

氮肥用量和混播比例对麦豆混播草地 饲草产量及种间关系的影响

刘泽宇¹, 刘罡¹, 张玉霞¹, 王显国²,
王振国³, 崔凤娟³, 张庆昕¹, 刘庭玉¹

(1. 内蒙古民族大学草业学院/国家民委科尔沁沙地生态农业重点实验室, 内蒙古 通辽 028000;
2. 中国农业大学草业科学与技术学院, 北京 100193; 3. 通辽市农牧业科学研究所, 内蒙古 通辽 028000)

摘要:为研究适宜科尔沁沙地生境下的麦豆混播草地氮肥用量和混播比例, 设置 0 (N0)、70 (N70)、140 (N140)、210 (N210) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 共 4 个氮肥施用水平, 100 : 0 (W0)、80 : 20 (W20)、70 : 30 (W30)、60 : 40 (W40)、50 : 50 (W50)、0 : 100 (W100) 共 6 个燕麦与饲用豌豆混播比例处理, 进行田间双因素随机区组试验, 分析氮肥用量和混播比例及其交互作用对麦豆混播草地产量和种间关系的影响。结果表明: 随氮肥用量的增加, 燕麦、饲用豌豆和麦豆总产量均呈逐渐增加的趋势, N210 处理较其他施氮处理麦豆鲜草总产量提高 24.33%~48.24%, 干草总产量提高 56.91%~111.16%; 随饲用豌豆混播比例的增加, 燕麦鲜草产量呈降低趋势, 饲用豌豆的鲜草和干草产量呈增加趋势, 麦豆总产量则呈先增加后降低的趋势, W40 处理麦豆饲草产量最高, 鲜草和干草产量分别为 29.79 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 9.06 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$; N210W40 处理下, 麦豆混播草地产量最高, 鲜草和干草产量分别为 34.4 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 10.53 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较其他处理分别提高 1.42%~89.32% 和 0.38%~255.74%。不同混播比例下土地当量比 > 1, 其中 W40 处理土地当量比最高 (1.19); 麦豆混播草地中燕麦的相对产量高于饲用豌豆, 燕麦的侵略强度高于 0。综上, 建议在科尔沁沙地采用 60 : 40 麦豆混播比例配合 210 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 氮肥用量进行麦豆混播草地生产。

关键词: 麦豆混播草地; 氮肥; 混播比例; 产量; 种间关系

中图分类号: S54; S147.22; S344 文献标志码: A

Effects of nitrogen fertilizer application and mixing ratio on grass forage yield of oat-pea forage crops and interspecific relationship

LIU Zeyu¹, LIU Gang¹, ZHANG Yuxia¹, WANG Xianguo²,
WANG Zhengu³, CUI Fengjuan³, ZHANG Qingxin¹, LIU Tingyu¹

(1. College of Prataculture, Inner Mongolia Minzu University, Key Laboratory of Ecological Agriculture in Horqin Sandy Land, State Ethnic Affairs Commission, Tongliao, Inner Mongolia 028000, China;
2. College of Pratacultural Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;
3. Tongliao Institute of Agriculture and Animal Husbandry Science, Tongliao, Inner Mongolia 028000, China)

Abstract: To determine the optimal nitrogen fertilizer dosage and mixing ratio for oat-pea mixed grassland in the suitable habitat of Horqin sandy land, a field trial was conducted using a two-factor randomized block design. Four nitrogen fertilizer (pure N) application levels were tested: 0 (N0), 70 (N70), 140 (N140), and 210 (N210) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, along with six oat-to-forage pea mixing ratios: 100 : 0 (W0), 80 : 20 (W20), 70 : 30 (W30), 60 : 40 (W40), 50 : 50 (W50), and 0 : 100 (W100). The effects of nitrogen fertilizer rates, mixing ratios, and their interactions on yield and interspecific relationship in the oat-pea mixed grassland were analyzed. The results showed that: with the increase of nitrogen fertilizer, the total yield of oats, forage peas and wheat beans

收稿日期: 2024-05-07

修回日期: 2024-07-26

基金项目: 国家牧草产业技术体系 (CARS-34); 内蒙古自治区直属高校科研专项 (GXKY22018); 国家民委科尔沁沙地生态农业重点实验室开放基金项目 (MDK2023095); 中央支持地方高校改革发展——作物学 (草学) 提质学科建设项目 (240101)

作者简介: 刘泽宇 (1998-), 男, 内蒙古包头人, 硕士研究生, 研究方向为饲草种质资源与利用。E-mail: lzy13171242444@163.com

通信作者: 张玉霞 (1965-), 女, 内蒙古赤峰人, 教授, 主要从事饲草种质资源与利用研究。E-mail: yuxiazhang685@163.com

gradually increased. The hay and fresh grass yield of N210 treatment was significantly higher than that of N0 and other nitrogen fertilizer treatments ($P < 0.05$), and the total yield of wheat beans was increased by 24.33% ~ 48.24% for fresh grass, and 56.91% ~ 111.16% for hay yield, in the N210 treatment compared with the other treatments. With the increase of forage pea mixing ratio, the fresh grass yield of oats showed a decreasing trend, the fresh grass and hay yields of forage peas showed an increasing trend, and the total yield of oat-pea showed a trend of increasing and then decreasing, of which the W40 mixing ratio treatment had the highest yield of oat-pea forage crop, which was $29.79 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $9.06 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$. The interaction of nitrogen fertilizer and mix ratio showed that the fresh and hay yields of oat-pea mixed grassland were highest under the N210W40 treatment, with yields of $34.4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (fresh grass) and $10.53 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (hay grass), respectively. These values were 1.42% to 89.32% and 0.38% to 255.74% higher than those of other treatments. The land equivalent ratio under different mix ratios was > 1 , with the highest land equivalent ratio of 1.19 under the W40 treatment. Relative yields of oats $>$ relative yields of forage peas in the mixed-grassland, oats' aggression intensity > 0 . Therefore, it is recommended to use 60 : 40 oat-pea mix ratio and $210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ N fertilizer dosage for oat-pea mix grassland production in Horqin sandy land.

Keywords: oat-pea mixed grassland; nitrogen fertilizer; mix ratio; yield; interspecific relationships

燕麦 (*Avena sativa*) 是禾本科燕麦属的一年生草本植物, 因其产量高, 品质好, 适应性强, 在我国北方地区广泛栽培^[1]。近年来, 随着国家牧草产业相关政策的实施, 畜牧业快速发展, 燕麦栽培面积也大幅增加^[2-3]。然而燕麦长期连作会导致土壤肥力下降和饲草产量品质下降等问题^[4]。研究表明, 燕麦与豆科植物混播可有效解决连作问题, 同时提高牧草产量^[5-6]。饲用豌豆 (*Pisum sativum*) 营养丰富, 蛋白质含量高, 适应性强, 是优质的豆科牧草之一。麦豆混播草地的优质高产依赖合适的混播组合以及适宜的混播比例, 适宜的混播比例可降低混播组分间的资源竞争^[7], 促进禾草对养分的吸收, 使混播草地能保持较高的生产力^[8]。前人对混播草地的研究主要集中于适宜的混播组合和比例, 研究表明种植区域不同, 适宜的麦豆混播比例不同^[9]。吕亮雨等^[10]在三江源区的研究表明, 豆禾混播比例为7 : 3处理的饲草产量显著高于其他混播比例; 杨鹏年等^[11]在甘肃夏河县的研究表明, 燕麦与豆科牧草混播比例为8 : 2时, 混播草地产量较高; 刘彦培等^[12]在滇西北高海拔地区的研究发现, 小黑麦与饲用豌豆混播最佳比例是40 : 60。氮是草地生长过程中必不可少的元素^[13], 不同地区混播草地适宜施氮量有所不同。何亚灵等^[14]在四川湿热地区的研究表明, 施氮 $450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 可显著提高豆禾混播草地的产量; 土旦加等^[15]在青海省的研究发现, 混播草地草产量随供氮水平的提高而提高, 施氮 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理促生效果最佳。可见, 因地制宜并合理施用氮肥是混播草地饲草产量提升的重要措施。

