

DOI: 10.11686/cyxb2024366

http://cyxb.magtech.com.cn

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.

ZHANG Yi-yin, WANG Bin, WANG Teng-fei, 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.

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

张译尹¹, 王斌¹, 王腾飞¹, 兰剑¹, 胡海英^{1,2*}

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏草业工程研究中心, 宁夏 银川 750021)

摘要: 针对宁夏引黄灌区地下水位高引起苜蓿营养生长过盛, 限制了其生殖生长, 造成种子产量低等问题, 试验采用单因素随机区组设计, 于2022年9月在紫花苜蓿种子田间作小黑麦, 小黑麦的播量设置5个水平, 分别为90(IMS₁)、135(IMS₂)、180(IMS₃)、225(IMS₄)、270 kg·hm⁻²(IMS₅), 苜蓿单播为对照(SM), 研究了不同播量小黑麦与紫花苜蓿间作对第一茬牧草产量、水分利用以及第2茬紫花苜蓿种子生产性能的影响。结果表明: 小黑麦与紫花苜蓿间作其总干草产量和粗蛋白产量较紫花苜蓿单作平均提高了25.71%和6.62%。小黑麦与紫花苜蓿间作可促进复合群体用水, 提高水分利用效率, 为第2茬紫花苜蓿种子收获提供适宜的土壤水分环境, 进而促进植株的个体发育和种子产量。其中间作群体耗水量较紫花苜蓿单作均显著提高, 且在IMS₄处理下, 耗水量达到最大, 为455.72 mm。同时, 在IMS₄处理下苜蓿实际种子产量达到最高, 为448 kg·hm⁻², 较紫花苜蓿单作提高了28.33%。因此, 小黑麦播量为225 kg·hm⁻²时与紫花苜蓿种子田间作有利于提高第一茬草地生产性能和水分利用效率, 同时对第2茬紫花苜蓿种子生产具有明显的正效应。

关键词: 小黑麦; 间作; 干草产量; 水分利用效率; 苜蓿种子产量

Effects of intercropping triticale with alfalfa on system yield, resource utilization, and alfalfa seed yield

ZHANG Yi-yin¹, WANG Bin¹, WANG Teng-fei¹, LAN Jian¹, HU Hai-ying^{1,2*}

1. College of Forestry and Grassland, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Ningxia Grassland and Pasture Engineering Research Center, Yinchuan 750021, China

Abstract: The high water table in the diverted irrigation area of Ningxia causes low seed yield of alfalfa (*Medicago sativa*), because the excessive nutrient supply favors its vegetative growth and limits its reproductive growth. We conducted a field experiment to explore whether intercropping with triticale (*Triticosecale*) could address this issue. The field experiment began in September 2022, and had a one-way randomized block design, with triticale intercropped with alfalfa. Five seeding rates of triticale were tested, namely: 90 (IMS₁), 135 (IMS₂), 180 (IMS₃), 225 (IMS₄), and 270 kg·ha⁻¹ (IMS₅). Alfalfa monoculture served as the control (SM). The effects of intercropping with triticale at different seeding rates on the yield of the first forage crop, and the water use and seed production of the second alfalfa crop were investigated. The results show that intercropping with triticale increased the total hay yield and crude protein yield of alfalfa by an average of 25.71% and 6.62%, respectively, compared

收稿日期: 2024-09-24; 改回日期: 2024-10-28

基金项目: 宁夏自然科学基金项目(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: 张译尹(1998-), 女, 甘肃定西人, 在读博士。E-mail: 2543378861@qq.com

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

with those of SM. Intercropping of triticale with alfalfa promoted the water use of the composite population, improved the water use efficiency, and provided a suitable soil moisture environment for the second crop of alfalfa, leading to improved individual plant development and seed yield. The water consumption was significantly higher in all the intercropping treatments than in SM, reaching the maximum of 455.72 mm in the IMS_4 treatment. The alfalfa actual seed yield reached the maximum of $448 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ in the IMS_4 treatment, which was 28.33% higher than that of SM. Therefore, intercropping of triticale at a sowing rate of $225 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ with alfalfa improved the performance of the first crop in terms of grass production and water use, and had a significant positive effect on the second crop in terms of alfalfa seed production.

Key words: triticale; intercropping; dry matter yield; water use efficiency; alfalfa seed yield

草种业健康发展是国家粮食安全的重要保障^[1],也是稳定和扩大饲草生产的基本条件^[2]。我国从“十二五”到“十四五”规划以来,坚持大力发展种业,建立育种基地,加快推进种业振兴。目前,我国有40%以上草种依赖进口^[3],近10年来种业进口量增加到3倍以上。紫花苜蓿(*Medicago sativa*)作为优质饲草被广泛种植,可有效解决饲草短缺的问题,而苜蓿种子高效生产是提高饲草供应能力的重要保障^[4]。宁夏作为温带牧草种子生产的优势区域^[5],北部引黄灌区是农业农村部确立的苜蓿良种扩繁重要地区。然而,由于该地区地下水位高,引起植株营养生长过快,冠层结构分布不合理,苜蓿群体透光率低、通风不良,导致授粉受阻、落花落荚严重,造成种子产量低、质量差^[6]。因此,高水位地区苜蓿种子田如何控制水肥,以及资源的高效利用,是苜蓿种子高效生产中亟待解决的关键技术问题。

