

DOI: 10.11686/cyxb2025180

http://cyxb.magtech.com.cn

邓文辉, 赵小娜, 雍嘉仪, 等. 行比和燕麦密度对苜蓿种子产量及其构成因素的影响. 草业学报, 2026, 35(4): 100—111.

DENG Wen-hui, ZHAO Xiao-na, YONG Jia-yi, *et al.* Effects of intercropping oat with different densities on alfalfa seed yield and its constituent factors. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(4): 100—111.

## 行比和燕麦密度对苜蓿种子产量及其构成因素的影响

邓文辉, 赵小娜, 雍嘉仪, 管思雨, 胡国强, 王腾飞, 胡海英\*

(宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021)

**摘要:**为探究银北灌区紫花苜蓿种子田与燕麦间作条件下最适宜的密度配置及燕麦播种量,本试验在原有苜蓿宽窄行种子田(窄行Z:行距50 cm;宽行W:行距100 cm)中采用双因素裂区试验设计,主区为4个燕麦的播量水平( $S_1$ :  $90 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;  $S_2$ :  $135 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;  $S_3$ :  $180 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;  $S_4$ :  $225 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ),副区为4个播种行比( $Z_0W_2$ :在窄行不播种宽行播种2行;  $Z_0W_3$ :在窄行不播种宽行播种3行;  $Z_1W_2$ :在窄行播种1行宽行播种2行;  $Z_1W_3$ :在窄行播种1行宽行播种3行),分别对不同处理的苜蓿种子产量及种子产量构成因素进行测定分析。结果表明:苜蓿和燕麦的株高、单位面积生殖枝数、每花序小花数、每花序结荚数、每荚种子数、实际种子产量和理论种子产量均随着燕麦播量的增加呈先上升后下降的趋势,千粒重随着燕麦播量的增加持续上升。土壤贮水量与苜蓿种子产量呈显著负相关关系( $P < 0.05$ )。在播量 $S_3$ 、行比 $Z_1W_2$ 的处理中苜蓿种子产量构成因素效果最佳,苜蓿种子产量达到最高,为 $414.53 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。通过灰色关联度法对苜蓿产量及产量构成成分进行排序,可得出在银北灌区苜蓿/燕麦复合群体种子生产中,燕麦最优播种量为 $180 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,最优行比配置为在窄行播种1行宽行播种2行。

**关键词:**密度配置;苜蓿+燕麦;土壤水分;苜蓿种子产量;灰色关联度

## Effects of intercropping oat with different densities on alfalfa seed yield and its constituent factors

DENG Wen-hui, ZHAO Xiao-na, YONG Jia-yi, GUAN Si-yu, HU Guo-qiang, WANG Teng-fei, HU Hai-ying\*

College of Forestry and Grassland, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

**Abstract:** The aim of this research was to determine the optimal density and seeding rate of oat for alfalfa seed production under intercropping conditions in the Yinbei irrigation district. To this end, a field experiment was conducted with a split-plot design with two factors. The main plots consisted of four oat seeding rates ( $S_1$ :  $90 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ;  $S_2$ :  $135 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ;  $S_3$ :  $180 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ;  $S_4$ :  $225 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), and the subplots included four row ratio treatments ( $Z_0W_2$ : sown with no narrow rows and two wide rows;  $Z_0W_3$ : sown with no narrow rows and three wide rows;  $Z_1W_2$ : sown with one narrow row and two wide rows;  $Z_1W_3$ : sown with one narrow row and three wide rows). The alfalfa seed yield and its components under different treatments were measured. The results show that as the oat seeding rate increased, the plant height of alfalfa and oat, reproductive branches per unit area, number of florets per inflorescence, number of pods per inflorescence, number of seeds per pod, actual seed yield, and theoretical seed yield initially increased and then decreased, whereas the thousand-seed weight continued to increase. Soil water storage was significantly negatively correlated with alfalfa seed yield ( $P < 0.05$ ). The treatment with seeding rate  $S_3$

收稿日期:2025-05-08;改回日期:2025-06-04

基金项目:宁夏自然科学基金(2023AAC03152)和宁夏高等学校一流学科建设(草学学科)项目(NXYLXK2017A01)资助。

作者简介:邓文辉(1999—),男,甘肃天水人,在读硕士。E-mail: 1657187804@qq.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: haiying@nxu.edu.cn

and row ratio  $Z_1W_2$  optimized alfalfa seed yield components and achieved the highest yield.

**Key words:** density configuration; *Medicago sativa* + *Avena sativa* intercropping; soil moisture; alfalfa seed yield; grey relational analysis

苜蓿(*Medicago sativa*)作为全球广泛种植的优质豆科牧草,因其高蛋白含量、良好的适口性及固氮能力,在畜牧业和土壤改良中具有重要地位<sup>[1]</sup>。优质牧草种子是推动现代草业转型升级的重要物质基础,对实现草业高质量发展具有战略性支撑作用<sup>[2]</sup>。然而,研究表明,苜蓿在单作条件下易受杂草竞争、倒伏及授粉效率低等因素制约,导致种子产量难以提高<sup>[3]</sup>;同时,由于苜蓿种子生产体系不完善、收获难度大等因素,其实际产量仅为理论产量的 4% 左右,平均单产长期在 225~900 kg·hm<sup>-2</sup>徘徊,远不能满足苜蓿种植产业的需求<sup>[4]</sup>。因此,探索合理的种植模式以提高苜蓿种子产量成为研究热点之一。

Askarian 等<sup>[5]</sup>研究证明,当苜蓿播种量为 1.0 kg·hm<sup>-2</sup>时,单位面积内的花序数、结荚数最多,种子产量最高。赵梦雨等<sup>[6]</sup>通过探究播种量对苜蓿种子产量的影响发现,不同播种量下苜蓿种子产量构成因素均随播种量的增加呈先升后降的趋势,结果表明半干旱地区苜蓿种子田最佳播种量为 3.0 kg·hm<sup>-2</sup>。麦麦提敏·乃依木等<sup>[7]</sup>研究发现苜蓿种子产量受不同株距影响明显,10 cm 株距下产量最低,但结荚率较高,在 5 cm 株距下产量最高,30 cm 下次之。杜文华等<sup>[8]</sup>研究发现,增加行距会使得苜蓿株高降低,而株高与种子产量呈负相关关系,即种子产量随苜蓿株高增加而减少,同时行距对种子产量及其构成要素影响较大,而灌水量对种子产量及其构成要素的影响较小。

间作系统通过构建多物种、多层次的复合植物群落,实现了资源的高效整合与利用,不仅显著提高了单位土地面积的生产力和土地利用效率,还增强了农田生态系统的稳定性,展现出高效、高产的优势<sup>[9-10]</sup>。燕麦(*Avena sativa*)作为一种快速生长的禾本科作物,常被用作保护作物或伴生作物与豆科植物间作,以减少杂草竞争、改善田间微环境并提高资源利用效率<sup>[11]</sup>。研究表明,在苜蓿/燕麦复合群体中,燕麦因其早期快速生长的特性,能够为苜蓿幼苗提供遮阴和支撑作用,从而有效降低风害和倒伏风险,同时抑制杂草生长,增强间作系统的稳定性,并提高整体饲草产量<sup>[12]</sup>。然而,也有研究发现,间作可能会提高系统中一种饲草的产量与品质,但同时降低另一种饲草的产量与品质<sup>[13]</sup>。杨航等<sup>[11]</sup>通过研究苜蓿与燕麦的间作系统发现,影响苜蓿产量的主要因素是光合色素含量和气孔导度,而影响燕麦产量的关键因素则是株高和碳水化合物积累。可见,燕麦与苜蓿的竞争关系会显著影响苜蓿的生长和生殖发育,尤其是当密度配置不当时,可能导致苜蓿生物量积累不足或种子产量下降<sup>[14]</sup>。

