

DOI: 10.11686/cyxb2025217

http://cyxb.magtech.com.cn

项凌飞, 张峰举, 李跃, 等. 不同行距和播量对盐碱地湖南稷子饲草及种子产量和质量的影响. 草业学报, 2026, 35(5): 126—138.

XIANG Ling-fei, ZHANG Feng-ju, LI Yue, et al. Effects of varied row spacings and sowing rates on forage and seed yield and quality of *Echinochloa frumentacea* in saline-alkali land. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(5): 126—138.

不同行距和播量对盐碱地湖南稷子饲草及种子产量和质量的影响

项凌飞¹, 张峰举², 李跃³, 王学琴⁴, 刘金龙⁵, 马巧利^{1*}

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学生态环境学院, 宁夏 银川 750021; 3. 中国农业大学草业科学与技术学院, 北京 100191; 4. 宁夏科学技术发展战略和信息研究所, 宁夏 银川 750021; 5. 宁夏千叶青农业科技发展有限公司, 宁夏 平罗 753400)

摘要: 科学合理的种植密度是提升禾本科牧草生产效益的关键措施。然而, 在宁夏银北盐碱地区, 湖南稷子的适宜行距与播量配置及其对产量与质量的影响尚不明确。本研究采用双因素裂区试验设计, 设置5个行距水平(20、30、40、50和60 cm)和3个播量水平(7.50、11.25和15.00 kg·hm⁻²), 探究其对饲草和种子产量及质量的影响, 为盐碱地牧草种植的精准管理提供科学依据。结果表明: 行距对湖南稷子鲜草产量有极显著影响($P < 0.01$), 在H₁D₂(行距20 cm、播量11.25 kg·hm⁻²)处理下鲜草产量最高, 为36129.17 kg·hm⁻²; 种子产量在H₃D₁(行距60 cm、播量7.50 kg·hm⁻²)处理下最高, 达1631.95 kg·hm⁻²。H₃D₁(行距40 cm、播量7.50 kg·hm⁻²)处理的发芽势、发芽指数和活力指数最高, 表明该处理下种子质量最优。行距对种子的小穗数、穗重、穗长和发芽势均有极显著影响($P < 0.01$), 而播量对实际种子产量、发芽率和发芽势有极显著影响($P < 0.01$), 行距和播量的交互作用对实际种子产量以及种子的各项指标均产生极显著影响($P < 0.01$)。相关性分析显示, 行距与穗重、总穗数呈极显著正相关($P < 0.01$), 与鲜草产量呈极显著负相关($P < 0.01$); 通径分析表明, 总穗数对种子产量的直接贡献最大。主成分分析结果表明, H₃D₁处理的综合得分最高。因此, 为实现盐碱地湖南稷子饲草和种子的高产, 建议鲜草生产采用窄行距(20 cm)和中等播量(11.25 kg·hm⁻²), 种子生产则以宽行距(60 cm)和低播量(7.50 kg·hm⁻²)为宜。

关键词: 湖南稷子; 行距; 播量; 种子产量; 种子质量; 通径分析

Effects of varied row spacings and sowing rates on forage and seed yield and quality of *Echinochloa frumentacea* in saline-alkali land

XIANG Ling-fei¹, ZHANG Feng-ju², LI Yue³, WANG Xue-qin⁴, LIU Jin-long⁵, MA Qiao-li^{1*}

1. College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. College of Ecological Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 3. College of Grassland Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100191, China; 4. Ningxia Institute of Science and Technology Development Strategy and Information, Yinchuan 750021, China; 5. Ningxia Qianyeqing Agricultural Science and Technology Development Co., Ltd., Pingluo 753400, China

Abstract: A scientifically based and rational planting density is a key measure to improve the production efficiency of Poaceae forage. The aim of this study, therefore, was to determine the optimal row spacing and seeding rate for *Echinochloa frumentacea* in saline-alkali land in Yinbei, Ningxia, and to determine the impacts of these factors on

收稿日期: 2025-05-29; 改回日期: 2025-07-21

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFD1900603), 宁夏回族自治区重点研发计划(2023BCF01012, 2022BDE92070)和宁夏回族自治区自然科学基金项目(2023AAC03729)资助。

作者简介: 项凌飞(1998—), 男, 宁夏盐池人, 在读硕士。E-mail: xlf_waooo@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: mql_2008@126.com

yield and quality. We conducted a field experiment with a split-plot experimental design with five row spacings (20, 30, 40, 50, and 60 cm; designated as H₁–H₅) and three sowing rates (7.50, 11.25, and 15.00 kg·ha⁻¹; designated as D₁–D₃). The results show that row spacing exerted a highly significant influence on the fresh yield of *E. frumentacea* ($P<0.01$), with the highest yield of 36129.17 kg·ha⁻¹ in the H₁D₂ treatment (row spacing 20 cm, sowing rate 11.25 kg·ha⁻¹); and the highest seed yield of 1631.95 kg·ha⁻¹ in the H₅D₁ treatment (row spacing 60 cm, sowing rate 7.50 kg·ha⁻¹). In terms of seed quality, the best results (highest germination potential, germination index, and vigor index) were in the H₃D₁ treatment (row spacing 40 cm, sowing rate 7.50 kg·ha⁻¹). Row spacing had an extremely significant effect on the spikelet number, spike weight, spike length, and germination potential of seeds ($P<0.01$), whereas the sowing rate had an extremely significant effect on actual seed yield, germination rate, and germination potential ($P<0.01$). The row spacing×sowing rate interaction was highly significant for both seed production and quality parameters ($P<0.01$). Correlation analysis showed that row spacing was extremely significantly positively correlated with spike weight and total spike number ($P<0.01$), and extremely significantly negatively correlated with fresh forage yield ($P<0.01$). A Path analysis indicated that the total spike number made the largest direct contribution to seed yield. In a principal component analysis, the H₅D₁ treatment had the highest score. Therefore, to achieve high yields of forage and seeds of *E. frumentacea* in saline-alkali land, it is recommended to use narrow row spacing (20 cm) and a medium sowing rate (11.25 kg·ha⁻¹) for forage production, and wide row spacing (60 cm) and a low sowing rate (7.50 kg·ha⁻¹) for seed production. These findings provide scientific evidence for the precise management of forage cultivation in saline-alkali land.

Key words: *Echinochloa frumentacea*; row spacing; sowing rate; seed yield; seed quality; Path analysis

近年来,随着畜牧业的规模化和集约化发展,优质饲草资源短缺已成为制约我国畜牧业可持续发展的关键因素之一^[1-2]。宁夏地区作为我国西北重要的畜牧业基地,饲草供应不足问题尤为突出,成为制约当地肉牛、奶牛等草食畜种发展的核心问题^[3-4]。宁夏引黄灌区是我国西北地区重要的饲草主产区,但该区域尤其是银北地区,土壤盐碱化程度高、地力下降,严重制约了饲草产量和品质的提升^[5]。因此,加快盐碱地的生态修复与资源高效利用,提升草地产出水平,已成为保障区域畜牧业发展和国家粮食安全的重要任务。

湖南稷子(*Echinochloa frumentacea*)为一年生禾本科牧草,具有广泛的适应性和较强的抗逆性,能够在含盐量为0.6%、pH为9.3的盐碱地上正常生长,并具有较高的保苗率^[6]。湖南稷子不仅作为高产优质草料在农业中广泛应用,还对盐碱地改良具有重要作用。研究表明,其在弃耕盐碱荒地种植2~3年后,可显著降低土壤中的全盐含量和碱化程度,改善土壤的物理性状,为后续种植其他作物创造有利条件^[7-9]。因此,湖南稷子被广泛应用于宁夏、内蒙古、甘肃等盐碱化地区的生态修复和饲草生产中^[9]。