科尔沁沙地地处西辽河平原, 是我国典型的半

干旱灌溉农业区^[16]。近年来, 以喷灌为主的沙地燕麦草产业发展迅猛, 作为苜蓿倒茬轮作的首选牧草, 燕麦种植规模接近 $10\,000 \text{ hm}^2$ ^[17]。作为优质的饲料作物, 燕麦与饲用豌豆具有适口性好、营养价值高等特点, 将燕麦与饲用豌豆进行同行混播, 其种间促进作用相比于单播更具增产优势并且可有效利用养分及光热资源, 提高资源的利用效率^[18]。当前对麦豆混播的研究大多数集中在西北和南方地区^[12-14], 关于科尔沁地区的报道不多, 且不同氮肥施用水平对该地区豆禾混播草地影响的研究亦不多见。基于此, 本研究选取4个施氮水平和6个燕麦和饲用豌豆混播比例, 通过分析混播草地的饲草产量及种间关系, 筛选适宜科尔沁地区麦豆混播草地的氮肥用量及混播比例, 以为该地区麦豆混播草地建植提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于内蒙古自治区通辽市内蒙古民族大学农牧业科技示范园区 ($43^{\circ}69'N$, $122^{\circ}06'E$, 海拔 183 m), 属典型温带大陆性季风气候, 冬冷夏温, 春季多风, 降水集中于夏季。年均气温 6.8°C , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温约 $3\,200^{\circ}\text{C}$, 无霜期 145 d 左右, 年均日照时间 $3\,000 \text{ h}$ 左右, 年均降水量 $350 \sim 450 \text{ mm}$ (中国气象网 <http://www.weather.com.cn/>)。该地区地势平坦, 土壤质地为砂性土, $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层土壤理化性质为有机质含量 $4.87 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾含量 $94.51 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷含量 $10.48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮含量 $11.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 值为 8.2。

1.2 供试材料

供试燕麦品种为‘青海444’,供试饲用豌豆品种为‘青豌1号’,均由青海省农科院提供。

1.3 试验设计

试验于2023年4—12月在内蒙古民族大学农业科技示范园区内开展,采取双因素随机区组设计。A因素为氮肥用量,设置0、70、140、210 kg·hm⁻²共4个氮肥梯度,分别用N0、N70、N140、N210表示;B因素为混播比例,设置6个燕麦和饲用豌豆混合播种比例(表1),其中两者等比例混播时播种量按各自单播量的80%计^[19]。共24个组合处理,每个组合处理3次重复,共计72个小区,小区面积12 m²(4 m×3 m),各小区间预留0.5 m步道。

燕麦和饲用豌豆于2023年4月15日播种,播种方式为条播,行距20 cm,于燕麦蜡熟期(2023年6月20日)进行收获。磷肥(重过磷酸钙,含P₂O₅≥46%)和钾肥(氯化钾,含K₂O≥50%)作为底肥一次性施入,施肥量分别为150 kg·hm⁻²和100 kg·hm⁻²;氮肥(尿素,含N≥46%)30%作底肥,70%作追肥,追肥分别于燕麦拔节期和灌浆期等量撒施。整个生育期采用微喷进行灌溉,其他田间管理措施与当地燕麦高产田一致。

1.4 测定指标及方法

于燕麦蜡熟期,每个小区随机选取2个2 m×2 m的样方进行刈割测产,留茬高度3 cm,将燕麦与豌豆分离后分别称重,记录燕麦、豌豆鲜草产量和总鲜草产量。各处理分别随机取鲜样500 g带回实验室,采用65℃烘干法烘至恒重,称量干草产量,计算干鲜比(干草产量/鲜草产量)。

1.5 数据统计与分析

土地当量比(land equivalent ratio, LER)用于评定混播优势,表示麦豆混播系统内物种对资源利用的竞争性大小,其计算公式如下:

$$LER = LER_o + LER_p = (Y_{op}/Y_{oo}) + (Y_{po}/Y_{pp}) \quad (1)$$

式中,LER为混播群体的土地当量比;LER_o和LER_p分别表示燕麦和饲用豌豆的偏土地当量比;Y_{oo}表示单播燕麦(W0处理)的产量;Y_{pp}表示单播饲用豌豆(W100处理)的产量;Y_{op}表示麦豆混播时燕麦的产量;Y_{po}表示麦豆混播时饲用豌豆的产量^[20]。

饲草的相对产量(relative yield, RY)及相对产量总和(total relative yield, RYT)计算公式如下:

$$RY_o = Y_{op}/Y_{oo} \quad (2)$$

$$RY_p = Y_{po}/Y_{pp} \quad (3)$$

$$RYT = LER \quad (4)$$

式中,RY_o和RY_p分别表示燕麦和饲用豌豆的相对产量(图1);RYT表示混播系统麦豆相对产量总和;RYT>1说明混播系统种间干扰低于种内干扰,RYT=1说明混播草地燕麦和饲用豌豆可共享资源,RYT<1说明混播草地燕麦和饲用豌豆间存在拮抗作用^[21]。

侵略强度(aggresivity, A)可用于确定两物种间的竞争关系,其计算公式如下:

$$A_o = Y_{op}/(A_{op}Y_{oo}) - Y_{po}/(A_{po}Y_{pp}) \quad (5)$$

$$A_p = Y_{po}/(A_{po}Y_{pp}) - Y_{op}/(A_{op}Y_{oo}) \quad (6)$$

式中,A_o和A_p分别代表燕麦和饲用豌豆的侵略强度;A_{op}为燕麦所占混播比例,A_{po}为饲用豌豆所占混播比例^[20]。若A_o>0,表示燕麦为优势作物;若A_o=0,表示燕麦与饲用豌豆具有相同的竞争力;若A_o<0,表示饲用豌豆为优势作物^[22]。