间作种植模式是我国传统农业的精髓^[7],其中豆/禾间作通过互补协调能够使作物充分利用光、热、水、肥等资源,提高作物产量和土地利用效率^[8-9]。如,小麦(*Triticum aestivum*)/蚕豆(*Vicia faba*)^[10]、玉米(*Zea mays*)/花生(*Arachis hypogaea*)^[11]等作物间作,促进了作物产量的提升,表现出较强的土地生产力优势。同时,在糜子(*Panicum miliaceum*)/绿豆(*Vigna radiata*)^[12-13]、玉米/大豆(*Glycine max*)^[14]、高粱(*Sorghum bicolor*)/大豆^[15]等间作系统中研究发现,间作可提高土壤水分含量、降低表层土壤水分蒸发,进而提升间作系统水分利用效率。综上,间作物种的合理搭配以及适宜种植密度的科学管理可显著提升农田生产力和水分利用效率,将资源利用达到最大化。因此,针对宁夏北部引黄灌区苜蓿种子田地下水位高、资源浪费等问题,可以通过间作方式来高效利用土壤水分,提高饲草生产性能,其次为紫花苜蓿种子生产提供良好的生长环境,促进苜蓿种子田的生殖生长。饲用小黑麦(*Triticosecale*)是近年来被广泛推广的一种新型禾本科饲草,它具有产量高、抗性强、适应性广等优良性状^[16-17]。研究表明^[18],紫花苜蓿与小黑麦间作获得的总饲草产量较小黑麦单作提高了19.66%。蔺芳等^[19]研究得出,紫花苜蓿与小黑麦间作其干草产量较苜蓿单作提高了104.72%,较小黑麦单作提高了151.71%。基于此,本试验通过在9月中旬紫花苜蓿种子田间作不同播种量小黑麦,于翌年5月下旬将第一茬紫花苜蓿与小黑麦作为饲草收获,第2茬紫花苜蓿收获种子,探究不同播量小黑麦对苜蓿种子田饲草产量、水分消耗以及种子产量的影响,筛选出能够提高紫花苜蓿/小黑麦系统生产性能及资源利用的最佳小黑麦播种量,同时探究出苜蓿种子产量提升的技术要点,为宁夏北部引黄灌区紫花苜蓿种子生产提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验区位于宁夏回族自治区石嘴山市平罗县惠威村(N 38°36'18", E 105°57'42", 海拔1100 m),该区四季分明,属于大陆性气候。夏季炎热,雨量集中,冬季干冷,雨雪稀少。日照充足,温差大,蒸发强烈。年平均气温2.8~16.0℃,历年平均降水量173.2 mm,全年降水主要集中在6-9月(图1),年均蒸发量为1755 mm,由于本地气候干旱,受季节影响较大,年蒸发量是降水量的10倍。空气相对湿度为55%,平均地面温度为11.9℃,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 试验方法

试验于 2022 年 9 月—2023 年 6 月进行,采用单因素随机区组试验设计,紫花苜蓿种子田间作小黑麦,小黑麦的播量设置 5 个水平,分别为 90(IMS₁)、135(IMS₂)、180(IMS₃)、225(IMS₄)、270 kg·hm⁻²(IMS₅),苜蓿单播(SM),共计 6 个处理。每个处理重复 4 次,共 24 个小区,每个小区面积 60 m²(6 m×10 m),小区间隔 2 m。选用 3 龄紫花苜蓿种子田,其中紫花苜蓿播量为 2.25 kg·hm⁻²;采用宽窄行种植(图 2),窄行为 50 cm,宽行 100 cm,其中窄行不种植小黑麦,在宽行上由南向北播 4 行小黑麦。小黑麦之间行距 20 cm,苜蓿与小黑麦之间行距 20 cm。9 月中旬苜蓿种子收获后种植越冬小黑麦,在翌年 5 月下旬(紫花苜蓿始花期,小黑麦抽穗至灌浆期)将小黑麦与苜蓿一起刈割。第 2 茬紫花苜蓿收获种子。各小区的磷肥和钾肥于苜蓿返青前一次性施入,磷肥(P₂O₅)施量为 150 kg·hm⁻²、钾肥(K₂O)施量为 90 kg·hm⁻²。试验地采用喷灌,生长季灌水 3 次,小黑麦播种时灌水 80 mm,紫花苜蓿越冬水 80 mm,小黑麦和紫花苜蓿返青时灌水 100 mm。

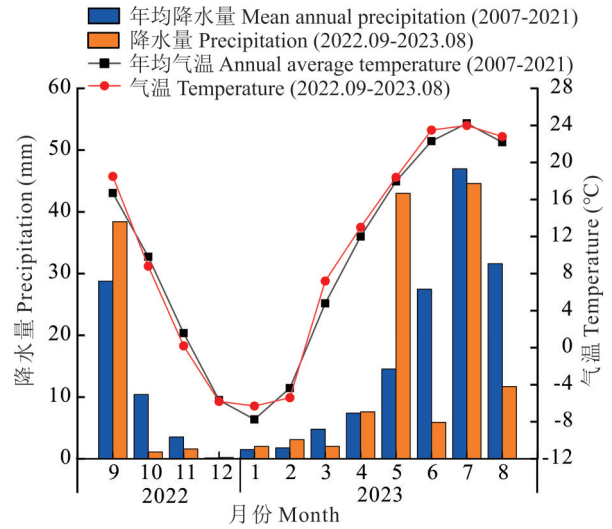


图 1 2022 和 2023 年试验区不同月份降水量和温度
Fig. 1 Precipitation and temperature in different months of the test area in 2022 and 2023

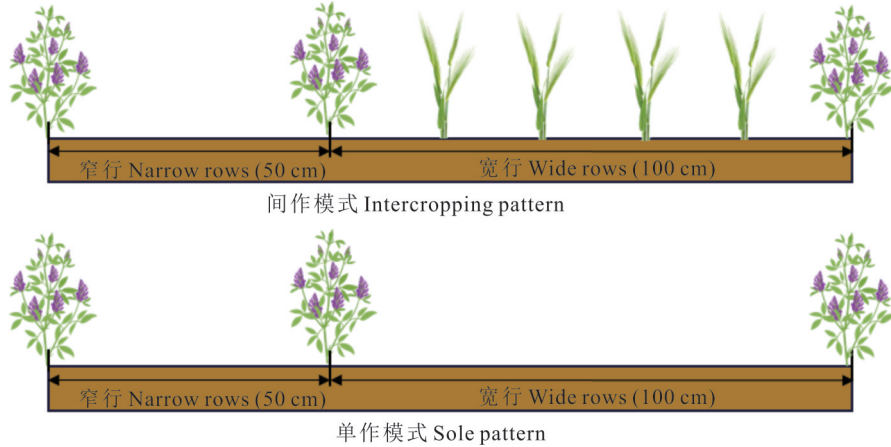


图 2 种植模式
Fig. 2 Planting pattern

1.3 测定项目及方法

1.3.1 生长指标的测定 每个小区内随机选取 3 个 1.5 m×1.0 m 的样方收割鲜草,将小黑麦与苜蓿分开,然后分别称量鲜重,再换算为每 hm²鲜草产量,利用鲜干比计算干草产量。

$$\text{粗蛋白产量}^{[20]}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}) = \text{干草产量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}) \times \text{粗蛋白含量}(\%)$$