当前,在盐碱地发展牧草种植面临的主要问题之一,是如何通过合理的田间管理措施提升牧草的产量和种子质量。研究表明,种植密度即行距与播量的合理配置,是影响牧草生长发育、光热资源利用率以及产量形成的重要因素,合理的种植密度可有效提高作物对水分、光照和土壤养分的竞争能力,从而实现生物量和种子产量的协同提升^[10]。反之,当行距或播量设置不当时,易造成光能利用不足、田间通风透光性差和植株间竞争加剧等问题,从而影响饲草的生长发育和种子产量^[11]。现有研究表明,不同的行距和播种量对牧草的生长表现、生物量以及种子产量构成因子具有显著影响。郑春风等^[12]在研究箭筈豌豆(*Vicia sativa*)时发现,不同播量和行距配置对箭筈豌豆的产量影响显著,种子产量在播量26.25 kg·hm⁻²、行距30 cm时最优,达到3753 kg·hm⁻²,鲜草和秸秆产量在播量为33.75 kg·hm⁻²、行距20 cm时最高;武慧娟等^[13]则指出,甘肃红豆草(*Onobrychis viciaefolia*)产量以行距60 cm、播种量22.5 kg·hm⁻²组合时最高,种子产量主要受千粒重、分枝数、荚果重等因素影响;刘凯强等^[14]研究表明,‘青燕1号’燕麦(*Avena sativa*)在播量为200~300 kg·hm⁻²、行距为15~20 cm时,其有效分蘖数、穗数和

千粒重均达到最佳,从而提高了种子和秸秆产量。然而,关于湖南稷子在盐碱地条件下的种植密度与行距的具体影响研究未见相关报道。因此,本研究旨在探索行距与播量对湖南稷子饲草及种子产量、质量的影响规律,揭示湖南稷子在盐碱地条件下的生长、产量及种子质量的关键调控因素,为盐碱地牧草种植的精准管理提供科学指导和技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

本试验于2024年在宁夏平罗县高庄乡千叶青农业科技发展有限公司盐碱地草畜一体化试验基地进行,地理坐标(东经105°57',北纬38°36'),海拔1100 m,样区为中温带半干旱荒漠性气候,年平均降水量176.7 mm,年平均气温9.9℃,主要集中在6—9月,年蒸发量1825 mm左右,无霜期171 d,日照时数3008.6 h,平均霜冻期为194.6 d。试验地土壤为灌淤土,全盐含量为1.07 g·kg⁻¹,电导率为4.6 dS·m⁻¹。土壤pH为8.1,有机质含量为17.62 g·kg⁻¹,全氮含量为0.66 g·kg⁻¹,碱解氮含量为54.25 mg·kg⁻¹,速效钾含量为75.65 mg·kg⁻¹,速效磷含量为24.25 mg·kg⁻¹,全磷含量为1.22 g·kg⁻¹,全钾含量为14.11 g·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验材料选用湖南稷子品种‘海子一号’,由宁夏千叶青农业科技发展有限公司提供,其发芽率不低于85%。试验采用双因素裂区设计,共设行距(H)和播种量(D)两个因素,H因素设H₁(20 cm)、H₂(30 cm)、H₃(40 cm)、H₄(50 cm)、H₅(60 cm)5个水平,D因素设D₁(7.50 kg·hm⁻²)、D₂(11.25 kg·hm⁻²)、D₃(15.00 kg·hm⁻²)3个水平。共15个处理组合,每个处理设3个重复,共45个小区,每个小区18 m²(3 m×6 m)。于2024年4月18日播种,采用人工开沟条播,播种深度3~5 cm,试验地周围1 m种植保护行,试验期间及时清除杂草。生育期内灌水两次:第一次在抽穗期(7月11日),灌水量120 mm;第二次在灌浆期(8月15日),灌水量150 mm,乳熟期(9月21日)进行产草量和种子产量的测定。

1.3 主要指标及测定方法

1.3.1 农艺性状 株高:每个小区随机选取10株,用卷尺测量湖南稷子基部至顶端的垂直高度,取平均值。茎粗:距地面5 cm处,用游标卡尺测量茎秆直径,每个小区测量10株,取平均值。鲜草产量:每个小区选取6个1 m样段,刈割留茬5 cm称鲜重,取平均值。叶面积指数:于乳熟期采用TOP-1300植物冠层分析系统(浙江托普云农科技股份有限公司),在各试验小区随机选取3个观测点位进行冠层扫描并对图像进行分析,以3次测定结果的均值作为该小区湖南稷子的叶面积指数。

1.3.2 种子产量相关性状的测定 小穗数:每小区随机选取生殖枝10株,统计单枝小穗数,取平均值。穗长:每小区随机选取生殖枝3个,测量10个穗长,取平均值。穗重与总穗数:每小区6个1 m样段剪穗称重,同步计数总穗数。千粒重:种子成熟后,每个小区选取净种子1000粒称重。种子产量:完熟期每小区刈割6条长势均匀一致的1 m样段,晾干脱粒后人工清选称重。

1.3.3 种子质量的测定 从各处理组收获的湖南稷子种子中随机选取净种子50粒,采用5% NaClO溶液消毒10 min后,用蒸馏水充分漂洗3次以去除残留消毒剂。将种子均匀分布于9 cm培养皿(内置双层无菌滤纸)中,定量添加蒸馏水至滤纸湿润。各处理设置3个重复,置于智能人工气候箱(HYR-500D-4,陕西华屹仪器有限公司)中培养,昼夜变温模式(昼/夜25℃/15℃),光周期[光/暗,16 h/8 h(光照强度5000 lx)],相对湿度60%。以胚根突破种皮为有效发芽标准,每日定时记录发芽数至连续3 d无新增发芽。试验完成后,随机选取10株幼苗,利用精度为0.01 cm的游标卡尺测量胚芽的长度。相关指标计算公式如下:

$$\text{发芽势(germination potential, \%)} = (\text{第4天发芽种子数} / \text{供试种子数}) \times 100$$

$$\text{发芽率(germination rate, \%)} = (\text{第7天发芽种子数} / \text{供试种子数}) \times 100$$

$$\text{发芽指数(germination index, GI)} = \sum \left(\frac{G}{D} \right)$$

式中:G为逐日发芽数;D为相应的发芽天数。

$$\text{活力指数 (vigor index)} = GI \times M$$

式中: M 为平均胚芽长。

1.4 数据处理

利用 Microsoft Excel 2019 进行数据整理, 采用 Origin 2024 作图, 使用 SPSS 27.0 对不同播种密度处理的原始数据进行显著性差异分析、双因素方差分析、多元回归及通径分析。

2 结果与分析

2.1 不同播量和行距对湖南稷子农艺性状的影响

行距对湖南稷子的鲜草产量有极显著影响 ($P < 0.01$), 对其他生长指标影响不显著 ($P > 0.05$), 播量、行距和播量之间的交互作用对湖南稷子的农艺指标均无显著影响 (表 1)。在不同行距和播量处理下, H_5D_1 处理的株高最高, 与 H_1D_1 、 H_1D_3 和 H_2D_1 差异显著 ($P < 0.05$); H_2D_1 处理的株高最低, 为 1.29 m, 较 H_5D_1 (1.58 m) 处理降低了 18.35%。 H_3D_3 处理的茎粗表现最佳, 但与部分其他处理的差异不显著 ($P > 0.05$)。鲜草产量在 H_1D_2 处理下达到最大值, 为 $36129.17 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较最低处理 H_3D_3 ($18027.53 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 提高 100.41%。各处理中, H_1D_3 的叶面积指数最高, 显著高于 H_3D_2 和 H_4D_3 处理 ($P < 0.05$)。