宁夏地区多干旱少雨、光照充足、无霜期长,为苜蓿种子生产创造了天然优势,并且雨热同期能够满足苜蓿生长所需,非常适合苜蓿种子生产<sup>[15]</sup>。尤其在宁夏银北地区,由于有黄河水灌溉的便利条件,这里建设了千亩苜蓿种子生产基地项目。然而,苜蓿种子的收益并不理想,多年平均种子产量只有 210~225 kg·hm<sup>-2</sup>,不到固原等雨养区产区的一半。该地区苜蓿种子田采用 1.0 m×0.5 m 的宽窄行种植模式,由于行距过大,加之地下水位较高、水分充足,导致苜蓿营养生长过于旺盛,生殖生长受到抑制。同时,苜蓿倒伏现象严重,这些因素可能是造成苜蓿种子产量低的主要原因<sup>[16]</sup>。由此,本研究引入间作优势理论,在苜蓿种子田中的宽窄行内添加间作燕麦,设置不同密度,研究不同间作密度配置下苜蓿种子产量的表现及其差异,重点探讨苜蓿与燕麦如何通过种间竞争与互补关系,增加土壤水分消耗,促进苜蓿生殖生长,最后综合分析确定添加间作燕麦后提高苜蓿种子产量的最适密度配置,为该地区的苜蓿种子生产提供重要技术参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本试验在宁夏石嘴山市平罗县高庄乡惠威村(105°57' E, 38°36' N, 海拔 1100 m)进行。该地位于银川北部平原,地势低洼,属于黄河冲积平原,年平均降水量 173 mm 左右,全年降水主要集中在 6—9 月。2023 年平罗县月平均降水量、月平均温度如图 1 所示。全年平均值为 3008.6 h,日照充足;温差大;蒸发强烈,日照时数在 5—6 月

最长;年均蒸发量为1800 mm左右;蒸发量最大的月份是5月;空气相对湿度为55%;平均霜冻期为194.6 d,无霜期为171 d。降水量年际间变化较大,分布严重不均。

## 1.2 试验设计

苜蓿种子田于2020年进行宽窄行模式建植,窄行(Z)行距50 cm,宽行(W)行距100 cm,苜蓿播量为 $2.25 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,播种方式为穴播。添加间作燕麦于2023年开展,采用裂区试验设计,主区为燕麦播种量,即 $90 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ( $S_1$ )、 $135 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ( $S_2$ )、 $180 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ( $S_3$ )和 $225 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ( $S_4$ )4个水平,副区为4种间作行比模式,即在窄行不播种宽行播种2行( $Z_0W_2$ )、在窄行不播种宽行播种3行( $Z_0W_3$ )、在窄行播种1行宽行播种2行( $Z_1W_2$ )、在窄行播种1行宽行播种3行( $Z_1W_3$ )。试验总计16个间作处理,1个苜蓿单作(M),具体详见表1,每处理重复3次,共51个小区,小区面积 $30 \text{ m}^2$ ,每个小区之间间隔1 m,每个试验主区之间设置2 m隔离带。在2023年3月上旬顶凌播种燕麦,6月初收割第1茬饲草(此时,燕麦处于抽穗期,苜蓿处于初花期),在9月中旬(第2茬苜蓿成熟期)收获苜蓿种子。各小区的磷肥和钾肥于苜蓿播种前及返青前一次性施入,磷肥( $P_2O_5$ )施量为 $105 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、钾肥( $K_2O$ )施量为 $90 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,田间常规管理,在2023年试验研究期间无灌溉。

## 1.3 测试指标与方法

**1.3.1 饲草生长参数的测定** 株高、密度的测定时间为苜蓿开花期,在每个小区内选取有代表性的苜蓿、燕麦各10株,测定其自然高度;在每个小区内选取代表性的5个1 m样段,测定苜蓿和燕麦密度。

**1.3.2 土壤水分指标的测定** 土壤含水量测定时间为苜蓿盛花期,测定方法为烘干法<sup>[17]</sup>,在苜蓿与燕麦行间分层取0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm土层的土样,用精度为0.01 g的天平称取土样的重量,在105 °C的烘箱内将土样烘6~8 h至恒重,测定烘干土样质量,计算土壤含水量。

$$\text{土壤含水量} = (\text{烘干前土样质量} - \text{烘干后土样质量}) / \text{烘干后土样质量} \times 100\%$$

用0~100 cm土壤含水量计算土壤贮水量(soil water storage, SWS, mm),SWS为5个不同土壤层次贮水量的总和,计算公式如下<sup>[18]</sup>:

$$SWS = \sum_{i=1}^6 h \times \alpha \times \theta \times 10$$

式中: $h$ 为土层厚度(cm); $\alpha$ 为土壤容重( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ); $\theta$ 为土壤质量含水量。

**1.3.3 苜蓿种子产量及产量构成因素的测定** 种子产量构成因素的相关指标测定时间为苜蓿盛花期,种子产量的测定时间为成熟期,各小区在盛花期随机取生殖枝条20枝,统计其每生殖枝的花序数量。在不同处理的小区内随机挑选20个花序并用红色毛线标记,统计其每花序上的小花数量。各小区在结荚期统计红色毛线标记花序的荚果数量。在每个小区内随机选取20个小荚,统计每个小荚内种子的数量。在苜蓿结荚期,在各小区随机

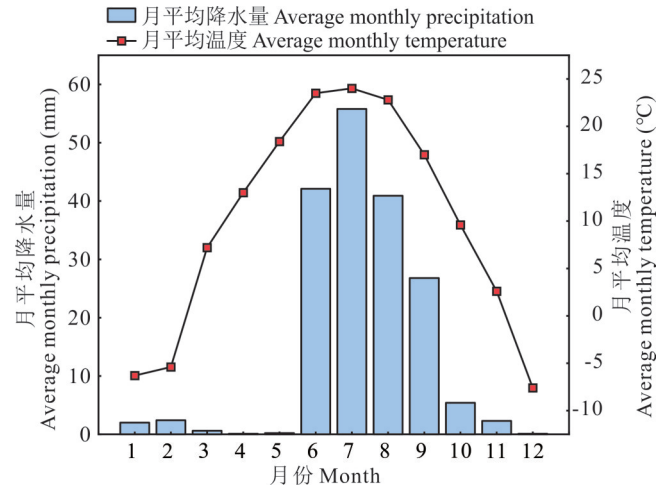


图1 平罗县2023年月平均降水量、月平均温度

Fig. 1 Average monthly precipitation and average monthly temperature in Pingluo County in 2023

表1 不同燕麦播量水平和播种行比试验处理

Table 1 Experimental treatment of different oat seeding rates and row ratios

播种行比 Seeding row ratio	燕麦播量 Oat seeding rate ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )			
	90 ( $S_1$ )	135 ( $S_2$ )	180 ( $S_3$ )	225 ( $S_4$ )
$Z_0W_2$	$S_1Z_0W_2$	$S_2Z_0W_2$	$S_3Z_0W_2$	$S_4Z_0W_2$
$Z_0W_3$	$S_1Z_0W_3$	$S_2Z_0W_3$	$S_3Z_0W_3$	$S_4Z_0W_3$
$Z_1W_2$	$S_1Z_1W_2$	$S_2Z_1W_2$	$S_3Z_1W_2$	$S_4Z_1W_2$
$Z_1W_3$	$S_1Z_1W_3$	$S_2Z_1W_3$	$S_3Z_1W_3$	$S_4Z_1W_3$

$Z_0W_2$ : 在窄行不播种宽行播种2行 Sown with no narrow rows and two wide rows;  $Z_0W_3$ : 在窄行不播种宽行播种3行 Sown with no narrow rows and three wide rows;  $Z_1W_2$ : 在窄行播种1行宽行播种2行 Sown with one narrow row and two wide rows;  $Z_1W_3$ : 在窄行播种1行宽行播种3行 Sown with one narrow row and three wide rows; 下同 The same below.