竞争比率(competition ratio, CR)是反映混播系统中植物竞争强弱的指标,其计算公式如下:

$$CR_o = (LER_o/LER_p) \times (A_{op}/A_{po}) \quad (7)$$

$$CR_p = (LER_p/LER_o) \times (A_{po}/A_{op}) \quad (8)$$

式中,CR_o和CR_p分别代表燕麦和饲用豌豆的竞争比

表1 混播组合及饲草播种量

Table 1 Mixed sowing combination and forage sowing amount

处理 Treatment	燕麦:饲用豌豆 Oat: forage pea	播种量/(kg·hm ⁻²) Sowing amount	
		燕麦 Oat	饲用豌豆 Forage pea
W0	100:0	180.0	0.0
W20	80:20	230.4	72.0
W30	70:30	201.6	108.0
W40	60:40	172.8	144.0
W50	50:50	144.0	180.0
W100	0:100	0.0	225.0

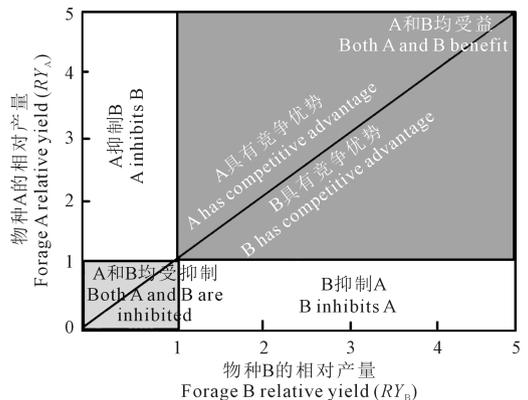


图1 两物种的竞争模式

Fig.1 Competition patterns between two species

率; $CR_0 > 1$ 表明燕麦竞争能力更强, 反之则为饲用豌豆竞争能力更强^[23]。

系统生产力指数 (system productivity index, SPI) 可用于评价麦豆混播系统的生产力和稳定性^[24], 其计算公式如下:

$$SPI = [(Y_{oo}/Y_{pp}) \times Y_{po} + Y_{op}] \quad (9)$$

采用 Microsoft Excel 2021 进行数据整理, 使用 SPSS Statistics 27.0 进行数据分析, 即一般线性模型对数据进行方差分析 (two-way ANOVA)。采用最小差异显著法 (LSD) 对产量、种间竞争关系进行差

异显著性检验 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 氮肥和混播比例对混播草地饲草产量的影响

2.1.1 氮肥和混播比例对饲草产量影响的差异显著性分析 对混播草地饲草产量和干鲜比进行 F 检验, 如表 2 所示, 氮肥、混播比例及其交互作用对燕麦、饲用豌豆、燕麦+饲用豌豆的鲜干草产量及干鲜比均存在极显著影响 ($P < 0.01$), 有必要对存在差异的指标进行多重比较分析。

表 2 氮肥、混播比例及其互作处理下饲草产量指标的显著性检验 (F 值)

Table 2 Significance test of forage yield indicators under nitrogen fertilizer, mixed sowing ratio and their interaction treatments (F value)

饲草种类 Forage type	指标 Indicator	氮肥 Nitrogen	混播比例 Mixed sowing ratio	氮肥×混播比例 Nitrogen×Mixed sowing ratio
燕麦 Oat	鲜草产量 Fresh grass yield	22.58 **	128.58 **	36.25 **
	干草产量 Hay yield	1639.12 **	1976.39 **	81.98 **
	干鲜比 Dry-fresh ratio	919.00 **	2671.19 **	64.06 **
饲用豌豆 Forage pea	鲜草产量 Fresh grass yield	72.87 **	4553.40 **	17.22 **
	干草产量 Hay yield	32.18 **	2057.29 **	13.09 **
	干鲜比 Dry-fresh ratio	171.74 **	2951.54 **	36.07 **
燕麦+饲用豌豆 Oat+Forage pea	鲜草产量 Fresh grass yield	828.24 **	367.90 **	12.68 **
	干草产量 Hay yield	1357.98 **	430.73 **	62.87 **
	干鲜比 Dry-fresh ratio	447.03 **	110.54 **	68.59 **

注: * 表示差异显著 ($P < 0.05$), ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$)。下同。

Note: * indicates significant differences at $P < 0.05$ level, ** indicates significant differences at $P < 0.01$ level. The same below.

2.1.2 氮肥对混播草地饲草产量及干鲜比的影响

如表 3 所示, 随着氮肥用量的增加, 燕麦、饲用豌豆、饲草总产量均呈逐渐增加的变化趋势。与 N0 处理相比, 施用氮肥处理的燕麦鲜草产量提高 31.44%~50.06%, 干草产量提高 91.52%~166.33%; 施用氮肥处理的饲用豌豆鲜草产量提高 4.74%~43.23%, N210 处理干草产量显著提高 20.46% ($P < 0.05$); 燕麦+饲用豌豆的鲜草产量提高 24.33%~48.24%, 干草产量提高 56.91%~111.16%。不同氮肥处理间燕麦、燕麦+饲用豌豆的鲜草产量和干草产量均差异显著 ($P < 0.05$), N210 处理下饲用豌豆的鲜草和干草产量显著高于其他氮肥处理 ($P < 0.05$)。燕麦和燕麦+饲用豌豆的干鲜比均随氮肥用量的增加呈上升趋势, 饲用豌豆的干鲜比则呈降低趋势; 与 N0 处理相比, 燕麦干鲜比提高 21.26%~48.34%, 燕麦+饲用豌豆的干鲜比提高 18.90%~33.12%。N210 处理下, 燕麦和燕麦+饲用豌豆的干鲜比显著高于其他氮肥处理 ($P < 0.05$)。燕麦、饲用豌豆产量和总产量均在 N210 达到最大值, 说明 210 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施氮量有利于燕麦和饲用豌豆生长。

表 3 不同施氮处理下饲草产量及干鲜比

Table 3 Forage yield and dry-fresh ratio under different nitrogen treatments

饲草种类 Forage type	氮肥处理 Nitrogen treatment	鲜草产量 Fresh grass yield /($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	干草产量 Hay yield /($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	干鲜比 Dry-fresh ratio/%
燕麦 Oat	N0	15.68±0.03d	2.97±0.33d	17.73±0.39d
	N70	20.61±0.18c	5.69±0.64c	21.50±0.28c
	N140	22.56±0.24b	7.30±0.62b	25.31±0.44b
	N210	23.53±0.21a	7.91±0.82a	26.30±0.19a
饲用豌豆 Forage pea	N0	5.69±0.02c	1.71±0.04b	32.69±0.42a
	N70	5.96±0.03c	1.71±0.04b	30.98±0.41b
	N140	6.99±0.25b	1.79±0.07b	29.38±0.25c
燕麦+饲用豌豆 Oat+Forage pea	N210	8.15±0.02a	2.06±0.03a	25.73±0.24d
	N0	21.37±0.04d	4.48±0.09d	22.28±0.42d
	N70	26.57±0.20c	7.03±0.15c	26.61±0.35c
	N140	29.55±0.34b	8.63±0.03b	28.66±0.40b
	N210	31.68±0.22a	9.46±0.14a	29.66±0.40a

注: 同列不同小写字母表示相同饲草种类下处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between different nitrogen treatments of the same forage type ($P < 0.05$). The same below.