表 1 行距和播量对湖南稷子农艺性状的影响

Table 1 Effects of row spacing and seeding rate on agronomic traits of *E. frumentacea*

行距 Rowing spacing	播量 Sowing rate	株高 Plant height (m)	茎粗 Stem diameter (mm)	鲜草产量 Fresh yield ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	叶面积指数 Leaf area index
H_1	D_1	$1.33 \pm 0.13\text{bcd}$	$4.72 \pm 0.69\text{b}$	$27791.67 \pm 1470.60\text{abcd}$	$0.96 \pm 0.06\text{b}$
	D_2	$1.43 \pm 0.15\text{abcd}$	$5.39 \pm 1.15\text{ab}$	$36129.17 \pm 7555.04\text{a}$	$1.01 \pm 0.05\text{ab}$
	D_3	$1.32 \pm 0.17\text{cd}$	$4.83 \pm 1.14\text{b}$	$32516.25 \pm 3820.72\text{ab}$	$1.16 \pm 0.07\text{a}$
H_2	D_1	$1.29 \pm 0.15\text{d}$	$4.75 \pm 1.10\text{b}$	$24271.39 \pm 2981.76\text{abcd}$	$1.01 \pm 0.04\text{ab}$
	D_2	$1.52 \pm 0.24\text{abcd}$	$5.01 \pm 1.00\text{ab}$	$31145.19 \pm 4965.34\text{abc}$	$1.02 \pm 0.07\text{ab}$
	D_3	$1.51 \pm 0.15\text{abcd}$	$5.46 \pm 0.86\text{ab}$	$29459.17 \pm 1667.50\text{abcd}$	$1.06 \pm 0.07\text{ab}$
H_3	D_1	$1.53 \pm 0.28\text{abc}$	$5.43 \pm 1.41\text{ab}$	$22955.92 \pm 2021.74\text{bcd}$	$1.05 \pm 0.07\text{ab}$
	D_2	$1.36 \pm 0.20\text{abcd}$	$4.56 \pm 1.05\text{b}$	$21399.58 \pm 3391.95\text{bcd}$	$0.76 \pm 0.07\text{d}$
	D_3	$1.46 \pm 0.19\text{abcd}$	$6.03 \pm 1.06\text{a}$	$18027.53 \pm 3652.23\text{d}$	$0.95 \pm 0.03\text{bc}$
H_4	D_1	$1.39 \pm 0.12\text{abcd}$	$5.00 \pm 1.11\text{ab}$	$19231.83 \pm 1747.12\text{cd}$	$0.90 \pm 0.05\text{bcd}$
	D_2	$1.47 \pm 0.24\text{abcd}$	$4.85 \pm 0.82\text{b}$	$25901.83 \pm 4565.96\text{abcd}$	$1.00 \pm 0.04\text{ab}$
	D_3	$1.45 \pm 0.29\text{abcd}$	$5.36 \pm 0.90\text{ab}$	$19231.83 \pm 4058.73\text{cd}$	$0.79 \pm 0.05\text{cd}$
H_5	D_1	$1.58 \pm 0.18\text{a}$	$5.21 \pm 0.78\text{ab}$	$23159.72 \pm 2598.85\text{bcd}$	$1.04 \pm 0.04\text{ab}$
	D_2	$1.56 \pm 0.35\text{ab}$	$5.12 \pm 1.24\text{ab}$	$23067.08 \pm 4008.17\text{bcd}$	$0.95 \pm 0.05\text{bc}$
	D_3	$1.38 \pm 0.15\text{abcd}$	$4.93 \pm 0.74\text{ab}$	$20565.83 \pm 2048.56\text{bcd}$	$1.05 \pm 0.03\text{ab}$

显著性检验 (F 值) Significance test (F value)

行距 Rowing spacing (H)	0.68NS	0.44NS	5.43**	2.53NS
播量 Sowing rate (D)	0.27NS	0.44NS	1.78NS	0.70NS
行距 \times 播量 H \times D	0.79NS	0.90NS	0.53NS	2.04NS

H_1 至 H_5 代表 5 种行距处理水平, D_1 至 D_3 分别对应 3 个播量设置; 同列不同小写字母表示处理间存在显著性差异 ($P < 0.05$)。 H_1 至 H_5 represent five row spacing treatment levels, D_1 to D_3 correspond to three seeding rate settings; different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). **表示行距、播量以及行距 \times 播量对各指标具有极显著影响 ($P < 0.01$); NS 表示无显著影响 ($P > 0.05$)。下同。 ** indicates that the influence of H, D and H \times D factors on each index is extremely significant ($P < 0.01$). NS indicates no significant influence ($P > 0.05$). The same below.

2.2 行距与播量对湖南稷子种子产量及其构成因子的影响

方差分析结果(表2)表明,行距对湖南稷子的小穗数、穗重和穗长有极显著影响($P<0.01$),而对总穗数和千粒重的影响不显著($P>0.05$)。播量对各项产量构成指标的影响均不显著($P>0.05$)。行距和播量的交互作用对穗长有极显著影响($P<0.01$),而对其他指标影响不显著($P>0.05$)。

不同行距和播量组合处理下小穗数、穗重、总穗数以及穗长均表现出明显差异(图1),千粒重无显著差异。 H_3D_3 处理的小穗数(25.33)较最低处理 H_1D_3 (13.78)提高了83.82%。总穗数在 H_3D_1 处理下最大,为271.33,最小值则出现在 H_2D_3 处理,为141.00,二者相差130.33。 H_3D_1 处理的穗重最大($0.71\text{ kg}\cdot\text{株}^{-1}$),与 H_1 、 H_2 、 H_3 处理均存在显著差异,较最低处理 H_1D_2 ($0.17\text{ kg}\cdot\text{株}^{-1}$)提高了317.65%。 H_3D_3 处理的穗长值最大,为14.38 cm, H_3D_2 处理次之,为13.89 cm,较 H_3D_2 (8.92 cm)处理分别显著提高了61.21%、55.72%。千粒重值为3.38~3.80 g,在 H_1D_1 处理下最高, H_2D_3 处理下最低,二者相差0.42 g。

表2 行距与播量对湖南稷子种子产量相关因子影响的方差分析

Table 2 Variance analysis of the effects of row spacing and seeding rate on seed yield related factors of *E. frumentacea*

处理	小穗数	总穗数	穗重	穗长	千粒重
Treatment	Spikelet number	Total spike number	Spike weight	Spike length	Thousand-grain weight
行距H	5.428**	1.702NS	10.760**	9.296**	0.218NS
播量D	1.776NS	0.366NS	0.839NS	0.734NS	0.561NS
行距×播量H×D	0.53NS	0.750NS	0.454NS	9.445**	0.776NS