选取 5 个 1 m 样段,近地面刈割,统计有效的生殖枝条数量,并换算成单位面积生殖枝条数量。在每个小区收获的种子清选后,随机选取 6 个重复,每个重复 1000 粒种子,计算相应的种子千粒重。当 3/4 的荚果呈黑褐色时,随机选取 5 个 1 m 样段,用镰刀人工收获,对其进行晾晒、脱粒以及清选处理,并计算单位面积种子实际产量。

理论种子产量 = 单位面积生殖枝 × 每生殖枝花序数 × 每花序小花数 × 每荚种子数 × 千粒重 ×  $10^{-3}$ [19]。

#### 1.4 数据统计与分析

采用 Excel 2023 软件处理基础数据,采用 SPSS 27.0 软件的单因素方差法 (one-way ANOVA) 分析处理间显著差异性 ( $P < 0.05$ ),使用 Origin 2024 软件对试验结果进行可视化处理。

采用灰色关联度法<sup>[20]</sup>对各处理种子产量优劣进行排序,具体计算公式如下:

$$\xi_i(k) = \frac{\min(i)\min(k)|x_0(k) - x_i(k)| + \rho\max(i)\max(k)|x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho\max(i)\max(k)|x_0(k) - x_i(k)|}$$

$$\gamma_i = \frac{1}{N} \sum_{k=i}^N \xi_i(k)$$

$$\omega_i = \frac{\gamma_i}{\sum \gamma_i}$$

$$\gamma_i' = \sum_{k=i}^N \omega_i(k) \times \xi_i(k)$$

式中: $\xi_i(k)$ 为关联度系数; $x_i(k)$ 为原始数据, $x_0(k)$ 为参考数据; $\min(i)\min(k)|x_0(k) - x_i(k)|$ 为两级度差最小差; $\rho$ 为分辨系数,一般取 0.5; $\max(i)\max(k)|x_0(k) - x_i(k)|$ 为两级度差最大差; $|x_0(k) - x_i(k)|$ 为  $k$  点的绝对值; $\gamma_i$ 为等权关联度; $N$ 为样本数; $\omega_i$ 为权重系数; $\gamma_i'$ 为加权关联度。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对苜蓿/燕麦复合群体生长性状的影响

在不同处理中,苜蓿株高为 93.75~102.50 cm(表 2)。其中, $S_3Z_1W_3$ 处理的苜蓿株高最高(102.50 cm),较最低值(单作苜蓿 M, 93.75 cm)提高 9.33%。燕麦株高以  $S_3Z_1W_2$  处理最高(87.92 cm),显著高于除  $S_3Z_0W_3$  和  $S_3Z_1W_3$  外的其他处理 ( $P < 0.05$ )。苜蓿和燕麦的株高均随燕麦播量的增加呈先上升后下降的趋势,并在  $S_3$  处理时达到最大值。燕麦播量对苜蓿株高无显著影响 ( $P > 0.05$ ),但对燕麦株高有显著影响 ( $P < 0.01$ );而不同行比对苜蓿和燕麦株高均无显著影响 ( $P > 0.05$ ),且燕麦播量与行比的交互作用对株高也无显著影响 ( $P > 0.05$ )。

燕麦播量对苜蓿和燕麦密度均有显著影响 ( $P < 0.01$ )。苜蓿密度随燕麦播量增加而降低,而燕麦密度则随播量增加而上升。行比及播量 × 行比交互作用对二者密度均无显著影响 ( $P > 0.05$ )。苜蓿在 M 处理中密度最高 ( $132 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$ ),显著高于除  $S_1Z_0W_3$ 、 $S_1Z_1W_2$  和  $S_1Z_1W_3$  外的其他处理 ( $P < 0.05$ )。燕麦密度以  $S_4Z_1W_2$  处理最高,并显著高于除  $S_4Z_0W_2$ 、 $S_4Z_0W_3$  和  $S_4Z_1W_3$  外的其他处理 ( $P < 0.05$ )。

### 2.2 不同处理对苜蓿/燕麦复合群体土壤含水量的影响

燕麦播量、不同行比以及燕麦播量和行比互作效应对不同土层的含水量均有显著影响 ( $P < 0.01$ ),随着燕麦播量的增加,不同土层含水量均呈先下降后上升的趋势(表 3)。在各土层中,苜蓿单播处理的土壤含水量均显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ )。各土层含水量最低值所在处理及其与苜蓿单播土层含水量相比结果如下:0~20 cm 土层  $S_3Z_1W_2$  处理最低,由单作的 10.30% 降至 6.21%,降幅 39.71%,20~40 cm 土层  $S_3Z_1W_3$  处理最低,由单作的 12.78% 降至 8.11%,降幅 36.54%,40~60 cm 土层  $S_3Z_0W_3$  处理最低,由单作的 14.91% 降至 10.43%,降幅 30.05%,60~80 cm 土层  $S_4Z_0W_3$  处理最低,由单作的 15.23% 降至 12.57%,降幅 17.47%,80~100 cm 土层  $S_3Z_1W_2$  处理最低,由单作的 18.43% 降至 15.20%,降幅 17.53%。可以看出,在燕麦播量为  $S_3$  和  $S_4$  下,各土层土壤含水量较低。

### 2.3 不同处理对苜蓿种子产量构成因素的影响

研究结果表明(表 4),燕麦播量和不同行比均会对苜蓿的单位面积生殖枝数、每生殖枝花序数、每花序小花数、每花序结荚数、每荚种子数和苜蓿种子的千粒重造成显著影响 ( $P < 0.01$ )。随着播量增加,除千粒重之外的

表2 不同处理间苜蓿和燕麦的株高及密度的比较

Table 2 Comparison of plant height and density of alfalfa and oat under different treatments

处理 Treatment	株高 Plant height (cm)		密度 Density (plants·m <sup>-2</sup> )	
	苜蓿 Alfalfa	燕麦 Oat	苜蓿 Alfalfa	燕麦 Oat
S <sub>1</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>2</sub>	95.58±0.51ef	75.75±0.99c	123.00±3.61cde	55.33±0.88g
S <sub>1</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>3</sub>	97.00±0.55de	75.75±0.72c	124.00±1.20bcd	56.00±1.15g
S <sub>1</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>2</sub>	98.25±0.82cd	75.75±2.63c	130.00±2.08ab	57.33±0.88g
S <sub>1</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>3</sub>	97.42±0.70de	76.25±2.42bc	126.67±3.18bc	56.33±0.88g
S <sub>2</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>2</sub>	99.08±0.99bcd	76.42±2.35bc	117.33±3.38def	64.00±2.31f
S <sub>2</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>3</sub>	98.92±0.84bcd	76.25±0.58bc	118.33±2.33def	66.33±2.96ef
S <sub>2</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>2</sub>	99.25±0.58bcd	76.75±0.83bc	121.00±3.51cdef	69.33±1.86cde
S <sub>2</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>3</sub>	99.00±0.58bcd	77.67±2.27bc	115.33±2.73efg	67.33±1.33def
S <sub>3</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>2</sub>	100.42±0.70abc	81.50±3.21bc	116.00±2.00defg	73.33±1.45c
S <sub>3</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>3</sub>	101.33±1.18ab	83.33±2.69ab	114.33±1.20fg	72.33±2.67cd
S <sub>3</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>2</sub>	100.50±1.02abc	87.92±1.22a	118.33±1.45def	70.67±2.40cde
S <sub>3</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>3</sub>	102.50±1.06a	86.33±2.72ab	113.00±3.06fg	74.33±1.45bc
S <sub>4</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>2</sub>	99.25±0.76bcd	77.83±0.96bc	103.00±3.21h	81.33±0.88a
S <sub>4</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>3</sub>	99.58±1.20bcd	78.75±3.63bc	104.33±1.45h	80.33±1.20a
S <sub>4</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>2</sub>	99.33±0.99bcd	78.08±1.77bc	109.00±3.61gh	82.33±1.45a
S <sub>4</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>3</sub>	100.42±0.82abc	78.50±2.12bc	105.00±1.53h	78.67±0.88ab
M	93.75±0.90f	—	132.00±1.53a	—
显著性检验 Significant test (F值 F value)				
播量 S	1.76NS	20.27**	42.51**	149.62**
行比 ZW	0.16NS	0.98NS	2.88NS	0.54NS
播量×行比 S×ZW	0.07NS	0.61NS	0.28NS	2.10NS

M: 苜蓿单作 Alfalfa monoculture; S: Broadcast volume; ZW: Row ratio; \*:  $P<0.05$ ; \*\*:  $P<0.01$ ; NS: 无显著性 Not significant; 同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P<0.05$ ) Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between different treatments ( $P<0.05$ ); 下同 The same as below.