1.3.2 水分指标的测定 采用烘干法分别测定 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm、100~120 cm、120~140 cm、140~160 cm、160~180 cm、180~200 cm 土壤水分含量,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。土壤含水量、土壤贮水量(soil water storage, SWS, mm)、耗水量(water consumption, ET, mm)和水分利用效率(water use efficiency, WUE, kg·hm⁻²·mm⁻¹)计算公式如下^[12]:

$$\text{土壤含水量} = [(\text{烘干前铝盒及土样质量} - \text{烘干后铝盒及土样质量}) / (\text{烘干后铝盒及土样质量} - \text{烘干空铝盒质量})] \times 100\%$$

用0~200 cm土壤含水量计算SWS:

$$SWS = D \times H \times W \times 10/100$$

式中:SWS为土壤贮水量; D 为土壤容重($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$); H 为土层厚度(cm); W 为质量含水量(%)。

$$ET = (SWS_1 - SWS_2) + P + I + CR - R - D$$

$$WUE = Y/ET$$

式中: SWS_1 和 SWS_2 分别为播种前和收获期的土壤贮水量; P 为降水量; I 为灌溉量; CR 是毛细水上升总量,在本试验中由于地下水水位高,因此采用达西定律和地下水补给数学模型计算^[13]; R 为径流量(mm),由于试验区域地势平坦,因此忽略了径流量; D 是土壤水渗透,由于试验地采用喷灌,在短期内水很少渗透到200 cm深度,因此计算中 D 忽略不计。 Y 为产量。

1.3.3 苜蓿种子产量及其构成因素的测定 在各小区盛花期随机选取30枝生殖枝条,统计其每生殖枝花序数量;在各小区内随机选取枝条不同位置的花序30个,统计其每花序小花数量;在各小区随机选取枝条上不同位置的结荚花序30个,统计每花序结荚数;在结荚期后每小区随机选取3个样方(1.5 m×1.0 m),统计地表有效的单位面积生殖枝条数量;在各小区随机选取30个小荚,统计每荚种子数;在各小区收获的种子净度分析后,随机选取6个重复,每个重复1000粒种子,通过其标准差的计算观察其变异系数是否超过4.0,不超过4.0便可计算相应的种子重量,天平的精度为0.0001 g;当70%的荚果成熟时人工收割,随机选取3个样方(1.5 m×1.0 m),测量该样方内的生殖枝数量,晒干后人工清选脱粒,称重各小区的实际种子产量,然后换算每 hm^2 种子产量。

$$\text{表现种子产量} = \text{生殖枝数} \times \text{盛花期花序数} \times \text{每花序小花数} \times \text{每荚种子数} \times \text{千粒重} \times 10^{-3[4]}$$

1.4 数据处理及分析

采用Excel 2016软件整理数据,利用SPSS Statistics 27.0软件进行方差分析、Duncan法进行多重比较。使用Origin 2022作图。利用结构方程模型(structural equation model, SEM)分析耗水量对苜蓿种子构成因素及产量的影响,分析前对所有指标进行Z-score标准化处理,用冗余分析选取土壤耗水量(ET)与种子构成因素(seed composition factors, SCF)作为主要因子,借助Amos 27.0软件进行SEM拟合分析。

2 结果与分析

2.1 不同播量小黑麦与紫花苜蓿间作对干草产量和粗蛋白产量的影响

不同处理的总干草产量存在显著性差异($P < 0.05$),其中 IMS_4 处理的总干草产量达到最高,为 $10163.57 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, SM 处理下总干草产量最低,为 $8085.11 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, IMS_4 处理的总干草产量较 IMS_1 、 IMS_2 、 IMS_3 、 SM 处理分别提高了11.67%、7.64%、6.57%、25.71%(图3)。

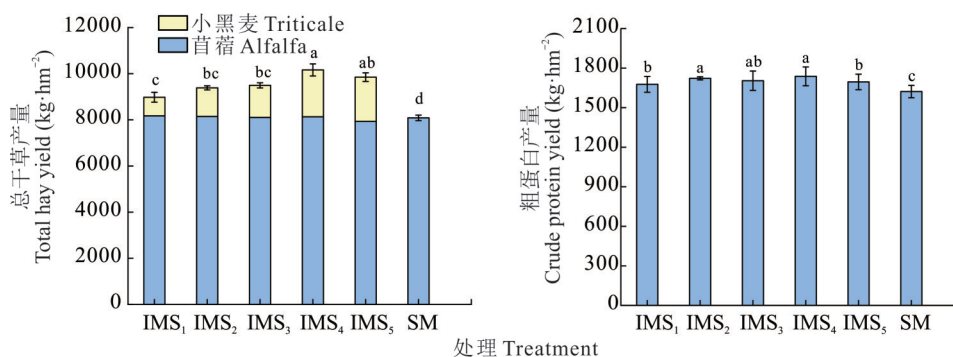


图3 不同处理下总干草产量和粗蛋白产量

Fig. 3 Total hay yield and crude protein yield under different treatments

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.

不同处理的粗蛋白产量存在显著性差异($P < 0.05$)。其中 IMS_4 处理的粗蛋白产量达到最高,为 $1737.60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, SM 处理的粗蛋白产量最低,为 $1622.55 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,二者相差 $115.05 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (图 3)。

2.2 不同播量小黑麦与紫花苜蓿间作对水分利用的影响

不同处理 $0 \sim 200 \text{ cm}$ 土层的播前土壤含水量无显著差异($P > 0.05$)。在返青期和收获期, $0 \sim 200 \text{ cm}$ 土层的土壤含水量存在显著差异($P < 0.05$),其中 SM 处理的土壤含水量达到最高,分别为 9.67% 、 15.31% , IMS_4 处理最低,分别为 8.99% 、 12.59% , IMS_4 处理较 SM 处理分别下降了 7.03% 、 17.77% (图 4)。