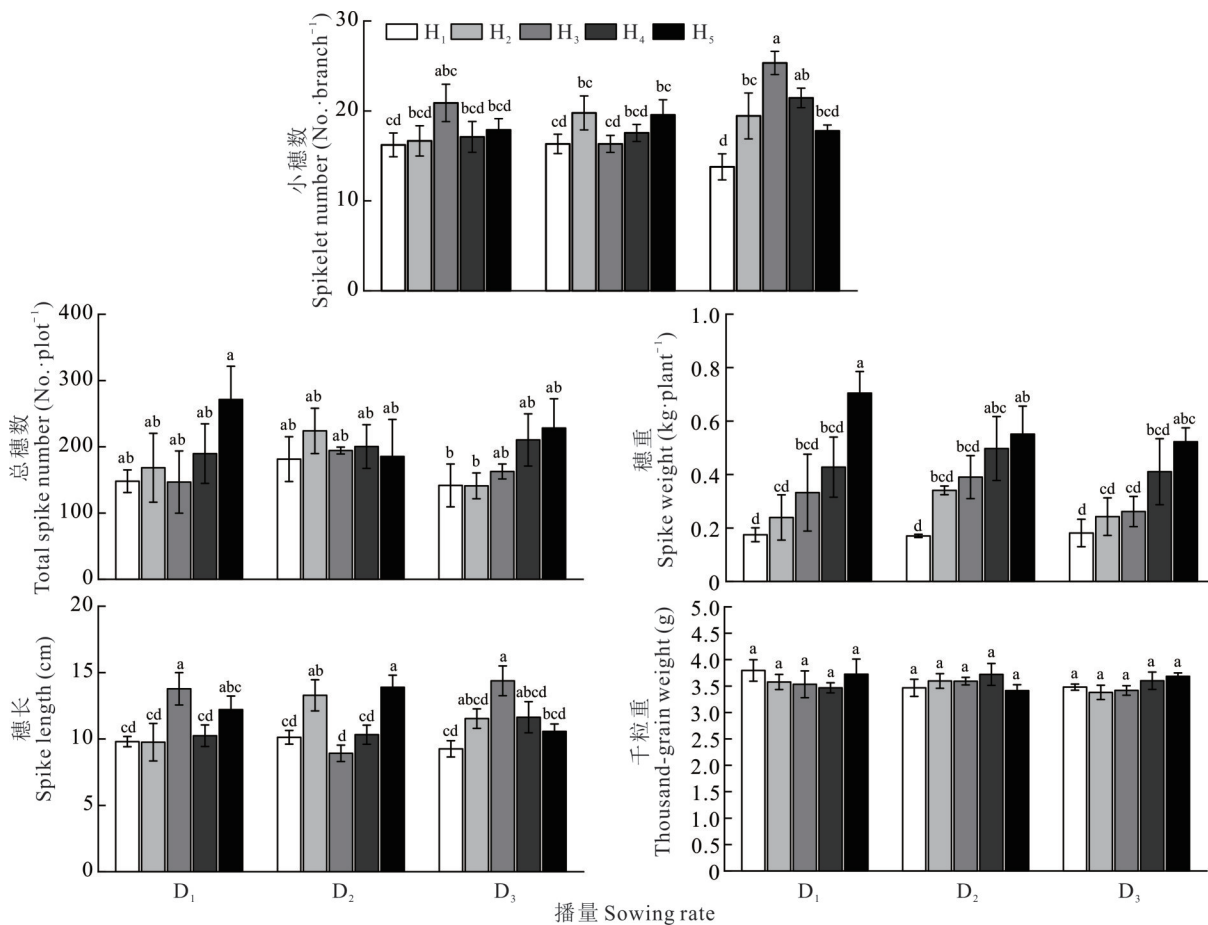


图1 不同行距与播量对湖南稷子产量构成因子的影响

Fig. 1 Effects of different row spacing and sowing rate on yield component factors of *E. frumentacea*

不同小写字母表示不同行距、播量处理间差异显著($P<0.05$)。下同。Different lowercase letters indicate significant differences among different row spacing and sowing rate treatments ($P<0.05$). The same below.

2.3 行距和播量对湖南稷子种子产量的影响

方差分析结果表明,播量以及播量与行距的交互作用对湖南稷子的实际种子产量有极显著影响($P < 0.01$),行距则影响不显著(表 3)。其中 H_5D_1 处理实际种子产量最高,为 $1631.95 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, H_2D_1 处理最低,为 $1077.91 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,二者相差 $554.04 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。在同一播量水平上,随行距的增加实际种子产量无明显变化规律;在同一行距水平上随播量的增加, H_1 、 H_2 、 H_3 和 H_4 处理的实际种子产量呈先增加后降低的趋势, H_5 处理呈降低趋势。另外,在 D_3 处理下,湖南稷子的实际种子产量较 H_5D_1 处理显著降低($P < 0.05$),表明过高的种植密度不利于种子高产(图 2)。

表 3 不同行距与播量对湖南稷子种子产量和质量影响的方差分析

Table 3 Variance analysis of effects of different row spacing and seeding rate on seed yield and quality of *E. frumentacea*

处理 Treatment	实际种子产量 Actual seed yield	发芽率 Germination rate	发芽势 Germination potential	发芽指数 Germination index	活力指数 Vigour index
行距 H	1.046NS	3.492*	8.498**	1.206NS	1.840NS
播量 D	9.794**	13.364**	11.676**	5.326*	3.555*
行距×播量 H×D	6.611**	5.827**	16.411**	3.961**	9.132**

表示行距、播量以及行距×播量对各指标具有显著影响($P < 0.05$)。 indicates that the influence of H, D and H×D factors on each index is significant ($P < 0.05$).

2.4 行距和播量对湖南稷子种子质量的影响

方差分析可知(表 3),行距对发芽势有极显著影响($P < 0.01$),对发芽率有显著影响($P < 0.05$),对发芽指数和活力指数影响不显著($P > 0.05$);播量对发芽率和发芽势均有极显著影响($P < 0.01$),对发芽指数和活力指数有显著影响($P < 0.05$);行距和播量的交互作用对所有种子产量和质量指标均有极显著影响($P < 0.01$)。

行距与播量的交互效应对湖南稷子种子质量指标具有显著的调控作用(图 3), H_2D_3 处理的发芽率最高,为 80.33%,较最低处理(H_2D_1 和 H_4D_1)提高了 82.57%; H_3D_1 处理的发芽势与 H_1D_3 、 H_2D_2 、 H_3D_2 和 H_3D_3 处理存在显著差异($P < 0.05$);同时,该处理的发芽指数和活力指数分别较最低值(H_2D_1 处理)提高 46.71% 和 59.24%。

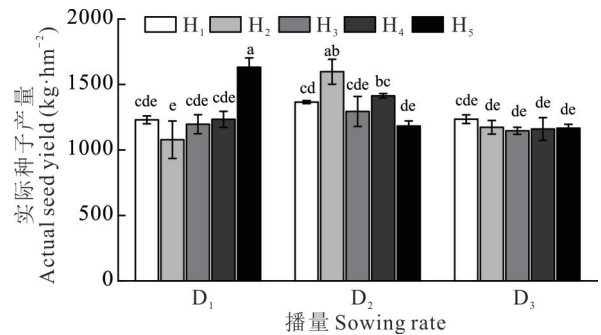


图 2 行距和播量对湖南稷子实际种子产量的影响

Fig. 2 Effects of row spacing and sowing rate on actual seed yield of *E. frumentacea*

