

DOI:10.11686/cyxb2024214

http://cyxb.magtech.com.cn

王腾飞, 马霞, 刘金龙, 等. 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. 草业学报, 2025, 34(4): 27-37.

WANG Teng-fei, MA Xia, LIU Jin-long, et al. Analysis of the yield, quality and economic benefits from multiple cropping of fodder oats in the Yellow River irrigation area. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(4): 27-37.

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

王腾飞^{1,2}, 马霞^{1,2}, 刘金龙³, 王斌^{1,2}, 张译尹^{1,2}, 李佳旺^{1,2}, 马江萍^{1,2}, 王小兵^{1,2}, 兰剑^{1,2*}

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏草畜牧业工程技术研究中心, 宁夏 银川 750021; 3. 宁夏千叶青农业科技发展有限公司, 宁夏 石嘴山 753000)

摘要:为探讨适合宁夏引黄灌区麦后复种燕麦种植模式,以燕麦、箭筈豌豆和毛苕子为试验材料,设置2种混播模式和3种单播模式,研究不同种植模式对草地种间竞争、生产性能和经济效益的影响。2年试验结果表明,复种燕麦混播模式相较燕麦单作在土地资源利用、生产力提升、营养品质改善和经济效益方面具有明显优势。复种燕麦混播模式土地当量比(LER)均大于1,土地利用效率平均提高21%,复种燕麦×箭筈豌豆对草地生产力提高效果明显,其中干草产量(8.37 t·hm⁻²)、粗蛋白产量(1049.58 kg·hm⁻²)和经济效益(8817元·hm⁻²)较复种燕麦单作显著提高了16.97%、42.49%和30.89%。复种燕麦×毛苕子对营养价值改善明显,其中粗蛋白含量(13.33%)和相对饲喂价值(114.55)较复种燕麦单作显著提高了29.92%和17.78%。综上,可根据实际需求选择不同麦后复种模式,对牧草需求量大,可优先选择燕麦×箭筈豌豆混播模式;对牧草营养品质要求较高,推荐燕麦×毛苕子混播模式。研究结果对宁夏引黄灌区耕地资源潜力的挖掘和种植结构的调整提供了实践依据。

关键词:引黄灌区;混播;粗蛋白产量;营养品质;土地当量比;经济效益

Analysis of the yield, quality and economic benefits from multiple cropping of fodder oats in the Yellow River irrigation area

WANG Teng-fei^{1,2}, MA Xia^{1,2}, LIU Jin-long³, WANG Bin^{1,2}, ZHANG Yi-yin^{1,2}, LI Jia-wang^{1,2}, MA Jiang-ping^{1,2}, WANG Xiao-bing^{1,2}, LAN Jian^{1,2*}

1. College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Ningxia Grass and Animal Husbandry Engineering Technology Research Center, Yinchuan 750021, China; 3. Ningxia Qianyeqing Agricultural Science and Technology Development Co., Ltd., Shizuishan 753000, China

Abstract: This research evaluated different mixed cropping options for planting oats after wheat in the Ningxia Yellow River irrigation area. Two mixed planting patterns and three sole crop planting treatments were established with oats (*Avena sativa*), common vetch (*Vicia sativa*) and hairy vetch (*Vicia villosa*), to study the effects on interspecific competition, yield performance and economic benefits over two years. The results showed that oats sown in mixtures with vetch outperformed oats sown as a sole crop in terms of land resource utilization, productivity enhancement, nutritional quality improvement, and economic benefit. The land equivalent ratio (LER) of the

收稿日期:2024-06-06;改回日期:2024-07-29

基金项目:宁夏高等学校一流学科建设(草学学科)项目(NXYLXK2017A01)和“一年两熟”人工草地可持续发展模式研究与示范项目(2021BBF02001)资助。

作者简介:王腾飞(1997-),男,宁夏固原人,在读博士。E-mail: tengfei_4740@163.com

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

replanted oat mixed cropped with vetch was greater than 1, and the land use efficiency increased by 21% on average. The effect of replanting oat with common vetch on crop productivity was substantial. In this mixture, the hay yield was $8.37 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, crude protein yield was $1049.58 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ and economic benefit was $8817 \text{ CNY}\cdot\text{ha}^{-1}$. These values were increased ($P<0.05$) by 16.97%, 42.49% and 30.89%, respectively, compared to oat monoculture. Similarly, the crop nutritional value was improved in mixed crops of oats with hairy vetch. In this mixture, the relative feeding value was 114.55 and crude protein content was increased ($P<0.05$) by 29.92% compared to oats alone, where crude protein content was 13.33%. In conclusion, different modes of replanting after wheat can be selected according to the actual forage demand. When the forage demand is high, oat-common vetch mixtures offer higher yield; when it is desired to optimize forage nutritional quality oat-hairy vetch mixtures are recommended. The results of the study provide practical guidelines for improving the potential of arable land resources and adjusting the planting mixture according to forage requirement in the Yellow River irrigation area of Ningxia.

Key words: Yellow River irrigation area; mixture sowing; crude protein yield; nutritional quality; land equivalent ratio; economic benefits

近年来,随着社会发展水平的提升以及食物来源的多元化,人们的饮食观念和食物消费结构也随之产生了变化,尤其对食物不仅要吃饱更要吃好的需求,促进了我国畜产品消费的增长^[1]。然而,当前我国存在草畜产品生产发展相对滞后、价格浮动较大、畜产品多样化供应不足的问题,主要原因是饲草供应不足,特别是优质饲草短缺。宁夏作为全国重要的肉、禽、蛋、奶生产基地,饲草产业发展正在面临巨大挑战,加之耕地可种植饲草面积减小,草产业发展受到严重制约。麦后复种是缓解饲草种植面积不足的有效举措,在小麦(*Triticum aestivum*)等麦类作物7月初收获后复种,不仅能充分利用耕地资源,还能避免残留氮引起的环境污染等问题^[2-3]。饲用燕麦(*Avena sativa*)因其较短的生育期常作为麦后复种作物之一,经常与毛苕子(*Vicia villosa*)和箭筈豌豆(*Vicia sativa*)等豆科植物混播种植以提高饲草生产力和改善牧草品质^[4],而在生产实践中混播系统生产力受作物种类和种间竞争影响^[5]。因此,分析宁夏引黄灌区麦后复种燕麦种植模式对混播草地维持较高生产力和缓解草畜矛盾具有重要意义。