苜蓿其他指标均呈先升后降趋势,且均在S<sub>1</sub>播量时最低,S<sub>3</sub>播量时达到峰值。S<sub>3</sub>Z<sub>1</sub>W<sub>2</sub>的单位面积生殖枝数最大,为153个·m<sup>-2</sup>,较最低处理M(139个·m<sup>-2</sup>)提高了10.07%;每生殖枝花序数为19.60~22.00个,S<sub>4</sub>Z<sub>0</sub>W<sub>3</sub>的每生殖枝花序数最大,为22个,较最低处理M(19.60个)提高了12.24%,且显著高于S<sub>1</sub>Z<sub>0</sub>W<sub>2</sub>和苜蓿单作M( $P<0.05$ );S<sub>3</sub>Z<sub>1</sub>W<sub>2</sub>的每花序小花数最大,为19.80个,较最低处理M(15.80个)提高了25.32%;每花序结荚数为9.00~10.80个,S<sub>3</sub>Z<sub>0</sub>W<sub>3</sub>、S<sub>3</sub>Z<sub>1</sub>W<sub>2</sub>和S<sub>3</sub>Z<sub>1</sub>W<sub>3</sub>的每花序结荚数相同且最大,均为10.80个,而苜蓿单作的每花序结荚数最小,为9.00个。

苜蓿种子的千粒重随燕麦播量的上升呈持续增加趋势。各处理中,千粒重为1.74~2.31g,S<sub>3</sub>Z<sub>1</sub>W<sub>2</sub>的千粒重最大,为2.31g,较最低处理M(1.74g)提高了32.76%。燕麦播量和不同行比互作效应对单位面积生殖枝数、每生殖枝花序数和每花序小花数也有显著影响( $P<0.01$ ),在同一燕麦播量下,Z<sub>1</sub>W<sub>2</sub>的单位面积生殖枝数和每花序小花数最大;在燕麦播量为S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>和S<sub>4</sub>时,Z<sub>0</sub>W<sub>3</sub>的每生殖枝花序数最大,在燕麦播量为S<sub>3</sub>时,Z<sub>0</sub>W<sub>3</sub>、Z<sub>1</sub>W<sub>2</sub>和Z<sub>1</sub>W<sub>3</sub>的每生殖枝花序数相同且大于Z<sub>0</sub>W<sub>2</sub>的每生殖枝花序数;而燕麦播量和不同行比互作效应对每荚种子数和千粒重无显著影响( $P>0.05$ )。

表 3 不同处理间土壤含水量变化

Table 3 Changes in soil moisture content among different treatments (%)

处理 Treatment	土层 Soil layer				
	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	60~80 cm	80~100 cm
S <sub>1</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>2</sub>	8.78±0.39b	10.52±0.25b	13.39±0.79b	14.75±0.47ab	17.70±0.22b
S <sub>1</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>3</sub>	8.72±0.22b	10.45±0.23b	13.45±0.22b	14.59±0.19bc	17.09±0.21bcdef
S <sub>1</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>2</sub>	8.17±0.25cd	10.00±0.24bcd	13.01±0.38b	13.78±0.12de	16.89±0.11cdef
S <sub>1</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>3</sub>	7.86±0.10d	9.34±0.12ef	12.64±0.13bcd	13.59±0.17ef	16.84±0.19cdef
S <sub>2</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>2</sub>	8.68±0.17bc	10.34±0.25bc	13.32±0.30b	14.21±0.26bcd	17.36±0.19bcd
S <sub>2</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>3</sub>	8.01±0.18d	10.02±0.11bcd	13.11±0.09b	13.98±0.11de	16.83±0.23cdef
S <sub>2</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>2</sub>	7.65±0.09def	8.79±0.10gh	11.99±0.07de	12.89±0.09g	16.68±0.11def
S <sub>2</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>3</sub>	7.75±0.05de	9.31±0.32efg	11.66±0.21ef	13.68±0.08de	16.57±0.21ef
S <sub>3</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>2</sub>	7.91±0.16d	9.80±0.11cde	12.95±0.12bc	13.89±0.10de	17.31±0.39bcde
S <sub>3</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>3</sub>	7.18±0.07fg	9.55±0.07de	10.43±0.07g	12.89±0.09g	15.77±0.13g
S <sub>3</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>2</sub>	6.21±0.13h	8.47±0.08hi	10.76±0.13g	12.69±0.12g	15.20±0.16g
S <sub>3</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>3</sub>	6.84±0.08g	8.11±0.12i	10.91±0.06fg	12.79±0.12g	15.21±0.18g
S <sub>4</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>2</sub>	8.62±0.19bc	10.30±0.27bc	12.88±0.23bc	14.11±0.21cde	17.51±0.21bc
S <sub>4</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>3</sub>	7.01±0.11g	8.68±0.08h	10.88±0.09fg	12.57±0.09g	15.42±0.41g
S <sub>4</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>2</sub>	7.71±0.12def	8.91±0.08fgh	12.11±0.14cde	13.55±0.13ef	16.81±0.16cdef
S <sub>4</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>3</sub>	7.22±0.17efg	8.44±0.13hi	11.79±0.41de	13.05±0.14fg	16.55±0.14f
M	10.30±0.16a	12.78±0.12a	14.91±0.06a	15.23±0.14a	18.43±0.29a
显著性检验 Significant test ( <i>F</i> 值 <i>F</i> value)					
播量 S	43.27**	33.05**	31.13**	28.48**	24.34**
行比 ZW	33.35**	50.90**	19.27**	26.64**	27.59**
播量×行比 S×ZW	4.40**	5.42**	4.67**	5.47**	4.80**

#### 2.4 不同处理对苜蓿种子产量的影响

燕麦播量和不同行比对苜蓿实际种子产量和理论种子产量均有显著影响( $P < 0.05$ ),随燕麦播量的增加,苜蓿实际种子产量和理论种子产量均呈先增加后下降的趋势(图 2 和表 5)。在燕麦播量为 S<sub>3</sub> 时,苜蓿种子产量最大,播量为 M 时,种子产量最小;而在同一播量下,Z<sub>1</sub>W<sub>2</sub> 的实际种子产量和理论种子产量均为最高。

燕麦播量和不同行比互作效应对实际种子产量和理论种子产量均无显著影响( $P > 0.05$ )。在各处理中,实际种子产量为 346.33~414.53 kg·hm<sup>-2</sup>,S<sub>3</sub>Z<sub>1</sub>W<sub>2</sub> 的实际种子产量最大,为 414.53 kg·hm<sup>-2</sup>,较最低 M 处理(346.33 kg·hm<sup>-2</sup>)提高了 19.69%,且显著高于其他处理( $P < 0.05$ ),而苜蓿单作的实际种子产量最小,显著低于除 S<sub>1</sub>Z<sub>0</sub>W<sub>2</sub> 外的其他处理( $P < 0.05$ )。