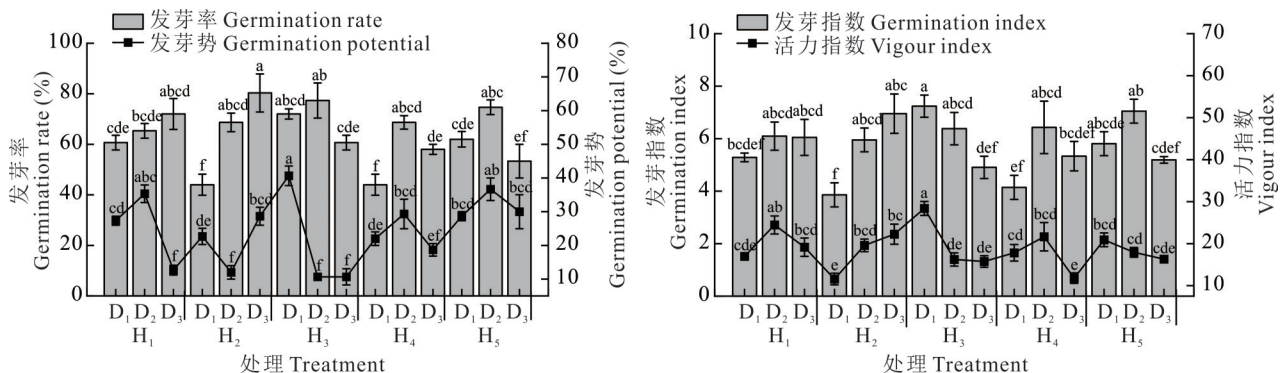


图 3 不同处理下湖南稷子的种子质量

Fig. 3 Seed quality of *E. frumentacea* under different treatments

2.5 行距和播量对湖南稷子种子产量及相关性状的影响

由相关性分析结果(图4)可知,行距与穗重、总穗数呈极显著正相关($P < 0.01$),与鲜草产量呈极显著负相关($P < 0.01$);播量与其他各指标相关性均不显著($P > 0.05$);实际种子产量与总穗数呈极显著正相关($P < 0.01$);株高与穗长呈极显著正相关($P < 0.01$),与茎粗、小穗数、穗重、发芽指数、活力指数之间呈显著正相关($P < 0.05$);鲜草产量与叶面积指数呈显著正相关($P < 0.05$),与穗重呈显著负相关($P < 0.05$);发芽率与发芽指数呈极显著正相关($P < 0.01$),与活力指数呈显著正相关($P < 0.05$)。

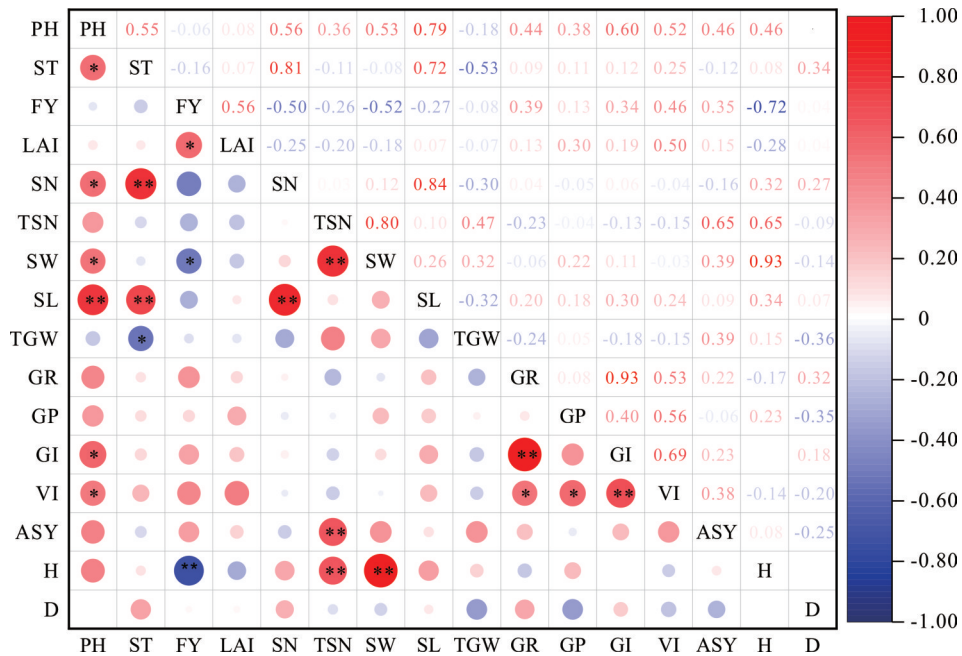


图4 行距和播量对湖南稷子农艺性状、产量及种子质量的相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis of row spacing and sowing rate on agronomic traits, yield and seed quality of *E. frumentacea*

PH: 株高 Plant height; ST: 茎粗 Stem diameter; FY: 鲜草产量 Fresh yield; LAI: 叶面积指数 Leaf area index; SN: 小穗数 Spikelet number; TSN: 总穗数 Total spike number; SW: 穗重 Spike weight; SL: 穗长 Spike length; TGW: 千粒重 Thousand-grain weight; GR: 发芽率 Germination rate; GP: 发芽势 Germination potential; GI: 发芽指数 Germination index; VI: 活力指数 Vigour index; ASY: 实际种子产量 Actual seed yield; H: 行距 Row spacing; D: 播量 Sowing rate. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

2.6 湖南稷子种子产量与构成因子的多元逐步回归及通径分析

基于逐步回归法^[15],构建湖南稷子产量构成要素[小穗数(X_1)、总穗数(X_2)、穗重(X_3)、穗长(X_4)和千粒重(X_5)]与实际种子产量的数学模型。得到最优回归方程: $Y = 18.058 - 46.154X_1 + 4.166X_2 - 553.822X_3 + 76.437X_4 + 186.824X_5$ ($F = 3.467, R^2 = 0.658, P = 0.051$),结果显示,其他条件不变,湖南稷子的总穗数(X_2)、穗长(X_4)和千粒重(X_5)每增加一个单位时,种子产量就分别提升4.166、76.437和186.824个单位;小穗数(X_1)和穗重(X_3)每增加一个单位时,种子产量分别减少46.154和553.822个单位。

对种子产量与产量构成因子进行通径分析(表4),探究各性状对种子产量的直接影响和间接影响。经直接通径分析得出,影响湖南稷子种子产量的各构成因素直接作用大小依次为总穗数(X_2) > 穗长(X_4) > 千粒重(X_5) > 穗重(X_3) > 小穗数(X_1),其中,总穗数直接作用大于间接作用之和,其次是穗长。因此,总穗数是影响湖南稷子种子产量的首要因子。在实际生产中,建议采取合适的栽培措施以增加总穗数,进而有效提升种子产量。

2.7 湖南稷子各生长指标、种子产量及质量性状的主成分分析

采用主成分分析法对湖南稷子的农艺性状、产量构成要素等参数进行综合评价。通过特征值 > 1 的原则确定了各主成分的方差贡献率及因子载荷(表5),可提取5个主成分,累积方差贡献率达到88.901%,解释了总体信息的88.901%。株高、茎粗、小穗数、穗长、发芽率、发芽指数、活力指数在主成分 I 中载荷较高且特征向量值均

表 4 湖南稷子种子产量与构成因素的通径分析

Table 4 Path analysis of seed yield and component factors of *E. frumentacea*

因子 Factor	相关系数 Correlation coefficient	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient					合计 Total
			$\rightarrow X_1$	$\rightarrow X_2$	$\rightarrow X_3$	$\rightarrow X_4$	$\rightarrow X_5$	
X_1	-0.155	-0.790		0.029	-0.067	0.717	-0.043	0.636
X_2	0.647	0.950	-0.024		-0.432	0.083	0.069	-0.304
X_3	0.393	-0.539	-0.098	0.077		0.222	0.046	0.247
X_4	0.859	0.850	-0.666	0.093	-0.141		-0.046	-0.760
X_5	0.387	0.146	0.233	0.448	-0.171	-0.270		0.240

$X_1 \sim X_5$ 分别表示小穗数、总穗数、穗重、穗长和千粒重。 $X_1 \sim X_5$ represent spikelet number, total spike number, spike weight, spike length, and thousand-grain weight, respectively.

