2025204

http://cyxb.magtech.com.cn

李小聪, 闫聚辉, 王星, 等. 紫花苜蓿/无芒雀麦间作对草地生产性能和土壤理化特性的影响. 草业学报, 2026, 35(5): 113—125.

LI Xiao-cong, YAN Ju-hui, WANG Xing, et al. Effects of different inter-row planting ratios of alfalfa and smooth brome on grass production performance and soil physicochemical properties. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(5): 113—125.

紫花苜蓿/无芒雀麦间作对草地生产性能和土壤理化特性的影响

李小聪^{1,3}, 闫聚辉^{1,3}, 王星^{1,3}, 胡鹏飞^{1,3}, 叶雨浓^{1,3}, 伏兵哲^{1,2,3*}

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏草业工程技术研究中心, 宁夏 银川 750021; 3. 农业农村部饲草高效生产模式创新重点实验室, 宁夏 银川 750021)

摘要:为探究宁夏半干旱区紫花苜蓿与无芒雀麦间行种植的适宜比例,以单播紫花苜蓿(CK_M)和无芒雀麦(CK_B)为对照,设置紫花苜蓿(M)和无芒雀麦(B)5种植比例(3:1、2:1、1:1、1:2、1:3,分别为M₃B₁、M₂B₁、M₁B₁、M₁B₂、M₁B₃),测定与分析不同种植模式下紫花苜蓿与无芒雀麦的农艺性状、营养品质、土壤养分等指标。结果表明,间行种植比例(M₂B₁)在产量、品质和土壤养分积累方面表现最优。M₂B₁处理使紫花苜蓿分枝数较CK_M提高18.36%,无芒雀麦株高和叶面积较CK_B分别提高22.40%和37.03%,混合干草产量达17.70 t·hm⁻²,与CK_M相当。M₂B₁处理下的粗蛋白含量较CK_B提高33.83%,中性洗涤纤维降低5.12%。土壤养分积累方面,M₂B₁处理的有机质含量较CK_M和CK_B分别提高2.13%和3.90%,碱解氮含量分别提高16.53%和37.33%。冗余分析(RDA)结果表明,混合产量与土壤速效钾、碱解氮含量呈正相关关系。综合评价显示,紫花苜蓿与无芒雀麦按2:1间行种植时,土地资源利用效率、生产力提升和土壤养分积累效果最优。

关键词:紫花苜蓿;无芒雀麦;间行种植;生产性能;土壤养分

Effects of different inter-row planting ratios of alfalfa and smooth brome on grass production performance and soil physicochemical properties

LI Xiao-cong^{1,3}, YAN Ju-hui^{1,3}, WANG Xing^{1,3}, HU Peng-fei^{1,3}, YE Yu-nong^{1,3}, FU Bing-zhe^{1,2,3*}

1. College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Ningxia Grassland and Animal Husbandry Engineering Technology Research Center, Yinchuan 750021, China; 3. Key Laboratory for Model Innovation in Forage Production Efficiency, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yinchuan 750021, China

Abstract: To determine the optimal inter-row planting ratio of alfalfa (*Medicago sativa*) and smooth brome (*Bromus inermis*) for cultivation in the semi-arid region of Ningxia, a field study was conducted with single-crop alfalfa (CK_M) and smooth brome (CK_B) as controls. The treatments consisted of five different inter-row planting ratios of *M. sativa* (M) and *B. inermis* (B): 3:1 (M₃B₁), 2:1 (M₂B₁), 1:1 (M₁B₁), 1:2 (M₁B₂), and 1:3 (M₁B₃). The agronomic traits and nutritional quality of both species and soil nutrient contents were measured and analyzed under these different planting patterns. It was found that the 2:1 inter-row planting ratio (M₂B₁) achieved the best performance in terms of yield, quality, and soil nutrient accumulation. Compared with CK_M, the M₂B₁ treatment increased the number of alfalfa branches by 18.36%. Compared with CK_B, the M₂B₁ treatment enhanced smooth

收稿日期:2025-05-21;改回日期:2025-07-18

基金项目:国家自然科学基金项目(32260349)和宁夏回族自治区2021年青年拔尖人才培养项目资助。

作者简介:李小聪(1999—),男,宁夏海原人,在读硕士。E-mail: 2425145154@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: fbzhe19@163.com

brome plant height and leaf area by 22.40% and 37.03%, respectively. The mixed hay yield under M_2B_1 reached $17.70 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, comparable to that of CK_M . In terms of nutritional quality, the M_2B_1 treatment increased the crude protein content by 33.83% and decreased the neutral detergent fiber content by 5.12%, compared with CK_B . Soil analysis revealed that the M_2B_1 treatment increased the soil organic matter content by 2.13% and 3.90% compared with that in CK_M and CK_B , respectively, and the alkaline-hydrolyzable nitrogen content by 16.53% and 37.33%, respectively. The results of a redundancy analysis indicated that mixed yield was positively correlated with soil available potassium and alkali-hydrolyzable nitrogen contents. In conclusion, the 2:1 inter-row planting ratio of alfalfa and smooth brome in Ningxia optimized land resource utilization efficiency, productivity, and soil nutrient accumulation.

Key words: *Medicago sativa*; *Bromus inermis*; inter-row planting; production performance; soil nutrients

豆科与禾本科间作是一种高效的种植策略,这种模式不仅能够显著提升草地的生产力和牧草品质,还能对土壤生态环境产生积极影响,促进草地生态系统的可持续发展^[1]。豆科与禾本科间作使植物根系构型和空间结构发生显著变化,导致根系生态位分离,这不仅有利于土壤养分的积累,而且促进植物生长^[2]。豆科植物通常具有较为发达的根系,能高效吸收土壤中的水分和养分,其固氮作用可为禾本科植物提供额外的氮素供应,减少对氮肥的依赖,同时禾本科植物的根系则有助于改善土壤结构,增强土壤的保水保肥能力^[3],这种互补作用使得间作草地的牧草产量显著高于单播草地,因此间作系统有显著的增产效果。合理的种植比例可有效避免种间竞争,从而提高草地生产力。当苜蓿(*Medicago sativa*)与鸭茅(*Dactylis glomerata*)以 1:1^[4]、与垂穗披碱草(*Elymus nutans*)以 3:7^[5]、与冰草(*Agropyron cristatum*)以 5:5^[6]、红豆草(*Onobrychis viciaefolia*)以 3:7^[7]混播时,草地不仅能实现较高的生产性能,还能保持高效的资源利用率^[8]。在西藏地区,适宜的混播比例有助于燕麦(*Avena sativa*)与箭筈豌豆(*Vicia sativa*)草地的产量更高、品质更优^[9]。此外,相关研究也进一步证实了豆科与禾本科间作的生态效益、经济效益。例如,玉米(*Zea mays*)/苜蓿间作(M_2A_2 、 M_4A_4)通过提高氮素有效性等显著提升了土壤的微生物多样性,对改善土壤质量有重要意义^[10]。在饲用燕麦与豆科牧草混播的研究中发现,与4种豆科植物单播相比,饲用燕麦:紫花苜蓿为 2:1 可显著提高饲用燕麦与紫花苜蓿干草产量;但与饲用燕麦单播相比,饲用燕麦:紫花苜蓿为 3:1 混播模式可显著降低饲用燕麦茎叶比^[11]。在河西走廊进行的玉米—苜蓿间作研究结果表明,间作不同行数和密度对青贮玉米的株高、茎粗、绿叶数、黄叶数、叶面积和果穗重有显著影响^[12]。