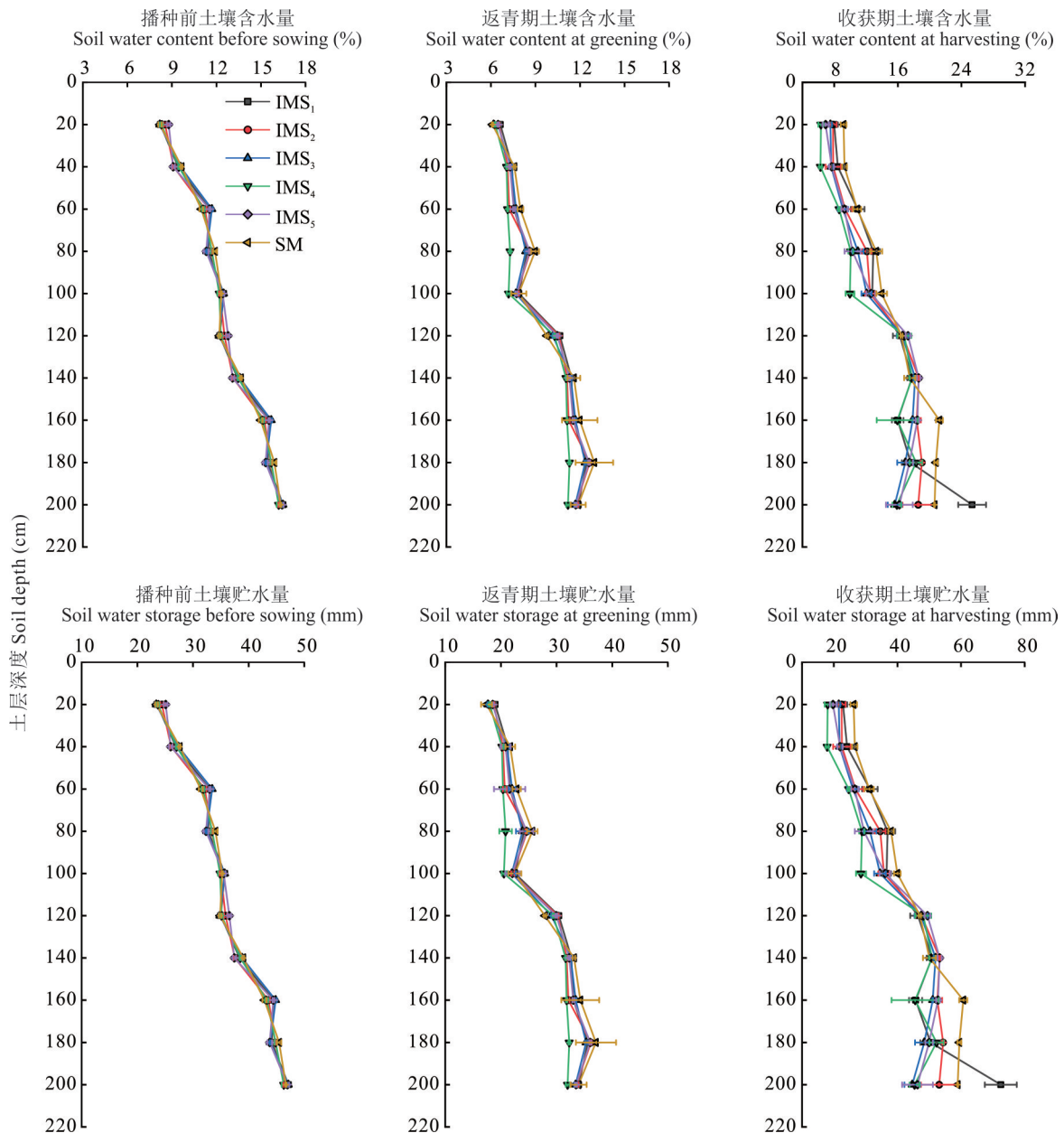


图 4 不同处理下土壤含水量和土壤贮水量

Fig. 4 Soil water content and soil water storage under different treatments

不同处理 $0 \sim 200 \text{ cm}$ 土层的播前土壤贮水量无显著差异($P > 0.05$)。在返青期和收获期, $0 \sim 200 \text{ cm}$ 土层的土壤贮水量存在显著差异($P < 0.05$),其中 SM 处理的土壤贮水量达到最高,分别为 276.52 、 438.01 mm , IMS_4 处理最低,分别为 257.11 、 367.39 mm , IMS_4 处理较 SM 处理分别下降了 7.02% 、 16.12% (图 4)。

不同处理0~200 cm土层中土壤耗水量存在显著差异($P<0.05$)。其中IMS₄处理的土壤耗水量最高,达到455.72 mm,较IMS₁、IMS₂、IMS₃、IMS₅、SM处理分别提高了7.58%、5.56%、3.64%、3.41%、9.94%(图5)。

间作处理的水分利用效率与苜蓿单作间无显著差异($P>0.05$),水分利用效率为21.22~22.31 kg·hm⁻²·mm⁻¹(图5)。

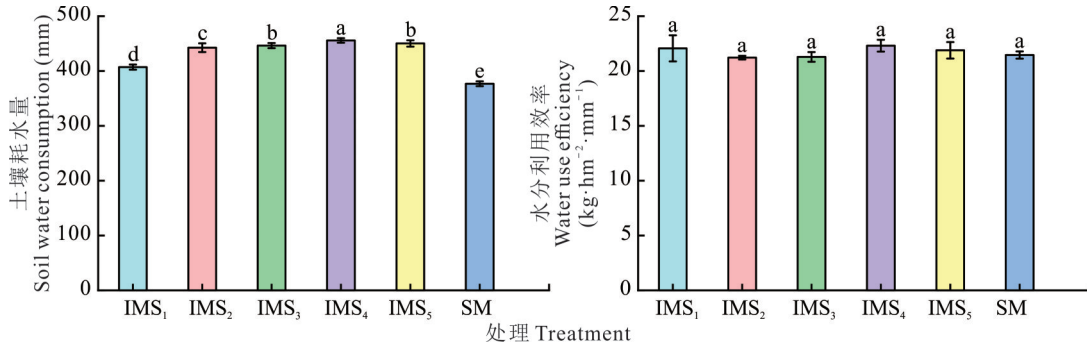


图5 不同处理下土壤耗水量与水分利用效率

Fig. 5 Soil water consumption and water use efficiency under different treatments