表 5 各因子载荷值与主成分特征值和累积贡献率

Table 5 Loading values of each factor, principal component eigenvalue and accumulative contribution rate

项目 Items	主成分 Principal component				
	I	II	III	IV	V
株高 Plant height	0.914	-0.288	0.222	-0.016	0.026
茎粗 Stem diameter	0.629	-0.341	-0.521	0.173	0.271
鲜草产量 Fresh yield	0.134	0.855	0.112	-0.008	0.368
叶面积指数 Leaf area index	0.270	0.563	0.053	0.526	0.325
小穗数 Spikelet number	0.521	-0.666	-0.440	-0.042	0.114
总穗数 Total spike number	0.036	-0.537	0.771	0.007	0.189
穗重 Spike weight	0.239	-0.577	0.659	0.060	-0.256
穗长 Spike length	0.766	-0.471	-0.220	0.084	0.145
千粒重 Thousand-grain weight	-0.344	-0.088	0.703	0.100	-0.067
实际种子产量 Actual seed yield	0.307	0.050	0.776	-0.157	0.482
发芽率 Germination rate	0.629	0.441	0.022	-0.586	-0.167
发芽势 Germination potential	0.444	0.201	0.167	0.618	-0.532
发芽指数 Germination index	0.761	0.398	0.142	-0.338	-0.331
活力指数 Vigour index	0.716	0.504	0.162	0.197	-0.035
特征值 Eigenvalue	4.135	3.190	2.778	1.232	1.110
方差贡献率 Variance contribution rate (%)	29.536	22.789	19.843	8.803	7.930
累积贡献率 Accumulative contribution rate (%)	29.536	52.325	72.168	80.971	88.901

为正,千粒重在主成分 I 中特征向量值为负,表明株高较高、茎粗较粗、小穗数较多、穗长较长、发芽率、发芽指数和活力指数较高、千粒重较小的湖南稷子鲜草产量和实际种子产量较低。主成分 II 中叶面积指数、发芽指数、活力指数的载荷较高且特征向量为正,小穗数、总穗数、穗重、穗长载荷较高且特征向量为负,表明具有较高的叶面积指数、发芽指数和活力指数,较少的小穗数、总穗数,较低的穗重和较短的穗长,湖南稷子鲜草产量较高,实际种子产量较低。主成分 III 中总穗数、穗重、千粒重的载荷较高且特征向量为正,茎粗、小穗数的载荷较高且特征向量为负,表明总穗数较多、穗重较重、千粒重较高、茎粗细和小穗数较少的湖南稷子鲜草产量较低,实际种子产量较高。主成分 IV 中叶面积指数、发芽势的载荷较高且特征向量为正,发芽率、发芽指数的载荷较高且特征向量为负,表明叶面积指数高、发芽势高、发芽率和发芽指数较低的湖南稷子鲜草产量与实际种子产量均较低。主成分 V 中穗重、千粒重、发芽率、发芽指数和活力指数的特征向量为负,说明穗重轻、千粒重较小,发芽率、活力指数和发芽

指数低的湖南稷子鲜草产量与实际种子产量均较高。

根据主成分综合评价方法^[16],将原始数据进行标准化后导入SPSS软件建立综合评价模型,得出公因子 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 和 Y_5 , Y_1 中 H_3D_1 得分最高, Y_2 中 H_1D_3 得分最高, Y_3 中 H_5D_1 得分最高, Y_4 中 H_5D_3 得分最高, Y_5 中 H_2D_2 得分最高;代入 $Y=(29.536Y_1+22.789Y_2+19.843Y_3+8.803Y_4+7.930Y_5)/88.901$ 计算,得出不同综合得分, H_5D_1 得分最高(1.083),15个不同行距与播量的处理排名顺序为 $H_5D_1>H_3D_1>H_1D_2>H_2D_2>H_2D_3>H_4D_2>H_5D_2>H_1D_3>H_1D_1>H_5D_3>H_3D_2>H_4D_1>H_3D_3>H_4D_3>H_2D_1$ (表6)。

表6 不同处理公因子值及综合排名

Table 6 Common factor values and comprehensive ranking of different treatments

处理 Treatment	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y	排名 Ranking
H_1D_1	-2.243	1.426	0.149	0.263	-0.451	-0.361	9
H_1D_2	0.844	2.487	-0.147	0.705	0.695	1.017	3
H_1D_3	-1.342	3.386	-0.682	-0.500	0.874	0.298	8
H_2D_1	-3.678	-0.062	-1.049	1.259	0.144	-1.335	15
H_2D_2	1.235	-0.071	1.383	-1.026	2.306	0.805	4
H_2D_3	2.252	1.737	-1.737	-0.341	-0.223	0.752	5
H_3D_1	3.355	0.693	-0.924	1.022	-1.232	1.078	2
H_3D_2	-1.733	0.045	0.802	-2.953	-1.152	-0.780	11
H_3D_3	1.031	-2.789	-3.386	-0.239	1.393	-1.028	13
H_4D_1	-1.997	-1.316	-0.311	0.850	-0.048	-0.990	12
H_4D_2	0.432	0.552	2.043	-0.022	-0.522	0.692	6
H_4D_3	-0.831	-2.769	-0.669	-0.837	-0.359	-1.250	14
H_5D_1	1.589	-1.578	3.663	0.698	0.818	1.083	1
H_5D_2	2.396	-0.738	-0.239	-0.256	-1.600	0.386	7
H_5D_3	-1.311	-1.002	1.105	1.378	-0.644	-0.367	10

3 讨论

3.1 行距和播量对湖南稷子饲草生长指标的影响

调整行距和播种量是饲草生产中的主要栽培措施之一^[17],也是调节作物种植密度的关键方法^[18]。合理调控种植密度能够充分地利用水肥、光热、土壤养分等环境资源^[19],对盐碱地牧草生产力的提升具有显著效果。株高是评价饲草产量和生产状况的关键指标之一。有研究表明,行距显著影响‘和燕1号’燕麦的株高($P<0.05$),播量及播量和行距的交互作用对株高的影响均不显著,株高会随行距的加大而增高,其中30 cm行距处理下,不同播量处理的植株高度均较高^[11]。本研究表明, H_5D_1 处理下湖南稷子的株高显著高于 H_2D_1 处理,较宽行距下的株高增加,可能是由于植物对养分、水分、空间和光照的竞争较少,为作物的生长发育提供了更好的环境。这一结果与王旭成^[20]对沙芦草(*Agropyron mongolicum*)和无芒雀麦(*Bromus inermis*)的研究发现一致,即宽行距有利于植株的垂直生长。适度的种植密度可以优化植株的形态建成^[21],行距与播种量的配置对禾本科牧草的饲草产量影响显著。刘启林等^[22]的研究发现在高寒地区‘青牧1号’和‘青牧2号’老芒麦(*Elymus sibiricus*)的饲草产量在行距15 cm、播种量 $22.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,鲜草产量较高,分别达12668.16和12180.94 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,显著优于其他处理组合。本研究中也发现窄行距配合中等播量的配置显著提高了单位面积的鲜草产量,在 H_1D_2 处理(行距20 cm,播量 $11.25 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)达到峰值,为36129.17 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。当行距增大到40 cm以上时,鲜草产量明显下降,这可能是由于随着行距增大,单位面积内的植株密度降低,从而减少了群体生物量的积累,导致产量下降,说明湖南稷子对密植栽培具有较好的适应性。叶面积指数是衡量作物群体冠层结构合理性的关键指标。董立强等^[23]在辽宁中部

稻区种植主栽水稻(*Oryza sativa*)品种‘辽粳 401’时发现,随着种植密度的提高,与光能利用效率密切相关的叶面积指数呈现上升趋势,其中采用 25 cm 等行距密植方式可使叶面积指数达到最大值,从而实现高产目标。本研究中, H_1D_3 处理的叶面积指数达到最高(1.162),表明较低的植株间距、较高的种植密度可以增加群体的叶面积覆盖度,从而提高光能利用率,这一发现为优化湖南稷子的田间配置提供了重要依据。