豆禾混播可以提高饲草产量,改善营养品质,获得较高的生产效益^[6-8]。例如,Mao等^[9]发现,通过竞争效应,混播可使饲草产量提高23%~34%。徐强等^[4]研究表明,混播后饲草粗蛋白含量较单播提高9.2%~46.2%。因此,为了增加燕麦的牧草品质和产量稳定性,学者们将箭筈豌豆和毛苕子等豆科作物与燕麦混播^[6,10-11]。目前,针对麦后复种研究较少且主要集中在作物单作,如饲用油菜(*Brassica campestris*)^[12]、花生(*Arachis hypogaea*)^[13]、糜子(*Panicum miliaceum*)^[14]等,关于麦后复种燕麦混播相关研究鲜见,仅见袁英良等^[7]在吉林地区研究麦后复种饲用油菜与燕麦混播模式,试验获得干草产量 $6988.16 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。宁夏引黄灌区是全国重要的粮食生产基地,麦类作物收获后水热资源丰富,拥有全年40%的雨水资源^[15]。前人关于宁夏引黄灌区麦后复种的报道主要针对复种单一牧草,如饲用油菜^[16]、高粱(*Sorghum bicolor*)^[12]、高丹草(*S. bicolor*×*Sorghum sudanese*)^[17]等。鉴于此,本研究针对宁夏饲草总量不足、麦后复种燕麦种植模式不明的现状,充分利用麦后水热资源复种燕麦不同种植模式,并通过田间试验综合分析不同模式生产力、资源利用及经济效益。旨在提出充分利用光、热、土地资源,挖掘农田增产潜力的种植模式,为该区域草畜平衡和高效复种制度的绿色发展提供理论依据和技术支持。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验于2022年7月至2023年10月在宁夏大学草学农垦茂盛公司牧草基地($38^{\circ}33' \text{ N}$, $106^{\circ}03' \text{ E}$)进行,试验区属中温带大陆性气候,年平均气温 8.5°C ,年日照时数达2800~3100 h,年平均降水量为180~210 mm,且主要集中在秋季,无霜期为190 d左右。试验地土壤为熟化的淡灰钙土,0~20 cm土层土壤理化性状为:有机质 $15.08 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效氮 $51.20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $18.70 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $128.93 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{pH}=8.23$ 。试验地具备灌溉条

件, 试验期间降水和气温如图 1 所示。

1.2 试验材料

箭筈豌豆、毛苕子, 燕麦, 详细信息见表 1。

1.3 试验设计与田间管理

试验播种时间为 2022 年 7 月 14 日和 2023 年 7 月 14 日, 收获时间为 2022 年 10 月 4 日和 2023 年 10 月 3 日, 前茬作物为种用小黑麦 (*Triticale*)。采用单因素随机区组设计 (图 2), 试验共设 2 个混播组合处理, 分别为燕麦 + 毛苕子混播、燕麦 + 箭筈豌豆混播; 3 个单播处理, 分别为燕麦单播、毛苕子单播、箭筈豌豆单播。共 5 个处理, 每个处理 3 个重复, 共计 15 个小区。小区面积为 18 m² (3 m × 6 m), 过道 1 m。播种量如表 2 所示, 混播处理采用间行混播方式条播, 燕麦间行距 30 cm。试验地采用地面滴灌, 滴灌带间隔 60 cm, 滴头间隔 20 cm。播前施尿素 45 kg · hm⁻² 和磷酸二铵 120 kg · hm⁻², 在燕麦拔节期追施尿素 105 kg · hm⁻²。

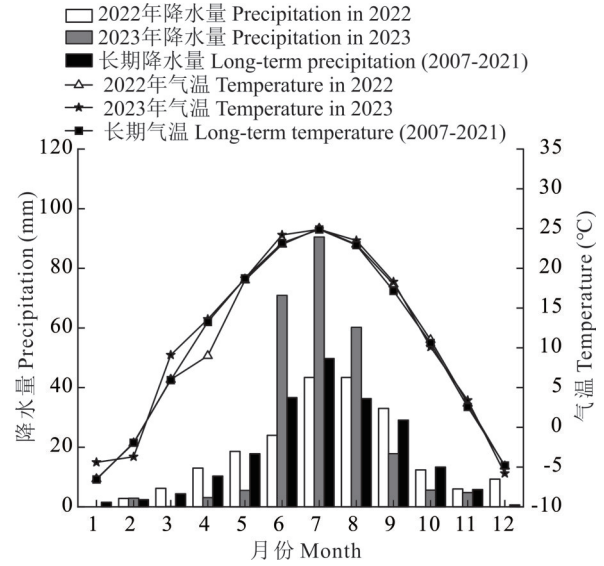


图 1 试验地月平均降水量和气温

Fig. 1 Monthly average precipitation and temperature in the experimental field

表 1 供试材料信息

Table 1 Information of test materials

材料 Material	品种 Variety	纯净度 Purity (%)	发芽率 Germination rate (%)	千粒重 Thousand seeds weight (g)	来源 Source
燕麦 <i>A. sativa</i>	喜韵 Xiyun	98	94	36.70	北京百斯特草业有限公司
毛苕子 <i>V. villosa</i>	土库曼毛苕子 Turkmen hairy vetch	98	85	22.70	Beijing Best Grass Industry Co., Ltd.
箭筈豌豆 <i>V. sativa</i>	普通箭筈豌豆 Common vetch	92	80	65.50	