2.3 不同播量小黑麦与紫花苜蓿间作对种子构成因素的影响

不同处理下单位面积生殖枝数存在显著差异($P<0.05$)。其中IMS₄处理的单位面积生殖枝数达到最高,为162.67个·m⁻²,但与IMS₃和IMS₅处理之间无显著差异(表1)。SM处理下单位面积生殖枝数最少,为134.17个·m⁻²,较IMS₄处理降低了17.52%。不同处理下每生殖枝花序数存在显著差异($P<0.05$)。IMS₄处理的每生殖枝花序数最多,为27.50个,SM处理的每生殖枝花序数最少,仅有17.83个。不同处理下每花序小花数存在显著差异($P<0.05$)。IMS₄处理的每花序小花数最多,为21.33个,IMS₂次之(20.83个),SM最少,仅有19.17个,较IMS₄与IMS₂分别降低了10.13%、7.97%。不同处理下每花序结荚数存在显著差异($P<0.05$)。其中IMS₄处理的每花序结荚数最多,达到9.33个,SM处理最小,仅有6.83个,二者相差2.5个。不同处理下每荚种子数存在显著差异($P<0.05$)。其中IMS₄处理的每荚种子数最多,达到5.50粒,IMS₅次之,SM处理最低,仅为3.83粒,较IMS₄和IMS₅处理分别降低了30.36%、17.99%。不同处理下千粒重仅IMS₃与SM存在显著差异($P<0.05$),其中IMS₃处理的千粒重达到最大,为2.14 g,较IMS₁、IMS₂、IMS₄、IMS₅、SM处理分别提高了1.90%、2.39%、2.88%、2.88%、3.88%。

表1 不同处理对苜蓿种子产量构成因素的影响

Table 1 Effect of different treatments on the components of alfalfa seed yield

处理 Treatment	每m ² 生殖枝数 Reproductive branches per m ²	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)
IMS ₁	147.33±4.67b	20.33±1.28bc	19.50±0.99b	7.67±0.33b	4.17±0.31bc	2.10±0.03b
IMS ₂	148.00±3.83b	24.83±1.99ab	20.83±0.95a	7.83±0.48b	4.33±0.21bc	2.09±0.05b
IMS ₃	150.50±5.41ab	25.67±1.28a	19.50±1.34b	8.00±0.37ab	4.50±0.22bc	2.14±0.01a
IMS ₄	162.67±2.43a	27.50±2.26a	21.33±1.23a	9.33±0.21a	5.50±0.22a	2.08±0.02b
IMS ₅	153.17±4.11ab	26.67±1.54a	19.67±2.79b	8.17±0.17ab	4.67±0.21b	2.08±0.02b
SM	134.17±3.68c	17.83±0.87c	19.17±0.91b	6.83±0.40c	3.83±0.17c	2.06±0.03b

注: 同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$).

2.4 不同播量小黑麦与紫花苜蓿间作对苜蓿种子产量的影响

不同处理下苜蓿表现种子产量存在显著差异($P < 0.05$)。其中 IMS_4 处理的苜蓿表现种子产量达到最高,为 $5205.16 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 而 SM 处理最低,为 $2025.22 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 二者相差 $3179.94 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (图 6)。

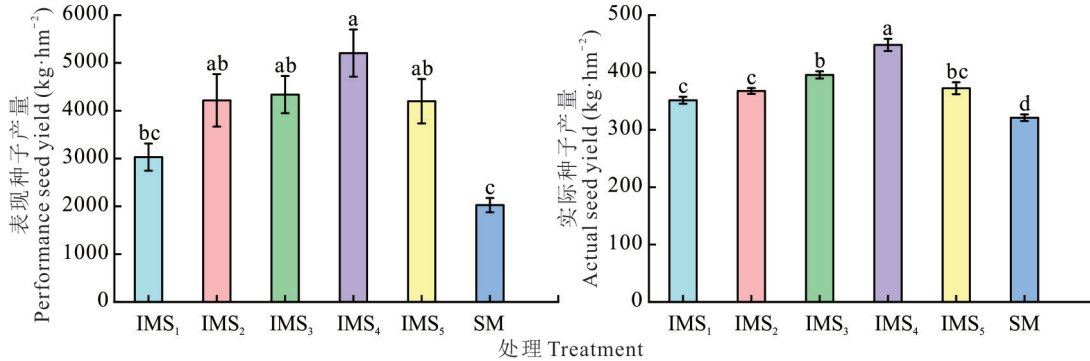


图 6 不同处理苜蓿种子实际产量与表现产量

Fig. 6 Actual yield and performance yield of alfalfa seed under different treatments

不同处理下苜蓿种子实际产量存在显著差异($P < 0.05$)。其中 IMS_4 处理的实际种子产量最高,达到 $448.00 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 显著高于其他处理,较 IMS_1 、 IMS_2 、 IMS_3 、 IMS_5 、SM 分别提高了 21.53%、17.91%、11.66%、16.84%、28.33% (图 6)。

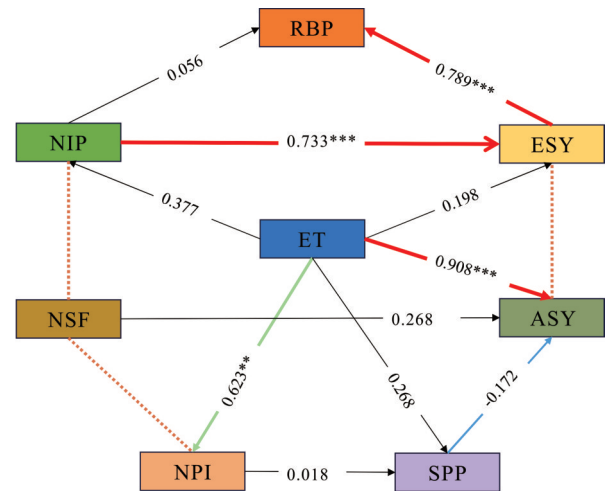
2.5 结构方程

SEM 结果(图 7)表明,耗水量对实际种子产量有极显著的直接正效应($P < 0.001$),表现种子产量对每生殖枝花序数有极显著的直接正效应($P < 0.001$),表现种子产量对单位面积生殖枝数有极显著的直接正效应($P < 0.001$)。耗水量对每花序结荚数有显著的直接正效应($P < 0.05$)。每生殖枝花序数对单位面积生殖枝数无显著的直接影响($P > 0.05$)、耗水量对每生殖枝花序数、每荚种子数、表现种子产量无显著的直接影响($P > 0.05$)、每花序小花数对实际种子产量无显著的直接影响($P > 0.05$),每花序结荚数对每荚种子数无显著的直接影响($P > 0.05$),每荚种子数对实际种子产量产生负效应,但无显著的直接影响($P > 0.05$)。

