

DOI:10.11686/cyxb2021236

http://cyxb.magtech.com.cn

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.

WANG Bin, YANG Yu-qi, LI Man-you, *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.

不同播种量下行距配置对紫花苜蓿产量及品质的影响

王斌^{1,2}, 杨雨琦^{1,2}, 李满有^{1,2}, 倪旺^{1,2}, 海艺蕊^{1,2}, 张顺香³, 董秀⁴, 兰剑^{1,2*}

(1. 宁夏大学农学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏草业工程技术研究中心, 宁夏 银川 750021; 3. 宁夏隆德县城关畜牧兽医工作站, 宁夏 固原 756000; 4. 兰州大学草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730020)

摘要:为探讨宁夏引黄灌区紫花苜蓿优质高效生产的最佳播种量和行距配置, 试验采用双因素随机区组设计, 研究了不同播种量(S_1 : 13.5 kg·hm⁻², S_2 : 18.0 kg·hm⁻², S_3 : 22.5 kg·hm⁻²)和行距配置(R_1 : 15 cm等行距, R_2 : 20 cm等行距, R_3 : 两窄一宽 15 cm+15 cm+20 cm, R_4 : 一窄一宽 15 cm+20 cm)对紫花苜蓿生产性能和品质的影响。3年试验结果表明, 播种量和行距对紫花苜蓿分枝数、叶茎比、干草产量、粗蛋白、中性洗涤纤维含量和相对饲喂价值有显著影响($P<0.05$), 其中分枝数、叶茎比、干草产量和粗蛋白含量随播种量的增加呈先增加后降低趋势。干草产量(18.41 t·hm⁻²)、粗蛋白含量(21.00%)在播种量为 18.0 kg·hm⁻²和行距为 15 cm+15 cm+20 cm时最高。中性洗涤纤维(36.50%)和酸性洗涤纤维(26.59%)含量在行距为 20 cm时最低。相对饲喂价值(171.98)在播种量为 18.0 kg·hm⁻²和行距为 20 cm时最高。3年各项指标数据取其平均值, 经主成分分析(PCA)可知, 紫花苜蓿干草产量、叶茎比、分枝数和中性洗涤纤维贡献率较大, 株高和酸性洗涤纤维贡献率较小。播种量为 18.0 kg·hm⁻²和行距为 15 cm+15 cm+20 cm时有利于提高紫花苜蓿干草产量和营养品质, 是该地区紫花苜蓿草地最佳播种量和行距配置。

关键词: 紫花苜蓿; 引黄灌区; 播种量; 行距; 产量; 品质

The effect of sowing rate and row spacing on the yield and quality of alfalfa in the Ningxia Yellow River irrigation area

WANG Bin^{1,2}, YANG Yu-qi^{1,2}, LI Man-you^{1,2}, NI Wang^{1,2}, HAI Yi-rui^{1,2}, ZHANG Shun-xiang³, DONG Xiu⁴, LAN Jian^{1,2*}

1. College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Ningxia Grass and Animal Husbandry Engineering Technology Research Center, Yinchuan 750021, China; 3. Ningxia Longde County Chengguan Animal Husbandry and Veterinary Work Station, Guyuan 756000, China; 4. College of Grassland Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China

Abstract: This research explored the optimal sowing rate and row spacing configuration for high-quality and high-efficiency production of alfalfa (*Medicago sativa*) in the Ningxia Yellow River irrigation area. In a three-year experiment, a two-factor randomized block design was used to study the effects on the yield and quality of alfalfa, of different sowing rates (S_1 : 13.5 kg·ha⁻¹, S_2 : 18.0 kg·ha⁻¹, S_3 : 22.5 kg·ha⁻¹) and row spacing configurations (R_1 : 15 cm equal row spacing, R_2 : 20 cm equal row spacing, R_3 : rows spaced two narrow and one wide 15 cm+15 cm+20 cm, R_4 : rows spaced one narrow and one wide 15 cm+20 cm). It was found that the number of branches, leaf: stem ratio, hay yield, crude protein, neutral detergent fiber content and relative feeding value of alfalfa were

收稿日期: 2020-12-08; 改回日期: 2021-05-06

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0500505)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: 王斌(1995-), 男, 宁夏中卫人, 在读硕士。E-mail: 2415540536@qq.com

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

significantly affected by both sowing rate and row spacing ($P < 0.05$). The results of three-year experiment showed that the sowing rate and row spacing had significant effects on the branch number, leaf stem ratio, hay yield, crude protein, neutral detergent fiber content and relative feeding value of Alfalfa ($P < 0.05$). The hay yield ($18.41 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$) and crude protein content (21.00%) were the highest when sowing rate was S_2 and row spacing was R_3 . The contents of neutral detergent fiber (36.50%) and acid detergent fiber (26.59%) were the lowest when the row spacing was R_2 . Relative feeding value (171.98) was the highest when sowing rate was S_2 and row spacing was R_2 . These findings are based on averaged data from the three years. A principal component analysis (PCA) showed that the drymatter yield, leaf: stem ratio, branch number and neutral detergent fiber level of herbage were more responsive to the alfalfa sowing rate and row spacing treatments contribution rate of alfalfa were larger, and the plant height and acid detergent fiber responses were smaller. The treatment combination S_2R_3 (sowing rate of $18.0 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ and row spacing of $15 \text{ cm} + 15 \text{ cm} + 20 \text{ cm}$) was the optimal sowing rate and row spacing combination for alfalfa forage production in this region for maximization of hay yield and forage nutritional quality.

Key words: alfalfa; Yellow River irrigation area; sowing rate; row spacing; yield; quality

紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 产草量高、营养丰富、适口性好, 在国内外广泛种植, 被誉为“牧草之王”^[1-3], 是建植人工饲草基地的重要草种^[4-5]。目前, 宁夏紫花苜蓿留床面积 33 万 hm^2 , 是我国苜蓿产业带优势产区之一。近年来, 随着国家大力推动“粮改饲”, 紫花苜蓿人工草地种植面积越来越多, 同时, 各大企业以及养殖户对于优质高产的紫花苜蓿追求也越来越高。而播种量和行距配置是影响紫花苜蓿产量形成和营养物质积累的重要因素, 其中播种量决定紫花苜蓿的群体大小, 行距配置则决定紫花苜蓿群体的均匀性^[6]。因此, 研究播种量和行距配置对提高紫花苜蓿产量及品质具有重要意义。

科学合理的播种量和行距能够形成较合理的群体结构, 可以缓和紫花苜蓿群体与个体之间对生存资源竞争的矛盾^[7-9], 进而延长苜蓿寿命, 促进可持续性发展, 提高紫花苜蓿的产量和品质。但由于各地区水热条件、气候等因素不同, 对紫花苜蓿播种量和行距要求也不同。例如, 汪堃等^[10]、南丽丽等^[11]研究甘肃荒漠灌区紫花苜蓿适宜播种量和行距时, 发现紫花苜蓿粗蛋白含量和相对饲喂价值在播种量为 $16.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 行距为 20 cm 时最高。吕会刚等^[12]研究表明, 在盐碱地区, 播种量为 $22.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和行距为 15 cm 配置时, 可促进紫花苜蓿生长, 显著提高产量和粗蛋白含量, 降低中性和酸性洗涤纤维含量。Elfatih 等^[13]认为, 紫花苜蓿播种量为 $25 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时干草产量达到最高。张帆等^[14]在黄淮海地区开展行距和播种量对紫花苜蓿产量及品质影响的研究, 发现行距为 20 cm 时, 干草产量可达 $18.32 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 同时, 随着播种量增大, 行距减小, 紫花苜蓿中性、酸性洗涤纤维含量呈下降趋势。也有学者研究发现, 紫花苜蓿播种量在一定范围内, 干草产量随着播种量的增加呈上升趋势, 当超过一定限度时, 产量开始下降^[15]。