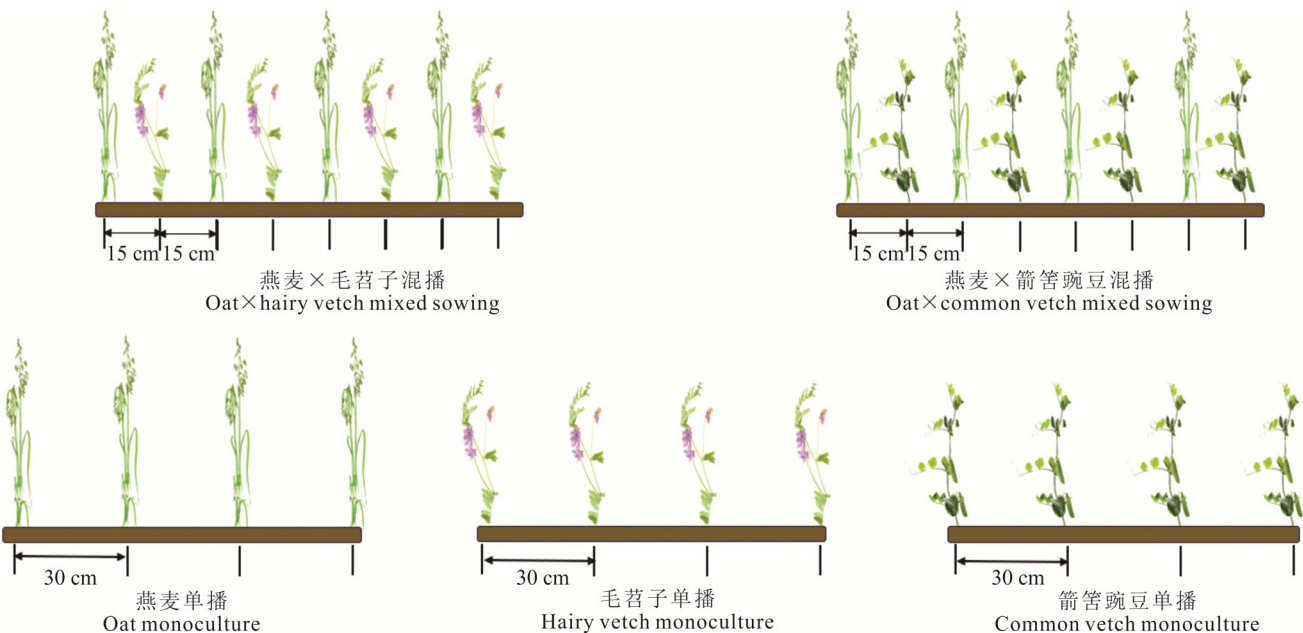


图 2 试验种植模式

Fig. 2 Experimental planting pattern

1.4 测定指标及方法

1.4.1 株高、密度、干草产量和粗蛋白产量 每个小区随机选取长势具有代表性的燕麦、箭筈豌豆和毛苕子各30株,用卷尺测量植株从地面到顶部最高点的自然高度,记为株高。每个小区内随机选取3个2 m样段测定燕麦和豆科牧草的密度。在灌浆期,随机在每个小区选取长势均一、有代表性的3个1 m²(1 m×1 m)样方人工用镰刀进行刈割,留茬高度3~5 cm,将鲜样编号装进轻型网袋,用便携式弹簧手提秤(香山手提秤,广州中山)称鲜草产量。然后将鲜样带回实验室于105℃下杀青35 min,于65℃烘干至恒重,称干草产量,计算鲜干比(鲜干比=鲜草产量/干草产量),折算每hm²干草产量。粗蛋白产量计算公式如下:

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

1.4.2 营养品质 测产时每个小区随机取3个500 g鲜样,带回实验室自然阴干后用粉碎机(中药材超细商用破碎机,浙江金华)粉碎,过0.45 mm筛。使用极光手持近红外仪(SN 117618,德国)测定样品的营养成分,包括牧草粗蛋白(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。计算相对饲喂价值(relative feeding value, RFV):

$$\text{RFV} = 120/\text{NDF} \times (88.9 - 0.779 \times \text{ADF})/1.29$$

1.4.3 竞争指数 土地当量比(land equivalent ratio, LER):可用于评价混作体系中系统生产力情况。LER值越大表示混播效果越好,当LER>1时,物种间表现出产量和资源利用优势;LER<1时,表现出产量和资源利用劣势^[18]。

$$\text{LER}_O = Y_{MO}/Y_O$$

$$\text{LER}_L = Y_{ML}/Y_L$$

$$\text{LER} = \text{LER}_O + \text{LER}_L$$

式中: Y_{MO} 、 Y_{ML} 分别代表混播燕麦和混播豆科牧草产量; Y_O 、 Y_L 分别代表单播燕麦和单播豆科牧草产量, LER_O 、 LER_L 、 LER 分别表示燕麦偏土地当量比、豆科牧草偏土地当量比和土地当量比。

竞争强度(aggresivity, A):可用于确定两个物种间的竞争关系。A值表示混播群体中,一种植物相比于另外一种植物相关产量的增加或减少。若 $A_O > 0$,表示燕麦的竞争能力大于毛苕子或箭筈豌豆;若 $A_O = 0$,表示毛苕子或箭筈豌豆与燕麦的竞争能力相同;若 $A_O < 0$,表示燕麦的竞争能力小于毛苕子或箭筈豌豆^[2]。

$$A_O = Y_{MO}/(Y_O Z_{MO}) - Y_{ML}/(Y_L Z_{ML})$$

$$A_L = Y_{ML}/(Y_L Z_{ML}) - Y_{MO}/(Y_O Z_{MO})$$

式中: Z_{MO} 和 Z_{ML} 分别代表燕麦和豆科牧草的混播比例; A_O 和 A_L 分别代表燕麦和豆科牧草的竞争强度。

竞争比率(competition ratio, CR):反映混播群体中植物竞争强弱的指标, $\text{CR}_O > 1$ 表明燕麦的竞争能力更强,反之,则是豆科牧草竞争能力更强^[2]。

$$\text{CR}_O = (\text{LER}_O/\text{LER}_L)(Z_{ML}/Z_{MO})$$

$$\text{CR}_L = (\text{LER}_L/\text{LER}_O)(Z_{MO}/Z_{ML})$$

式中: CR_O 和 CR_L 分别代表燕麦和豆科牧草的竞争比率。

系统生产力(system productivity, SP)计算方法如下^[19]:

$$\text{SP} = Y_{MO} \times Z_{MO} + Y_{ML} \times Z_{ML}$$

1.4.4 经济效益分析 经济效益主要包括投入与产出,本研究计算过程中涉及具体内容如下:农业生产要素投入:人工(田间管理,如播种、锄草、收获等)、农机(机械耕作费用,如耕地、除草等)、农资(种子、灌溉、化肥、农药等),本研究以产量为主要的测定指标,在收获季节对燕麦与毛苕子、箭筈豌豆混播及单播的作物进行测产,计算

表2 试验处理

Table 2 Test treatment

播种模式 Seeding mode	处理 Treatment	播种组合 Seeding combination	播种量 Seeding rate (kg·hm ⁻²)
间行混播 Inter-row mixed	YM	燕麦×毛苕子 <i>A. sativa</i> × <i>V. villosa</i>	127/52
	YJ	燕麦×箭筈豌豆 <i>A. sativa</i> × <i>V. sativa</i>	169/60
单播 Monoculture	YD	燕麦 <i>A. sativa</i>	180
	MD	毛苕子 <i>V. villosa</i>	105
	JD	箭筈豌豆 <i>V. sativa</i>	150

单位面积的产量,通过市场调查以及官方统计等方式了解市场价格(表3),计算单位面积的总收入及净收入。

1.5 数据处理与分析

使用Microsoft Excel 2019对试验数据进行整理,并使用Origin Pro 2021b制图。使用SPSS 25.0软件通过Duncan法对存在显著差异的指标进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 麦后复种不同处理株高和密度比较

不同复种模式对株高影响显著($P < 0.05$),混播模式下燕麦的株高小于燕麦单播,但株高差异不显著($P > 0.05$),YJ和YM混播模式下燕麦2年株高平均值较YD分别降低了0.16%和0.63%(图3)。混播模式豆科牧草株高变化存在差异,其中YJ混播模式抑制了箭筈豌豆的株高,较JD两年间分别显著下降14.46%和18.90%;YM混播模式促进了毛苕子株高,2022年与MD差异不显著,2023年较MD显著增加7.10%。混播模式总密度与燕麦单播差异不显著($P > 0.05$),混播后总密度虽然大于燕麦单播,但2种模式并未产生显著影响。YJ和YM混播模式燕麦2年密度平均值较YD分别增加11.67%和3.78%。表明YJ混播模式在对燕麦株高不产生消极作用的同时可得到最大的密度,但对箭筈豌豆株高抑制作用明显。