2.1.3 混播比例对混播草地饲草产量及干鲜比的影响 如表 4 所示,随饲用豌豆混播比例的增加,燕麦鲜草产量呈降低趋势,饲用豌豆鲜草产量呈增加趋势,总鲜草(燕麦+饲用豌豆)产量则呈先增加后降低的变化趋势。与 W0 相比,其他处理下燕麦鲜草产量降低 2.51%~16.91%;总鲜草产量则为 W40 处理最高,较 W0、W20 和 W100 处理分别显著提高 11.66%、3.19% 和 47.72% ($P<0.05$)。与单播燕麦(W0 处理)和单播饲用豌豆(W100 处理)相比,混播可显著提高总鲜草产量且以 W40 处理产量最高,可见燕麦:饲用豌豆为 60:40 的混播比例最有利于提高饲草总鲜草产量。

燕麦干草产量和总干草产量均随饲用豌豆混播比例的增加呈先增加后降低的变化趋势,且均在 W40 处理下最高,燕麦干草产量和总干草产量分别较其他混播比例处理提高 2.57%~25.52% 和 9.42%~91.54%;饲用豌豆的干草产量随饲用豌豆混播比例的增加呈逐渐增加的趋势,且不同混播比例处理间差异显著 ($P<0.05$)。

随饲用豌豆混播比例的增加,燕麦、饲用豌豆和燕麦+饲用豌豆的干鲜比呈先上升后下降的趋势,且均在 W40 处理下最高,分别为 29.33%、33.06% 和

30.03%,且显著高于其他混播比例 ($P<0.05$),说明 60:40 是科尔沁沙地适宜的燕麦与饲用豌豆混播比例。

2.1.4 不同组合处理对混播草地饲草产量和干鲜比的影响 如表 5 所示,N210W0 处理的燕麦鲜草产量最高,达到 $31.20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,显著高于除 N210W20

表 4 不同混播比例处理下饲草产量及干鲜比

Table 4 Forage yield and dry-fresh ratio under different mixed sowing ratio treatments

饲草种类 Forage type	处理 Treatment	鲜草产量 Fresh grass yield /($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	干草产量 Hay yield /($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	干鲜比 Dry-fresh ratio/%
燕麦 Oat	W0	26.67±0.08a	6.74±0.15b	24.39±0.52d
	W20	26.00±0.31b	7.00±0.12ab	26.06±0.27c
	W30	24.71±0.31c	6.89±0.13b	27.11±0.46b
	W40	24.03±0.14d	7.18±0.11a	29.33±0.30a
	W50	22.16±0.25e	5.72±0.09c	24.94±0.35d
饲用豌豆 Forage pea	W20	2.86±0.02e	0.82±0.01e	29.83±0.27c
	W30	4.42±0.01d	1.39±0.02d	31.78±0.45b
	W40	5.76±0.03c	1.88±0.01c	33.06±0.16a
	W50	6.98±0.05b	2.08±0.01b	30.22±0.20c
	W100	20.17±0.36a	4.73±0.16a	23.58±0.68d
燕麦+饲用豌豆 Oat+Forage pea	W0	26.67±0.08c	6.74±0.15d	24.39±0.52d
	W20	28.86±0.33b	7.82±0.12c	26.37±0.23c
	W30	29.13±0.32ab	8.28±0.14b	27.80±0.45b
	W40	29.79±0.16a	9.06±0.12a	30.03±0.26a
	W50	29.13±0.28ab	7.80±0.10c	26.22±0.30c
W100	20.17±0.36d	4.73±0.16e	23.58±0.68d	

表 5 不同组合处理的饲草产量和干鲜比

Table 5 Forage yield and dry-fresh ratio under different combination treatments

处理 Treatment	燕麦 Oat			饲用豌豆 Forage pea			燕麦+饲用豌豆 Oat+Forage pea		
	鲜草产量 Fresh grass yield /($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	干草产量 Hay yield /($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	干鲜比 Dry-fresh ratio/%	鲜草产量 Fresh grass yield /($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	干草产量 Hay yield /($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	干鲜比 Dry-fresh ratio/%	鲜草产量 Fresh grass yield /($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	干草产量 Hay yield /($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	干鲜比 Dry-fresh ratio/%
N0W0	20.16±0.21k	2.96±0.13kl	14.67±0.72j				20.16±0.21jk	2.96±0.13l	14.67±0.72m
N0W20	19.86±0.34k	3.31±0.16jkl	16.67±0.54ij	2.16±0.03k	0.74±0.01l	34.00±0.98ab	22.02±0.34hij	4.05±0.17k	18.37±0.53l
N0W30	19.13±0.24k	3.63±0.05jk	19.00±0.47gh	3.61±0.03ij	1.21±0.03jk	33.67±0.72ab	22.74±0.27hi	4.85±0.06hij	21.33±0.46jk
N0W40	18.92±0.31k	3.99±0.16ij	21.11±0.83g	4.59±0.04ghi	1.6±0.05ghij	34.89±0.68a	23.51±0.33h	5.6±0.21h	23.8±0.83ghi
N0W50	16.01±0.50l	2.76±0.15l	17.22±0.42hi	5.61±0.05fg	1.95±0.04efgh	34.78±0.57a	21.62±0.55hij	4.71±0.18ijk	21.78±0.27ijk
N0W100				18.17±0.05c	4.74±0.13b	26.11±0.79de	18.17±0.05k	4.74±0.13ijk	26.11±0.79fg
N70W0	26.29±0.45fg	6.66±0.26gh	25.33±1.19f				26.29±0.45g	6.66±0.26g	25.33±1.19fgh
N70W20	25.68±0.34fgh	6.79±0.14g	26.44±0.31ef	2.39±0.03k	0.78±0.02l	32.67±0.54abc	28.07±0.37fg	7.57±0.14ef	26.98±0.24ef
N70W30	24.82±0.53ghi	6.01±0.17h	24.22±0.16f	3.94±0.01hij	1.26±0.02jk	31.89±0.57bc	28.76±0.53f	7.27±0.17fg	25.27±0.18fgh
N70W40	23.78±0.55ij	7.85±0.30ef	32.85±0.54a	4.93±0.04gh	1.67±0.04fghi	34.00±0.98ab	28.71±0.58f	9.53±0.30bc	33.17±0.35a
N70W50	23.10±0.30j	4.62±0.13i	20.00±0.72g	6.32±0.14ef	1.97±0.06efg	31.11±0.79c	29.42±0.44ef	6.58±0.15g	22.39±0.67ij
N70W100				18.18±0.08c	4.58±0.14b	25.22±0.87ef	18.18±0.08k	4.58±0.14jk	25.22±0.87fgh
N140W0	29.04±0.47bc	8.32±0.05de	28.67±0.54de				29.04±0.47f	8.32±0.05de	28.67±0.54de
N140W20	28.37±0.19cd	8.26±0.22de	29.11±0.68cd	3.08±0.05jk	0.99±0.04kl	32.11±0.68bc	31.44±0.22cde	9.25±0.21c	29.41±0.58cd
N140W30	26.96±0.56def	8.71±0.14bcd	32.33±0.47a	4.56±0.05ghi	1.51±0.03ij	33.22±0.42abc	31.52±0.6cd	10.23±0.17ab	32.46±0.46ab
N140W40	26.43±0.18efg	8.46±0.19cde	32.00±0.54ab	6.10±0.02f	2.14±0.04de	35.00±0.54a	32.53±0.19abcd	10.49±0.16a	32.56±0.34ab
N140W50	24.54±0.71hij	7.31±0.25fg	29.78±0.68bcd	7.49±0.13d	2.01±0.10ef	26.78±0.87de	32.03±0.80bcd	9.31±0.26c	29.08±0.37de
N140W100				20.73±1.41b	4.10±0.37c	19.78±0.68g	20.73±1.41ij	4.10±0.37jk	19.78±0.68kl
N210W0	31.20±0.92a	9.01±0.27abc	28.89±0.57d				31.20±0.92de	9.01±0.27cd	28.89±0.57de
N210W20	30.10±0.74ab	9.63±0.23a	32.00±0.27ab	3.82±0.08hij	0.78±0.04l	20.56±0.87g	33.92±0.82ab	10.42±0.27a	30.71±0.33bcd
N210W30	27.93±0.25cde	9.18±0.26ab	32.89±1.03a	5.57±0.04fg	1.58±0.01hij	28.33±0.47d	33.49±0.29abc	10.46±0.27a	32.13±0.91ab
N210W40	26.99±0.13def	8.43±0.22cde	31.22±0.96abc	7.41±0.06de	2.1±0.02de	28.33±0.27d	34.40±0.17a	10.53±0.23a	30.60±0.81bcd
N210W50	24.98±0.39ghi	8.19±0.15de	32.78±0.42a	8.50±0.05d	2.4±0.07d	28.22±0.68d	33.47±0.43abc	10.38±0.13a	31.62±0.14abc
N210W100				23.60±0.13a	5.48±0.20a	23.22±0.83f	23.6±0.13h	5.48±0.21h	23.22±0.83hij