宁夏引黄灌区作为饲草重要生产区域, 光热资源充足, 农业生产条件优越, 蕴藏着巨大的紫花苜蓿开发潜力^[16]。但鲜见不同播种量下行距配置对紫花苜蓿产量及品质影响的报道。鉴于此, 本研究通过3年试验, 探讨该区域紫花苜蓿适宜播种量及其行距配置, 以期对紫花苜蓿生产提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在宁夏大学草业科学专业教学科研基地 ($N 38^{\circ}33'26''$, $E 106^{\circ}04'12''$, 海拔 1111 m) 进行。该地位于宁夏农垦茂盛草业有限公司, 属温带大陆性季风气候, 年平均气温 8.5°C , 年均日照时数 3100 h , 年均降水量 $190 \sim 220 \text{ mm}$, 且 70% 集中在 $7-9$ 月, 年均蒸发量 1550 mm 。土壤类型为黏壤土, pH 值 8.3 , 有机质含量 $15.26 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮含量 $99.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾含量 $135.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷含量 $8.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

以宁夏紫花苜蓿主推品种“巨能 7”为试验材料,种子发芽率在 90% 以上,田间出苗率在 87% 以上。试验采用双因素随机区组设计,设置 3 个播种量(S_1 :13.5 kg·hm⁻², S_2 :18.0 kg·hm⁻², S_3 :22.5 kg·hm⁻²),4 个行距配置(R_1 :15 cm 等行距, R_2 :20 cm 等行距, R_3 :两窄一宽 15 cm+15 cm+20 cm, R_4 :一窄一宽 15 cm+20 cm)。共 12 个处理(表 1),每个处理设 3 个重复,总计 36 个小区,小区面积为 60 m²(10 m×6 m)。2016 年 4 月 28 日以条播方式进行人工开沟播种,播深 2~3 cm,播种前施足基肥。紫花苜蓿每年刈割 4 茬,各指标分别于 2018 年于 6 月 2 日、7 月 4 日、8 月 14 日、9 月 23 日,2019 年于 5 月 27 日、6 月 28 日、8 月 3 日、9 月 15 日,2020 年于 5 月 29 日、6 月 30 日、8 月 5 日、9 月 20 日测定。

表 1 播种量、行距配置组合

Table 1 Combination of sowing rate and row spacing configuration

播种量 Sowing rate (S)	行距 Row spacing (R)	组合 Combination (SR)
S_1 (13.5 kg·hm ⁻²)	R_1 (15 cm 等行距, 15 cm equal row spacing)	S_1R_1
	R_2 (20 cm 等行距, 20 cm equal row spacing)	S_1R_2
	R_3 (两窄一宽 15 cm+15 cm+20 cm, two narrow and one wide 15 cm+15 cm+20 cm)	S_1R_3
	R_4 (一窄一宽 15 cm+20 cm, one narrow and one wide 15 cm+20 cm)	S_1R_4
S_2 (18.0 kg·hm ⁻²)	R_1 (15 cm 等行距, 15 cm equal row spacing)	S_2R_1
	R_2 (20 cm 等行距, 20 cm equal row spacing)	S_2R_2
	R_3 (两窄一宽 15 cm+15 cm+20 cm, two narrow and one wide 15 cm+15 cm+20 cm)	S_2R_3
	R_4 (一窄一宽 15 cm+20 cm, one narrow and one wide 15 cm+20 cm)	S_2R_4
S_3 (22.5 kg·hm ⁻²)	R_1 (15 cm 等行距, 15 cm equal row spacing)	S_3R_1
	R_2 (20 cm 等行距, 20 cm equal row spacing)	S_3R_2
	R_3 (两窄一宽 15 cm+15 cm+20 cm, two narrow and one wide 15 cm+15 cm+20 cm)	S_3R_3
	R_4 (一窄一宽 15 cm+20 cm, one narrow and one wide 15 cm+20 cm)	S_3R_4

紫花苜蓿灌水方式为渗灌(地下滴灌)。滴灌带间隔 60 cm,滴头间隔 30 cm,滴灌带距离地面 20 cm。每年灌水 6 次,苜蓿春季返青时灌水 1 次,灌水量为 1200 m³·hm⁻²,生长季内灌水 4 次(每茬灌水均在苜蓿分枝期),每次灌水 900 m³·hm⁻²,灌越冬水 1 次,灌水量为 1500 m³·hm⁻²。生育期内施肥 4 次(第 1 茬施尿素 75 kg·hm⁻²,磷酸二铵 100 kg·hm⁻²,硫酸钾 150 kg·hm⁻²;第 2 茬施尿素 60 kg·hm⁻²,磷酸二铵 75 kg·hm⁻²,硫酸钾 120 kg·hm⁻²;第 3 茬施尿素 45 kg·hm⁻²,磷酸二铵 50 kg·hm⁻²,硫酸钾 90 kg·hm⁻²;第 4 茬施尿素 30 kg·hm⁻²,磷酸二铵 25 kg·hm⁻²,硫酸钾 60 kg·hm⁻²),与灌水同时进行,将肥料完全溶解到桶中,利用虹吸原理将肥料通过小管均匀冲入出水管。试验所用肥料:尿素(N≥46%),磷酸二铵(P₂O₅≥46%),硫酸钾(K₂O≥52%)。

1.3 测定指标及方法

以下各农艺性状指标均在紫花苜蓿初花期刈割时测定。

株高:每个小区随机选取 30 株紫花苜蓿测垂直高度,取平均值。

分枝数:在每个小区内随机取 6 个 1 m 样段,从根茎处数其一级分枝数,取平均值。

叶茎比:每个小区随机选取 30 株紫花苜蓿将茎和叶分离,于 105℃杀青 1 h,65℃烘干 48 h 后冷却,称量干重,叶茎比=叶片干重/茎秆干重。

鲜草产量:在每个小区随机取 2 m² (1 m×2 m)样方,留茬高度 4~5 cm,刈割后称量为鲜草产量,每个小区重复 6 次,换算出每公顷鲜草产量。

干草产量:将所采集的紫花苜蓿鲜草风干,至恒重后测量干重,换算出每公顷干草产量。

营养品质测定:在每个小区内随机取 500 g 的鲜草样品,剪为 4~5 cm 长的小段,于烘箱中 105℃下杀青 0.5 h 左右,65℃烘干 48 h 至恒重。将烘干的紫花苜蓿草样粉碎,过 0.45 mm 筛。根据《饲料分析及饲料质量检测技

术》^[17]测定粗蛋白(crude protein, CP)、中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)、酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)含量。计算饲料相对饲喂价值(relative feed value, RFV)^[18]。