表3 投入与产出类别及饲草价格

Table 3 Input and output categories and forage prices

项目 Item	单价 Unit price
燕麦种子 Oat seed (CNY·kg ⁻¹)	8
毛苕子种子 Hairy vetch seed (CNY·kg ⁻¹)	20
箭筈豌豆种子 Common vetch seed (CNY·kg ⁻¹)	15
灌溉 Irrigation (CNY·hm ⁻²)	2000
肥料 Fertilizer (CNY·hm ⁻²)	650
人工 Labor (CNY·hm ⁻²)	3000
机械 Machinery (CNY·hm ⁻²)	700
收割 Harvest (CNY·hm ⁻²)	750
燕麦饲草 Oat forage (CNY·t ⁻¹)	2100
毛苕子饲草 Hairy vetch forage (CNY·t ⁻¹)	3000
箭筈豌豆饲草 Common vetch forage (CNY·t ⁻¹)	2400

注:价格按当地正常市场价格估算,饲草价格为两年平均价格。

Note: The price is estimated according to the local normal market price, and the forage price is the average price of two years.

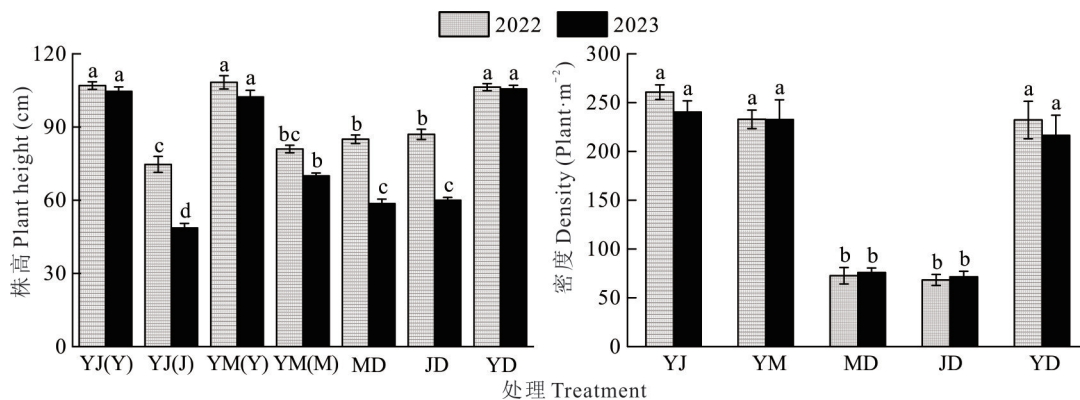


图3 不同处理对株高和密度的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on plant height and density

图中不同小写字母表示同一年份不同处理间差异显著($P < 0.05$),YJ、YM、MD、JD和YD均为不同处理编号,YJ(Y)、YJ(J)、YM(Y)和YM(M)分别表示燕麦×箭筈豌豆混播中燕麦、燕麦×箭筈豌豆混播中箭筈豌豆、燕麦×毛苕子混播中燕麦和燕麦×毛苕子混播中毛苕子,下同。Different lowercase letters in the figure indicate significant differences among treatments in the same year ($P < 0.05$). YJ, YM, MD, JD and YD were different treatment numbers. YJ(Y), YJ(J), YM(Y) and YM(M) represented oats in oat×common vetch mixed sowing, common vetch in oat×common vetch mixed sowing, oat in oat×hairy vetch mixed sowing and hairy vetch in oat×hairy vetch mixed sowing, respectively. The same below.

2.2 麦后复种不同处理草地生产性能比较

混播干草产量虽与燕麦单播未产生显著差异($P > 0.05$),但均较燕麦单播有所提高,其中YJ混播模式提高幅度较大,2022和2023年平均提高16.97%,干草产量平均达8.37 t·hm⁻²(图4);而YM混播模式提高幅度较小,2年间平均提高4.40%。混播模式显著提高了粗蛋白产量($P < 0.05$),YJ混播模式因其干草产量的优异表现,粗蛋

白产量平均达 $1049.58 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 2022年 YJ和YM混播模式分别较 YD粗蛋白产量显著增加 32.53%和 32.21%, 2023年 YJ和YM混播模式分别较 YD粗蛋白产量显著增加 54.87%和 39.55%。表明混播对草地粗蛋白产量提升效果优于干草产量, 豆科牧草的加入使得原本高产的禾本科草地更加优质, 本试验中 YJ混播模式干草产量和粗蛋白产量表现优于 YM混播模式。