紫花苜蓿,被称为“牧草之王”,具有耐盐碱、耐旱、抗瘠薄等特点,产草量高,每 hm^2 优质苜蓿提供的粗蛋白相当于 2~3 hm^2 大豆(*Glycine max*)提供的蛋白质,并且具有固氮、改良土壤等功效。而无芒雀麦(*Bromus inermis*)具有适应性强、营养品质高、产草量大的特点,是禾本科优良牧草之一。紫花苜蓿/无芒雀麦间行种植的草地有很多优势,一方面,禾本科植物(如无芒雀麦)的根系分泌物能够促进豆科植物(如紫花苜蓿)根瘤菌的固氮作用^[13];另一方面,豆科与禾本科作物通过生态位分化,在时间和空间上实现对水分、养分等资源的高效利用^[14]。当前,对多年生牧草混播的研究,多集中在老芒麦(*Elymus sibiricus*)、紫花苜蓿、冰草、垂穗披碱草、羊草(*Leymus chinensis*)^[15]以及红豆草等牧草的同行混播与间作方面。而在宁夏半干旱地区针对紫花苜蓿与无芒雀麦间作比例的研究相对较少,仅有的研究也是针对紫花苜蓿与无芒雀麦的不同比例混合青贮^[16]、对禾草叶片碳氮代谢的影响等^[17]。灌溉条件下,在宁夏半干旱地区,紫花苜蓿与无芒雀麦不同间行种植比例对草地生产性能和土壤理化特性的影响是否存在显著差异? 这一问题的提出基于豆科与禾本科间作模式在提升草地生产力、牧草品质以及改善土壤生态环境方面的潜在优势。然而,目前对于紫花苜蓿与无芒雀麦间作比例的研究相对较少,尤其是在灌溉条件下的最佳种植比例尚不清楚。因此,本研究旨在通过对比不同间行种植比例下紫花苜蓿与无芒雀麦的农艺性状、营养品质以及土壤养分的变化,揭示其对草地生产性能和土壤理化特性的影响机制,以期为宁夏半干旱地区建植高产、优质且有利于土壤养分积累的人工草地提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于宁夏回族自治区吴忠市盐池县四墩子试验基地,东经 $107^{\circ}17'$,北纬 $37^{\circ}47'$,属于典型温带大陆性季风气候,年平均气温 8.0°C , $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的年积温 3430.3°C ,无霜期160 d左右,年降水量289.3 mm左右,年蒸发量2141.8 mm,试验地土壤主要为黄棉土,土壤pH为8.66,有机质 $12.9\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 $0.75\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷 $0.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全钾 $16.97\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 $19.80\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $7.62\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $112.21\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,灌溉条件良好。

1.2 试验设计

试验于2023年5月至2025年10月进行,以紫花苜蓿单播(CK_M)和无芒雀麦单播(CK_B)为对照。紫花苜蓿为‘宁农2号’,无芒雀麦为‘龙江’。试验种植模式如图1所示,采用条播种植,行距30 cm,设置1:1 (M_1B_1)、3:1 (M_3B_1)、1:2 (M_1B_2)、2:1 (M_2B_1)、1:3 (M_1B_3)5种间作比例,间作播量=单播播量 \times 间作比例,单播播量均为 $15\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。试验共设计7个处理,每个处理3个重复,共计21个小区。小区面积 28 m^2 ($4\text{ m}\times 7\text{ m}$),过道1 m。本试验采用漫灌的方式进行灌溉,分别在返青及每次刈割后灌溉,返青后施肥一次,收获过程未施肥,试验期间定期人工去除杂草。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 农艺性状指标测定 株高:每个小区随机挑选10株紫花苜蓿、无芒雀麦,在初花期用卷尺测量牧草从地面至叶尖或花序顶端的绝对高度。茎叶比:将10株苜蓿进行茎叶分离,待风干后分别称质量,计算茎叶比(茎叶比=茎干重/叶干重)。茎粗、分枝数和分蘖数:每个小区随机挑选紫花苜蓿、无芒雀麦各10株用游标卡尺测定紫花苜蓿一级分枝、无芒雀麦一级分蘖的直径,并统计紫花苜蓿从主茎长出的分枝数和无芒雀麦从茎基部分蘖节长出的枝条数。在每个小区内随机选取紫花苜蓿和无芒雀麦同一部位叶片各10片,编号装袋带回实验室,采用叶面积仪(AM350,英国)测量叶片面积、长、宽。在每个小区内随机选取紫花苜蓿和无芒雀麦各10个1 m样段收割鲜草,留茬高3~5 cm,测定紫花苜蓿和无芒雀麦的鲜重[1 m样段鲜草重量/(长1.0 m \times 宽0.3 m) $\times 10000\text{ m}^2$ \times 该作物在间行种植中的比例],之后取一部分装在网袋里测得鲜重并在自然风干后测得干重,利用网袋样品计算鲜干比(鲜干比=鲜重/干重)后利用鲜干比计算干草产量。

粗蛋白产量(crude protein yield, CPY)计算公式如下:

$$\text{CPY}(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}) = \text{CP} \times \text{HY} \quad (1)$$

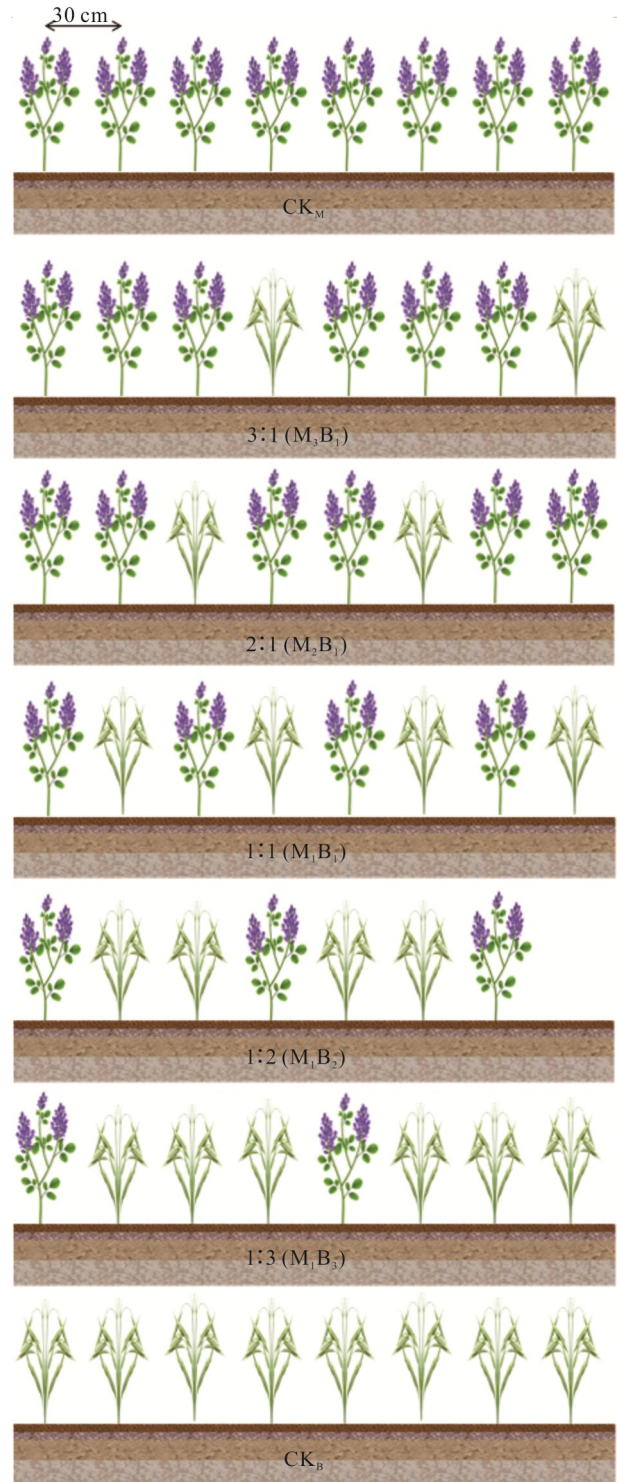


图1 种植模式

Fig. 1 Planting pattern

式中:CP为牧草粗蛋白质量分数(crude protein fraction, %);HY为干草产量(hay yield, t·hm⁻²)。

1.3.2 苜蓿和无芒雀麦的土地当量比(land equivalent ratio, LER) 土地当量比的计算公式如下:

$$LER_M = Y_{MB}/Y_M \quad (2)$$

$$LER_B = Y_{BM}/Y_B \quad (3)$$

$$LER = LER_M + LER_B \quad (4)$$

式中:LER_M和LER_B分别为紫花苜蓿和无芒雀麦的偏土地当量比;Y_M和Y_B分别为紫花苜蓿和无芒雀麦单播的产量,Y_{MB}和Y_{BM}分别为紫花苜蓿和无芒雀麦间行种植的产量。