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

1.4 数据分析

采用Excel 2013软件进行数据整理(干草产量4茬累加,其余指标均为4茬平均),利用SPSS Statistics 25.0软件进行统计方差分析、多重比较,用Origin 2018作图。并用SAS 9.4软件对株高(X_1)、分枝数(X_2)、叶茎比(X_3)、干草产量(X_4)、粗蛋白(X_5)、中性洗涤纤维(X_6)、酸性洗涤纤维(X_7)、相对饲喂价值(X_8)3年平均值进行主成分分析(principal component analysis, PCA)。

2 结果与分析

2.1 播种量和行距对紫花苜蓿农艺性状、产量和营养指标的互作分析

由表2方差分析可知,播种量对分枝数、叶茎比、干草产量、粗蛋白和酸性洗涤纤维含量有显著影响($P < 0.05$),对株高、中性洗涤纤维和相对饲喂价值无显著影响($P > 0.05$);行距对叶茎比、干草产量、粗蛋白、酸性洗涤纤维和相对饲喂价值有极显著影响($P < 0.01$),对分枝数和中性洗涤纤维有显著影响($P < 0.05$),对株高无显著影响($P > 0.05$);年份对株高、分枝数、叶茎比、粗蛋白、相对饲喂价值、中性和酸性洗涤纤维含量有极显著影响($P < 0.01$),对干草产量无显著影响($P > 0.05$);播种量和行距互作效应对株高、分枝数、叶茎比和酸性洗涤纤维有极显著影响($P < 0.01$),对干草产量有显著影响($P < 0.05$),对粗蛋白、中性洗涤纤维和相对饲喂价值无显著影响($P > 0.05$);播种量和年份互作效应对分枝数有极显著影响($P < 0.01$);行距和年份互作效应对各指标无显著影响($P > 0.05$);播种量和行距、年份互作效应对分枝数有显著影响($P < 0.05$)。

表2 紫花苜蓿农艺性状、产量和营养指标的方差分析

Table 2 Analysis of variance of alfalfa agronomic traits, yield and nutritional indicators

因素 Factor	株高 Plant height	分枝数 Branch number	叶茎比 Leaf/ stem	干草产量 Hay yield	粗蛋白 Crude protein	中性洗涤纤维 Neutral deter- gent fiber	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber	相对饲喂价值 Relative feed value
播种量 Sowing rate	NS	*	*	*	*	NS	*	NS
行距 Row spacing	NS	*	**	**	**	*	**	**
年份 Year	**	**	**	NS	**	**	**	**
播种量×行距 Sowing rate×row spacing	**	**	**	*	NS	NS	**	NS
播种量×年份 Sowing rate×year	NS	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS
行距×年份 Row spacing×year	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
播种量×行距×年份 Sowing rate×row spacing×year	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS

注: *表示0.05水平显著; **表示0.01水平显著; NS表示无显著性。

Note: * means significant at the 0.05 level; ** means significant at the 0.01 level; NS means not significant.

2.2 播种量和行距对紫花苜蓿生长性能的影响

由表3可知,播种量对2018—2020年株高无显著影响,对一级分枝数有显著影响($P < 0.05$)。行距对株高和一级分枝数均有显著影响($P < 0.05$)。随播种量的增加,一级分枝数呈先增加后减少趋势。株高和一级分枝数3年均值在播种量 S_2 、行距 R_3 条件下均达到最大值。

由表4可知,在12个播种量和行距配置组合中,2018—2020年株高变化范围分别为75.17~80.93 cm、76.37~83.52 cm、72.21~78.59 cm;2018—2020年一级分枝数的变化范围分别为93~120个、96~129个、94~114个,相同播种量和行距下,2020年株高、一级分枝数整体低于2018和2019年。其中3年株高、一级分枝数均值在 S_2R_3 处理下均达到最大。

表 3 播种量和行距对紫花苜蓿株高和分枝数的互作

Table 3 Interaction of sowing rate and row spacing on alfalfa plant height and branch number

指标 Index	株高 Plant height (cm)				一级分枝数 Branch number (plant·m ⁻¹)			
	2018	2019	2020	平均 Average	2018	2019	2020	平均 Average
播种量 Sowing rate								
S ₁	77.41b	78.45a	76.37a	77.40a	103b	107b	99b	103b
S ₂	78.71a	78.91a	75.62a	77.41a	106a	114a	104a	108a
S ₃	77.57ab	78.82a	75.14a	77.17a	99c	101c	99b	99c
行距 Row spacing								
R ₁	76.95b	78.17b	75.65a	76.92b	101c	107b	99b	102b
R ₂	77.92ab	77.98b	75.67a	76.74b	103ab	105b	98b	102b
R ₃	78.91a	80.39a	76.13a	78.48a	105a	113a	105a	108a
R ₄	77.79ab	78.36b	75.39a	77.18b	102bc	105b	99b	102b

注：同列不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at the 0.05 level. The same below.

表 4 播种量和行距对紫花苜蓿株高和分枝数的影响

Table 4 The effect of sowing rate and row spacing on alfalfa plant height and branch number

播种量 Sowing rate	行距 Row spacing	株高 Plant height (cm)				一级分枝数 Branch number (plant·m ⁻¹)			
		2018	2019	2020	平均 Average	2018	2019	2020	平均 Average
S ₁	R ₁	76.00±1.99cd	78.00±1.13bc	75.20±2.11bc	76.40±1.74c	100±3d	107±2d	98±5d	102±3c
	R ₂	76.29±1.62cd	77.25±0.78cd	76.37±2.00bc	76.64±1.47c	108±4b	106±3de	96±4ef	104±4bc
	R ₃	78.96±0.93ab	79.32±2.17bc	77.59±2.31b	78.62±1.77b	98±4ef	112±5bc	102±3bc	104±4bc
	R ₄	78.38±1.65b	79.21±0.89bc	76.32±2.40bc	77.97±1.65bc	107±5b	102±4e	99±4cd	103±2bc
S ₂	R ₁	76.81±3.52cd	77.31±1.23cd	75.37±3.11bc	76.50±2.64c	99±3e	108±5c	97±4e	102±3c
	R ₂	75.17±2.86d	76.37±2.86d	73.21±3.86bc	74.92±3.19e	97±2f	104±4de	98±5de	100±2d
	R ₃	80.93±2.77a	83.52±1.62a	78.59±2.73a	81.01±2.37a	120±4a	129±3a	114±5a	121±4a
	R ₄	77.92±2.48c	78.43±3.67bc	75.32±4.21bc	77.22±3.45bc	107±5b	114±4b	105±3b	109±3b
S ₃	R ₁	78.05±2.83bc	79.20±1.91bc	76.37±4.45bc	77.87±3.06bc	102±6cd	104±5de	101±4c	103±1bc
	R ₂	78.30±4.65b	80.31±1.27b	77.43±5.19bc	78.68±3.71b	103±5c	105±7de	99±4cd	103±2bc
	R ₃	76.84±3.26cd	78.32±3.41bc	72.21±3.84d	75.79±3.50d	96±4fg	96±4f	98±3d	97±1e
	R ₄	77.08±3.61cd	77.44±3.15c	74.53±4.47c	76.35±3.74c	93±5g	96±3f	94±5f	95±1e