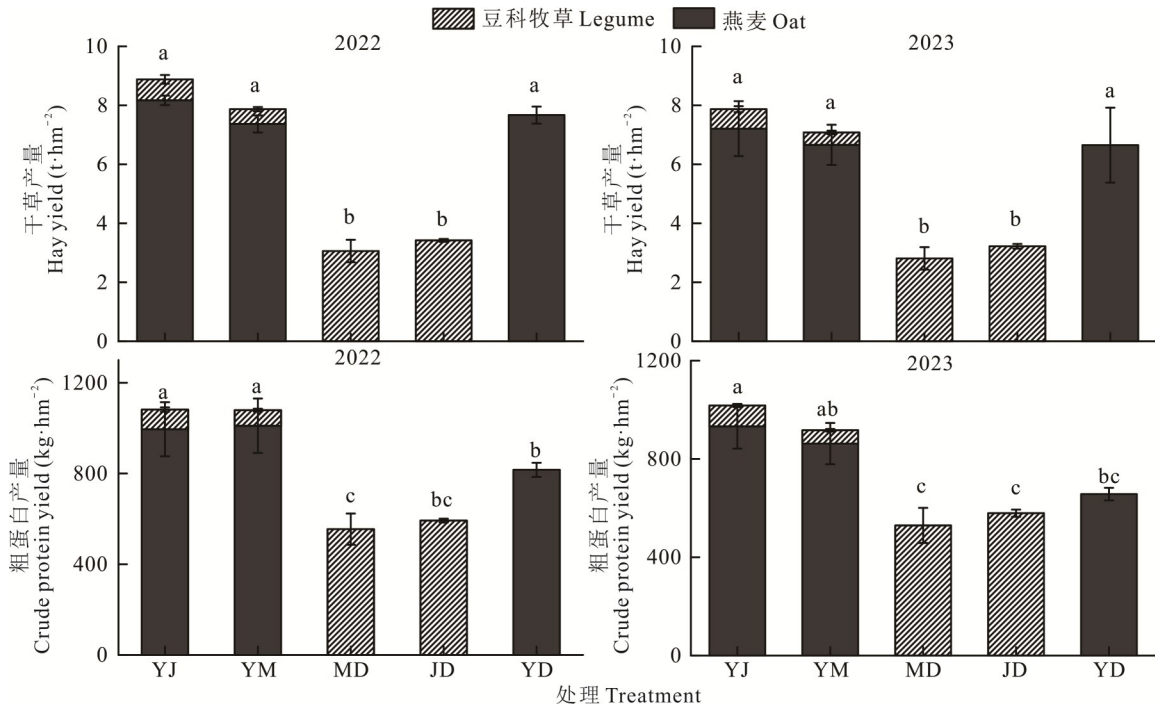


图4 不同处理对草地生产性能的影响

Fig. 4 Effects of different treatments on grassland production performance

2.3 麦后复种不同处理饲草营养价值比较

播种模式显著影响了饲草营养价值 ($P < 0.05$, 表4), 粗蛋白(CP)含量和相对饲喂价值(RFV)整体表现一致, 均为豆科牧草单播 > 混播模式 > 燕麦单播; 中性洗涤纤维(NDF)和酸性洗涤纤维(ADF)含量变化整体表现一致, 但与CP和RFV的变化相反, 表现为燕麦单播 > 混播模式 > 豆科牧草单播。混播模式YM的CP和RFV均大于YJ, 表明燕麦混播毛苕子营养价值优于燕麦混播箭筈豌豆, 混播模式YJ和YM的CP两年平均值分别是YD的1.22和1.30倍, 较JD分别下降28.89%和24.50%, 较MD分别下降32.08%和27.89%; 混播模式YJ和YM的RFV两年平均值分别是YD的1.15和1.18倍, 较JD分别下降28.73%和27.07%, 较MD分别下降36.43%和34.94%。

2.4 麦后复种不同处理竞争指数比较

竞争指数能够较好地反映混播群落中植物的生长状况及对资源的利用效率。2种混播模式的土地当量比(LER)间差异不显著 ($P > 0.05$, 图5), 竞争强度(A)、竞争比率(CR)和系统生产力(SP)存在显著差异 ($P < 0.05$)。混播模式的LER均大于1, 表明混播系统比相应的单播使用更少的土地, 生产出更多的饲草, YJ混播模式LER(1.28)大于YM混播模式(1.14), 相同条件下能提高14%的土地利用率。不同混播模式下A和CR的变化趋势相似, 2年试验结果均能证明燕麦的竞争能力高于豆科牧草(箭筈豌豆和毛苕子)。2022和2023年, YJ和YM混播模式下燕麦竞争强度(A_0)分别为0.29、0.33和1.19、1.29, 平均为0.31和1.24, 2022和2023年, YJ和YM混播模式下燕麦竞争比率(CR_0)分别为1.44、1.40和4.03、4.54, 平均为1.42和4.29, 表明在燕麦与豆科牧草混播系统中, 燕麦为竞争优势作物, 豆科牧草为竞争劣势作物。2022和2023年, YJ混播模式下系统生产力均达最大值, 分别为6680.29和5896.61 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

表 4 不同处理对饲草营养品质的影响

Table 4 Effects of different treatments on nutritional quality of forage

年份 Year	处理 Treatment	粗蛋白 Crude protein (%)	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber (%)	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber (%)	相对饲喂价值 Relative feed value
2022	YJ	12.18±0.05d	52.81±0.80b	32.93±0.12b	111.47±1.83c
	YM	13.71±0.08c	51.30±0.49b	31.66±0.49b	116.53±1.82c
	MD	18.12±0.04a	38.79±2.42c	24.25±0.82d	169.00±9.09a
	JD	17.32±0.17b	40.04±0.35c	30.29±0.12c	151.75±1.53b
	YD	10.64±0.08e	60.47±0.37a	35.38±0.08a	94.37±0.68d
2023	YJ	12.93±0.03c	52.73±0.34b	32.35±0.44ab	112.39±1.30c
	YM	12.95±0.05c	53.51±1.08b	31.10±0.81b	112.56±3.32c
	MD	18.85±0.19a	35.45±0.05d	24.54±0.51d	183.14±1.32a
	JD	17.99±0.29b	38.85±0.71c	27.14±0.22c	162.36±3.25b
	YD	9.88±0.22d	58.49±1.03a	33.36±0.14a	100.13±1.93d

注：表中不同小写字母表示同一年份不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

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

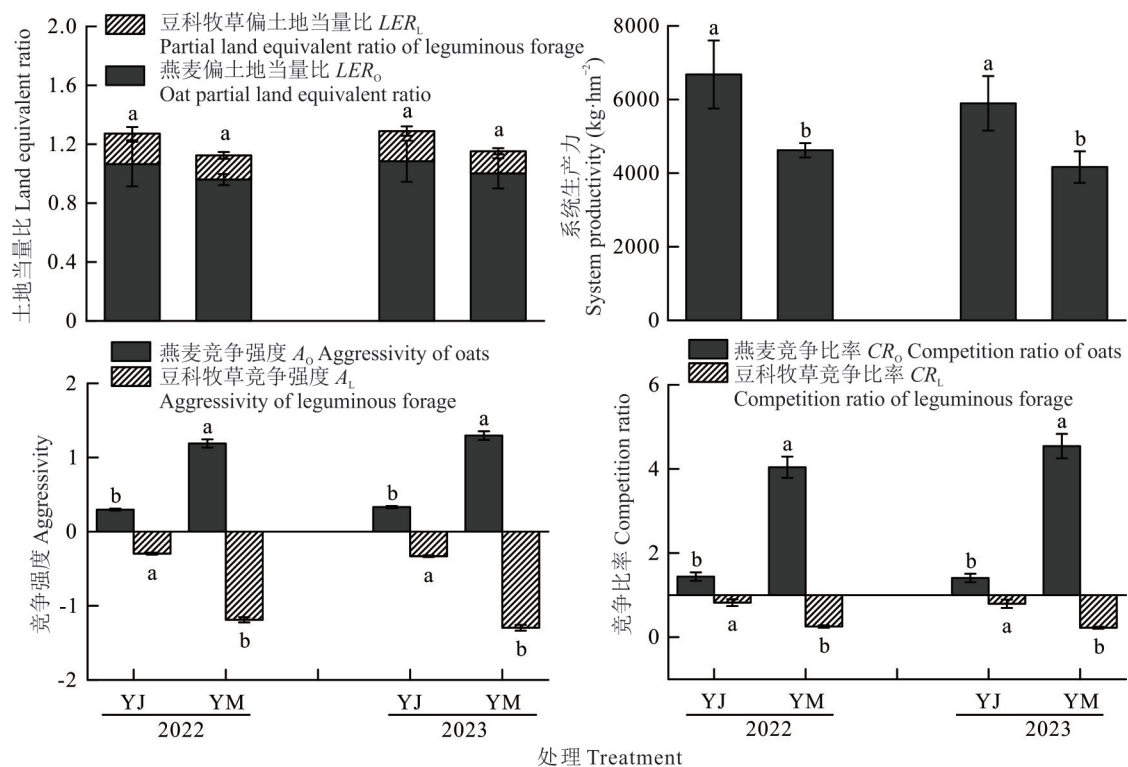


图 5 不同处理对竞争指数的影响

Fig. 5 Effects of different treatments on competition index

2.5 麦后复种不同处理经济效益分析

单播毛苕子和箭筈豌豆均表现出入不敷出的结果,净收入分别为-45和-1007元·hm⁻²(表5)。燕麦单播和2个混播模式均表现出正的净收入,混播模式净收入均大于燕麦单播,YJ处理获得最高的总收入(17790元·hm⁻²)和净收入(8817元·hm⁻²),YJ和YM净收入较YD分别提高30.89%和8.42%,表明麦后复种燕麦混播模式平均经济效益较优,有利于增加收入。