1.3.3 营养品质测定 在每个小区选取紫花苜蓿和无芒雀麦鲜草样品各500g,剪至4~5cm长,105℃杀青1h,烘干至恒重。将烘干的紫花苜蓿和无芒雀麦草样粉碎,过0.45mm筛子。参照《饲草产品检验》^[18]测定粗蛋白(crude protein, CP)、中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)和酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)含量以及相对饲喂价值(relative feed value, RFV):

$$RFV = (120/NDF) \times (88.9 - 0.779 \times ADF) / 1.29 \quad (5)$$

1.3.4 土壤理化性质测定 在第3茬饲草收割后,按照5点取样法^[1],使用土钻取0~30cm土壤样品,过2mm筛以去除根系和枯落物。将过筛后的土样带回实验室放置于干燥阴凉处自然风干用于土壤养分测定。采用重铬酸钾容量法—外加热法测定土壤有机质;采用碱解扩散法测定土壤碱解氮;采用NaHCO₃浸提钼锑抗比色法测定土壤有效磷;采用NH₄OAc浸提火焰光度法测定土壤速效钾;采用凯氏定氮法测定土壤全氮;采用碱融—钼锑抗比色法测定土壤全磷;采用碱融—火焰光度法测定土壤全钾,具体测定步骤参照《土壤农化分析》^[19]。

1.4 数据分析

采用Microsoft Excel 2021进行数据录入和处理,采用IBM SPSS Statistics 27.0进行方差分析和隶属函数分析,采用Canoco 5进行冗余分析并制图,采用Origin 2025作图。

2 结果与分析

2.1 不同间行种植比例对紫花苜蓿与无芒雀麦农艺性状的影响

不同间行种植比例对紫花苜蓿株高、叶面积、分枝数或分蘖数、茎叶比有显著影响($P < 0.05$),但对茎粗无显著影响。M₁B₂处理下的紫花苜蓿株高显著高于M₃B₁、M₂B₁和M₁B₃处理($P < 0.05$);间作处理中,M₁B₁处理下的紫花苜蓿茎粗和叶面积最大,分别为3.56mm和318.11mm²;M₁B₃处理下的紫花苜蓿分枝数仅显著高于M₂B₁和CK_M处理($P < 0.05$);M₃B₁处理下的紫花苜蓿茎叶比与其他处理间差异不显著($P > 0.05$)。不同间行种植比例对无芒雀麦的株高、叶面积、分蘖数和茎叶比也有显著影响($P < 0.05$),但对茎粗无显著影响($P > 0.05$)。M₃B₁处理下的无芒雀麦茎粗与其他处理不显著,叶面积高于其他处理,但株高显著高于CK_B($P < 0.05$);M₁B₃处理下的无芒雀麦分蘖数仅显著高于M₁B₁和M₂B₁处理($P < 0.05$);M₂B₁的茎叶比最大,为1.52(表1)。

不同间行种植比例对紫花苜蓿和无芒雀麦的干草产量均具有显著影响($P < 0.05$)。M₂B₁处理下的紫花苜蓿干草产量显著高于M₁B₁、M₁B₂和M₁B₃处理($P < 0.05$),但显著低于CK_M($P < 0.05$)。M₁B₃处理下的无芒雀麦干草产量显著高于其他间作处理($P < 0.05$),但显著低于CK_M($P < 0.05$)。此外,M₁B₁、M₁B₂、M₁B₃处理下紫花苜蓿种植比例不变,随着无芒雀麦的种植比例增加,无芒雀麦的干草产量也呈现显著增加趋势($P < 0.05$,表1)。

M₂B₁处理下的混合干草产量为17.70t·hm⁻²,高于其他间行种植比例处理,与CK_M相当。紫花苜蓿与无芒雀麦不同间行种植比例下的混合牧草粗蛋白产量差异显著($P < 0.05$)。粗蛋白产量为1.05~2.90t·hm⁻²,M₂B₁的粗蛋白产量显著高于M₁B₂和M₁B₃($P < 0.05$,图2)。

2.2 不同间行种植比例对的土地当量比的影响

紫花苜蓿与无芒雀麦不同间行种植比例的土地当量比均大于1,M₁B₃处理下的土地当量比最大,为1.29(图3),显著高于M₂B₁、M₃B₁和M₁B₁处理($P < 0.05$)。

表 1 不同间行种植比例对紫花苜蓿与无芒雀麦农艺性状的影响

Table 1 Effects of different inter-row planting ratios on agronomic traits of *M. sativa* and *B. inermis*

物种 Species	处理 Treatment	株高 Plant height (cm)	茎粗 Stem diameter (mm)	叶面积 Leaf area (mm ²)	分枝数或分蘖数 Branch/tiller number	茎叶比 Stem-leaf ratio	干草产量 Hay yield (t·hm ⁻²)
紫花苜蓿 <i>M. sativa</i>	M ₁ B ₁	92.78±1.08bc	3.56±0.17a	318.11±11.97ab	210.00±7.93a	1.71±0.07ab	11.87±0.45c
	M ₃ B ₁	87.46±1.79d	3.19±0.12a	311.30±10.20b	189.80±5.84ab	1.75±0.05ab	14.49±0.72b
	M ₁ B ₂	94.74±1.04ab	3.41±0.12a	244.93±11.64c	201.90±6.95ab	1.67±0.06ab	9.64±0.64d
	M ₂ B ₁	87.89±1.57d	3.34±0.14a	237.09±11.72c	181.80±7.62b	1.59±0.04b	15.19±0.86b
	M ₁ B ₃	89.46±1.25cd	3.37±0.12a	246.71±10.74c	210.30±8.77a	1.57±0.06b	7.38±0.31e
	CK _M	98.21±1.10a	3.37±0.12a	346.96±11.27a	153.60±6.12c	1.83±0.07a	17.87±0.93a
无芒雀麦 <i>B. inermis</i>	M ₁ B ₁	108.86±1.33a	2.46±0.09a	2068.86±109.87a	269.08±15.76c	0.98±0.08c	4.07±0.20d
	M ₃ B ₁	102.56±1.59b	2.61±0.13a	2229.82±101.63a	286.42±21.23bc	0.96±0.07c	1.97±0.12e
	M ₁ B ₂	108.11±1.03a	2.54±0.10a	1582.82±60.10b	283.92±15.37bc	1.34±0.15ab	7.03±0.41c
	M ₂ B ₁	107.36±1.33a	2.52±0.10a	1689.89±104.57b	255.58±11.27c	1.52±0.15a	2.51±0.14e
	M ₁ B ₃	107.78±1.51a	2.54±0.11a	1437.11±74.77bc	327.67±16.86ab	1.51±0.11a	8.51±0.43b
	CK _B	87.71±1.40c	2.61±0.12a	1233.21±59.19c	343.75±10.75a	1.14±0.07bc	9.70±0.43a

M: 紫花苜蓿 *M. sativa*; B: 无芒雀麦 *B. inermis*; CK_M: 单播紫花苜蓿 *M. sativa* monoculture; CK_B: 单播无芒雀麦 *B. inermis* monoculture. 不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ($P < 0.05$). The same below.