3 讨论

3.1 小黑麦与紫花苜蓿间作对干草产量和粗蛋白产量的影响

豆科饲草与禾本科饲草间作能够在有限的耕地上消耗较少的资源而获得优于单作种植的产量,进而充分发挥产量优势^[20-23]。杨航等^[24]研究表明,2019 年紫花苜蓿/燕麦(*Avena sativa*)间作其干物质产量较燕



$$\chi^2/df=0.849, CFI=1.000, RMSEA=0.000, GFI=0.841, P=0.629$$

图 7 结构方程模型

Fig. 7 Structural equation model

χ^2/df : 标准化卡方值 Normed Chi-square; CFI: 比较拟合指数 Comparison of fit indices; RMSEA: 近似均方根误差 Root mean square error of approximation; GFI: 拟合度指数 Goodness of fit index; P: P 值 P-value; 结构方程模型揭示了土壤耗水量、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、表现种子产量和实际种子产量的直接或间接影响。Structural equation models (SEM) revealed the direct or indirect effects of soil water consumption (ET), reproductive branches per unit area (RBP), inflorescence number per reproductive branches (NIP), number of small flowers per inflorescence (NSF), number of pods per inflorescence (NPI), number of seeds per pod (SPP), expression seed yield (ESY) and actual seed yield (ASY); 红线表示极显著正向关系($P < 0.001$), 绿线表示显著正向关系($P < 0.05$), 黑线表示无显著影响($P > 0.05$), 蓝线表示负向关系但无显著影响($P > 0.05$); ***: $P < 0.001$; **: $P < 0.05$.

麦单作提高了22%,较紫花苜蓿单作提高了9.10%。何纪桐等^[25]研究显示,燕麦/蚕豆间作产量较燕麦单作提高了6.03%,较蚕豆单作提高了6.87%。在本研究中,小黑麦与紫花苜蓿间作系统的总干草产量较苜蓿单作显著提高了16.11%。原因如下:首先,紫花苜蓿与小黑麦间作具有空间成层性分布的田间群体结构,能够增加群体叶面积指数,提高饲草的光能截获和转化效率,达到对光能的高效利用。其次,紫花苜蓿与小黑麦对养分需求种类和数量不同,小黑麦作为一年生浅根系禾本科饲草,而苜蓿为多年生深根系饲草,二者搭配在空间的分布范围有疏有密,提高了对养分的利用效率,从而具有明显的产量优势。再者,豆科与禾本科牧草间作中,紫花苜蓿作为豆科牧草可以高效固氮,通过根系给小黑麦转移氮素,促进植株生长,增加草地生产性能^[26]。此外,本研究发现,IMS₄处理的总干草产量最高(10163.57 kg·hm⁻²),说明适宜播种量的小黑麦与紫花苜蓿间作能够高效利用环境等资源(光、水分、土壤养分等),进而提高草地生产性能。粗蛋白产量是反映饲草营养价值的重要指标,也是饲草品质的重要组成部分^[27]。本研究发现,紫花苜蓿/小黑麦间作下的饲草粗蛋白产量较紫花苜蓿单作提高了6.62%,并在IMS₄处理下粗蛋白产量达到最高。这主要归因于在紫花苜蓿/小黑麦间作系统中总干草产量显著高于紫花苜蓿单作,虽然间作后的混合饲草粗蛋白含量有所下降,但是间作系统的总干草产量提高的幅度远远高于粗蛋白含量下降的幅度。

3.2 小黑麦与紫花苜蓿间作对水分利用的影响

水分供应是影响饲草生长的主要因素,其中种植密度在间作系统中可以通过调节不同牧草关键需水期的时间生态位、根系深度差异来缓解种间竞争,提高间作群体的水分利用效率^[28]。蔡倩等^[29]研究发现,玉米与大豆间作因其根系分布形态和区域不同,形成了空间立体结构,改善了作物土壤水分利用环境。牛伊宁等^[30]研究表明,玉米与豌豆(*Pisum sativum*)间作的水分利用效率较单作提高了3.07%~43.38%。在本研究中,小黑麦与紫花苜蓿间作系统收获期0~200 cm土层的含水量和贮水量呈下降趋势,较紫花苜蓿单作分别降低了11.18%和11.18%,而间作系统的土壤耗水量较紫花苜蓿单作提高了14.44%。其主要原因是小黑麦/紫花苜蓿间作系统的饲草密度增加,提高了间作复合群体的总干草产量,进而加大了两种饲草地下根系对水资源的吸收利用。在IMS₄处理下发现耗水量最多(455.72 mm),说明间作系统通过消耗大量的土壤水分来稳定总饲草产量。同时,本研究发现,间作系统的水分利用效率较紫花苜蓿单作提高了3.95%,并在IMS₄处理下,水分利用效率达到最大(22.30 kg·hm⁻²·mm⁻¹),这主要是小黑麦/苜蓿间作水分消耗和干物质积累增加的结果。究其原因,很有可能是小黑麦-苜蓿间作具有不同的根系结构,导致其对土壤养分及水分的吸收能力存在差异,从而产生了互补优势。此外,在时间上植物对养分和水分的需求也各不相同,这也是植物对水和养分吸收和利用的主要因子^[31]。根与根之间除有竞争之外,还具有促进作用。苜蓿固定的氮素可从根际间向小黑麦体内传递,从而改善小黑麦对氮素的供应状况,促进其对氮素的吸收和利用^[32]。结合本研究结果,在IMS₄处理下间作系统干物质积累量与水分利用效率都达到最高,表明紫花苜蓿/小黑麦间作在IMS₄处理下能提高水分利用效率从而带来更高的产量收益。说明小黑麦播量为225 kg·hm⁻²时与紫花苜蓿间作能够高效地利用土壤水分来提高第一茬饲草的生产效益,同时在此播量下增加了土壤水分消耗,促进了第2茬紫花苜蓿的种子产量。