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments ($P<0.05$).

外的其他处理 ($P < 0.05$), 增幅为 3.65% ~ 94.88%; N210W20 处理的燕麦干草产量最高, 达到 $9.63 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 显著高于除 N210W0 和 N210W30 外的其他处理 ($P < 0.05$), 增幅为 4.90% ~ 248.91%; 燕麦干鲜比在 N210W30 处理下最高 (32.89%), 较其他处理增加 0.12% ~ 124.20%。饲用豌豆的鲜草和干草产量均为 N210W100 处理最高, 分别是 $23.60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $5.48 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ($P < 0.05$)。N210 处理下饲用豌豆鲜草产量和干草产量较高; 燕麦和饲用豌豆混播草地在 N210W40 总鲜草产量和总干草产量最高分别为 $34.40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $10.53 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 且在 N210 处理下各混播处理间差异不显著。

2.2 混播比例对牧草生产力及竞争指标的影响

混播比例对牧草偏土地当量比的影响如表 6 和图 2 所示, 不同混播比例对 LER_o 和 LER_p 有极显著影响 ($P < 0.01$), 对土地当量比则有显著影响 ($P < 0.05$, 表 6)。如图 2 所示, LER_o 表现为 $W40 > W50 > W30 > W20$, 各处理值分别为 1.18、1.17、1.14、1.11; LER_p 表现为 $W50 > W40 > W30 > W20$, 各处理值分别为 0.34、0.28、0.22、0.14。LER 值均在 $LER_o = LER_p$ 的左侧, 即 $LER_o > LER_p$, 表明燕麦在混播制度中存在优势。LER 值随饲用豌豆混播比例的减少而降低。LER 值均大于 1, 说明混播牧草间的互补作用大于竞争作用, 且 W40 处理的 LER 值最高, 说明单播需要增加 18% 的土地面积才能达到混播草地的草产量。

表 6 饲草土地生产力及竞争指标的显著性检验 (F 值)

Table 6 Significance test of productivity and competition indicates of forage land (F value)

项目 Item	F 值 F value
饲用豌豆的偏土地当量比 Partial land equivalent ratio for forage pea (LER_p)	40.97 **
燕麦的偏土地当量比 Partial land equivalent ratio for oat (LER_o)	75.55 **
土地当量比 Land equivalent ratio (LER)	15.79 *
饲用豌豆相对产量 Relative yield for forage pea (RY_p)	39.10 *
燕麦相对产量 Relative yield for oat (RY_o)	247.53 **
相对产量总和 Total relative yield (RYT)	15.82 *
饲用豌豆侵略强度 Aggressivity for forage pea (A_p)	287.53 **
燕麦侵略强度 Aggressivity for oat (A_o)	287.53 **
饲用豌豆的竞争比率 Competitive ratio for forage pea (CR_p)	417.84 **
燕麦的竞争比率 Competitive ratio for oat (CR_o)	883.56 **

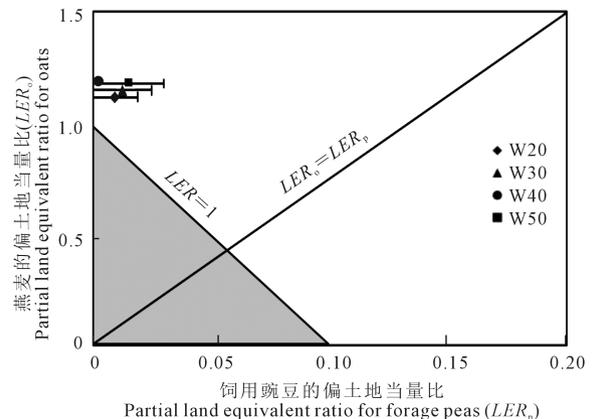
2.3 混播比例对牧草竞争指标的影响

如表 6 所示, 不同混播比例对燕麦的相对产量 RY_o 有极显著影响 ($P < 0.01$), 对饲用豌豆的相对产量 RY_p 有显著影响 ($P < 0.05$)。由 RY 值分布区域可知, 燕麦抑制了饲用豌豆的生长, 且燕麦占据竞争优势地位 (图 3A)。如图 3B ~ D 所示, 混播草地的侵略强度 (A) 表现为燕麦的侵略强度 $> 0 >$ 饲用豌豆的侵略强度 ($A_o > 0 > A_p$), 在 W50 时的侵略强度最大 (1.47) 显著高于其他处理 ($P < 0.05$); 竞争比率表现为燕麦的竞争比率 $> 1 >$ 饲用豌豆的竞争比率 ($CR_o > 1 > CR_p$), 表明燕麦的侵占力大于饲用豌豆, 燕麦占优势地位; 燕麦在 W50 时的竞争比率最高显著高于其他处理 ($P < 0.05$), 饲用豌豆则呈相反的变化趋势, 在 W50 处理下竞争比率最低; W50 和 W40 处理的系统生产力指数 (SPI) 显著高于 W30 和 W20 处理 ($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 氮肥对麦豆混播草地饲草产量的影响

在麦豆混播草地生长过程中, 氮肥发挥着重要作用^[25]。研究表明, 氮肥可以促进麦豆混播草地中燕麦的生长^[26-28]。本研究发现, 随氮肥用量的增加, 麦豆混播草地饲草产量呈上升趋势, N210 处理饲草产量最高且显著高于其他氮肥处理, 说明麦豆混播草地中施氮可以显著提高产量。这与何亚灵等^[14]在四川的研究结果相似。杜桂莹^[29]在吉林松原的混播试验也证明, 混播草地产量随施氮量的增加呈上升趋势, 180 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 氮肥用量下产量最高。