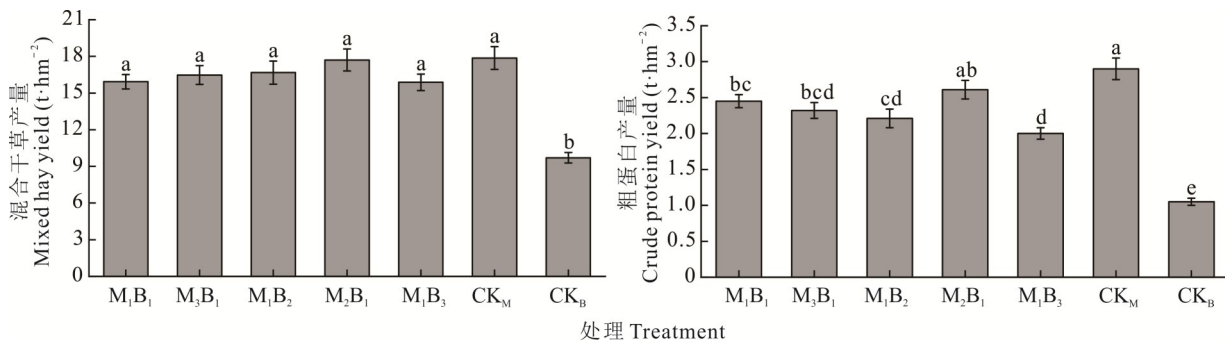


图 2 紫花苜蓿/无芒雀麦不同间行种植比例下混合干草产量和粗蛋白产量

Fig. 2 Mixed hay yield and crude protein yield under different inter-row planting ratios of *M. sativa* and *B. inermis*

不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same below.

2.3 不同间作比例对牧草营养品质的影响

不同间作比例对牧草营养品质的影响显著 ($P < 0.05$, 表 2)。其中, 牧草的粗蛋白含量为 10.73%~16.21%, 不同间行种植比例下的混合牧草粗蛋白 (CP) 含量显著高于 CK_B ($P < 0.05$), 但显著低于 CK_M ($P < 0.05$)。不同种植比例下的混合牧草中性洗涤纤维 (NDF) 含量为 55.23%~67.01%, M₂B₁ 和 M₁B₁ 处理下的中性洗涤纤维含量均显著低于 M₁B₃ 和 M₁B₂ 处理 ($P < 0.05$)。不同种植比例下的混合牧草酸性洗涤纤维 (ADF) 含量为 39.11%~44.32%, 其中, M₃B₁ 处理下的酸性洗涤纤维含量与 M₁B₂、M₂B₁、M₁B₃ 差异不显著 ($P > 0.05$), 此外 M₁B₂、M₂B₁ 处理下的酸性洗涤纤维含量显著高于 M₁B₁ 处理 ($P < 0.05$)。不同种植比例下混合牧草的相对饲喂价值 (RFV) 中 CK_M 处理最高, 为 97.29, M₁B₂ 最低, 为 77.90; M₁B₁、M₂B₁ 和 M₃B₁ 处理间的相对饲喂价值差异不显著 ($P > 0.05$), 但均显著高于 M₁B₂ 和 M₁B₃ 处理下的相对饲喂价值 ($P < 0.05$)。

2.4 不同间行种植比例下的土壤养分含量

紫花苜蓿/无芒雀麦不同间作比例对土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、有效磷、速效钾、全钾均有显著影响($P < 0.05$, 图4)。其中 M_1B_1 和 M_2B_1 处理下的土壤有效磷、速效钾含量差异不显著($P > 0.05$),但均显著高于其他处理($P < 0.05$); M_3B_1 处理下的土壤有机质含量与 M_2B_1 不显著($P > 0.05$); M_1B_1 和 M_3B_1 处理下的全钾含量仅显著高于 CK_M ($P < 0.05$); M_1B_2 处理下的碱解氮(M_1B_3 处理除外)与土壤全氮含量显著低于其他处理($P < 0.05$); M_2B_1 处理下的土壤有机质、碱解氮、有效磷、速效钾含量显著高于 CK_M 处理($P < 0.05$),但土壤全磷含量显著低于 CK_M 处理($P < 0.05$); CK_B 处理下的全磷含量显著高于其他处理($P < 0.05$)。

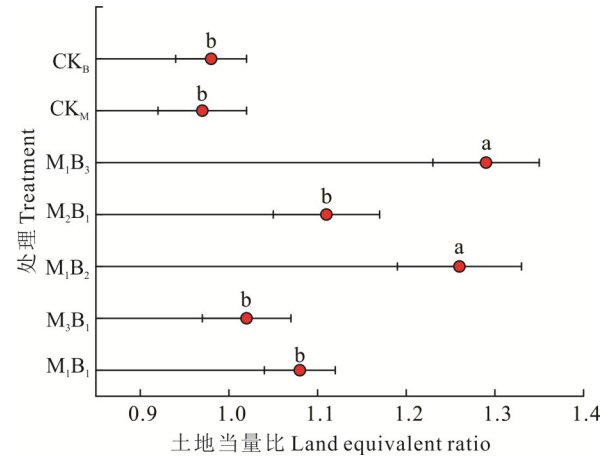


图3 不同间行种植比例的土地当量比

Fig. 3 Land-equivalent ratios for different inter-row planting ratios

表2 紫花苜蓿/无芒雀麦不同间行种植比例下的牧草营养品质

Table 2 Forage nutritional quality under different inter-row planting ratios of *M. sativa* and *B. inermis*

处理 Treatment	粗蛋白 Crude protein (CP, %)	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber (NDF, %)	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber (ADF, %)	相对饲喂价值 Relative feeding value (RFV)
M_1B_1	14.73±0.21b	63.37±1.14b	42.73±0.44b	83.78±1.55b
M_3B_1	13.84±0.13c	60.40±0.33c	44.32±0.32a	84.45±0.80b
M_1B_2	12.27±0.16d	66.18±0.38a	43.96±0.32a	77.90±0.80c
M_2B_1	14.36±0.12b	62.40±0.58b	43.97±0.42a	82.69±1.23b
M_1B_3	11.68±0.13e	67.01±0.35a	43.51±0.25ab	78.75±0.76c
CK _M	16.21±0.18a	55.23±0.62d	40.22±0.46c	97.29±1.81a
CK _B	10.73±0.25f	65.77±0.22a	39.11±0.32d	82.61±0.48b

2.5 不同间行种植比例下的土壤理化性质与生产性能的相关性分析

对于紫花苜蓿而言,茎粗与土壤全氮和全磷均呈正相关关系;叶面积与土壤有机质、全氮、全钾、碱解氮和有效磷均呈正相关关系;株高与土壤有机质和全氮含量均呈负相关关系。对于无芒雀麦而言,株高与土壤全氮、碱解氮、有效磷、速效钾均呈正相关关系;茎粗、分蘖数与土壤全磷含量有正向关系;叶面积与土壤有机质和全氮含量呈正相关关系(图5)。

2.6 冗余分析

冗余分析结果表明,混合产量与土壤速效钾、碱解氮含量呈正相关关系;粗蛋白产量与土壤速效钾、碱解氮、全氮含量呈正相关关系;土地当量比与土壤速效钾、有效磷含量呈正相关关系(图6)。

2.7 紫花苜蓿/无芒雀麦间作效应的综合评价

将混合干草产量、粗蛋白产量、粗蛋白含量、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维、相对饲喂价值、土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾13个指标进行降维处理,提取特征值大于1的主成分后得到3个主成分,累积贡献率达86.310%(表3)。以3个主成分的评分系数为基础,隶属函数分析结果表明,综合排名最佳的处理为 M_2B_1 ,其次是 M_1B_1 ,隶属函数值(D值)分别为0.764和0.632;综合排名最低的为 CK_B ,其次是 M_1B_2 ,D值分别为0.184和0.236(表4)。不同间行比例排名为 $M_2B_1 > M_1B_1 > M_3B_1 > CK_M > M_1B_3 > M_1B_2 > CK_B$,因此 M_2B_1 处理的间作效应最优。