3.3 小黑麦与紫花苜蓿间作对苜蓿种子产量及其构成因素的影响

在饲草种子生产过程中,采用合理的栽培措施能够最大限度地高效利用土壤养分以及水分,进而提高种子生产性能。研究发现,适宜的间作密度能够通过构建合理的群体结构,协调个体生长发育,使得作物种子达到高产^[33-34]。在本研究中,不同播量小黑麦与紫花苜蓿间作对苜蓿单位面积生殖枝、每生殖枝花序数、每花序小花数、每花序结荚数、千粒重以及种子产量均有明显的提高,其中,IMS₄处理的单位面积生殖枝、每生殖枝花序数、每花序小花数、每花序结荚数、每荚种子数最多,种子实际产量最高,较SM处理分别提高了17.52%、54.23%、10.13%、36.60%、30.36%、28.33%,说明当小黑麦播种量为225 kg·hm⁻²时与紫花苜蓿间作对苜蓿种子产量具有明显的正效应。通过结构方程模型分析来看,耗水量对实际种子产量有极显著的直接正效应($P < 0.05$)。首先,宁夏北部引黄灌区的苜蓿种子田土壤肥沃,通过间作禾本科小黑麦可以高效利用土壤养分,提高牧草总产量(小黑麦与第一茬紫花苜蓿同时收获),同时为第2茬紫花苜蓿种子收获提供了适宜的生长环境,进而促进植株的

个体发育和提高种子产量。其次,由于宁夏北部引黄灌区的苜蓿种子田地下水位高,造成苜蓿的营养生长大于生殖生长,通过间作小黑麦可以高效利用不同土层水分,为第2茬紫花苜蓿种子生产营造适宜的土壤水分,将营养生长转化为生殖生长增加种子产量。

4 结论

紫花苜蓿种子田间作小黑麦可以促进饲草生长,提高第一茬饲草产量和第2茬苜蓿种子产量。综合总干草产量、土壤耗水量、种子产量构成因素和实际种子产量,当小黑麦播量为 $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时与紫花苜蓿间作效果最佳,适宜在宁夏引黄灌区及其他气候条件相似的区域示范推广。

参考文献 References:

- [1] He T J, Meng X P. Study on the current situation and safety problems of grain crop seed industry in China. *Food Science and Technology and Economy*, 2019, 44(7): 43–44, 86.
贺同金, 孟晓鹏. 我国粮食作物种子产业现状及安全问题研究. *粮食科技与经济*, 2019, 44(7): 43–44, 86.
- [2] Ha X, Zhang J Q, Song Y X, *et al.* Comprehensive evaluation of seed yield traits in five varieties of Kentucky bluegrass. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45(12): 61–71.
哈雪, 张金青, 宋于笑, 等. 5份草地早熟禾种子产量性状相关指标综合评价与分析. *中国草地学报*, 2023, 45(12): 61–71.
- [3] Fan Z Y, Sun Y S. Big food view: scientific connotation, value implications, and practical requirements. *Journal of Northwest A&F University (Social Science Edition)*, 2023, 23(6): 68–75.
樊志远, 孙云舒. 论大食物观的科学内涵、价值意蕴与实践要求. *西北农林科技大学学报(社会科学版)*, 2023, 23(6): 68–75.
- [4] Wang X, Huang W, Yu S Y, *et al.* Effect of water and fertilizer coupling on seed yield and composition of alfalfa grown with underground drip irrigation in Ningxia. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(9): 76–85.
王星, 黄薇, 余淑艳, 等. 宁夏地区地下滴灌水肥耦合对紫花苜蓿种子产量及构成因素的影响. *草业学报*, 2022, 31(9): 76–85.
- [5] Song Y Y, Mi W B, Yang L N, *et al.* Study of agriculture development and spatial pattern in the economic zone along the Yellow River in Ningxia. *Ecological Science*, 2015, 34(2): 116–122.
宋永永, 米文宝, 杨丽娜, 等. 宁夏沿黄经济区农业发展与空间布局研究. *生态科学*, 2015, 34(2): 116–122.
- [6] Zhao M M, Wang S Y, Han S B, *et al.* Influence mechanism and ecological effect of water saving irrigation on water balance in the Yellow River irrigation area of Ningxia. *Geology in China*, 2023, 50(1): 26–35.
赵敏敏, 王思源, 韩双宝, 等. 节水灌溉对黄河流域宁夏引黄灌区水平衡的影响机制及其生态效应. *中国地质*, 2023, 50(1): 26–35.
- [7] Han J, Wang Y F, Gao Y H, *et al.* Effect of crop nutrient uptake utilization and yield in the flax intercropping pattern. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2024, 32(6): 997–1008.
韩静, 王一帆, 高玉红, 等. 胡麻间作模式对作物养分吸收利用及产量的影响. *中国生态农业学报*, 2024, 32(6): 997–1008.
- [8] Su B Y, Chen S B, Li Y G, *et al.* Intercropping enhances the farmland ecosystem services. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(14): 4505–4514.
苏本营, 陈圣宾, 李永庚, 等. 间套作种植提升农田生态系统服务功能. *生态学报*, 2013, 33(14): 4505–4514.
- [9] Zhang Y T, Zang J R, Zhang Z X, *et al.* Effect of biochar on nitrogen uptake in alfalfa/corn intercropping system. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(4): 1217–1223.
张钰婷, 臧军蕊, 张志新, 等. 生物炭对紫花苜蓿/玉米间作系统氮吸收的影响. *草地学报*, 2024, 32(4): 1217–1223.
- [10] Ren J B, Zhang M Y, Xiao J X, *et al.* Wheat and faba bean intercropping to improve yield and response to nitrogen. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(12): 1890–1900.
任家兵, 张梦瑶, 肖靖秀, 等. 小麦||蚕豆间作提高间作产量的优势及其氮肥响应. *中国生态农业学报*, 2020, 28(12): 1890–1900.
- [11] Gao Y L, Sun Z X, Bai W, *et al.* Productivity and water use efficiency of maize-peanut intercropping systems in the semi-arid region of western Liaoning Province. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(19): 3702–3713.
高砚亮, 孙占祥, 白伟, 等. 辽西半干旱区玉米与花生间作对土地生产力和水分利用效率的影响. *中国农业科学*, 2017,

50(19): 3702—3713.