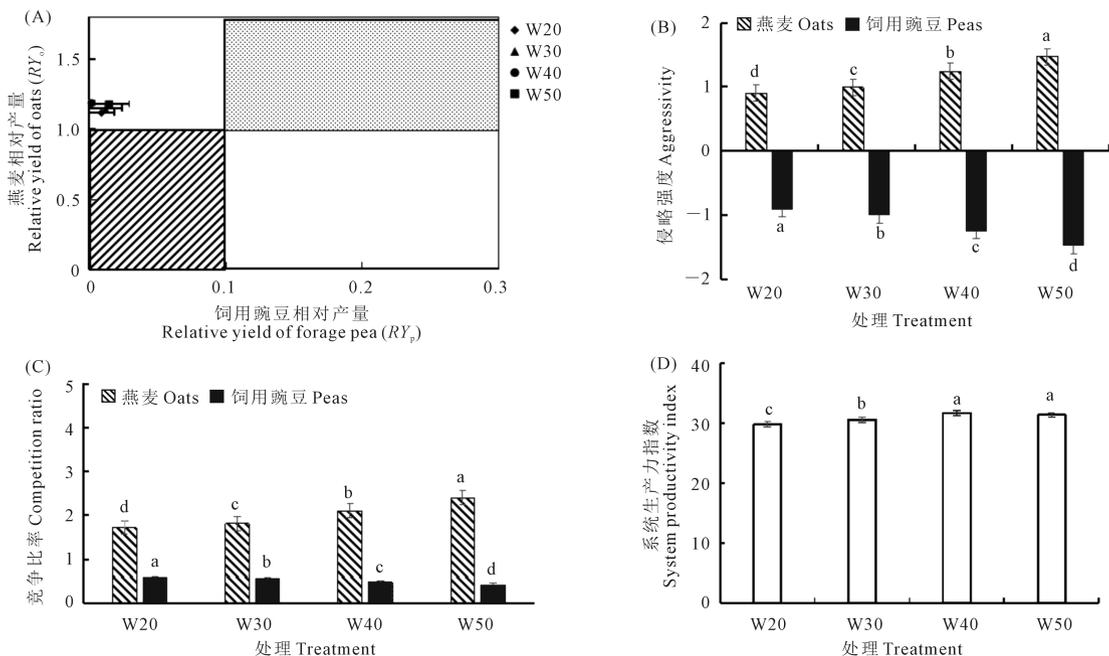


注: 图中左下角阴影部分面积是互补作用小于竞争作用的区域; 右上角空白是互补作用大于竞争作用的区域。

Note: The area of the shadow in the lower left corner of the figure is the area where the complementary effect is less than the competitive effect; the blank in the upper right corner is more complementary than competitive.

图 2 不同混播比例的偏土地当量比

Fig.2 Partial land equivalent ratio of different mixed sowing ratio



注:图B、C、D中不同小写字母代表同一饲草种类下不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters in figures B, C, D indicate significant differences among treatments of the same forage species ($P < 0.05$).

图3 饲草竞争力指数

Fig.3 Forage competitiveness index

张永亮等^[30]在科尔沁沙地研究表明,混播草地产量随着氮肥用量增加呈先增加后降低趋势,与本研究不一致,可能是由于混播草地选择的品种不同所致。本研究氮肥用量并未达到产量正向增长的阈值,具体氮肥阈值仍需要进一步试验验证。

3.2 混播比例对麦豆混播草地饲草产量的影响

豆科植物的比例是影响混播草地群落结构和功能的关键因素,决定着草地的生产力和稳定性^[31-32]。窦梓懿等^[33]在新疆昭苏的研究表明,箭筈豌豆和燕麦混播比例为3:1时,混播草地产量及综合生产能力较高。方伟^[34]在高寒地区的研究表明,以7:3麦豆混播比例建植的人工草地饲草产量最佳。本研究结果表明,科尔沁地区麦豆混播比例6:4(W40处理)时,饲草产量和干鲜比显著高于其他混播比例处理,与单播豌豆和单播燕麦相比,W40处理产量分别提高47.65%和11.66%。不同区域适宜的混播比例不同可能是供试品种不同以及各地域的作物种间相容性存在差异。冯廷旭等^[9]在高寒地区的研究表明,随饲用豌豆的混播比例增加,饲草产量呈先降低后增加的趋势。这与本研究结果有所不同,可能是海拔高度会对饲草产生较大影响,禾豆混播组合在低海拔地区产量高于高海拔地区^[31]。

3.3 混播比例对麦豆混播草地种间竞争的影响

土地当量比(LE_R)是衡量土地生产力的指标,可用于评价复合种植方式下的土地利用效率^[20]。

李兴龙等^[35]在黄土高原对不同混播饲草组合的种间关系研究发现,玉米与拉巴豆混播时土地当量比为1.31,资源利用率最高。郭常英等^[36]研究表明,燕麦与饲用豌豆混播处理的LE_R值为1.26~1.74,表现出明显的混播优势。本研究中,麦豆混播处理的LE_R>1,说明具有混播优势,其中W40处理的LE_R值最高(1.19),土地生产力提高19%;且LE_{R_o}>LE_{R_p},说明燕麦在混播系统中表现出产量优势。这与李兴龙等^[35]和郭常英等^[36]的研究结果一致,即燕麦在麦豆混播后表现出产量优势,LE_R值存在差异可能是供试品种不同所致。

在混播草地中,当种内竞争强于种间竞争,竞争同一资源的物种能够共存,并最终体现生长和物质积累的优势^[37]。不同混播比例导致混播作物间竞争作用存在差异,因此作物种间关系也不同^[38]。本研究中,混播草地相对产量总和(RYT)均大于1.0,即麦豆混播草地的种内竞争大于种间竞争,表明燕麦与饲用豌豆混播后种间相容性较好,因而有形成较高生产力的潜力(图2A)。燕麦通常被认为是麦豆混播草地系统中的优势作物^[39]。本研究中,混播草地的侵略强度A_o>0、竞争比率CR_o>1.0,说明燕麦在混播系统中占竞争优势地位。究其原因可能是饲用豌豆的植物学特性与燕麦有所不同,在其生长发育过程中对土壤水分和养分的吸收竞争及光截获争夺均处于不利地位^[40]。综上可知,本研

究中燕麦对环境资源的获取能力强于饲用豌豆,饲用豌豆的生产力较单播受到更强的限制,导致其产量减少(表 5)。

4 结 论

随氮肥施用量增加,燕麦、饲用豌豆和麦豆总产量均呈逐渐增加的变化趋势,210 kg · hm⁻²氮肥处理的干草、鲜草产量显著高于其他氮肥处理,其麦豆鲜草总产量提高 24.33%~48.24%;随饲用豌豆混播比例增加,麦豆总产量呈先增加后降低的趋势,燕麦和饲用豌豆 60:40 混播比例处理麦豆总产量最高。210 kg · hm⁻²氮肥+燕麦和饲用豌豆 60:40混播处理下,麦豆混播草地鲜草(34.4 t · hm⁻²)和干草(10.53 t · hm⁻²)产量最高,分别较其他处理提高 1.42%~89.32%和 0.38%~255.74%;该处理下,土地当量比 *LER* 值(1.19)最高,混播草地的相对产量总和 *RYT*>1.0。混播草地的侵略强度(*A*)和系统生产力指数(*SPI*)分别表现为 $A_a > 0 > A_v$ 、 $CR_a > 1 > CR_v$,说明燕麦的侵占力大于饲用豌豆,燕麦占优势地位。