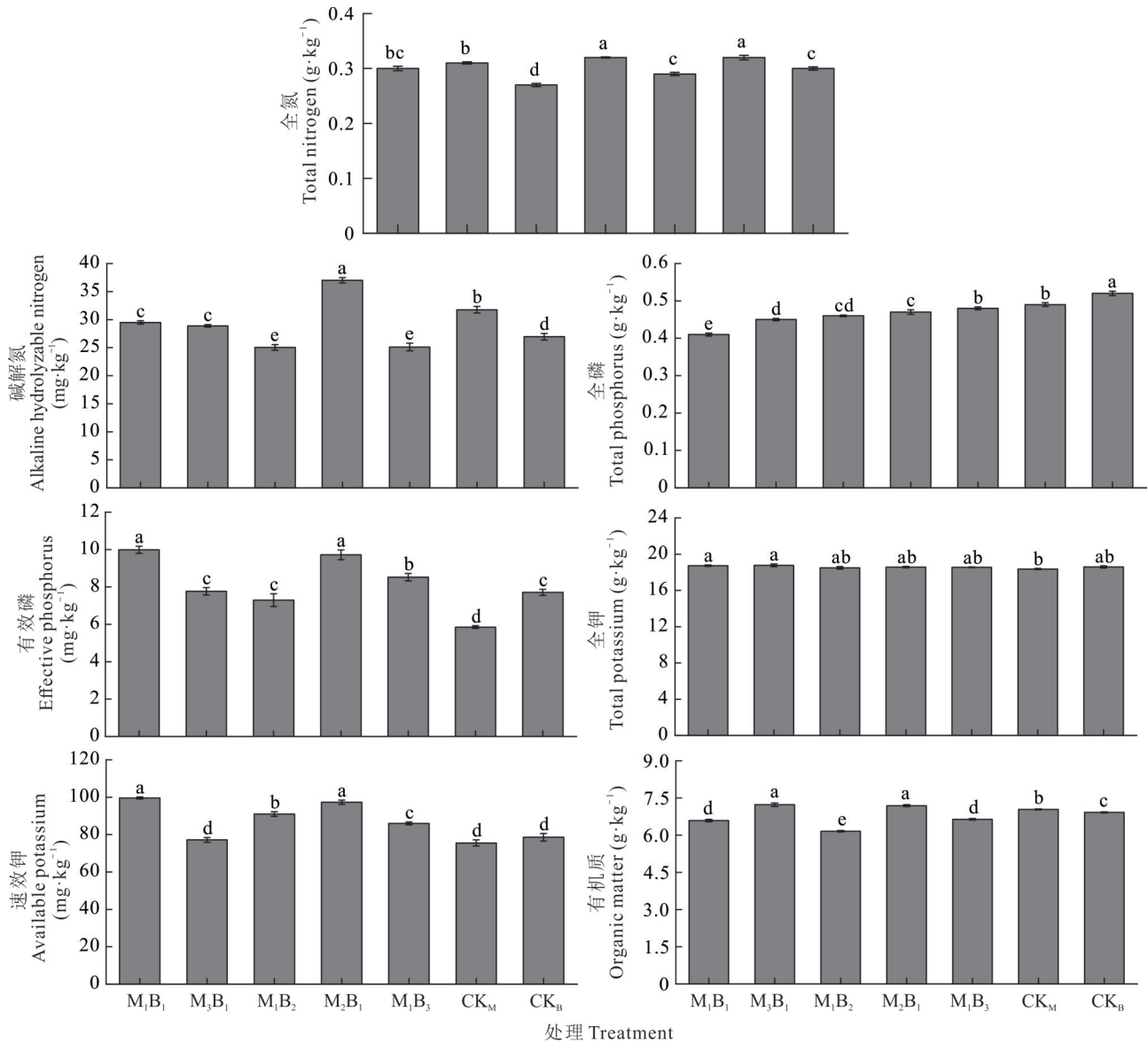


图 4 紫花苜蓿/无芒雀麦不同间行种植比例下的土壤养分含量

Fig. 4 Soil nutrient content under different inter-row planting ratios of *M. sativa* and *B. inermis*

3 讨论

3.1 不同间行种植比例对牧草农艺性状、产量、营养品质的影响

间作是在同一块地里同时种植两种或两种以上作物的种植方式,能优化利用土地、水、光和养分,以获得比单一作物更高的产量^[20]。本研究中,不同间行种植比例下的紫花苜蓿株高、叶面积、分枝数、茎叶比与单播相比均发生了不同程度的变化,其中 M₂B₁、M₃B₁与 CK_M相比,紫花苜蓿的株高分别降低了 10.51%、10.95%,但分枝数分别增加了 18.36%、23.57%;相比于 CK_M,M₁B₁处理的紫花苜蓿分枝数提高了 36.72%。相比于 CK_B,虽然不同间行种植比例下无芒雀麦的分蘖数有所降低,但株高、叶面积均有所提高,其中 M₁B₁处理使无芒雀麦株高提高 24.11%、叶面积提高 67.76%,这与曹雪乔等^[11]对饲用燕麦与豌豆(*Pisum sativum*)混播可能影响牧草形态特征的研究结果相似。分枝数和分蘖数在不同间作比例下也表现出显著差异,表明间作比例对牧草的分枝和分蘖能力具有重要影响。这些变化可能与种间竞争和资源分配有关,合理的间作比例能够优化牧草的生长空间和资源利用效率^[21]。谢开云等^[22]的研究也表明,将无芒雀麦和紫花苜蓿以 1:1 比例进行种植,随着植物的生长,无芒雀麦的竞争力呈现逐渐下降的趋势,紫花苜蓿的竞争力反而逐渐上升。说明豆科牧草在混播群落中的竞争力强于

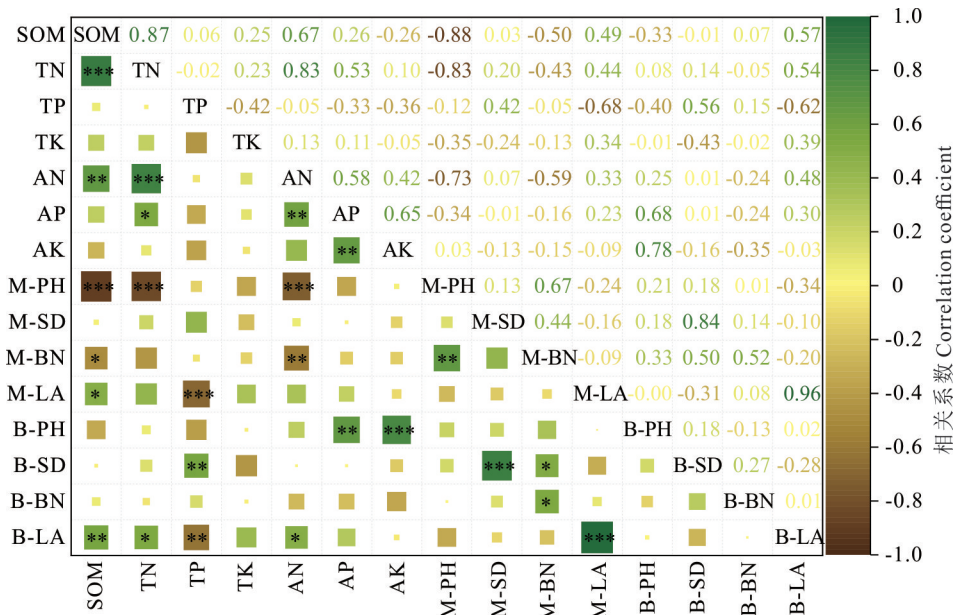


图5 紫花苜蓿/无芒雀麦的农艺性状指标与土壤理化性质的关系

Fig. 5 Relationship between agronomic trait indicators and soil physico-chemical properties of *M. sativa* and *B. inermis*

SOM: 土壤有机质 Soil organic matter; TN: 全氮 Total nitrogen; TP: 全磷 Total phosphorus; TK: 全钾 Total potassium; AN: 碱解氮 Alkaline hydrolyzable nitrogen; AP: 有效磷 Effective phosphorus; AK: 速效钾 Available potassium; M-PH: 紫花苜蓿-株高 *M. sativa*-plant height; M-SD: 紫花苜蓿-茎粗 *M. sativa*-stem diameter; M-BN: 紫花苜蓿-分枝数 *M. sativa*-number of branches; M-LA: 紫花苜蓿-叶面积 *M. sativa*-leaf area; B-PH: 无芒雀麦-株高 *B. inermis*-plant height; B-SD: 无芒雀麦-茎粗 *B. inermis*-stem diameter; B-BN: 无芒雀麦-分蘖数 *B. inermis*-number of tillers; B-LA: 无芒雀麦-叶面积 *B. inermis*-leaf area. 下同 The same below. *: $P \leq 0.05$; **: $P \leq 0.01$; ***: $P \leq 0.001$.