#### 2.5 苜蓿种子产量、种子产量构成因素及土壤水分的相关性分析

株高、单位面积生殖枝数与每生殖枝花序数、每花序小花数、每花序结荚数、每荚种子数、千粒重、实际种子产量和理论种子产量之间均呈显著正相关关系( $P < 0.05$ );密度和土壤贮水量呈显著正相关关系( $P < 0.05$ );密度、土壤贮水量与单位面积生殖枝、每生殖枝花序数、每花序小花数、每花序结荚数、每荚种子数、实际种子产量和株高呈显著负相关关系( $P < 0.05$ ,图 3)。

#### 2.6 灰色关联度分析

采用灰色关联度分析法对各处理的综合指标进行分析评价可以消除个别指标带来的片面性,使 17 个处理的综合指标具有真实可比性,灰色关联度越大,说明综合性能越高<sup>[20]</sup>。将单位面积生殖枝数、每生殖枝花序数、每花

表 4 不同处理对苜蓿种子产量构成因素的影响

Table 4 Effect of different treatments on alfalfa seed yield components

处理 Treatment	单位面积生殖枝数 Reproductive branches per m <sup>2</sup>	每生殖枝花序数 Number of inflorescences per reproductive branch	每花序小花数 Number of small flowers per inflorescence	每花序结荚数 Number of pods per inflorescence	每荚种子数 Seeds per pod	千粒重 Thousand seed weight (g)
S <sub>1</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>2</sub>	143.00±1.22f	20.20±1.10bc	16.00±1.22g	9.40±0.55cd	4.80±0.45bc	1.93±0.03ef
S <sub>1</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>3</sub>	143.20±1.30f	20.60±1.82abc	16.20±0.84fg	9.40±0.55cd	4.80±0.45bc	2.04±0.08cde
S <sub>1</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>2</sub>	146.20±2.17def	20.40±0.89abc	16.80±0.84efg	9.80±1.10abcd	5.20±0.45abc	2.11±0.01bcd
S <sub>1</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>3</sub>	145.00±0.71ef	20.40±0.89abc	16.60±0.55efg	9.40±0.55cd	5.00±0.71abc	1.99±0.01de
S <sub>2</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>2</sub>	147.20±1.64cde	21.00±1.00abc	17.40±0.89def	9.60±0.55bcd	5.20±0.84abc	1.99±0.01de
S <sub>2</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>3</sub>	148.00±0.71cde	21.40±0.55ab	17.40±0.55def	9.80±0.84abcd	5.20±0.84abc	2.11±0.01bcd
S <sub>2</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>2</sub>	150.20±2.39abc	21.20±0.84ab	18.40±0.55abcd	10.40±0.55abc	5.60±0.55ab	2.18±0.02ab
S <sub>2</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>3</sub>	149.40±1.34abcd	21.00±0.71abc	17.80±0.84cde	10.00±0.71abcd	5.40±0.55abc	2.12±0.07bc
S <sub>3</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>2</sub>	148.60±1.14bcd	21.60±0.55ab	19.40±0.55ab	10.60±0.55ab	5.60±0.55ab	1.85±0.07fg
S <sub>3</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>3</sub>	149.60±3.44abcd	21.80±1.92ab	19.60±1.52ab	10.80±0.84a	5.80±0.84a	2.21±0.01ab
S <sub>3</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>2</sub>	153.00±2.35a	21.80±0.45ab	19.80±0.84a	10.80±0.84a	5.60±0.55ab	2.31±0.02a
S <sub>3</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>3</sub>	152.00±6.60ab	21.80±1.79ab	19.60±1.67ab	10.80±1.79a	5.80±0.45a	2.13±0.05bc
S <sub>4</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>2</sub>	148.40±1.14bcde	21.60±0.55ab	18.20±0.45bcd	10.40±0.55abc	5.60±0.55ab	1.83±0.03fg
S <sub>4</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>3</sub>	150.20±2.49abc	22.00±0.71a	18.60±0.89abcd	10.60±0.55ab	5.40±0.55abc	2.20±0.01ab
S <sub>4</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>2</sub>	152.80±3.03a	21.60±0.89ab	19.00±1.58abc	10.60±0.55ab	5.60±0.55ab	2.28±0.04a
S <sub>4</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>3</sub>	150.20±2.39abc	21.60±1.14ab	18.80±0.84abc	10.60±0.55ab	5.80±0.84a	2.21±0.01ab
M	139.00±1.22g	19.60±0.55c	15.80±0.45g	9.00±0.71d	4.60±0.55c	1.74±0.06g
显著性检验 Significant test ( <i>F</i> 值 <i>F</i> value)						
播量 S	98.44**	89.31**	120.59**	40.19**	12.18**	13.51**
行比 ZW	25.48**	40.94**	42.31**	22.23**	8.52**	50.03**
播量×行比 S×ZW	2.06**	4.75**	3.89**	2.11**	0.92NS	1.91NS

序小花数、每花序结荚数、每荚种子数、千粒重、实际种子产量和理论种子产量作为参考序列 X<sub>0</sub>,对原始变量实施无量纲化处理以获取标准化数值,然后计算各点绝对差值,最后,利用这些绝对差值,计算各指标的关联系数值。各指标的关联系数为 0.3809~1.0000 (表 6),根据各指标关联系数值进行等权关联度和加权关联度排名(表 7),17 个处理的加权关联度排名为 S<sub>3</sub>Z<sub>1</sub>W<sub>2</sub>>S<sub>3</sub>Z<sub>1</sub>W<sub>3</sub>>S<sub>3</sub>Z<sub>0</sub>W<sub>3</sub>>S<sub>4</sub>Z<sub>1</sub>W<sub>2</sub>>S<sub>4</sub>Z<sub>1</sub>W<sub>3</sub>>S<sub>4</sub>Z<sub>0</sub>W<sub>3</sub>>S<sub>3</sub>Z<sub>0</sub>W<sub>2</sub>>S<sub>2</sub>Z<sub>1</sub>W<sub>2</sub>>S<sub>4</sub>Z<sub>0</sub>W<sub>2</sub>>S<sub>2</sub>Z<sub>1</sub>W<sub>3</sub>>S<sub>2</sub>Z<sub>0</sub>W<sub>3</sub>>S<sub>2</sub>Z<sub>0</sub>W<sub>2</sub>>S<sub>1</sub>Z<sub>1</sub>W<sub>2</sub>>S<sub>1</sub>Z<sub>1</sub>W<sub>3</sub>>S<sub>1</sub>Z<sub>0</sub>W<sub>3</sub>>S<sub>1</sub>Z<sub>0</sub>W<sub>2</sub>>M。

3 讨论

苜蓿种子产量受生态条件、种群密度、辅助授粉等多种因素影响,其中种植密度是最关键的影响因子,其次是土壤水分、辅助授粉和磷肥施用等<sup>[21]</sup>。本

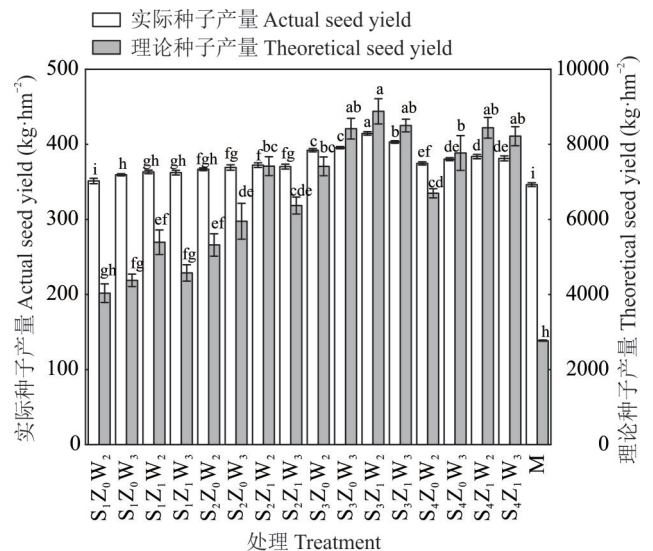


图 2 不同处理间苜蓿实际种子产量与理论种子产量比较

Fig. 2 Comparison of actual and theoretical seed yields of alfalfa under different treatments