- [12] Gong X W, Dang K, Li J, *et al.* Effects of different intercropping patterns on photosynthesis production characteristics and water use efficiency of proso millet. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(22): 4139—4153.
宫香伟, 党科, 李境, 等. 糜子绿豆间作模式下糜子光合物质生产及水分利用效率. *中国农业科学*, 2019, 52(22): 4139—4153.
- [13] Huang M Q. Calculation of crop water consumption and determination of underground water replenishment under deficit irrigation. Yangling: Northwest A&F University, 2007.
黄梦琪. 水分亏缺条件下作物需水量的计算及地下水补给量的确定. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- [14] Ren Y, Liu J, Wang Z, *et al.* Planting density and sowing proportions of maize-soybean intercrops affected competitive interactions and water-use efficiencies on the Loess Plateau, China. *European Journal of Agronomy*, 2016, 72(1): 70—79.
- [15] Liang X H, Cao X, Zhang R D, *et al.* Effects of different sorghum and soybean intercropping patterns on yield, water and nutrient use efficiency. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2021, 36(3): 174—184.
梁晓红, 曹雄, 张瑞栋, 等. 不同高粱大豆间作模式对产量及水分养分利用的影响. *华北农学报*, 2021, 36(3): 174—184.
- [16] Siezen R J, Bayjanov J R, Felis G E, *et al.* Genome-scale diversity and niche adaptation analysis of *Lactococcus lactis* by comparative genome hybridization using multi-strain arrays. *Microbial Biotechnology*, 2011, 4(3): 383—402.
- [17] Karbarz M, Tyrka M, Strzembicka A W, *et al.* Quantitative trait loci mapping of adult-plant resistance to powdery mildew in triticale. *Annals of Applied Biology*, 2020, 177(2): 223—231.
- [18] Xiao Y, Liu Q S, Xu Y P, *et al.* Grass-grain planting type of alfalfa—corn—triticale: yield and economic benefit. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(33): 17—20.
肖宇, 刘青松, 徐玉鹏, 等. 苜蓿—玉米—小黑麦“草粮兼顾”型种植模式产量及经济效益分析. *中国农学通报*, 2018, 34(33): 17—20.
- [19] Lin F, Liu X J, Tong C C, *et al.* A study of root system characteristics and carbon and nitrogen metabolism of alfalfa and four grass forages in monoculture or intercropped. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(9): 45—54.
蔺芳, 刘晓静, 童长春, 等. 4种间作模式下牧草根系特性及其碳、氮代谢特征研究. *草业学报*, 2019, 28(9): 45—54.
- [20] You Y L, Zhao H M, Li Y, *et al.* Effects of cutting system on the forage yield and quality of alfalfa in Haihe plain area. *Chinese Journal of Grassland*, 2018, 40(6): 47—55.
游永亮, 赵海明, 李源, 等. 刈割制度对海河平原区紫花苜蓿产量和品质的影响. *中国草地学报*, 2018, 40(6): 47—55.
- [21] Wang X, Zeng Z H, Zhu B, *et al.* Effect of different intercropping and mixture modes on forage yield and quality of oat and common vetch. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(11): 1892—1895.
王旭, 曾昭海, 朱波, 等. 箭筈豌豆与燕麦不同间作混播模式对产量和品质的影响. *作物学报*, 2007, 33(11): 1892—1895.
- [22] Yang H, Zhou Y, Chen P, *et al.* Effects of nutrient uptake and utilization on yield of maize-legume strip intercropping system. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(6): 1476—1487.
杨欢, 周颖, 陈平, 等. 玉米—豆科作物带状间套作对养分吸收利用及产量优势的影响. *作物学报*, 2022, 48(6): 1476—1487.
- [23] Xia H Y, Zhao J H, Sun J H, *et al.* Dynamics of root length and distribution and shoot biomass of maize as affected by intercropping with different companion crops and phosphorus application rates. *Field Crops Research*, 2013, 150(8): 52—62.
- [24] 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.
- [25] He J T, Ma X, Ju Z L, *et al.* Effects of intercropping between oat and broad bean on crop growth and yield in alpine region. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(9): 2514—2521.
何纪桐, 马祥, 琚泽亮, 等. 高寒地区燕麦与蚕豆间作对作物生长发育及产量的影响. *草地学报*, 2022, 30(9): 2514—2521.
- [26] Wang B, Deng J Q, Wang T F, *et al.* Optimizing nitrogen application rates to maximize productivity while reducing environmental risk by regulating nitrogen and water utilization in mixed crop systems. *Agricultural Water Management*, 2024, 303(10): 109053.
- [27] Wang Z F, Wang D J, Yu H Z, *et al.* Effects of cutting time and stubble height on hay yield and quality of *Leymus chinensis* meadow. *Pratacultural Science*, 2016, 33(2): 276—282.
王志锋, 王多伽, 于洪柱, 等. 刈割时间与留茬高度对羊草草甸草产量和品质的影响. *草业科学*, 2016, 33(2): 276—282.

- [28] Dong W L, Zhang L Z, Yu Y, *et al.* Productivity and water use in sunflower intercropped with potato. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(18): 127–133.
董宛麟, 张立祯, 于洋, 等. 向日葵和马铃薯间作模式的生产力及水分利用. *农业工程学报*, 2012, 28(18): 127–133.
- [29] Cai Q, Sun Z X, Wang W B, *et al.* Yield and water use of maize/soybean intercropping systems in semi-arid western Liaoning. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2022, 43(7): 551–562.
蔡倩, 孙占祥, 王文斌, 等. 辽西半干旱区玉米大豆间作对作物产量及水分利用的影响. *中国农业气象*, 2022, 43(7): 551–562.
- [30] Niu Y N, Liu D M, Luo Z Z, *et al.* Characteristics of crop water consumption under maize/pea intercropping systems with different irrigation levels. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(1): 83–88.
牛伊宁, 刘冬梅, 罗珠珠, 等. 不同供水水平对玉米/豌豆间作系统作物耗水特征的影响. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(1): 83–88.
- [31] Chen W, Xue L. Root interactions: competition and facilitation. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(6): 1243–1251.
陈伟, 薛立. 根系间的相互作用——竞争与互利. *生态学报*, 2004, 24(6): 1243–1251.
- [32] Xiao Y B, Li L, Zhang F S. Effect of root contact on interspecific competition and N transfer between wheat and fababean using direct and indirect ¹⁵N techniques. *Plant and Soil*, 2004, 262(1/2): 45–54.
- [33] 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.
- [34] 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.