禾本科牧草。

豆科和禾本科的间作是最为常见的间作模式,通常表现出产量优势^[20]。紫花苜蓿和无芒雀麦不同间行种植比例下的牧草产量则有不同程度的差异。本研究中, M_2B_1 、 M_1B_1 、 M_1B_2 间作处理下紫花苜蓿和无芒雀麦产量与单作处理之间差异显著 ($P < 0.05$)。 M_2B_1 处理下的混合干草产量达 $17.70 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 与 CK_M 相当且高于无芒雀麦单播, 这表明间作相较于单作, 在牧草生产中具有显著优势, 这与张译尹等^[23]在苜蓿种子田间作小黑麦 (*Triticosecale*) 得出的小黑麦与紫花苜蓿间作其总干草产量较紫花苜蓿单作有所提高的研究结果一致。间作模式中 M_2B_1 的粗蛋白产量与 CK_M 无显著差异, 这表明间作相对于单作, 群体蛋白产量并不会显著下降, 这与陈彦龙等^[12]在河西走廊玉米-苜蓿间作体系中的研究结果相一致。因此, 在实际生产中, 需综合考虑产量和品质, 选择合适的间作比例。

营养品质是评价牧草品质的重要指标之一, 直接关系到其在畜牧业中的利用价值^[24]。本研究发现 M_2B_1 处理下的粗蛋白含量较 CK_B 提高了 33.83%, 表明间作对提高无芒雀麦的粗蛋白含量有积极作用^[12], 这与冯琴等^[25]对牧草混播中加入豆科植物能明显提升牧草营养品质的研究结果相一致。 M_3B_1 处理下的相对饲喂价值

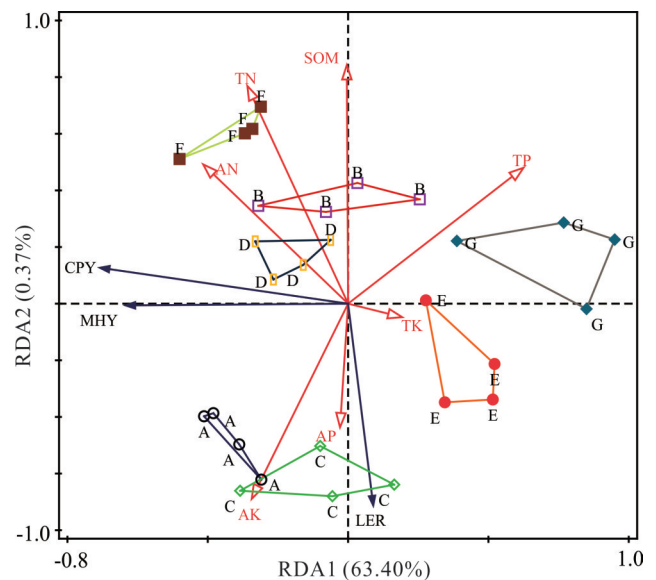


图6 不同间行种植比例下牧草产量、粗蛋白产量、土地当量比与土壤养分含量的冗余分析

Fig. 6 Redundancy analysis (RDA) of forage yield, crude protein yield (CPY), land equivalent ratio (LER) and soil nutrient content of different inter-row planting ratios

MHY: 混合干草产量 Mixed hay yield. A: M_1B_1 ; B: M_3B_1 ; C: M_1B_2 ; D: M_2B_1 ; E: M_1B_3 ; F: CK_M ; G: CK_B .

表 3 不同间行种植比例下各指标的特征值和累积贡献率

Table 3 Eigenvalues and cumulative contributions rate of indicators under different inter-row planting ratios

指标 Index	主成分 Principal component (PC)			指标 Index	主成分 Principal component (PC)		
	1	2	3		1	2	3
粗蛋白含量 Crude protein content	0.171	0.079	-0.072	酸性洗涤纤维 Acid detergent fibre	-0.020	0.212	-0.068
中性洗涤纤维 Neutral detergent fibre	-0.180	0.042	0.041	全磷 Total phosphorus	-0.013	-0.225	0.044
粗蛋白产量 Crude protein yield	0.145	0.131	-0.189	有效磷 Effective phosphorus	-0.048	0.189	0.275
相对饲喂价值 Relative feeding value	0.164	-0.099	-0.048	全钾 Total potassium	-0.050	0.118	0.314
全氮 Total nitrogen	0.157	-0.026	0.264	有机质 Organic matter	0.121	-0.053	0.330
碱解氮 Alkaline hydrolyzable nitrogen	0.141	0.067	0.201	特征值 Eigenvalue	5.326	3.892	2.002
混合干草产量 Mixed hay yield	0.111	0.153	-0.233	贡献率 Contribution rate (%)	40.971	29.941	15.398
速效钾 Available potassium	-0.039	0.213	0.028	累积贡献率 Cumulative contribution rate (%)	40.971	70.913	86.310

较 CK_B 提高了 2.23%，除单作外，M₁B₁ 处理下的酸性洗涤纤维含量最低，为 42.73%，说明间作比例对牧草的纤维含量具有重要影响，与许莹月等^[1]的研究结果相似。相对饲喂价值方面，CK_M 处理的值最高，表明 CK_M 处理在提高牧草饲喂价值方面具有明显优势。

3.2 不同间行种植比例对土壤养分的影响

土壤养分含量是衡量草地土壤质量和肥力的关键指标，直接影响牧草的生长状况和草地的生产力^[26]。在草地生态系统中，豆科与禾本科牧草的混播模式不仅能够显著提高牧草产量和品质，还具有较高的氮替代潜力，从而实现草地的减氮增效^[27]。这种优势的关键在于适宜的种植比例，种植比例的优化能够有效提升土壤养分含量，进而改善草地的生态功能和生产性能^[28]。本研究中，不同间行种植处理下的土壤养分差异显著，与 CK_B 相比，M₂B₁ 显著提高了土壤有效磷和速效钾含量，这与豆禾牧草混播能够显著提高土壤中有机质和多种矿质元素的含量，促进表层土壤氮、磷、钾等关键养分的富集，从而为牧草生长提供更为丰富的营养物质的研究结果相似^[29]。豆科牧草在间作系统中的固氮作用是土壤氮素的重要来源。本研究通过分析紫花苜蓿与无芒雀麦不同间行种植比例对土壤养分的影响发现，随着无芒雀麦比例的增加，土壤碱解氮含量呈下降趋势。这一现象可能与禾本科牧草的比例过高抑制豆科牧草的生长，进而降低其固氮效率有关^[30]。这一结果印证了前人关于豆科牧草比例对土壤微生物群落及酶活性影响的研究^[31]，即适当增加豆科牧草比例有利于土壤养分转化和肥力提升。同时，M₂B₁ 处理的全氮 (CK_M 除外) 和碱解氮含量均显著高于其他处理 ($P < 0.05$)，表明该比例下两种牧草的共生关系更为协调，这可能通过优化根际微生物的群落结构，促进了微生物的活动，也可能是因为改善了土壤物理结构、提高了氮素固定和转化效率^[32]。

与单作相比，紫花苜蓿与无芒雀麦的间作模式能够显著提高大多数土壤养分的利用率。例如，M₂B₁ 处理与 CK_B 相比，土壤有机质、全氮、碱解氮和有效磷含量均有所提升^[33]。这表明间作模式通过优化植物根系的分布和功能，能够更有效地利用土壤中的养分资源。此外，本研究还发现各间作比例下的有效磷含量均高于 CK_B (M₁B₂ 除外)，这可能与紫花苜蓿和无芒雀麦根系分布的空间差异有关^[34]。不同植物根系在土壤中的分布和活动范围不同，这种差异可以促进土壤中磷素的释放和吸收，从而提高土壤中速效磷的含量。