综合考虑牧草产量和群落稳定性,采用 60:40 的燕麦和饲用豌豆混播比例,配合施用氮肥 210 kg · hm⁻²,可作为提高科尔沁沙地麦豆混播草地饲草生产力的推荐措施。

参 考 文 献:

- [1] 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[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2022, 52(4): 34-40.
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 [J]. Chinese Qihai Journal of Animal and Veterinary Sciences, 2022, 52(4): 34-40.
- [2] 王旭. 饲草产业发展迎来战略机遇期[J]. 中国畜牧业, 2022, (8): 16-23.
WANG X. Development of forage industry is about to enter a period of strategic opportunity[J]. China Animal Industry, 2022, (8): 16-23.
- [3] 杨富裕. 树立“饲草就是粮食”理念,大力发展饲草产业[J]. 草地学报, 2023, 31(2): 311-313.
YANG F Y. New concept "forage is a part of grains" to utmost spurring the development of forage industry [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(2): 311-313.
- [4] FLORENCE A M, MCGUIRE A M. Do diverse cover crop mixtures perform better than monocultures? A systematic review [J]. Agronomy Journal, 2020, 112(5): 3513-3534.
- [5] 张永亮, 张丽娟, 于铁峰, 等. 禾豆组合与间作方式对牧草产量及产量稳定性的影响[J]. 草地学报, 2019, 27(5): 1410-1418.
ZHANG Y L, ZHANG L J, YU T F, et al. Effects of Grass-Legume combinations and intercropping patterns on the forage yield and yield stability [J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(5): 1410-1418.
- [6] 郑伟, 加娜尔古丽, 唐高溶, 等. 不同混播方式下豆禾混播草地群落稳定性的测度与比较[J]. 草业学报, 2015, (3): 155-167.
ZHENG W, JIA N E G L, TANG G R, et al. Determination and compar-

- ison of community stability in different legume-grass mixes[J]. Acta praeagriculturae Sinica, 2015, (3): 155-167.
- [7] 刘文辉, 张永超, 梁国玲, 等. 高寒区不同农艺措施对燕麦人工草地各生育期土壤碳氮储量与碳氮比的影响[J]. 草地学报, 2019, 27(3): 675-686.
LIU W H, ZHANG Y C, LIANG G L, et al. Effects of different agronomy treatments on the oat cultivation grassland soil carbon and nitrogen stock and the carbon/nitrogen ratio [J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(3): 675-686.
- [8] 蒋汶桃, 苑广源, 沈禹颖, 等. 温度和混播比例对红豆草-垂穗披碱草群体生长及种间竞争的影响[J]. 中国草地学报, 2021, 43(4): 22-29.
JIANG W T, YUAN G Y, SHEN Y Y, et al. Effects of temperatures and mixed sowing ratios on growth and interspecific competition of onobrychis viciaefolia and elymus nutans community [J]. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(4): 22-29.
- [9] 冯廷旭, 德科加, 向雪梅, 等. 高寒地区燕麦与豌豆不同混播组合和比例对饲草产量及品质的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(2): 487-494.
FENG T X, DE K J, XIANG X M, et al. Effects of different mixtures and proportions of avena sativa and pea on forage yield and quality in alpine cold region [J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(2): 487-494.
- [10] 吕亮雨, 施建军, 刘青青, 等. 三江源区青甜 1 号与豆科饲草混播对饲草产量和品质的影响[J]. 饲料研究, 2024, (16): 1-13.
LV L Y, SHI J J, LIU Q Q, et al. Effects of mixed sowing of Qingtian No.1 and leguminous forage in Sanjiangyuan region on forage yield and quality [J]. Feed Research, 2024, (16): 1-13.
- [11] 杨鹏年, 杜文华, 田新会. 甘南高寒牧区加拿大饲用燕麦与豌豆的混播效果研究[J]. 中国草地学报, 2022, 44(3): 39-48.
YANG P N, DU W H, TIAN X H. Study on the mixed effect of Canadian forage oats and peas in Gannan alpine pasture area [J]. Chinese Journal of Grassland, 2022, 44(3): 39-48.
- [12] 刘彦培, 薛世明, 钟绍丽, 等. 滇西北高海拔地区小黑麦与饲用豌豆混播草地综合评价[J]. 草地学报, 2022, 30(9): 2497-2504.
LIU Y P, XUE S M, ZHONG S L, et al. Comprehensive evaluation of mixed grassland of triticale and feeding pea in high-elevation of northwestern Yunnan [J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(9): 2497-2504.
- [13] 张永亮, 滕泽, 郝凤, 等. 苜蓿混播方式及比例对混播草地生产力和稳定性的影响[J]. 草业学报, 2024, 33(2): 185-197.
ZHANG Y L, TENG Z, HAO F, et al. Effects of different mixed sowing patterns and sowing ratios of alfalfa on grassland productivity and community stability in grass-legume mixtures [J]. Acta praeagriculturae Sinica, 2024, 33(2): 185-197.
- [14] 何亚灵, 韦潇, 曾泰儒, 等. 氮肥水平对豆禾混播草地产量和营养品质的影响[J]. 四川农业大学学报, 2022, 40(5): 721-727, 745.
HE Y L, WEI X, ZENG T R, et al. Effects of nitrogen fertilizer levels on yield and quality of Legume-Grass mixtures [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2022, 40(5): 721-727, 745.
- [15] 土旦加, 周学丽. 不同供氮水平对豆禾混播草地草产量及品质的影响[J]. 青海草业, 2022, 31(2): 7-12.
TU D J, ZHOU X L. Effects of different n levels on productivity and quality of legume-grass mixtures [J]. Qinghai Prataculture, 2022, 31(2): 7-12.
- [16] 杨金虎. 燕麦箭筈豌豆间作与培肥对沙地土壤质量及饲草产量品质的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
YANG J H. Effects of intercropping and fertilization of oat and common vetchon soil quality, forage yield and quality in sandy land [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.
- [17] 高明文, 吕林有, 张彩枝, 等. 科尔沁沙地燕麦草引种实验研究[J].