表5 不同处理草地的成本与收益

Table 5 Costs and benefits of different treatments of grassland (CNY·hm⁻²)

处理 Treatment	总收入 Gross income		净收入 Net income		平均 Average		
	2022	2023	2022	2023	支出 Expenditure	总收入 Gross income	净收入 Net income
YJ	18864	16715	9891	7742	8973	17790	8817
YM	16975	15251	8165	6441	8810	16113	7303
MD	9174	8435	324	-415	8850	8805	-45
JD	8216	7719	-759	-1256	8975	7968	-1007
YD	16116	13956	7816	5656	8300	15036	6736

2.6 麦后复种混播模式各指标相关性

混播系统各主要指标间6对指标呈正相关关系,6对指标呈负相关关系(图6)。混播后燕麦株高和总干草产量与混播系统各指标间未显示相关性,而混播系统中豆科牧草株高与粗蛋白产量显著负相关($P < 0.05$),与粗蛋白和相对饲喂价值显著正相关($P < 0.05$)。系统生产力显著受混播密度的影响。混播密度和系统生产力对土地当量比表现为正效应,粗蛋白和相对饲喂价值对土地当量比表现为显著的负效应。另外,就相对饲喂价值而言,豆科牧草株高和粗蛋白与其显著正相关。

3 讨论

株高作为衡量作物竞争能力的重要指标之一,其值越高表明作物对光资源的竞争能力越强^[20]。本研究结果显示,混播豆科牧草的株高低于单播,而燕麦株高较单播有所提高,表明在燕麦与豆科牧草混播系统中,燕麦对光的截获具有优势,研究结果与Wilson^[21]提出的“妥协性”效应一致,即当作物在光能竞争中处于不利地位时,其会主动降低高度,从而增加系统的光能利用效率,但与蒋慧^[22]的研究结果不一致,可能与土壤水分、土壤养分和光资源等方面存在地域差异有关。牧草产量是反映草地营养物质输出能力和经济价值的重要指标,也是衡量混播系统生产力的重要因素^[23-24]。本研究结果表明,燕麦在两年中都表现出较高的生物量,而豆科牧草的生长更容易受到土壤水分有效性的影响,表现出更大的生产变异性,燕麦与毛苕子、箭筈豌豆混播均可提高草地总干草产量和粗蛋白产量,这与前人研究结果一致^[5,25],一方面因为混播草地中燕麦与毛苕子、箭筈豌豆通过根瘤菌的生物固氮增加了土壤氮素养分的供应与积累,促进了燕麦根部分蘖能力^[25]。其次,该混播群落形成生态位分离,可充分利用空间和光热资源,从而提高草地生产力^[26]。此外,张耀生等^[27]在高寒地区的研究表明,燕麦与箭筈豌豆混播组合产量高于燕麦与毛苕子的混播组合,本研究也得出相同的结果。原因可能是箭筈豌豆相较毛苕子竞争能力强,刺激燕麦通过增加株高和分蘖(图3)保持混播中的竞争优势,继而形成产量优势。再者可能是箭筈豌豆在与燕麦竞争中处于劣势地位,生长后期其可能主要发挥了绿肥作用,促进了燕麦的生长。

牧草的粗蛋白含量是牧草质量评价最重要的指标之一,也是畜牧业关注的最重要品质特征之一,RFV是用来预测牧草采食量和能量价值的指标,它是由ADF和NDF推导出来的。已有研究均证实豆科牧草较禾本科牧草含有更高的营养价值,尤其是高的粗蛋白含量^[11,28-29]。本研究表明,燕麦中随着豆科牧草的加入,其混合牧草

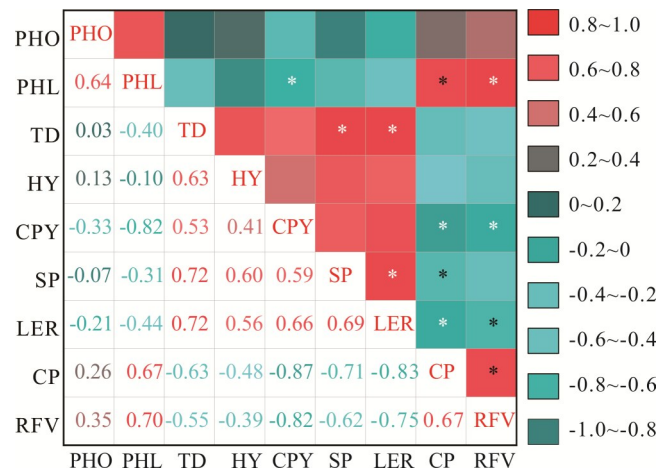


图6 混播处理主要性状相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis of main traits of mixed sowing treatment

PHO: 燕麦株高 Plant height of oat; PHL: 豆科牧草株高 Plant height of legume; TD: 总密度 Total density; HY: 干草产量 Hay yield; CPY: 粗蛋白产量 Crude protein yield; SP: 系统生产力 System productivity; LER: 土地当量比 Land equivalent ratio; CP: 粗蛋白 Crude protein; RFV: 相对饲喂价值 Relative feed value; *: $P < 0.05$.