2.3 播种量和行距对紫花苜蓿叶茎比和干草产量的影响

由表 5 可知,播种量和行距对 2018—2020 年叶茎比、干草产量均有显著影响($P<0.05$),随播种量的增加,叶茎比和干草产量均呈先增大后减小趋势,其中 3 年叶茎比和干草产量均值在播种量 S₂、行距 R₃ 条件下达最高,分别为 0.83、16.55 t·hm⁻² 和 0.81、17.00 t·hm⁻²。

由表 6 可知,在 12 个播种量和行距配置组合中,2018—2020 年的叶茎比变化范围分别为 0.72~0.87、0.74~0.91、0.71~0.89,3 年叶茎比均值在 S₂R₃ 处理下达到最大,为 0.89。干草产量在 2018—2020 年的变化范围分别为 14.85~18.37 t·hm⁻²、15.12~18.98 t·hm⁻²、14.27~17.89 t·hm⁻²,3 年干草产量均值在 S₂R₃ 处理下达最高,为 18.41 t·hm⁻²,显著高于其他处理($P<0.05$)。相同播种量和行距下,2020 年干草产量整体低于 2018 和 2019 年。

2.4 播种量和行距对紫花苜蓿中性洗涤纤维(NDF)、酸性洗涤纤维(ADF)含量的影响

由表 7 可知,播种量和行距对 2018—2020 年 NDF 含量均值有显著影响($P<0.05$),对 ADF 含量均值无显著影响。NDF 含量随播种量的增加呈先降低后增加的趋势,而 ADF 含量随播种量的增加呈上升趋势。3 年 NDF 含量均值在播种量 S₂、行距 R₂ 条件下最低;3 年 ADF 含量均值在播种量 S₁、行距 R₁ 条件下最低。

表 5 播种量和行距对紫花苜蓿叶茎比和干草产量的交互

Table 5 Interaction of sowing rate and row spacing on the leaf-to-stem ratio and hay yield of alfalfa

指标 Index	叶茎比 Leaf/stem				干草产量 Hay yield ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)			
	2018	2019	2020	平均 Average	2018	2019	2020	平均 Average
播种量 Sowing rate								
S ₁	0.74c	0.77c	0.75c	0.75c	15.76b	15.62b	15.30ab	15.56b
S ₂	0.82a	0.85a	0.83a	0.83a	16.56a	17.07a	16.02a	16.55a
S ₃	0.77b	0.79b	0.78b	0.78b	16.04b	16.02b	15.17b	15.74b
行距 Row spacing								
R ₁	0.76b	0.80ab	0.78b	0.78bc	16.10b	16.52ab	15.36b	15.99b
R ₂	0.79a	0.79ab	0.79b	0.79ab	15.81bc	15.48c	15.17b	15.49c
R ₃	0.80a	0.81a	0.82a	0.81a	17.24a	17.21a	16.55a	17.00a
R ₄	0.75b	0.79b	0.75c	0.76c	15.33c	15.73bc	14.90b	15.32c

表 6 播种量和行距对紫花苜蓿叶茎比、干草产量的影响

Table 6 The effect of different sowing rate and row spacing on the leaf-stem ratio and hay yield of alfalfa

播种量 Sowing rate	行距 Row spacing	叶茎比 Leaf/stem				干草产量 Hay yield ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)			
		2018	2019	2020	平均 Average	2018	2019	2020	平均 Average
S ₁	R ₁	0.72±0.02g	0.74±0.01e	0.72±0.09f	0.73±0.05e	14.85±0.32f	15.12±0.21c	14.62±0.19de	14.86±0.15cd
	R ₂	0.74±0.02f	0.76±0.03de	0.74±0.03e	0.75±0.03d	15.07±0.42e	15.17±0.23c	14.98±0.13d	15.07±0.05cd
	R ₃	0.75±0.02ef	0.79±0.02c	0.77±0.06d	0.77±0.04c	18.09±0.12ab	16.33±0.22b	16.37±0.16b	16.93±0.58b
	R ₄	0.73±0.04fg	0.77±0.01d	0.76±0.03de	0.75±0.03d	15.02±0.14e	15.85±0.51bc	15.21±0.43cd	15.36±0.25cd
S ₂	R ₁	0.81±0.03c	0.85±0.06b	0.82±0.01bc	0.83±0.01b	17.24±0.43b	18.21±0.26a	16.59±0.21ab	17.35±0.47b
	R ₂	0.83±0.05b	0.79±0.01c	0.83±0.03b	0.82±0.03b	15.67±0.15de	15.89±0.21bc	15.32±0.23c	15.63±0.17cd
	R ₃	0.87±0.01a	0.91±0.02a	0.89±0.02a	0.89±0.02a	18.37±0.21a	18.98±0.22a	17.89±0.12a	18.41±0.32a
	R ₄	0.75±0.03ef	0.83±0.02b	0.78±0.03cd	0.79±0.03bc	14.96±0.13ef	15.21±0.32c	14.27±0.23e	14.81±0.28d
S ₃	R ₁	0.76±0.03e	0.82±0.02bc	0.80±0.08c	0.79±0.03bc	16.20±0.13cd	16.24±0.42b	14.88±0.28d	15.77±0.45c
	R ₂	0.79±0.03d	0.83±0.03b	0.79±0.01cd	0.80±0.01bc	16.68±0.13c	15.37±0.33c	15.22±0.11cd	15.76±0.46c
	R ₃	0.77±0.01de	0.73±0.01e	0.81±0.01bc	0.77±0.01c	15.26±0.21de	16.33±0.21b	15.38±0.21c	15.66±0.34cd
	R ₄	0.76±0.05e	0.77±0.01d	0.71±0.02g	0.75±0.02d	16.01±0.25d	16.12±0.31b	15.21±0.12cd	15.78±0.29c

由表 8 可知,在 12 个播种量和行距配置组合中,2018—2020 年 NDF 含量变化范围分别为 35.82%~38.77%、35.35%~39.20%、36.52%~41.22%,3 年 NDF 含量均值最低的是 S₂R₂ 处理,为 36.50%。ADF 含量在 2018—2020 年的变化范围分别为 26.15%~31.34%、24.39%~27.59%、28.05%~31.36%,3 年 ADF 含量均值最低的处理是 S₁R₂,为 26.59%。

2.5 播种量和行距对紫花苜蓿粗蛋白含量(CP)、相对饲喂价值(RFV)的影响

由表 9 可知,播种量和行距对 CP 含量和 RFV 有显著影响($P<0.05$),CP 含量和 RFV 随播种量的增加均呈先增加后下降的趋势,其中 CP 含量和 RFV 均值在播种量 S₂ 条件下最大,在行距 R₃ 条件下 CP 含量均值最高,在行距 R₂ 条件下 RFV 均值最高。

由表 10 可知,在 12 个播种量和行距配置组合中,CP 含量在 2018—2020 年的变化范围分别为 18.82%~20.47%、19.31%~22.33%、17.92%~20.21%,其中 3 年 CP 含量均值在 S₂R₃ 处理下达到最高,为 21.00%,相同播种量和行距下,2019 年 CP 含量整体高于 2018 和 2020 年。2018—2020 年的 RFV 变化范围分别为 159.41~175.42、160.73~183.79、149.77~168.50,其中 3 年 RFV 均值最大的是 S₂R₂ 处理,达到 171.98。