研究发现,随着燕麦播种量的增加,苜蓿种子的产量及其主要构成因素(包括单位面积生殖枝数、每生殖枝花序数、每花序小花数和每荚种子数)均呈先升高后降低的趋势,并在燕麦播种量  $S_3$  时达到峰值,在  $S_1$  时最低。这一结果与周刊社等<sup>[22]</sup>关于苜蓿播种量对产量影响的研究结论一致:随着播种量增加,这些产量构成因素均会先增加后下降。然而,本研究中苜蓿种子千粒重却随着燕麦播量的增加持续上升,这与赵

表 5 不同处理对苜蓿种子产量影响的显著性检验

Table 5 Significance test of seed yield under different treatments

因素 Factor	实际种子产量 Actual seed yield	理论种子产量 Theoretical seed yield
播量 S	190.80**	89.49**
行比 ZW	15.76**	15.37**
播量×行比 S×ZW	2.02NS	0.51NS

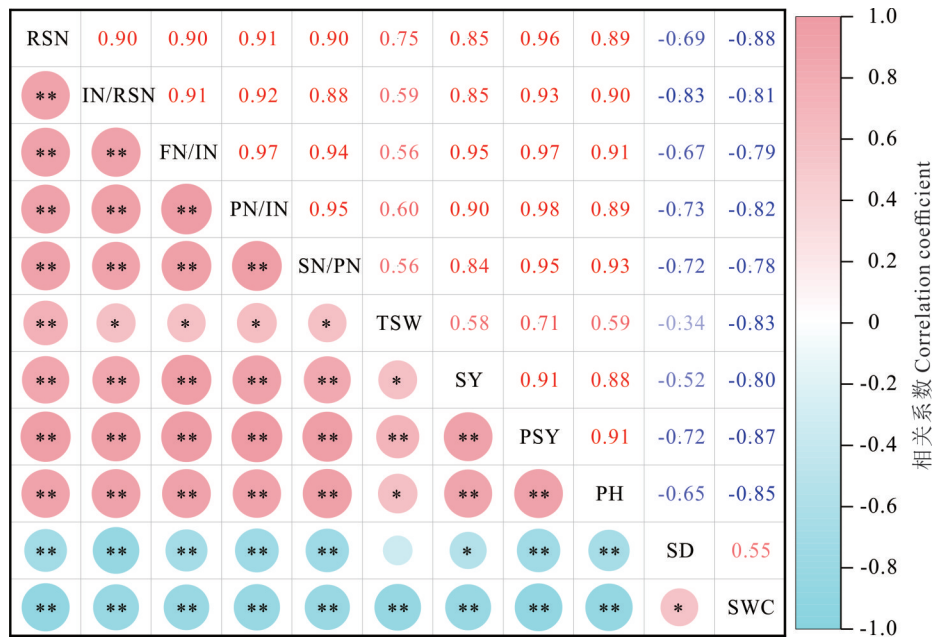


图 3 苜蓿种子产量、种子产量构成因素及土壤水分的相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis of alfalfa seed yield, seed yield components and soil moisture

RSN: 单位面积生殖枝数 Number of reproductive branches per unit area; IN/RSN: 每生殖枝花序数 Number of inflorescences per reproductive branch; FN/IN: 每花序小花数 Number of florets per inflorescence; PN/IN: 每花序结荚数 Number of pods per inflorescence; SN/PN: 每荚种子数 Number of seeds per pod; TSW: 千粒重 Thousand-seed weight; SY: 实际种子产量 Actual seed yield; PSY: 理论种子产量 Theoretical seed yield; PH: 株高 Plant height; SD: 密度 Density; SWC: 土壤贮水量 Soil water content; \*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ .

梦雨等<sup>[6]</sup>研究中千粒重随播量增加呈先上升后下降的结论存在差异,其原因可能是燕麦作为伴生作物,其播种量的增加可能改变了苜蓿的生长策略,在低、中播量( $S_1 \sim S_3$ )时,燕麦可能通过竞争光资源促进苜蓿向生殖生长倾斜,提高种子充实度;而在高播量处理下( $S_4$ ),虽然生殖枝数减少,但剩余种子可能获得更多养分,导致千粒重持续增加<sup>[23]</sup>。

行比配置是决定群体光能利用、资源竞争及生殖分配的关键因素<sup>[24]</sup>。张荟荟等<sup>[25]</sup>研究行距对苜蓿种子产量及构成因素的影响时发现,在一定的播量下,随着行距的增加,苜蓿的有效分枝数逐渐降低,在行距为 60 cm 时,苜蓿种子产量达到最高,为  $765.84 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。本研究发现,行比配置显著影响苜蓿种子产量,其中  $Z_1W_2$  处理的种子产量及其主要构成因素(包括单位面积生殖枝数、每生殖枝花序数、每花序小花数和每荚种子数)表现最优,这一结果与王显国等<sup>[26]</sup>的研究结论一致,其发现适度扩大的行距有利于改善苜蓿田间通风透光条件,促进花芽分化和授粉效率。较宽的行距可能减少了植株间对光资源的竞争,使中下部叶片获得更多光合有效辐射,从而增强生殖生长期间的碳水化合物积累,在此条件下,植株能够实现生殖资源的最有效分配,从而显著提升种子生产效率<sup>[27]</sup>。

表 6 不同处理的各指标关联系数值

Table 6 Correlation values for each indicator under different treatments

处理 Treatment	单位面积生殖枝数 Reproductive branches per m <sup>2</sup>	每生殖枝花序数 Number of inflores- cences per reproduc- tive branch	每花序小花数 Number of small flowers per inflo- rescence	每花序结荚数 Number of pods per inflo- rescence	每荚种子数 Seeds per pod	千粒重 Thousand seed weight	实际种子 产量 Actual seed yield	理论种子 产量 Theoretical seed yield
S <sub>1</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>2</sub>	0.8596	0.8303	0.6759	0.7554	0.6989	0.7238	0.7238	0.4232
S <sub>1</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>3</sub>	0.8620	0.8628	0.6876	0.7554	0.6989	0.7892	0.7509	0.4411
S <sub>1</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>2</sub>	0.9001	0.8462	0.7254	0.8121	0.7946	0.8458	0.7641	0.5046
S <sub>1</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>3</sub>	0.8845	0.8462	0.7124	0.7554	0.7437	0.7619	0.7606	0.4522
S <sub>2</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>2</sub>	0.9135	0.8980	0.7675	0.7827	0.7946	0.7596	0.7765	0.4995
S <sub>2</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>3</sub>	0.9245	0.9362	0.7675	0.8121	0.7946	0.8471	0.7855	0.5482
S <sub>2</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>2</sub>	0.9563	0.9167	0.8499	0.9153	0.9207	0.9018	0.7972	0.7086
S <sub>2</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>3</sub>	0.9445	0.8980	0.7985	0.8438	0.8530	0.8553	0.7897	0.5860
S <sub>3</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>2</sub>	0.9330	0.9565	0.9520	0.9558	0.9207	0.6806	0.8812	0.7078
S <sub>3</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>3</sub>	0.9474	0.9778	0.9754	1.0000	1.0000	0.9306	0.8975	0.8848
S <sub>3</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>2</sub>	1.0000	0.9778	1.0000	1.0000	0.9207	1.0348	1.0000	1.0000
S <sub>3</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>3</sub>	0.9839	0.9778	0.9754	1.0000	1.0000	0.8620	0.9359	0.9037
S <sub>4</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>2</sub>	0.9301	0.9565	0.8320	0.9153	0.9207	0.6704	0.8059	0.6194
S <sub>4</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>3</sub>	0.9563	1.0000	0.8685	0.9558	0.8530	0.9218	0.8288	0.7619
S <sub>4</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>2</sub>	0.9967	0.9565	0.9083	0.9558	0.9207	1.0000	0.8434	0.8901
S <sub>4</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>3</sub>	0.9563	0.9565	0.8880	0.9558	1.0000	0.9335	0.8331	0.8428
M	0.8139	0.7858	0.6646	0.7060	0.6592	0.6307	0.7087	0.3809
熵值 Entropy	0.9272	0.9165	0.8264	0.8751	0.8526	0.8323	0.8166	0.6562
权重 Weight	0.1383	0.1367	0.1233	0.1306	0.1272	0.1242	0.1218	0.0979