的营养价值提高效果显著,混播处理的牧草粗蛋白含量整体高于燕麦单播,低于毛苕子和箭筈豌豆单播,与前人研究结果一致^[27]。有研究者认为出现这一结果的原因是燕麦与毛苕子、箭筈豌豆混播后,毛苕子和箭筈豌豆中固定的氮由豆科牧草的植物组织淋洗到土壤中被燕麦再吸收或通过菌根接触直接运移,继而由燕麦根系转移到地上植株中^[10]。同时由于燕麦对固氮产物的利用,反馈到毛苕子和箭筈豌豆使得其固氮作用增强,提高了燕麦粗蛋白含量,从而增加了混合牧草粗蛋白含量^[30]。本试验结果显示燕麦单播的RFV远低于豆科牧草单播,牧草混播中和了燕麦的这一不足,其中在混播条件下燕麦和毛苕子粗蛋白含量和相对饲喂价值均最高,分别达13.33%和114.55。造成这一现象的原因可能是:1)燕麦收获时毛苕子还未结荚,而箭筈豌豆已有部分结荚,豆科牧草自身的营养影响混合牧草营养,毛苕子与箭筈豌豆单播的营养品质结果也进一步证实此结论(表4);2)在燕麦混播系统中,箭筈豌豆竞争能力强于毛苕子(图5),而燕麦作为混播优势作物抑制了箭筈豌豆生长,对毛苕子影响较小,表现为YM较YJ豆科牧草更多,继而影响营养品质。本研究表明麦后复种燕麦混播模式均表现出优于燕麦单播的品质特性,混播系统结合了较豆科牧草单作更高的牧草产量和比燕麦单作更好的营养品质。

我国的大多数土地以家庭为单位,地块小且迫切需要能够提高土地生产力的栽培方式,混播便是主要选择之一^[31]。通过研究不同饲草混播模式发现,各混播处理土地当量比均高于1,且地上生物量总和均高于单播处理^[31-32]。在本研究中,所有混播处理的土地当量比均大于1,表明燕麦与毛苕子、箭筈豌豆混播系统具有产量优势,可有效提高土地利用效率。同时研究发现燕麦生长发育较快是混播中的优势种,其偏土地当量比均大于0.67,毛苕子和箭筈豌豆的偏土地当量比均小于0.33,说明混播优势的主要贡献者是燕麦,主要原因是燕麦植株高,茎秆粗壮,相对毛苕子和箭筈豌豆更容易获取光资源和空间资源,使其在与毛苕子和箭筈豌豆的竞争占据优势^[33]。同时研究中燕麦竞争比率 $CR_0 > 1.0$,竞争强度 $A_0 > 0$ 的试验结果也证明燕麦在混播系统中的优势地位。此外,值得注意的是燕麦的优势主要受水供应的影响,本研究中燕麦种间竞争指数并未发现明显的年际变化,表明本试验田间管理较好。与单作不同,混播生产的产品多样化,在这种情况下,除了产量表现外,借助经济效益是决定且最终影响农民种植意愿的主要指标^[33]。复合种植较单作具有更大的经济优势,本试验中相较单作,2种混播模式表现出更大的经济效益,燕麦×毛苕子和燕麦×箭筈豌豆混播模式净收入较燕麦单作分别提高8.42%和30.89%。表明麦后复种燕麦混播模式对土地资源利用率、生产力提升、营养品质改善和经济回报更高。

4 结论

麦后复种燕麦种植模式对缓解当前饲草种植面积和供应不足具有实际意义,复种燕麦混播模式相较燕麦单作对土地资源利用、生产力提升、营养品质提高和经济回报更显著,混播模式中燕麦为竞争优势作物。根据实际需求可选择不同复种模式,对牧草营养品质要求较高,推荐麦后复种燕麦×毛苕子混播模式,可获得草产量 $7.47 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,粗蛋白产量 $997.92 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,以及13.33%的粗蛋白含量和114.55的相对饲喂价值;对牧草需求量大可优先选择麦后复种燕麦×箭筈豌豆混播模式,可收获最大草产量、粗蛋白产量和经济回报,分别达 $8.37 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $1049.58 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $8817 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。研究结果对宁夏引黄灌区耕地资源潜力的挖掘和种植结构的调整提供了实践依据。

参考文献 References:

- [1] Song M, Zhang A L. Cultivated land use transition from the "Greater Food" perspective: Realistic challenges, theoretical logic and implementation paths. *China Land Science*, 2023, 37(8): 31-41.
宋敏, 张安录. 大食物观视阈下的耕地利用转型: 现实挑战、理论逻辑与实现路径. *中国土地科学*, 2023, 37(8): 31-41.
- [2] Wang Z H, Li S X, Wang X N, *et al.* Nitrate nitrogen residue and leaching in dryland soil and influence factors. *Soils*, 2006, 38(6): 676-681.
王朝辉, 李生秀, 王西娜, 等. 旱地土壤硝态氮残留淋溶及影响因素研究. *土壤*, 2006, 38(6): 676-681.
- [3] Sebilio M, Mayer B, Nicolardot B, *et al.* Long-term fate of nitrate fertilizer in agricultural soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(45): 18185-18189.
- [4] Xu Q, Tian X H, Du W H. Effects of mixed sowing of rye and common vetch on forage yield and nutrient quality in alpine

- pastoral areas. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(8): 49–59.
- 徐强, 田新会, 杜文华. 高寒牧区黑麦和箭筈豌豆混播对草产量和营养品质的影响研究. *草业学报*, 2021, 30(8): 49–59.
- [5] Zhang Y L, Yu T F, Hao F, *et al.* Effects of fertilization and legume-grass ratio on forage yield and NPK utilization efficiency. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(11): 91–101.
- 张永亮, 于铁峰, 郝凤, 等. 施肥与混播比例对豆禾混播牧草产量及氮磷钾利用效率的影响. *草业学报*, 2020, 29(11): 91–101.
- [6] 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.
- [7] Yuan Y L, Tang D, Lu Y, *et al.* An investigation of multiple crop planting options when following wheat with mixed-cropped forage rape and oats in the Jilin area of northeast China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(7): 167–178.
- 袁英良, 唐丹, 鲁英, 等. 吉林地区麦后复种饲用油菜与燕麦混播效应研究. *草业学报*, 2021, 30(7): 167–178.
- [8] Zhou J J, Baima G W, Wei W, *et al.* The effects of grass-legume mixing farming on forage nutritional quality and soil nutrient in alpine zone of Tibet. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(2): 143–149.
- 周娟娟, 白玛嘎翁, 魏巍, 等. 西藏高寒区禾—豆混播对牧草营养品质及土壤养分的影响. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(2): 143–149.
- [9] Mao L L, Zhang L Z, Li W Q, *et al.* Yield advantage and water saving in maize/pea intercrop. *Field Crops Research*, 2012, 138: 11–20.
- [10] Quan X, Wu J X, Yang P Z, *et al.* Study on the relationship between productivity and species in grassland with mixed-sowed gramineous and leguminous forages in Lhasa river valley. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(3): 657–667.
- 权欣, 武俊喜, 杨培志, 等. 拉萨河谷禾豆混播草地生产力与种间关系研究. *草地学报*, 2023, 31(3): 657–667.
- [11] Sadeghpour A, Jahanzad E, Esmaeili A, *et al.* Forage yield, quality and economic benefit of intercropped barley and annual medic in semi-arid conditions; Additive series. *Field Crops Research*, 2013, 148: 43–48.
- [12] Liu L L, Liu G H, Mai X F, *et al.* Comprehensive benefits evaluation of spring wheat multiple cropping forage grass in Ningxia Yellow River irrigation area. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(1): 50–60.
- 刘露露, 刘根红, 买晓凤, 等. 宁夏引黄灌区春小麦复种牧草模式的综合效益评价. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(1): 50–60.
- [13] Zhao J H, Li Y, Qian B C, *et al.* Effects of straw return and tillage on soil properties and yield of multi-cropping peanut after wheat. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(5): 272–280.
- 赵继浩, 李颖, 钱必长, 等. 秸秆还田与耕作方式对麦后复种花生田土壤性质和产量的影响. *水土保持学报*, 2019, 33(5): 272–280.
- [14] Xie C H, Ma H Z, Xu H W, *et al.* Effects of nitrogen rate on growth, grain yield, and nitrogen utilization of multiple cropping proso millet after spring-wheat in irrigation area of Ningxia. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(2): 463–477.
- 谢呈辉, 马海盟, 许宏伟, 等. 施氮量对宁夏引黄灌区麦后复种糜子生长、产量及氮素利用的影响. *作物学报*, 2022, 48(2): 463–477.
- [15] Wei G Y, Tan J L, Li H, *et al.* Effects of nitrogen application rate and irrigation quota on yield and water and nitrogen utilization of post-spring wheat multiple cropping oilseed rape in Yellow River irrigation area. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(11): 1745–1757.
- 韦广源, 谭军利, 李红, 等. 施氮量和灌溉定额对引黄灌区麦后复种油菜产量和水氮利用的影响. *中国生态农业学报*, 2023, 31(11): 1745–1757.
- [16] Fan L, He W S, Jia B. Growth and development rule and analysis of main characters of *Brassica napus* L. after spring wheat harvesting in irrigated area of Ningxia. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 31(7): 1355–1359.
- 范玲, 何文寿, 贾彪. 宁夏引黄灌区麦后复种饲料油菜生长发育规律及其主要性状分析. *西南农业学报*, 2018, 31(7): 1355–1359.
- [17] Zhang J L, Shi A, Liang X J, *et al.* Nutrition and feeding value evaluation of multiple cropping of sorghum, sorghum and silage corn after wheat in Ningxia Yellow River irrigation area. *Feed Research*, 2021, 44(4): 83–87.
- 张俊丽, 施安, 梁小军, 等. 宁夏引黄灌区麦后复种高丹草、饲用高粱、青贮玉米营养及饲用价值评定. *饲料研究*, 2021, 44(4): 83–87.
- [18] Agegnehu G, Ghizaw A, Sinebo W. Yield performance and land-use efficiency of barley and faba bean mixed cropping in