表 7 播种量和行距对紫花苜蓿 NDF 和 ADF 含量的互作

Table 7 Interaction of sowing rate and row spacing on NDF and ADF content of alfalfa

指标 Index	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber (NDF, %)				酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber (ADF, %)			
	2018	2019	2020	平均 Average	2018	2019	2020	平均 Average
播种量 Sowing rate								
S ₁	38.12a	38.75b	37.79a	38.22a	27.61b	26.07a	28.56b	27.41a
S ₂	37.39b	38.17b	36.63b	37.39b	27.63b	24.89b	29.86a	27.46a
S ₃	37.55ab	39.76a	38.10a	38.47a	28.63a	26.57a	29.91a	28.37a
行距 Row spacing								
R ₁	38.51a	39.49a	37.36b	38.46a	27.12bc	25.80ab	28.95b	27.29a
R ₂	37.04b	38.59ab	36.55b	37.39b	26.89c	25.49b	29.69ab	27.36a
R ₃	37.24ab	37.75b	37.53b	37.51b	29.78a	25.36b	29.02b	28.05a
R ₄	37.94ab	39.74a	38.59a	38.76a	28.03b	26.71a	30.11a	28.28a

表 8 播种量和行距对紫花苜蓿 NDF、ADF 含量的影响

Table 8 Effects of sowing rate and row spacing on NDF and ADF content of alfalfa

播量 Sowing rate	行距 Row spacing	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber (%)				酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber (%)			
		2018	2019	2020	平均 Average	2018	2019	2020	平均 Average
S ₁	R ₁	38.48±0.95a	37.25±0.5bc	39.76±0.8ab	38.50±0.72ab	26.15±1.95e	26.58±0.9b	28.05±0.9c	26.93±0.58ab
	R ₂	38.77±0.84a	37.77±0.6bc	38.22±0.7bc	38.25±0.29ab	26.67±0.84de	24.72±0.8cd	28.37±1.1c	26.59±1.05b
	R ₃	37.09±0.61bc	38.02±0.7b	37.49±0.6c	37.53±0.27b	28.44±1.61bc	25.37±0.7c	28.32±0.5c	27.38±1.00ab
	R ₄	38.14±0.46ab	38.13±0.5b	39.53±0.5ab	38.60±0.47ab	29.18±1.46b	27.59±1.2a	29.51±0.7b	28.76±0.59ab
S ₂	R ₁	38.69±0.46a	36.52±0.7c	37.50±0.6c	37.57±0.63b	26.77±1.46d	25.33±0.7c	29.67±0.70b	27.26±1.28ab
	R ₂	35.82±0.61c	35.35±0.7d	38.34±0.7bc	36.50±0.93c	27.45±1.61c	24.52±0.7cd	31.10±0.80ab	27.69±1.90ab
	R ₃	36.90±0.66bc	36.20±0.9cd	36.52±0.5d	36.54±0.20c	29.55±1.66ab	24.39±0.9d	29.21±0.89bc	27.72±1.67ab
	R ₄	38.15±0.58ab	38.45±0.8ab	40.31±0.7ab	38.97±0.68ab	26.74±1.58d	25.32±0.8c	29.47±0.80bc	27.18±1.22ab
S ₃	R ₁	38.37±0.55ab	38.32±0.6ab	41.22±0.7a	39.30±0.96a	28.44±0.55bc	25.49±0.6c	29.14±0.7bc	27.69±1.12ab
	R ₂	36.53±0.52bc	36.52±0.4c	39.22±0.5b	37.42±0.90b	26.56±0.52de	27.25±0.7ab	29.59±0.5b	27.80±0.92ab
	R ₃	37.74±0.40b	38.37±0.6ab	39.24±0.4b	38.45±0.43ab	31.34±1.40a	26.31±0.9bc	29.53±0.9b	29.06±1.47a
	R ₄	37.54±0.49b	39.20±0.6a	39.37±0.5b	38.70±0.58ab	28.17±1.49bc	27.22±0.6ab	31.36±0.5a	28.92±1.25a

表 9 播种量和行距对紫花苜蓿 CP 含量和 RFV 的互作

Table 9 Interaction of sowing rate and row spacing on CP content and RFV of alfalfa

指标 Index	粗蛋白 Crude protein (CP, %)				相对饲喂价值 Relative feed value (RFV)			
	2018	2019	2020	平均 Average	2018	2019	2020	平均 Average
播种量 Sowing rate								
S ₁	18.78b	20.04c	18.07b	19.10b	164.57c	168.95b	160.36a	164.48ab
S ₂	19.73a	21.26a	18.67a	19.89a	167.80a	176.79a	160.23a	168.22a
S ₃	19.53ab	20.53b	18.04b	19.36b	165.39b	166.71b	153.89b	161.75b
行距 Row spacing								
R ₁	19.06b	20.01b	18.08b	19.05c	163.90b	171.46a	156.83b	163.85bc
R ₂	19.12b	20.18b	17.95b	19.08c	170.95a	175.94a	158.68ab	168.42a
R ₃	20.13a	21.31a	18.81a	20.08a	164.30b	171.63a	163.85a	166.40ab
R ₄	19.61ab	20.91a	18.20b	19.58b	164.52b	164.22b	153.27b	160.59c

表 10 播种量和行距对紫花苜蓿 CP、RFV 的影响

Table 10 Effects of sowing rate and row spacing on CP and RFV of alfalfa

播种量 Sowing rate	行距 Row spacing	粗蛋白 Crude protein (%)				相对饲喂价值 Relative feed value			
		2018	2019	2020	平均 average	2018	2019	2020	平均 Average
S ₁	R ₁	18.82±0.66c	19.31±0.21d	18.02±0.41b	18.72±0.38d	165.88±10.12b	170.47±4.00b	157.41±4.64b	164.28±3.94ab
	R ₂	19.08±0.41bc	20.21±0.32c	17.93±0.64c	19.07±0.66c	163.59±6.28bc	171.57±7.00b	162.75±5.12ab	165.85±2.85ab
	R ₃	19.69±0.42b	20.39±0.21bc	18.01±0.52bc	19.36±0.71bc	167.42±5.95b	169.31±6.23bc	166.17±5.32ab	167.47±0.96ab
	R ₄	19.13±0.31bc	20.23±0.15c	18.32±0.61b	19.23±0.55bc	161.37±4.39c	164.44±6.12c	155.11±5.46c	160.31±2.75b
S ₂	R ₁	19.10±0.51bc	20.15±0.30c	18.22±0.51b	19.16±0.56c	163.73±7.43bc	176.21±5.23ab	163.31±5.44ab	167.66±4.26ab
	R ₂	19.36±0.53bc	21.02±0.37b	17.92±0.97c	19.43±0.90bc	175.42±4.51a	183.79±6.43a	156.91±5.61b	171.98±7.91a
	R ₃	20.47±0.43a	22.33±0.21a	20.21±0.36a	21.00±0.67a	166.07±5.16b	179.64±5.62ab	168.50±5.54a	171.39±4.17a
	R ₄	19.99±0.52b	21.52±0.23ab	18.33±0.26b	19.95±0.92b	165.97±7.22b	167.49±4.51bc	152.21±6.12d	161.84±4.85b
S ₃	R ₁	19.25±0.61bc	20.58±0.24bc	18.01±0.34bc	19.28±0.74bc	162.09±6.81c	167.71±5.33bc	149.77±6.23d	159.61±5.37b
	R ₂	18.93±0.41bc	19.31±0.14d	17.99±0.28c	18.74±0.39d	173.85±7.12ab	172.46±3.91b	156.38±6.74b	167.42±5.63ab
	R ₃	20.21±0.51ab	21.22±0.41ab	18.20±0.41b	19.88±0.89b	159.41±5.18c	165.95±7.12c	156.89±6.42b	160.33±2.86b
	R ₄	19.71±0.42b	20.99±0.32b	17.96±0.19c	19.55±0.88bc	166.22±6.72b	160.73±6.23d	152.50±7.11cd	159.63±3.95b