表 7 不同处理的关联度及其排名

Table 7 Correlation degree and ranking under different treatments

处理 Treat- ment	等权关联度 Equal weight corre- lation degree	等权排序 Equal weight sorting	加权关联度 Weighted rele- vance degree	加权排序 Weighted sorting	处理 Treat- ment	等权关联度 Equal weight corre- lation degree	等权排序 Equal weight sorting	加权关联度 Weighted rele- vance degree	加权排序 Weighted sorting
S <sub>1</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>2</sub>	0.7114	16	0.7228	16	S <sub>3</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>3</sub>	0.9517	3	0.9543	3
S <sub>1</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>3</sub>	0.7310	15	0.7422	15	S <sub>3</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>2</sub>	0.9917	1	0.9912	1
S <sub>1</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>2</sub>	0.7741	12	0.7843	13	S <sub>3</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>3</sub>	0.9548	2	0.9573	2
S <sub>1</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>3</sub>	0.7396	14	0.7506	14	S <sub>4</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>2</sub>	0.8313	9	0.8407	9
S <sub>2</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>2</sub>	0.7740	13	0.7849	12	S <sub>4</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>3</sub>	0.8933	6	0.8994	6
S <sub>2</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>3</sub>	0.8020	11	0.8122	11	S <sub>4</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>2</sub>	0.9339	4	0.9366	4
S <sub>2</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>2</sub>	0.8708	8	0.8775	8	S <sub>4</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>3</sub>	0.9207	5	0.9244	5
S <sub>2</sub> Z <sub>1</sub> W <sub>3</sub>	0.8211	10	0.8303	10	M	0.6687	17	0.6799	17
S <sub>3</sub> Z <sub>0</sub> W <sub>2</sub>	0.8734	7	0.8803	7					

土壤水分对苜蓿种子产量的影响仅次于种植密度。本研究中,土壤含水量随燕麦播量的增加而降低,在 S<sub>3</sub>播量时,土壤含水量达到最低值,其原因是燕麦/紫花苜蓿间作系统通过增加饲草密度和地下根系分布,提高了复合群体对水资源的吸收利用能力。侯真珍等<sup>[28]</sup>研究发现,在苜蓿生育期中,灌溉 1 次水或者不灌溉水处理的苜蓿种

子产量要远高于灌溉 2 次和 3 次的处理,他们认为,苜蓿生育期水分供应过多会使其将更多生长资源分配给营养生长,导致茎叶粗壮,但会抑制生殖生长,从而降低种子产量。本研究结果与此一致, $S_3$ 播量的处理中,土壤含水量最低,苜蓿种子产量反而最高。

通过相关性分析,发现苜蓿实际种子产量与单位面积生殖枝数、每生殖枝花序数、每花序小花数、每花序结荚数及每荚种子数均呈显著正相关关系,这与前人研究结果相一致<sup>[29]</sup>,说明当各产量构成要素达到最优比时,苜蓿种子产量最高;而株高、土壤贮水量与苜蓿产量呈显著负相关关系,这与魏永鹏等<sup>[30]</sup>的研究不同,其原因可能是苜蓿营养生长过旺,导致苜蓿植株将大量生长资源用于茎叶伸长,抑制花芽分化和种子发育<sup>[23]</sup>。对苜蓿种子产量及构成成分进行灰色关联度分析,可得 17 个处理的加权关联度排名: $S_3Z_1W_2 > S_3Z_1W_3 > S_3Z_0W_3 > S_4Z_1W_2 > S_4Z_1W_3 > S_4Z_0W_3 > S_3Z_0W_2 > S_2Z_1W_2 > S_4Z_0W_2 > S_2Z_1W_3 > S_2Z_0W_3 > S_2Z_0W_2 > S_1Z_1W_2 > S_1Z_1W_3 > S_1Z_0W_3 > S_1Z_0W_2 > M$ ,表明任何间作处理的苜蓿种子产量均大于苜蓿单作的种子产量,且在播量  $S_3$ 、行比  $Z_1W_2$  的处理中苜蓿种子产量构成因素表现最佳,苜蓿种子产量达到最高。

#### 4 结论

本研究在苜蓿种子田的宽窄行间作不同密度的燕麦,比较了不同处理对苜蓿种子产量的影响,发现苜蓿和燕麦的株高、单位面积生殖枝数、每花序小花数、每花序结荚数、每荚种子数、实际种子产量和理论种子产量均随着燕麦播量的增加呈先上升后下降的趋势,千粒重随着燕麦播量的增加持续上升。土壤贮水量与苜蓿种子产量呈显著负相关关系( $P < 0.05$ )。播量  $S_3$ 、行比  $Z_1W_2$  的处理可优化苜蓿种子产量构成因素,实现最高产量。通过灰色关联度法对苜蓿产量及产量构成成分进行排序,得出在银北灌区苜蓿/燕麦复合群体种子生产中,燕麦最优播种量为  $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,最优行比配置为在窄行播种 1 行宽行播种 2 行。

#### 参考文献 References:

- [1] Sun Q Z, Liu Q, Li F, *et al.* Alfalfa species in ancient China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(8): 155—174.  
孙启忠, 柳茜, 李峰, 等. 我国古代苜蓿物种考述. *草业学报*, 2018, 27(8): 155—174.
- [2] Chen D D, Wang Y R, Han Y H. Effects of irrigation frequency and fertilizer rate on alfalfa seed yields in the Yellow River irrigated region. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(3): 154—163.  
陈冬冬, 王彦荣, 韩云华. 灌溉次数和施肥量对甘肃引黄灌区紫花苜蓿种子产量的影响. *草业学报*, 2016, 25(3): 154—163.
- [3] Li X Y, Yu S Y, Fu B Z, *et al.* Effect of film mulching on alfalfa seed yield and components in arid area of Ningxia. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2022, 50(2): 67—74.  
李小云, 余淑艳, 伏兵哲, 等. 覆膜对宁夏干旱区苜蓿种子产量及构成因素的影响. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(2): 67—74.
- [4] Mao P S, Ou C M, Jia Z C, *et al.* Research progress for seed production technology of herbage and turfgrass in China. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45(1): 1—11.  
毛培胜, 欧成明, 贾志程, 等. 我国牧草与草坪草种子生产技术的研究进展. *中国草地学报*, 2023, 45(1): 1—11.
- [5] Askarian M, Hampton J G, Hill M J. Effect of row spacing and sowing rate on seed production of lucerne (*Medicago sativa* L.) cv. Grasslands Oranga. *New Zealand Journal of Agriculture Research*, 2010, 38(3): 289—295.
- [6] Zhao M Y, Wang B, Wang T F, *et al.* Effects of different seeding rates on seed yield and components of alfalfa. *Pratacultural Science*, 2023, 40(11): 2871—2878.  
赵梦雨, 王斌, 王腾飞, 等. 不同播种量对紫花苜蓿种子产量及构成因素的影响. *草业科学*, 2023, 40(11): 2871—2878.
- [7] Maimaitimin·Naiyimu, Gulizila·Habudula, Wang Y X. Influence of planting density on alfalfa seed yield and components. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(19): 41—44.  
麦麦提敏·乃依木, 古丽孜拉·哈不都拉, 王玉祥. 密度对苜蓿种子产量及其构成因子的影响. *中国农学通报*, 2019, 35(19): 41—44.
- [8] Du W H, Tian X H, Cao Z Z. Influence of row spacing and irrigation rate on seed yield of *Medicago sativa*. *Acta Prataculturae Sinica*, 2007, 16(3): 81—87.  
杜文华, 田新会, 曹致中. 播种行距和灌水量对紫花苜蓿种子产量及其构成因素的影响. *草业学报*, 2007, 16(3): 81—87.
- [9] Undie U L, Uwah D F, Attoe E E. Effect of intercropping and crop arrangement on yield and productivity of late season maize/