- 草原与草业, 2015, 27(1): 52-54.
- GAO M W, LV L Y, ZHANG C Z, et al. Experimental study on the introduction of oat grass in Horqin Sandy Land[J]. Grassland and Prataculture, 2015, 27(1): 52-54.
- [18] 娜日苏, 梁庆伟, 杨秀芳, 等. 13个燕麦品种在科尔沁沙地的生产性能评价[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2018, (17): 136-141.
- NA R S, LIANG Q W, YANG X F, et al. Evaluation on the production performance of 13 oat varieties in Horqin Sandy Land[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2018, (17): 136-141.
- [19] XU R X, ZHAO H M, LIU G B, et al. Alfalfa and silage maize intercropping provides comparable productivity and profitability with lower environmental impacts than wheat - maize system in the North China plain[J]. Agricultural Systems, 2022, 195: 103305.
- [20] 陈宝书. 牧草饲料作物栽培学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.
- CHEN B S. Cultivation of forage and feed crops[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2001.
- [21] BAXEVANOS D, TSIALTAS I T, VLACHOSTERGIOS D N, et al. Cultivar competitiveness in pea-oat intercrops under Mediterranean conditions[J]. Field Crops Research, 2017, 214: 94-103.
- [22] 刘启宇, 云岚, 陈逸凡, 等. 苜蓿——禾草混播草地牧草产量及种间竞争关系的动态研究[J]. 草业学报, 2022, 31(3): 181-191.
- LIU Q Y, YUN L, CHEN Y F, et al. The dynamic analysis of forage yield and interspecific competition in alfalfa-grass mixed pasture[J]. Acta Pratacul Turae Sinica, 2022, 31(3): 181-191.
- [23] LIANG B, MA Y W, SHI K, et al. Appropriate bandwidth achieves a high yield by reducing maize intraspecific competition in additive maize-soybean strip intercropping[J]. European Journal of Agronomy, 2023, 142: 126658.
- [24] GITARI H I, NYAWADE S O, KAMAU S, et al. Revisiting intercropping indices with respect to potato-legume intercropping systems[J]. Field Crops Research, 2020, 258: 107957.
- [25] GONG X W, DANG K, LV S M, et al. Interspecific competition and nitrogen application alter soil coenzymatic stoichiometry, microbial nutrient status, and improve grain yield in broomcorn millet/mung bean intercropping systems[J]. Field Crops Research, 2021, 270: 108227.
- [26] 冯琴, 王斌, 王腾飞, 等. 不同播种量毛苕子与燕麦混播对草地生产性能及营养品质的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(12): 3439-3446.
- FENG Q, WANG B, WANG T F, et al. Effects of mixed sowing of vetch and oat on production performance and nutrient quality of grassland[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(12): 3439-3446.
- [27] BÉLANGER G, TREMBLAY G F, PAPADOPOULOS Y A, et al. Yield and nutritive value of grazed complex legume-grass mixtures under increasing nitrogen application rates[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2020, 100(4): 341-356.
- [28] 聂兆君, 秦世玉, 刘红恩, 等. 氮锌配施对冬小麦产量及土壤氮素转化相关酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(3): 431-441.
- NIE Z J, QIN S Y, LIU H E, et al. Effects of combined application of nitrogen and zinc on winter wheat yield and soil enzyme activities related to nitrogen transformation[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2020, 26(3): 431-441.
- [29] 杜佳莹. 施氮与混播比例对箭筈豌豆和苏丹草种间关系及饲草品质的影响[D]. 长春: 东北师范大学, 2023.
- DU J Y. Effects of nitrogen application and mixed seeding ratio on interspecific relationship and forage quality of *Vicia sativa* L. and *Sorghum sudanense* [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2023.
- [30] 张永亮, 于铁峰, 郝凤, 等. 施肥与混播比例对豆禾混播牧草生产性能的影响[J]. 中国草地学报, 2020, 42(6): 115-124.
- ZHANG Y L, YU T F, HAO F, et al. Effects of fertilization and mixed sowing ratio on the production performance of grass-alfalfa mixed forage[J]. Chinese Journal of Grassland, 2020, 42(6): 115-124.
- [31] 孙杰, 巩林, 连露, 等. 海拔高度和混播比例对燕麦与箭筈豌豆产草量及质量的影响[J]. 草业科学, 2018, 35(10): 2438-2449.
- SUN J, GONG L, LIAN L, et al. Effect of altitude and mixed-sowing ratio on forage production and quality of oat and common vetch[J]. Pratacultural Science, 2018, 35(10): 2438-2449.
- [32] 任文, 张志新, 蔺昶兴, 等. 混播比例对高寒草地红豆草-垂穗披碱草混播群落生物量分配与竞争的影响[J]. 草业科学, 2020, 37(10): 2035-2048.
- REN W, ZHANG Z X, LIN C X, et al. Effects of mixed seeding ratio on biomass allocation and competition of *Onobrychis vicifolia* and *Elymus nutans* under cold conditions in the Tianzhu alpine region[J]. Pratacultural Science, 2020, 37(10): 2035-2048.
- [33] 窦梓懿, 郑伟华, 田燕燕, 等. 一年生豆禾混播草地生产性能的综合比较[J]. 草业科学, 2023, 40(10): 2639-2650.
- DOU Z Y, ZHENG W H, TIAN Y Y, et al. Comprehensive comparison of production performance of annual mixed legume-grass pastures[J]. Pratacultural Science, 2023, 40(10): 2639-2650.
- [34] 方伟. 高寒地区不同禾豆混播组合与比例对牧草产量及品质的影响[J]. 青海草业, 2022, 31(4): 1-8.
- FANG W. Effects of different mixtures and proportions of legume-grass mixtures on productivity and quality in alpine cold region[J]. Qinghai Prataculture, 2022, 31(4): 1-8.
- [35] 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[J]. 草地学报, 2021, 29(6): 1318-1326.
- LI X L, SHI S L, HUANG Z C, et al. Effects of different forage mixed patterns on interspecific relationships in loess hilly areas[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(6): 1318-1326.
- [36] 郭常英, 王伟, 蒲小剑, 等. 播种方式和行距对燕麦/饲用豌豆混播草地生产性能及种间关系的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(9): 2483-2491.
- GUO C Y, WANG W, PU X J, et al. Effects of sowing method and row spacing on production performance and interspecific relationship of oat/forage pea mixed grassland[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(9): 2483-2491.
- [37] 谢开云, 赵云, 李向林, 等. 豆-禾混播草地种间关系研究进展[J]. 草业学报, 2013, 22(3): 284-296.
- XIE K Y, ZHAO Y, LI X L, et al. Relationships between grasses and legumes in mixed grassland: a review[J]. Acta pratacultural Sinica, 2013, 22(3): 284-296.
- [38] 冯琴, 王斌, 海艺蕊, 等. 毛苕子不同播种量与燕麦混播对群落竞争及燕麦生物量分配的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(9): 2423-2429.
- FENG Q, WANG B, HAI Y R, et al. Effects of mixed sowing of vetch and oat on community competition and biomass allocation of oats[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(9): 2423-2429.
- [39] 叶婷, 吴晓娟, 芦彦晓, 等. 混播比例对两种苜蓿混播草地产量和种群密度稳定性的影响[J]. 草业学报, 2023, 32(5): 127-137.
- YE T, WU X J, LU Y X, et al. Effect of planting ratio on the stability of forage yield and population density in two alfalfa-grass mixtures[J]. Acta pratacultural Sinica, 2023, 32(5): 127-137.
- [40] KATARZYNA P, STANISLAW P, AGNIESZKA S, et al. Grain yield and total protein content of organically grown oats-vetch mixtures depending on soil type and oats' cultivar[J]. Agriculture, 2021, 11(1): 79.