2.6 综合评价

主成分分析能够降低数据维数以消除重叠信息的不利影响。近年来,PCA 综合评价方法在作物栽培及牧草选育方面成为热点^[19]。对不同播种量和行距配置处理进行评价时,不能只考虑某一个或几个指标的优劣,而应该科学、综合的评价其所有指标。根据特征值大于1原则,可提取3个主成分,累积方差贡献率达到87.553%,代表了总体信息的87.553%(表11)。

表 11 主成分的特征值

Table 11 Eigen values of principal components

主成分 Principal component	初始特征值 Variance of initial eigen values			主成分 Principal component	初始特征值 Variance of initial eigen values		
	特征值 Eigenvalue	方差贡献率 Variance contribution (%)	累积贡献率 Accumulative contribution (%)		特征值 Eigenvalue	方差贡献率 Variance contribution (%)	累积贡献率 Accumulative contribution (%)
1	4.297	53.713	53.713	5	0.279	3.487	97.428
2	1.584	19.803	73.516	6	0.181	2.268	99.696
3	1.123	14.037	87.553	7	0.024	0.297	99.993
4	0.511	6.388	93.941	8	0.001	0.007	100.000

主成分对应的特征向量和载荷矩阵如表12所示,第1主成分主要综合了叶茎比(X₃)、干草产量(X₄)、分枝数(X₂),其载荷值较大,权重系数分别为0.900、0.845、0.825,可称为产量因子。第2主成分主要综合了酸性洗涤纤维(X₇)、相对饲喂价值(X₈)、粗蛋白(X₅),其载荷较大,权重系数分别为0.714、-0.621、0.574,可称为营养因子。第3主成分主要综合了中性洗涤纤维(X₆),其载荷值为0.531。

通过主成分1、2、3的特征向量值,得出各主成分综合得分线性方程,以各主成分对应的方差相对贡献率作为权重建立综合评价模型:

$$Y_1 = 0.331X_1 + 0.398X_2 + 0.434X_3 + 0.408X_4 + 0.315X_5 - 0.370X_6 - 0.101X_7 + 0.361X_8$$

$$Y_2 = 0.291X_1 + 0.110X_2 + 0.095X_3 + 0.123X_4 + 0.456X_5 + 0.335X_6 + 0.567X_7 - 0.493X_8$$

$$Y_3 = 0.413X_1 + 0.473X_2 - 0.154X_3 - 0.195X_4 - 0.070X_5 + 0.407X_6 - 0.584X_7 - 0.178X_8$$

$$Y = (53.713Y_1 + 19.803Y_2 + 14.037Y_3) / 87.553$$

表 12 主成分对应的特征向量和载荷矩阵

Table 12 The eigenvectors and load matrix corresponding to the principal components

项目 Item	主成分 1 Principal component 1 (Y_1)		主成分 2 Principal component 2 (Y_2)		主成分 3 Principal component 3 (Y_3)	
	特征向量 Feature vector	载荷 Load	特征向量 Feature vector	载荷 Load	特征向量 Feature vector	载荷 Load
株高 Plant height (X_1)	0.331	0.686	0.291	0.366	0.413	0.438
分枝数 Branch number (X_2)	0.398	0.825	0.110	0.139	0.473	0.501
叶茎比 Leaf/stem (X_3)	0.434	0.900	0.059	0.074	-0.154	-0.163
干草产量 Hay yield (X_4)	0.408	0.845	0.123	0.155	-0.195	-0.207
粗蛋白 CP (X_5)	0.315	0.652	0.456	0.574	-0.070	-0.074
中性洗涤纤维 NDF (X_6)	-0.370	-0.768	0.335	0.421	0.407	0.531
酸性洗涤纤维 ADF (X_7)	-0.101	-0.209	0.567	0.714	-0.584	-0.619
相对饲喂价值 RFV (X_8)	0.361	0.749	-0.493	-0.621	-0.178	-0.189

通过上述模型计算每个处理的综合得分并进行排名。在主成分 1 中,排名靠前的是 S_2R_3 , S_1R_3 , S_2R_1 ; 在主成分 2 中,排名靠前的是 S_3R_4 , S_3R_3 , S_1R_4 , S_2R_3 ; 在主成分 3 中,排名靠前的是 S_2R_4 , S_1R_2 , S_1R_1 , S_2R_3 。根据综合评价模型得分从高到低排名如下: S_2R_3 , S_1R_3 , S_2R_1 , S_2R_4 , S_3R_2 , S_3R_1 , S_2R_2 , S_1R_4 , S_1R_2 , S_3R_3 , S_3R_4 , S_1R_1 (表 13)。

3 讨论

3.1 播种量和行距对紫花苜蓿生产性能的影响

适宜播种量和行距配置是有效发挥紫花苜蓿高产潜能的重要因素。分枝数可作为评价紫花苜蓿产量高低的重要指标。目前,关于播种量对紫花苜蓿分枝数影响方面的研究相对较少,本研究连续 3 年试验发现,紫花苜蓿一级分枝数随播种量的增加呈先增加后减少趋势,且在行距为 15 cm+15 cm+20 cm 时分枝最多,与王彦华等^[20]的研究结果相似。另外,2020

年苜蓿一级分枝数整体低于 2018 和 2019 年,即分枝数也受苜蓿生长年限的影响,数量会随生长年限的增加下降。近年来,国内外学者通过研究不同播种量对紫花苜蓿产草量的影响已经得到广泛认可。Suttie^[21]认为播种量为 22.5~30.0 kg·hm⁻²时,紫花苜蓿产量较高。Jefferson 等^[15]报道,紫花苜蓿播种量在 6.0~18.0 kg·hm⁻²时,干草产量随播种量的增加呈增加趋势,但超过一定限度时,紫花苜蓿产量便会下降。魏晓艳^[22]认为在渗灌条件下,紫花苜蓿播种量为 18 kg·hm⁻²时干草产量达到最高。Lichner 等^[23]研究发现,增加播种量能够提高紫花苜蓿产量。而 Hoveland 等^[24]证明增加紫花苜蓿播种量对干草产量影响不显著。学者们的研究结果之所以有差异,主要源于不同区域水热、气候等条件存在差异。本研究得出,播种量对干草产量有显著影响,干草产量随着播种量的增加呈先增加后降低的趋势,且在播种量为 18 kg·hm⁻²时苜蓿干草产量达到最高。与前人研究结果相似,主要原因是:增加播种量就是增加单位面积植株数量,可以弥补紫花苜蓿分枝的空间,当播种量超过一定限度,单位面积植株数量过大,群体通风透光性差,影响紫花苜蓿正常光合作用,此时苜蓿产生自疏现象^[25],进而苜蓿产量下降。