- soybean mixtures in the humid environment of South Southern Nigeria. *Journal of Agricultural Science*, 2012, 4(4): 1916–9752.
- [10] Rodrigo V H L, Thenakoon S, Stirling C M. Priorities and objectives of smallholder rubber growers and the contribution of intercropping to livelihood strategies: A case study from Sri Lanka. *Outlook on Agriculture*, 2001, 30(4): 261–266.
- [11] Yang H, Zhao Y J, Liu X J. Effects on photosynthesis characteristics and yield regulations in the alfalfa/oat intercropping. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(1): 187–195.  
杨航, 赵雅姣, 刘晓静. 紫花苜蓿/燕麦间作的光合特征及其对产量的调控效应. *草地学报*, 2023, 31(1): 187–195.
- [12] Zhao X N, Wang B, Wang T F, *et al.* Effects of different seeding amounts of oat reseeded on production performance and nutritional quality of degraded alfalfa grassland. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(12): 67–74.  
赵小娜, 王斌, 王腾飞, 等. 补播不同播量燕麦对退化苜蓿草地生产性能和营养品质的影响. *中国草地学报*, 2024, 46(12): 67–74.
- [13] Zhao Y J, Liu X J, Lin F. Selection of intercropping combinations suitable for alfalfa and Poaceae forages in semi-arid areas of the Loess Plateau. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(3): 97–110.  
赵雅姣, 刘晓静, 蔺芳. 适宜于黄土高原半干旱区豆禾饲草间套作组合的筛选. *草业学报*, 2025, 34(3): 97–110.
- [14] Zhang H H. Competitive relation and productivity of mixed sowing pastures between alfalfa and different life forms of perennial gramineous forages. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2022.  
张辉辉. 紫花苜蓿与不同生活型多年生禾草混播草地竞争关系及生产力. 兰州: 甘肃农业大学, 2022.
- [15] Sun Q Z, Gui R, Narisu. Superiority and countermeasure to developing alfalfa seed industry in the northwest of China. *Pratacultural Science*, 2000, 17(2): 65–69.  
孙启忠, 桂荣, 那日苏. 我国西北地区苜蓿种子产业化发展优势与对策. *草业科学*, 2000, 17(2): 65–69.
- [16] Wang Q, Li X Y, Huang S D, *et al.* Effects of planting spacing and row spacing on seed yield and relevant factors of alfalfa (*Medicago sativa*) in arid areas of Ningxia. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45(8): 31–40.  
王琴, 李小云, 黄淑迪, 等. 株行距对宁夏干旱区苜蓿种子产量及构成因素的影响. *中国草地学报*, 2023, 45(8): 31–40.
- [17] Li W X, Chen Y Y. Research progress on soil moisture and its measurement methods. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2014, 42(10): 335–339.  
李旺霞, 陈彦云. 土壤水分及其测量方法的研究进展. *江苏农业科学*, 2014, 42(10): 335–339.
- [18] Gao F, Jia Z K, Lu W T, *et al.* Effects of different straw returning treatments on soil water, maize growth and photosynthetic characteristics in the semi-arid area of Southern Ningxia. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(3): 777–783.  
高飞, 贾志宽, 路文涛, 等. 秸秆不同还田量对宁南旱区土壤水分、玉米生长及光合特性的影响. *生态学报*, 2011, 31(3): 777–783.
- [19] Zhao M Y. Effects of mixed sowing of oats and leguminous forages on interspecific relationships and production performance of grassland in arid region of Ningxia. Yinchuan: Ningxia University, 2023.  
赵梦雨. 宁夏干旱区燕麦与豆科牧草混播对草地种间关系和生产性能的影响. 银川: 宁夏大学, 2023.
- [20] Liu S F, Cai H, Yang Y J, *et al.* Advance in grey incidence analysis modelling. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2013, 33(8): 2041–2046.  
刘思峰, 蔡华, 杨英杰, 等. 灰色关联分析模型研究进展. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(8): 2041–2046.
- [21] Wu S Q. Study on key factors affecting seed production and contributing to yield of alfalfa (*Medicago sativa*). Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2003.  
吴素琴. 紫花苜蓿种子丰产关键因子及产量构成因素的研究. 兰州: 甘肃农业大学, 2003.
- [22] Zhou K S, Liu Y L, Wang Y R. Diversity of seed yield and its components in alfalfa varieties. *Molecular Plant Breeding*, 2009, 7(1): 95–104.  
周刊社, 刘依兰, 王彦荣. 苜蓿种子产量及其构成因素的多样性研究. *分子植物育种*, 2009, 7(1): 95–104.
- [23] Wang B, Yang Y Q, Li M Y, *et al.* The effect of sowing rate and row spacing on the yield and quality of alfalfa in the Ningxia Yellow River irrigation area. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(2): 147–158.  
王斌, 杨雨琦, 李满有, 等. 不同播种量下行距配置对紫花苜蓿产量及品质的影响. *草业学报*, 2022, 31(2): 147–158.
- [24] Sha B P, Li X, Xie Y Z, *et al.* Effect of row spacing ratio on seed yield and yield components in drip irrigation of alfalfa. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(3): 751–759.  
沙栢平, 李雪, 谢应忠, 等. 株行比对滴灌苜蓿种子产量及其产量构成因子的影响. *草地学报*, 2019, 27(3): 751–759.
- [25] Zhang H H, Zhang X Z, Zhang Y G, *et al.* Influence of row spacing on seed yield of alfalfa and its components. *Grass-Feeding*

- Livestock, 2019(3): 46–50.
- 张荟荟, 张学洲, 张一弓, 等. 行距对紫花苜蓿种子产量及其构成因素的影响. 草食家畜, 2019(3): 46–50.
- [26] Wang X G, Han J G, Liu F Y, *et al.* Effect of spacing and intra-spacing under hole-seeding conditions on alfalfa seed yield and quality. Chinese Journal of Grassland, 2006, 28(2): 28–32.
- 王显国, 韩建国, 刘富渊, 等. 穴播条件下株行距对紫花苜蓿种子产量和质量的影响. 中国草地学报, 2006, 28(2): 28–32.
- [27] Cui L L. Hybrid analysis of alfalfa and alfalfa and construction of genetic map of SNP markers. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020.
- 崔乐乐. 紫花苜蓿与黄花苜蓿杂种分析及 SNP 标记遗传图谱构建. 北京: 中国农业科学院, 2020.
- [28] Hou Z Z, Zhang A Q, Zhu J Z. The quantitative characteristics of seed yield components and floral traits under different irrigation patterns of alfalfa. Xinjiang Agricultural Sciences, 2013, 50(9): 1668–1674.
- 侯真珍, 张爱勤, 朱进忠. 不同灌溉模式下苜蓿种子产量构成因素及花部特征对水分亏缺的响应. 新疆农业科学, 2013, 50(9): 1668–1674.
- [29] Yu H Q, Ou C M, Wang Z J, *et al.* Effects of agronomic measures on seed yield components of alfalfa. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(12): 2853–2861.
- 俞鸿千, 欧成明, 王占军, 等. 农艺措施对紫花苜蓿种子产量组分的影响. 草地学报, 2021, 29(12): 2853–2861.
- [30] Wei Y P, Nan L L, Yu C, *et al.* Effect of row spacing and planting density on the yield and quality of *Medicago sativa*. Pratacultural Science, 2017, 34(9): 1898–1905.
- 魏永鹏, 南丽丽, 于闯, 等. 种植密度和行距配置对紫花苜蓿群体产量及品质的影响. 草业科学, 2017, 34(9): 1898–1905.