土壤养分与牧草生长及草地生产性能之间有着重要的关系。对紫花苜蓿而言，其茎粗与土壤全氮和全磷含

表 4 不同间行种植比例的隶属函数值及其排名

Table 4 Membership function values and their ranking for different inter-row planting ratios

处理 Treatment	隶属函数值 Membership function value	排名 Ranking
M ₁ B ₁	0.632	2
M ₃ B ₁	0.604	3
M ₁ B ₂	0.236	6
M ₂ B ₁	0.764	1
M ₁ B ₃	0.310	5
CK _M	0.589	4
CK _B	0.184	7

量呈显著正相关关系($P < 0.05$),表明氮、磷养分的有效性直接影响苜蓿茎的形态建成^[35]。对无芒雀麦而言,其生长性状对土壤养分的响应呈现多维特征:株高与土壤全氮、全钾、碱解氮、有效磷和速效钾含量均呈正相关关系;茎粗和分蘖数与全磷含量显著正相关;叶面积与有机质及全氮含量正相关。这一结果说明,无芒雀麦通过差异化利用土壤养分资源来协调其生长策略,其中氮、钾养分主要驱动垂直生长(株高),而磷素则更显著影响横向扩展(茎粗、分蘖)^[36]。在草地生产性能层面,混合产量与速效钾、碱解氮含量呈显著正相关关系;粗蛋白产量同时受速效钾、碱解氮和全氮含量的正向调控;土地当量比与速效钾、有效磷含量正相关,这些研究结果与张小娟等^[37]关于“土壤全氮含量决定牧草干草产量”的结论相互印证,进一步揭示了速效钾和碱解氮作为关键限制性养分,对产量和品质的双重调控作用^[38]。同时,这种养分和产量之间存在显著的间作比例依赖性,当豆科与禾本科牧草配置比例适当时(如M₂B₁),可以通过优化根际养分的利用效率、增强种间互补效应、提高养分时空利用的能力,协同提升系统生产力^[39]。

4 结论

与其他间行种植比例以及单播相比,紫花苜蓿与无芒雀麦按2:1间行种植时,在土地资源利用效率、生产力提升、经济效益方面表现更为显著,同时也有利于土壤养分的积累,故紫花苜蓿与无芒雀麦按2:1间行种植可为宁夏半干旱地区建植高产、优质和有利于土壤养分积累的人工草地提供技术参考。

参考文献 References:

- [1] Xu Y Y, Hou Y R, Wang J, *et al.* Effects of intercropping mixture of legume and grass on grassland production performance and soil nutrients. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(10): 75–86.
许莹月, 侯钰荣, 王静, 等. 豆禾间行混播对草地生产性能与土壤养分的影响. *中国草地学报*, 2024, 46(10): 75–86.
- [2] Wu X J, Yang M, Lu Y X, *et al.* Effects of mixing ratio and nitrogen fertilization on root characteristics in the common vetch/oat mixture. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(9): 106–116.
吴晓娟, 杨梅, 芦奕晓, 等. 混播比例和施氮肥对箭筈豌豆/燕麦草地根系特性的影响. *草业学报*, 2020, 29(9): 106–116.
- [3] Wang Y F, Liu H Q, Zhao X N, *et al.* Effects of water and root separation on nitrogen uptake, utilization and transfer in a gramineae-legume intercropping system. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(4): 279–287.
王一帆, 刘华清, 赵西宁, 等. 禾豆间作系统水分和根系分隔对牧草氮素吸收利用及转移的影响. *水土保持学报*, 2024, 38(4): 279–287.
- [4] Xiao Y. Study on yield and efficiency increasing mechanism of the mixed planting mode of alfalfa and orchard grass in different row ratios. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2021.
肖毅. 苜蓿/鸭茅不同行比混播模式增产增效机制研究. 太原: 山西农业大学, 2021.
- [5] Zhao L J, Kou X X, Wang T M. Response of the relationship between mixed sowing of alfalfa and *Elymus nutans* to water content. *Chinese Journal of Grassland*, 2025, 47(2): 80–90.
赵力军, 寇潇雪, 王铁梅. 紫花苜蓿和垂穗披碱草混播间关系对水分的响应. *中国草地学报*, 2025, 47(2): 80–90.
- [6] Effects of mixed sowing ratio on root properties of *Medicago sativa* and *Agropyron cristatum*. *Pratacultural Science*, 2025, 42(5): 1222–1234.
侯钰荣, 许莹月, 兰吉勇, 等. 紫花苜蓿和冰草混播比例对根系属性的影响. *草业科学*, 2025, 42(5): 1222–1234.
- [7] Zhou D C. Study on forage productivity and soil physical and chemical properties of alfalfa-sainfoin mixed pasture in the Longzhong Loess Plateau. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.
周栋昌. 陇中黄土高原紫花苜蓿与红豆草混播草地生产性能和土壤理化性质研究. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [8] Zheng W, Zhu J Z, Jianaerguli, *et al.* Effects of different mixed sowing patterns on production performance of legume-grass mixture. *Chinese Journal of Grassland*, 2011, 33(5): 45–52.
郑伟, 朱进忠, 加娜尔古丽, 等. 不同混播方式对豆禾混播草地生产性能的影响. *中国草地学报*, 2011, 33(5): 45–52.
- [9] Li J K, Sun T, Wangzha, *et al.* Effects on mixture sowing ratio on the yield and quality of both vetch and oat in Tibet. *Acta Agrestia Sinica*, 2011, 19(5): 830–833.