许多学者在行距配置对紫花苜蓿产草量的影响方面进行了大量研究,但结果不尽相同。刘东霞等^[26]研究得出,在行距为 20、30、40、50 cm 4 个处理中,2 年苜蓿产量均以 20 cm 行距最高,干草产量随行距的加大呈下降趋势。孙仕仙等^[27]研究报道,干草产量在行距为 36 cm 时最高。孟凯等^[25]研究发现,行距为 15 和 30 cm 时产量达到

表 13 播种量、行距综合排名及得分

Table 13 Comprehensive rankings and scores of sowing rate and row spacing

处理 Treatment	主成分 1 Y_1	主成分 2 Y_2	主成分 3 Y_3	综合得分 Y	排名 Ranking
S_1R_1	-1.743	-1.305	0.982	-1.207	12
S_1R_2	-0.890	-1.410	1.095	-0.689	9
S_1R_3	0.945	-0.474	0.211	0.506	2
S_1R_4	-1.298	1.289	0.056	-0.496	8
S_2R_1	0.977	-1.011	-0.651	0.267	3
S_2R_2	0.663	-1.890	-1.847	-0.317	7
S_2R_3	5.684	1.233	0.320	3.817	1
S_2R_4	-0.420	0.590	1.474	0.112	4
S_3R_1	-0.941	0.948	0.927	-0.214	6
S_3R_2	0.416	-0.764	-0.075	0.071	5
S_3R_3	-1.437	1.445	-1.416	-0.782	10
S_3R_4	-1.957	1.348	-1.075	-1.068	11

Y: 综合得分 Composite scores.

最高。在本试验中,连续3年苜蓿干草产量均在行距为15 cm+15 cm+20 cm时最高,与前人研究结果接近,说明两窄一宽这种行距配置是宁夏引黄灌区紫花苜蓿最适宜的种植方式,可以促进植株高效利用单位面积内光、热、水、肥等环境资源,进而获得较高的产量。本研究还发现,紫花苜蓿干草产量还受生长年际的影响,与前人研究结果吻合^[28]。

3.2 播种量和行距对紫花苜蓿营养品质的影响

紫花苜蓿的粗蛋白、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维含量和相对饲喂价值是评定其营养品质的重要指标。目前,市场上一般认为优质紫花苜蓿CP>19%,NDF<40%,ADF<31%,RFV>155^[29]。本研究发现,综合3年数据,播种量13.5 kg·hm⁻²+行距15 cm、播种量22.5 kg·hm⁻²+行距20 cm组合的CP含量低于19%,其他播种量和行距组合处理的CP含量均高于19%,说明适宜的播种量和行距配置能够提高CP含量。在本试验中,3年NDF和ADF含量均值都满足优质苜蓿标准,表明不同播种量、行距配置下的紫花苜蓿适口性和消化率均为最优。同时,本研究中各处理的RFV均高于155,达到特优苜蓿等级。

不同播种量和行距对紫花苜蓿品质影响的研究较为成熟。魏永鹏等^[30]研究发现,播种量为16 kg·hm⁻²+行距20 cm时,紫花苜蓿CP含量最高,NDF、ADF含量最低。Lloveras等^[31]认为播种量对紫花苜蓿营养品质无显著影响。本研究得出紫花苜蓿CP含量在播种量为18 kg·hm⁻²和行距为15 cm+15 cm+20 cm时最高,与前人研究结果有所差异,主要原因是S₂R₃处理的苜蓿叶茎比显著高于其他处理,而紫花苜蓿中70%的CP来源于叶片,且叶片中CP含量远远高于茎^[32],叶茎比越大,紫花苜蓿的CP含量就越高。紫花苜蓿NDF含量在播种量18 kg·hm⁻²+行距20 cm时最低,ADF含量在播种量13.5 kg·hm⁻²+行距20 cm时最低,与前人研究结果相反,原因可能是行距削弱了播种量的影响效应。

4 结论

在宁夏引黄灌区紫花苜蓿栽培中,合理的播种量和行距配置能显著提高紫花苜蓿生产性能和营养品质。其中分枝数、叶茎比、干草产量、粗蛋白含量和相对饲喂价值随播种量的增加和行距的变化呈先增加后降低的趋势;综合3年平均数据,播种量为18 kg·hm⁻²和行距为15 cm+15 cm+20 cm处理的干草产量(18.41 t·hm⁻²)和粗蛋白含量(21.00%)最高;中性洗涤纤维(36.50%)和酸性洗涤纤维(26.59%)含量在行距为20 cm时最低;相对饲喂价值(171.98)在播种量为18 kg·hm⁻²和行距为20 cm时最高。经PCA对苜蓿产量和品质进行综合评价得出,播种量为18 kg·hm⁻²、行距为15 cm+15 cm+20 cm有利于提高宁夏引黄灌区紫花苜蓿产量和品质。

参考文献 References:

- [1] Shen X H, Li J D, Feng P, *et al.* Root physiological traits and cold hardiness of alfalfa grown alone or mix-sowed with meadow fescue. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science*, 2017, 67(3): 235–244.
- [2] Altinok S, Yurtseven E, Avci S, *et al.* The effects of different irrigation water salinities and leaching ratios on green and dry forage yields of alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Agriculture & Forestry*, 2015, 61(1): 85–90.
- [3] He L, Liu Y, He H, *et al.* A molecular framework underlying the compound leaf pattern of *Medicago truncatula*. *Nature Plants*, 2020, 6(5): 1–11.
- [4] Wang Y, You Z, Ren P. Research progress on alfalfa (*Medicago sativa* L.) adaptability under drought stress. *Agricultural Science & Technology*, 2017, 18(2): 219–222.
- [5] Zheng M N, Liang X Z, Han Z S, *et al.* Productivity and nutritional value of 28 alfalfa varieties in the Yanmenguan area of Shanxi Province. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(5): 97–108.
郑敏娜, 梁秀芝, 韩志顺, 等. 不同苜蓿品种在雁门关地区的生产性能和营养价值研究. *草业学报*, 2018, 27(5): 97–108.
- [6] Dong Z, Shen X Y. Overall review of crop cultivation. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
董钻, 沈秀瑛. 作物栽培学总论. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [7] Dong X, Li M Y, Ma Z R, *et al.* Preliminary study on the effect of different seeding amount and row spacing on alfalfa production performance. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2020(8): 99–104.
董秀, 李满有, 马忠仁, 等. 不同播种量与行距对紫花苜蓿生产性能影响的初步研究. *黑龙江畜牧兽医*, 2020(8): 99–104.