- Ethiopian highlands. *European Journal of Agronomy*, 2006, 25(3): 202–207.
- [19] Ghosh P K. Growth, yield, competition and economics of groundnut/cereal fodder intercropping systems in the semi-arid tropics of India. *Field Crops Research*, 2004, 88(2/3): 227–237.
- [20] Loreau M, Hector A. Partitioning selection and complementarity in biodiversity experiments. *Nature*, 2001, 413(6855): 548.
- [21] Wilson J B, Agnew A D Q. Positive-feedback switches in plant communities. *Advances in Ecological Research*, 1992, 23(6): 263–336.
- [22] Jiang H. Study on yield, quality and degradation rate of alfalfa and *Bromus inermis* mixed grassland and its comprehensive evaluation. Shihezi: Shihezi University, 2007.
蒋慧. 紫花苜蓿与无芒雀麦混播草地产量、品质和降解率研究及其综合评价. 石河子: 石河子大学, 2007.
- [23] Song Q H, Zhao C Z, Shi Y C, *et al.* Spatial distribution patterns of specific root lengths of *Avena sativa* L. and *Vicia villosa* Roth in mixed-sowing grassland under density dependence in northern slope of Qilian Mountains. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(2): 497–503.
宋清华, 赵成章, 史元春, 等. 祁连山北坡混播草地密度制约下燕麦和毛苕子比根长分布格局. *生态学杂志*, 2015, 34(2): 497–503.
- [24] Biswal A K, Kohli A. Cereal flag leaf adaptations for grain yield under drought: knowledge status and gaps. *Molecular Breeding*, 2013, 31(4): 749–766.
- [25] Li J, Du J Y, Yang L, *et al.* Effects of cross sowing at different times on grassland productivity in the third year of planting in northwest Hebei. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(8): 2167–2172.
李军, 杜俊颖, 杨莉, 等. 冀西北地区错期交叉混播对第3年草地生产力的影响. *草地学报*, 2022, 30(8): 2167–2172.
- [26] Zhang Y L, Gao K, Yu T F, *et al.* Effects of sowing patterns on productivity and interspecific relationship of alfalfa-grass mixture system. *Chinese Journal of Grassland*, 2020, 42(2): 47–57.
张永亮, 高凯, 于铁峰, 等. 禾草种类与混播比例对苜蓿-禾草混播系统生产力及种间关系的影响. *中国草地学报*, 2020, 42(2): 47–57.
- [27] Zhang Y S, Zhao X Q, Zhou X M. Mixed cropping of oat with three leguminous pasture species in alpine pastoral area. *Acta Prataculturae Sinica*, 2001, 10(1): 13–19.
张耀生, 赵新全, 周兴民. 高寒牧区三种豆科牧草与燕麦混播的试验研究. *草业学报*, 2001, 10(1): 13–19.
- [28] Wang T F, Wang B, Deng J Q, *et al.* Effect of sowing rate on yield and forage quality of a *Dolichos lablab*-*Sorghum bicolor* mixture under drip irrigation in arid areas of Ningxia. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(3): 30–40.
王腾飞, 王斌, 邓建强, 等. 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. *草业学报*, 2023, 32(3): 30–40.
- [29] Wang B, Dong X, Li M Y, *et al.* Effects of mixed planting of *Dolichos lablab* with different sowing rates and silage corn on grassland productivity and forage quality. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(4): 828–834.
王斌, 董秀, 李满有, 等. 不同播量拉巴豆与青贮玉米混播对草地生产性能及牧草品质的影响. *草地学报*, 2021, 29(4): 828–834.
- [30] Wang C, Zhou L B, Zhang G B, *et al.* Responses of photosynthetic characteristics and dry matter formation in waxy sorghum to row ratio configurations in waxy sorghum-soybean intercropping systems. *Field Crops Research*, 2021, 263.
- [31] Umesh M R, Angadi S, Begna S, *et al.* Intercropping and species interactions on physiological and light use characteristics of forage cereals-legumes combinations in semi-arid regions. *Field Crops Research*, 2023, 290.
- [32] Li X L, Shi S L, Huang Z C, *et al.* Effects of different forage mixed patterns on interspecific relationships in loess hilly areas. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(6): 1318–1326.
李兴龙, 师尚礼, 黄宗昌, 等. 黄土丘陵区不同饲草混播模式对种间关系的影响. *草地学报*, 2021, 29(6): 1318–1326.
- [33] Raza M A, Gul H, Wang J, *et al.* Land productivity and water use efficiency of maize-soybean strip intercropping systems in semi-arid areas: A case study in Punjab Province, Pakistan. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 308.