- 李佶恺, 孙涛, 旺扎, 等. 西藏地区燕麦与箭筈豌豆不同混播比例对牧草产量和质量的影响. 草地学报, 2011, 19(5): 830—833.
- [10] Liang S W, Zhou H N, Du G J, *et al.* Effects of maize/alfalfa intercropping on microbial communities in cinnamon soil. Chinese Journal of Ecology, 2025, <https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q.20250626.1150.004>.
梁思维, 周桦楠, 杜桂娟, 等. 玉米/苜蓿间作对褐土微生物群落的影响. 生态学杂志, 2025, <https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q.20250626.1150.004>.
- [11] Cao X Q, Lin Y, Zhao L J, *et al.* Effects of mixed sowing of forage oats and legumes on forage yield and stem-leaf ratio. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(11): 58—65.
曹雪乔, 林悦, 赵丽娟, 等. 饲用燕麦与豆科牧草混播对饲草产量及茎叶比的影响. 中国草地学报, 2024, 46(11): 58—65.
- [12] Chen Y L, Qi S, Xu R X, *et al.* Effects of planting row number and density on maize performance in Hexi Corridor corn-alfalfa intercropping system. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(6): 2013—2022.
陈彦龙, 齐帅, 许瑞轩, 等. 河西走廊玉米-苜蓿间作体系行数与密度对玉米生产性能的影响. 草地学报, 2025, 33(6): 2013—2022.
- [13] Huang N. Effect of nitrogen addition and grass root secretion on inter-rooted nitrogen deposition and nodule fixation in a legume-grass mixed grassland. Hohhot: Inner Mongolia University, 2023.
黄楠. 氮添加和禾草根分泌物对豆禾混播氮沉积及结瘤固氮的影响. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2023.
- [14] Zhou Y X, Yue X P, Wei Z W, *et al.* Development prospect of mixed planting of legume and gramineae forage in winter fallow field in the Yangtze-Huaihe region. Pratacultural Science, 2021, 38(2): 304—315.
周雅欣, 乐祥鹏, 魏臻武, 等. 江淮地区冬闲田豆禾牧草混播生产模式的发展前景. 草业科学, 2021, 38(2): 304—315.
- [15] Qi F, Li H G, Chen W W, *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on yield of *Medicago sativa*—*Leymus chinensis* mixed grassland. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(6): 49—56.
齐非, 李海港, 陈薇薇, 等. 氮磷添加对紫花苜蓿-羊草混播草地生产力的影响. 中国草地学报, 2024, 46(6): 49—56.
- [16] Wu L T, Chen S, Hu M J, *et al.* Effect of different mixing ratio of alfalfa and *Bromus inermis* on silage quality. Feed Research, 2024, 47(13): 118—123.
乌力塔, 陈肃, 胡梦洁, 等. 紫花苜蓿与无芒雀麦不同混合比例对其青贮品质的影响. 饲料研究, 2024, 47(13): 118—123.
- [17] Zhang Y L, Teng Z, Zhang Y X. Effects of the pattern and proportion of mixed sowing alfalfa-smooth brome on the carbon and nitrogen metabolism in its leaves. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(12): 3744—3749.
张永亮, 滕泽, 张玉霞. 苜蓿-无芒雀麦混播方式和比例对禾草叶片碳氮代谢的影响. 草地学报, 2023, 31(12): 3744—3749.
- [18] Yu Z, Jia Y S, Li C F. Forage product inspection. Beijing: Science Press, 2013: 28—43.
玉柱, 贾玉山, 李存福. 饲草产品检验. 北京: 科学出版社, 2013: 28—43.
- [19] Bao S D. Soil agrochemical analysis (the third edition). Beijing: China Agricultural Press, 2000.
鲍士旦. 土壤农化分析(第3版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] Sun G T, Bao G R, Tai J C, *et al.* Effect of maize and peanut intercropping on crop and soil characteristics. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2025, 41(5): 7—12.
孙广涛, 包桂荣, 邵继承, 等. 玉米花生间作对作物及土壤特性的影响. 中国农学通报, 2025, 41(5): 7—12.
- [21] Chen X, Li S S, Wang N X, *et al.* Effects of different intercropping patterns on interspecific competition pattern and production performance of triticale and common vetch grassland. Grassland and Turf, 2023, 43(5): 5—14.
陈雪, 黎松松, 王宁欣, 等. 不同间作方式对小黑麦+箭筈豌豆草地种间竞争格局和生产性能的影响. 草原与草坪, 2023, 43(5): 5—14.
- [22] Xie K Y, Zhang Y J, Li X L, *et al.* Competition and coexistence of alfalfa (*Medicago sativa* L.) and smooth brome (*Bromus inermis* Layss.) in mixture. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(18): 3767—3778.
谢开云, 张英俊, 李向林, 等. 无芒雀麦和紫花苜蓿在(1:1)混播中的竞争与共存. 中国农业科学, 2015, 48(18): 3767—3778.
- [23] Zhang Y Y, Wang B, Wang T F, *et al.* Effects of intercropping triticale with alfalfa on system yield resource utilization and alfalfa seed yield. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(8): 43—53.

- 张译尹, 王斌, 王腾飞, 等. 苜蓿种子田间作小黑麦对饲草产量、水分利用及苜蓿种子产量的影响. 草业学报, 2025, 34(8): 43—53.
- [24] Wang X. Study on the spatiotemporal characteristics of alfalfa/gramineous forage intercropping effects and root interactions. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2023: 74—79.
汪雪. 紫花苜蓿/禾本科牧草间作效应及其根系互作关系的时空特征研究. 兰州: 甘肃农业大学, 2023: 74—79.
- [25] Feng Q, He X L, Wang B, *et al.* A study of mixed sowing effects for oat and common vetch in the Ningxia Yellow River Irrigation Area. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(3): 107—119.
冯琴, 何小莉, 王斌, 等. 宁夏引黄灌区燕麦与箭筈豌豆的混播效果研究. 草业学报, 2024, 33(3): 107—119.
- [26] Xu Q. Study on the mixture combination and mixed ratio of triticale and peas in the alpine pastoral area of Gansu. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2021.
徐强. 甘肃高寒牧区小黑麦与豌豆的混播组合及混播比例研究. 兰州: 甘肃农业大学, 2021.
- [27] Dou Z Y, Li S S, Tian X C, *et al.* Effects of different mixed sowing ratios on soil nitrogen substitution potential in mixed-sowing grassland with *Vicia sativa*+*Avena sativa*. *Pratacultural Science*, 2022, 39(11): 2424—2433.
窦梓懿, 黎松松, 田新春, 等. 不同混播比例对箭筈豌豆+燕麦混播草地土壤氮素替代潜力的影响. 草业科学, 2022, 39(11): 2424—2433.
- [28] Guan Z X, Naerkezi, Zhu Y Q, *et al.* Effect of different sowing patterns on production performance and soil nutrients in *Avena sativa*+*Vicia sativa* mixtures. *Pratacultural Science*, 2019, 36(3): 772—784.
关正翔, 娜尔克孜, 朱亚琼, 等. 不同混播方式下燕麦+箭筈豌豆混播草地的生产性能及土壤养分特征. 草业科学, 2019, 36(3): 772—784.
- [29] Wang J H. Effects of corn/alfalfa intercropping on soil nutrient, enzyme activity and plant growth. Guiyang: Guizhou University, 2019.
王家豪. 玉米/苜蓿间作对土壤养分、酶活性及植物生长的影响. 贵阳: 贵州大学, 2019.
- [30] Qian S Y, De K J, Feng T X, *et al.* Effect of annual grass-legume mixture on soil nutrients and forage nutrients in alpine region. *Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Sciences*, 2022, 52(4): 34—40.
钱诗祎, 德科加, 冯廷旭, 等. 高寒地区一年生禾豆混播对土壤养分与牧草营养的影响. 青海畜牧兽医杂志, 2022, 52(4): 34—40.
- [31] Yu T F, Hao F, Zhang Y L, *et al.* Response of soil enzyme and soil fertility of artificial grassland in sandy soil to different mixture ratio of alfalfa and smooth brome. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(6): 1217—1223.
于铁峰, 郝凤, 张永亮, 等. 沙地豆禾混播草地土壤酶与土壤养分对混播比例的响应. 草地学报, 2021, 29(6): 1217—1223.
- [32] 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.
- [33] Zhou J, Wang Z C, Yang F. Research progress about phytoremediation mechanisms in saline-sodic soils. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(5): 1453—1462.
周杰, 王志春, 杨帆. 盐碱土壤植物修复机制研究进展. 生态学杂志, 2024, 43(5): 1453—1462.
- [34] Duan C, Shi P L, Zong N, *et al.* Feeding solution: Crop-livestock integration via crop-forage rotation in the southern Tibetan Plateau. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 284: 106589.
- [35] Wang W H, Zheng H B, Wu Y P, *et al.* An assessment of background removal approaches for improved estimation of rice leaf nitrogen concentration with unmanned aerial vehicle multispectral imagery at various observation times. *Field Crops Research*, 2022, 283: 108543.
- [36] Shi L, Wang J, Chen Y, *et al.* Effects of combined application of bio-bacterial manure with reduced chemical fertilizer on pigment pepper growth. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2021, 58(5): 854—865.
石磊, 王军, 陈云, 等. 化肥减量配施生物菌肥对色素辣椒生长的影响. 新疆农业科学, 2021, 58(5): 854—865.
- [37] Zhang X J, Yang H, Song J C, *et al.* Effects of reduced chemical fertilizer use on oat yield and soil nutrients in the Sanjiangyuan

region. *Chinese Journal of Grassland*, 2025, 47(1): 54–64.

张小娟, 杨航, 宋建超, 等. 化肥减施对三江源区燕麦生产性能和土壤养分的影响. *中国草地学报*, 2025, 47(1): 54–64.

- [38] Guo N, Liu J, Wang Y L, *et al.* Effects of reseeded rates and fertilization levels on nutritional quality and yield of forage in a degraded grassland. *Chinese Journal of Grassland*, 2025, 47(2): 70–79.

郭楠, 刘建, 王云玲, 等. 不同补播量和施肥量对退化草地牧草营养品质和产量的影响. *中国草地学报*, 2025, 47(2): 70–79.

- [39] Homulle Z, George T S, Karley A J. Root traits with team benefits: understanding belowground interactions in intercropping systems. *Plant and Soil*, 2022, 471(112): 1–26.