- [8] Wang Y H, Wang C Z, Li D F, *et al.* Effects of seeding rate on plant number, production performance, and quality of alfalfa. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(2): 123–135.
王彦华, 王成章, 李德锋, 等. 播种量和品种对紫花苜蓿植株动态变化、产量及品质的影响. *草业学报*, 2017, 26(2): 123–135.
- [9] Wang Y, Duan X Y, Zhang S C, *et al.* Influence of planting density on grass yield and other biological properties of *Medicago sativa*. *Pratacultural Science*, 2011, 28(7): 1400–1402.
王莹, 段学义, 张胜昌, 等. 紫花苜蓿播种密度对草产量及其他生物学性状的影响. *草业科学*, 2011, 28(7): 1400–1402.
- [10] Wang K, Hao M M, Nan L L, *et al.* Effects of seeding rate and row spacing on productivity of alfalfa in the arid oasis region of Gansu Province. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2020, 55(1): 128–135.
汪堃, 郝明明, 南丽丽, 等. 播量和行距对荒漠灌区紫花苜蓿生产性能的影响. *甘肃农业大学学报*, 2020, 55(1): 128–135.
- [11] Nan L L, Shi S L, Guo Q E, *et al.* Effects of seeding rate and row spacing on nutritional value of alfalfa in the arid oasis region of Gansu Province. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(1): 108–119.
南丽丽, 师尚礼, 郭全恩, 等. 甘肃荒漠灌区播种量和行距对紫花苜蓿营养价值的影响. *草业学报*, 2019, 28(1): 108–119.
- [12] Lv H G, Kang J M, Long R C, *et al.* Effects of seeding rate and row spacing on the hay yield and quality of alfalfa in saline-alkali land. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(3): 164–174.
吕会刚, 康俊梅, 龙瑞才, 等. 播种量和行距配置对盐碱地紫花苜蓿草产量及品质的影响. *草业学报*, 2019, 28(3): 164–174.
- [13] Elfatih M A, Awad O A. Effect of seeding rate on growth and yield of two alfalfa (*Medicago sativa* L.) cultivars. *World Association for Sustainable Development*, 2012, 2: 141–154.
- [14] Zhang F, Kang J M, Zhao Z X, *et al.* Effect of between-row spacing and seeding rate on alfalfa hay yield and quality of Huang Huai Hai Plain. *Pratacultural Science*, 2018, 35(12): 2960–2967.
张帆, 康俊梅, 赵忠祥, 等. 行距和播种量对黄淮海平原紫花苜蓿产草量及品质的影响. *草业科学*, 2018, 35(12): 2960–2967.
- [15] Jefferson P G, Cutforth H W. Sward age and weather effects on alfalfa yield at a semi-arid location in southwestern Saskatchewan. *Canadian Journal of Plant Science*, 1997, 77: 595–599.
- [16] Ji L D, Guo X N, Sun Q, *et al.* Soil microbial biomass and activity in different land use types in Ningxia irrigation area. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(3): 516–524.
纪立东, 郭鑫年, 孙权, 等. 宁夏引黄灌区不同土地利用方式土壤微生物群落多样性研究. *生态环境学报*, 2020, 29(3): 516–524.
- [17] Zhang L Y. Feed analysis and feed quality inspection technology. Beijing: China Agricultural University Press, 2016.
张丽英. 饲料分析及饲料质量检测技术. 北京: 中国农业大学出版社, 2016.
- [18] Zhou D C, Shen Y Y, Wu H J, *et al.* Production performance of mixed grassland in the Loess Plateau of Longzhong. *Pratacultural Science*, 2021, 38(1): 147–159.
周栋昌, 沈禹颖, 武慧娟, 等. 陇中黄土高原混播草地生产性能. *草业科学*, 2021, 38(1): 147–159.
- [19] Ren L J, Zhao L S, Chen Y K. Comprehensive evaluation of silage quality of whole corn silage for different varieties in northeast China based on principal component analysis and cluster analysis. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32(8): 3856–3868.
任丽娟, 赵连生, 陈雅坤, 等. 基于主成分分析和聚类分析方法综合评价东北地区不同品种全株玉米青贮饲料的青贮品质. *动物营养学报*, 2020, 32(8): 3856–3868.
- [20] Wang Y H, Li D F, Qi S L, *et al.* Effects of seeding rate and variety on branch number and plant height of alfalfa. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(3): 183–190.
王彦华, 李德锋, 齐胜利, 等. 播种量和品种对紫花苜蓿分枝数和株高的影响. *草业学报*, 2017, 26(3): 183–190.
- [21] Suttie J M. Hay and straw conservation: For small-scale farming and pastoral conditions. Food & Agriculture Organization, 2000, 29: 89–95.
- [22] Wei X Y. Research on alfalfa seeding rate and mixed seeding mode under drip irrigation. Yinchuan: Ningxia University, 2018.
魏晓艳. 滴灌条件下苜蓿播种量及混播模式的研究. 银川: 宁夏大学, 2018.
- [23] Lichner S, Khazim H. The relationship of number of stems and their weight to yields of lucerne (*Medicago sativa* L.).

- Herbage, 1987, 57(3): 41.
- [24] Hoveland C S, Bouton J H, Newsome J F, *et al.* Alfalfa establishment as affected by land preparation and seeding rate. Research Report-Georgia Agricultural Experiment Stations, 1987, 42: 4.
- [25] Meng K, Li X Y, Jia Z Y, *et al.* Effects of planting density on the growth, yield and nutritional quality of alfalfa in central Inner Mongolia. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(7): 73–81.
孟凯, 李星月, 贾振宇, 等. 种植密度对内蒙古中部地区苜蓿生长, 饲草产量及营养品质影响. *草业学报*, 2019, 28(7): 73–81.
- [26] Liu D X, Liu G H, Yang Z M. The effects of planting and harvesting factors on hay yield and stem-leaf ratio of *Medicago sativa*. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(3): 48–57.
刘东霞, 刘贵河, 杨志敏. 种植及收获因子对紫花苜蓿干草产量和茎叶比的影响. *草业学报*, 2015, 24(3): 48–57.
- [27] Sun S X, Mao H M, Bi Y F. Study of the experiment of cultivation for alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Modern Agricultural Science and Technology*, 2009(11): 210–211.
孙仕仙, 毛华明, 毕玉芬. 苜蓿栽培试验研究. *现代农业科技*, 2009(11): 210–211.
- [28] Sha B P, Xie Y Z, Gao X Q, *et al.* Effects of coupling of drip irrigation water and fertilizer on yield and quality of alfalfa in the Yellow River irrigation district. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(2): 102–114.
沙栢平, 谢应忠, 高雪芹, 等. 地下滴灌水肥耦合对紫花苜蓿草产量及品质的影响. *草业学报*, 2021, 30(2): 102–114.
- [29] Kazemi M, Tahmasbi A M, Naserian A A, *et al.* Potential nutritive value of some forage species used as ruminants feed in Iran. *African Journal of Biotechnology*, 2012(11): 12110–12117.
- [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.
- [31] Lloveras J, Chocarro C, Freixes O, *et al.* Yield, yield components, and forage nutritive value of alfalfa as affected by seeding rate under irrigated conditions. *Agronomy Journal*, 2008, 100(1): 191–197.
- [32] Miao X R, Sun Y M, Yu L, *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus fertilizer rate on hay yield and nutritional quality of alfalfa under drip irrigation. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(9): 55–66.
苗晓茸, 孙艳梅, 于磊, 等. 氮磷互作对不同茬次滴灌苜蓿生产性能及营养品质的影响. *草业学报*, 2019, 28(9): 55–66.