3.2 行距和播量对湖南稷子产量组分的影响

行距与密度的合理配置是决定牧草光能利用、干物质积累及群体结构的关键措施,种植密度过高会导致植株地下根系分布不均,加剧个体间的营养竞争,从而使植株更易倒伏,最终导致种子产量下降;而种植密度过低则会使单位面积耕地的利用效率降低、杂草丛生,同时植株数量不足、光合作用弱,造成光热水肥浪费,同样引起种子产量的下降^[24-25]。因此,适宜的种植密度能够在平衡饲草的群体竞争与资源利用的同时获得较高的产量。Addisu 等^[26]的研究表明,当行距为 15 cm,播量为 $20 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,可实现苔麸(*Eragrostis tef*)种子产量的最大化;武慧娟等^[13]发现,红豆草在 60 cm 行距的种子产量显著高于 30 和 120 cm 行距($P<0.05$),而播种量对种子产量的影响相对较小。本研究得出,湖南稷子的种子产量在 H_3D_1 处理(行距 60 cm,播量 $7.50 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)下最高,为 $1631.95 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,说明宽行距低密度有利于生殖生长,这与鲜草生产的最佳配置形成鲜明对比。播量对产量构成因素的影响相对较弱,但交互作用分析表明,行距 \times 播量对穗长具有极显著影响($P<0.01$)。在 D_3 处理($15.00 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)下,种子产量普遍较低,可能是高播量通过增加湖南稷子的营养生长竞争而抑制生殖发育。这一现象与郑春风等^[12]对箭筈豌豆的研究结果部分吻合,但具体响应程度因物种和生境而异。

密度和行距显著影响饲草的群体结构及产量形成因子。田宏等^[27]发现江夏扁穗雀麦(*Bromus catharticus*)在 20~60 cm 行距梯度下,鲜草产量随行距增大而极显著降低($P<0.01$),而播量为 $7.5\sim 30.0 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,对鲜草产量的影响则相反;孟祥君等^[28]认为,不同行距对高寒地区饲用黑麦(*Secale cereale*)株高、穗长、穗粒重、千粒重和种子产量影响显著($P<0.05$),但对有效分蘖数和穗粒数影响不显著($P>0.05$)。本研究通过方差分析表明,行距对湖南稷子的小穗数、穗重和穗长具有极显著影响($P<0.01$),对总穗数和千粒重影响不显著($P>0.05$)。相关性分析显示,行距与穗重和总穗数呈极显著正相关,而与鲜草产量呈显著负相关。其中,行距与总穗数的关系与邵生荣等^[29]对苏丹草(*Sorghum sudanense*)的研究发现有所不同,可能与湖南稷子的生物学特性及盐碱地的特殊环境有关。多元回归与通径分析能够构建种子产量与各构成因素之间的关系模型,系统解析各因素对产量的直接及间接影响,为优化种子生产提供科学依据。如赖草(*Leymus secalinus*)的单穗粒数、单位面积生殖枝数、小穗数及千粒重均显著影响种子产量^[10];沙芦草的生殖枝数、种子数、小花数、穗长、千粒重和小穗数对种子产量直接作用和间接作用较大^[30];每花序的小穗数和每小穗的小花数对多年生黑麦草(*Lolium perenne*)的种子产量有显著直接影响^[31]。本研究发现,总穗数、穗长和千粒重对种子产量具有正向贡献,其中总穗数的直接通径系数最高,为 0.95,表明总穗数是影响种子产量的关键因素。这一发现与前人的研究结果有差异,可能与植物种类、地区特点、评估指标以及栽培密度配置方案的差异有关。综合主成分分析发现,产量组分与生长指标在主成分 III 中呈现明显分离,表明植株在营养生长与生殖生长阶段存在明显的资源竞争关系。基于此,实际生产中,建议根据目标(种子或鲜草)选择不同配置,种子生产需通过宽行距(60 cm)和低密度播种($7.50 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)以促进生殖枝分化,而鲜草生产需高密度种植以增强营养生长。

3.3 行距和播量对湖南稷子种子质量的影响

牧草种子质量的优劣直接影响牧草的产量和草牧业发展的水平^[32],种子的发芽率、发芽势、发芽指数以及活力指数,是评估种子质量的核心指标^[33]。华铄泽等^[24]研究表明,当行距为 20 cm,播量为 $5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,‘青海’草地早熟禾(*Poa pratensis* Qinghai)种子产量最高且质量最好;王琴等^[33]研究表明,无芒雀麦在行距 30 cm、播量 $20 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时发芽指标最优。行距显著影响发芽势、发芽率及发芽指数($P<0.05$ 或 $P<0.01$),播量仅显著影响发芽势和活力指数,行距与播量互作对发芽势有极显著影响($P<0.01$),对其他指标无显著作用。本研究发现, H_2D_3 处理(行距 30 cm,播量 $15.00 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)的发芽率高达 80.33%, H_3D_1 处理(行距 40 cm,播量 $7.50 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)的发芽势、发芽指数和活力指数均达到最高值,这表明适中的行距结合较低的播种量有利于种子活力的提升。行距

对湖南稷子的发芽势和发芽率有极显著或显著影响,播量对发芽率和发芽势均表现出极显著影响,行距和播量互作对所有的种子质量指标均产生了极显著影响($P < 0.01$)。主成分分析显示,种子质量指标在主成分 I 中与株高、穗长等形态指标具有较高的相关性,表明植株生长状况直接影响种子质量。综合来看,湖南稷子在 H_3D_1 处理下种子质量最优,因其在发芽势、发芽指数、活力指数等关键指标上表现出最佳的种子质量,且低播量+适中行距的组合更符合植株的生长需求,与形态指标(株高、穗长)高度相关,确保种子高产优质。

4 结论

宁夏银北地区盐碱地种植湖南稷子可根据利用方式不同选择相应的行距和密度配置,鲜草产量在行距 20 cm、播量 $11.25 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理下最高($36129.17 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$);种子产量在行距 60 cm、播量 $7.50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理下最高($1631.95 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$);种子质量方面,行距 40 cm、播量 $7.50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理最优,表现为发芽势、活力指数等指标显著提升。经主成分综合分析饲草产量、种子产量以及种子质量发现, H_5D_1 处理(行距 60 cm、播量 $7.50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 表现最佳,可为盐碱地湖南稷子种植提供科学依据。

参考文献 References:

- [1] He Z F, He C G, Wang F, *et al.* Analysis of production performance and quality of different types of forage sorghum. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(7): 1446–1453.
何振富, 贺春贵, 王斐, 等. 不同类型饲草高粱生产性能与饲用品质的差异分析. *草地学报*, 2021, 29(7): 1446–1453.
- [2] Jia X Y, Zhou J J, Su T T, *et al.* Effects of different cropping densities on the habitat of artificial *Caragana intermedia* in desert steppe. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(12): 4126–4136.
贾希洋, 周静静, 宿婷婷, 等. 平茬密度对荒漠草原人工柠条林间生境的影响. *生态学报*, 2020, 40(12): 4126–4136.
- [3] Ma X P, Du J M, He J L, *et al.* Adaptability of feed sorghum to the saline-alkali area of Yinbei, Ningxia. *Pratacultural Science*, 2025, 42(6): 1486–1495.
马雪鹏, 杜建民, 何建龙, 等. 饲用高粱在宁夏银北盐碱地区的适应性. *草业科学*, 2025, 42(6): 1486–1495.
- [4] Ma J P, Zhang Y Y, Wang T F, *et al.* Interspecific relationship and forage productivity effects in mixed sowings of *Sorghum bicolor* and *Dolichos lablab*. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(3): 111–122.
马江萍, 张译尹, 王腾飞, 等. 饲用高粱与拉巴豆混播对种间关系及草地生产力的影响. *草业学报*, 2025, 34(3): 111–122.
- [5] Sun Y, Zhang J H, Jia P P, *et al.* Spectral characteristics of different vegetations on saline-alkali land in the Northern Yinchuan Plain of Ningxia. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2020, 48(11): 143–154.
孙媛, 张俊华, 贾萍萍, 等. 宁夏银北盐碱地不同植被光谱特征研究. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(11): 143–154.
- [6] Jia X H, Zhang F J, Xie X W, *et al.* Effects of different nitrogen fertilizers on performance and nutrient uptake of *Echinochloa frumentacea* in saline-alkali land. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(1): 272–279.
贾晓辉, 张峰举, 谢小伟, 等. 施用不同氮肥对盐碱地湖南稷子生产性能以及养分吸收的影响. *草地学报*, 2023, 31(1): 272–279.
- [7] Lu A Q. Study on the saline-alkali tolerance and biological improvement effect of *Echinochloa frumentacea*. Yinchuan: Ningxia University, 2021.
陆安桥. 湖南稷子耐盐碱特性及生物改良效果研究. 银川: 宁夏大学, 2021.
- [8] Zhu K, Chen J Y, Li Y, *et al.* Research on the standard germination method of *Echinochloa frumentacea* seeds. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(3): 903–913.
朱楷, 陈镜聿, 李跃, 等. 湖南稷子种子标准发芽方法研究. *草地学报*, 2023, 31(3): 903–913.
- [9] Wang X Q. Root response mechanism of *Echinochloa frumentacea* under saline-alkali stress and its improvement effect of saline-alkali soil. Yinchuan: Ningxia University, 2022.
王学琴. 湖南稷子根系对盐碱胁迫的响应机理及其改良盐碱地效果研究. 银川: 宁夏大学, 2022.
- [10] Du L X, Liao M W, Qin S L, *et al.* Effects of nitrogen application rate and row spacing on seed yield and quality of *Leymus secalinus*. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(3): 968–976.
杜利霞, 廖明旺, 秦士利, 等. 施氮量与行距对赖草种子产量及质量的影响. *草地学报*, 2024, 32(3): 968–976.
- [11] Wu H J, Zhang R, Zhang S P, *et al.* Sowing rates and row spacing of *Avena sativa* 'Heyan No. 1' influence agronomic

- characters and yield. *Pratacultural Science*, 2020, 37(1): 106–116.
- 武慧娟, 张榕, 张少平, 等. ‘和燕 1 号’农艺性状和产量对不同播量和行距的响应. *草业科学*, 2020, 37(1): 106–116.
- [12] Zheng C F, Liu C Z, Zhang J S, *et al.* Effects of different sowing rates and row spacings on agronomic traits, seed setting traits and yield of *Vicia sativa*. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2024(6): 215–221.
- 郑春风, 刘春增, 张济世, 等. 播量和行距对箭筈豌豆农艺结实性状及产量的影响. *中国土壤与肥料*, 2024(6): 215–221.
- [13] Wu H J, Zhang R, Geng X L, *et al.* Effects of sowing rate and row spacing on the seed yield and yield component traits of *Onobrychis viciaefolia* ‘Gansu’. *Pratacultural Science*, 2023, 40(12): 3084–3094.
- 武慧娟, 张榕, 耿小丽, 等. 播种量和行距对甘肃红豆草种子产量及产量构成因素的影响. *草业科学*, 2023, 40(12): 3084–3094.
- [14] Liu K Q, Liu W H, Wei X X, *et al.* Effect of different sowing rates and row spacings on seed yield of *Avena sativa* cv. Qingyan No. 1. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(2): 82–91.
- 刘凯强, 刘文辉, 魏小星, 等. 不同播量和行距对‘青燕 1 号’燕麦种子产量的影响. *草业学报*, 2020, 29(2): 82–91.
- [15] Li X Y, Yu S Y, Huang W, *et al.* Effect of film mulching on alfalfa seed yield and components in arid area of Ningxia. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2022, 50(2): 67–74.
- 李小云, 余淑艳, 黄薇, 等. 覆膜对宁夏干旱区苜蓿种子产量及构成因素的影响. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(2): 67–74.
- [16] Wang B, Li M Y, Wang X P, *et al.* Combined ploughing and tilling to improve degraded alfalfa (*Medicago sativa*) stands in a semi-arid region. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(1): 107–117.
- 王斌, 李满有, 王欣盼, 等. 深松浅旋对半干旱区退化紫花苜蓿人工草地改良效果研究. *草业学报*, 2022, 31(1): 107–117.
- [17] Wang X J, Wang J L, Li E C, *et al.* Plant height is the main factor driving forage yield of *Poa* species under different row spacings and seeding rates in the Qilian Mountains. *Frontiers in Plant Science*, 2025, 16: 1535937.
- [18] Aklilu E. Effect of seed rate and row spacing on yield and yield components of upland rice (*Oryza sativa* L.) in Metema, West Gondar, Ethiopia. *American Journal of Agriculture and Forestry*, 2020, 8(4): 112–125.
- [19] Qin Y T, Shi X Y, Wang Z S, *et al.* Influence of planting density on the phytoremediation efficiency of *Festuca arundinacea* in Cd-polluted soil. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2021, 107(1): 154–159.
- [20] Wang X C. Effects of density on production performance and soil enzyme activities of two gramineous forages. Yinchuan: Ningxia University, 2023.
- 王旭成. 密度对 2 种禾本科牧草生产性能和土壤酶活性的影响. 银川: 宁夏大学, 2023.
- [21] Lan X L, Xiao H, Lin X C, *et al.* Effects of density and sowing amount on photosynthetic characteristics and yield of vegetable soybean. *Soybean Science*, 2024, 43(6): 735–742.
- 蓝新隆, 萧涵, 林训昌, 等. 密度与播量配置对鲜食大豆光合特性和产量的影响. *大豆科学*, 2024, 43(6): 735–742.
- [22] Liu Q L, Wang X J, Wang J L, *et al.* Effects of row spacing and seeding rate on growth and forage yield of *Elymus sibiricus* and comprehensive analysis in alpine region. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(14): 2744–2754.
- 刘启林, 王小军, 王金兰, 等. 行距和播种量对高寒区老芒麦生长和产草量的影响及综合分析. *中国农业科学*, 2024, 57(14): 2744–2754.
- [23] Dong L Q, Gao H, Li Y D, *et al.* Effects of row and hill spacing on rice canopy structure and yield. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2021, 52(3): 265–271.
- 董立强, 高虹, 李跃东, 等. 行株距配置对水稻群体冠层结构及产量的影响. *沈阳农业大学学报*, 2021, 52(3): 265–271.
- [24] Hua X Z, Liu Y, Ma Y S, *et al.* Yield and growth characteristics response to row spacing and sowing rate in *Poa pratensis* L. ‘Qinghai’. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(7): 2220–2231.
- 华铄泽, 刘颖, 马玉寿, 等. 行距和播种量配置对‘青海’草地早熟禾产量和生长特性的影响. *草地学报*, 2023, 31(7): 2220–2231.
- [25] Tang J W, Qiao A H, Ma L, *et al.* The effect of the rowing technologies on yield and agronomic characters of *Roegneria grandiglumis*. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(5): 1425–1430.
- 唐俊伟, 乔安海, 马力, 等. 播种技术对大颖草产量及农艺性状的影响. *草地学报*, 2019, 27(5): 1425–1430.
- [26] Addisu T, Nandeshwar B C, Zerihun J, *et al.* Response of tef (*Eragrostis tef* [Zucc.] Trotter.) variety to varying seed rates and inter-row spacings for growth, yield and lodging severity in Western Ethiopia. *All Life*, 2023, 16(1): 2225761.
- [27] Tian H, Liu Y, Zhang H S, *et al.* Effects of row space and seeding rate on yields of fresh forage and seeds of *Bromus*

- cartharticus* cv. Jiangxia. Chinese Journal of Grassland, 2015, 37(4): 108–113.
- 田宏, 刘洋, 张鹤山, 等. 行距和播量对江夏扁穗雀麦鲜草和种子产量的影响. 中国草地学报, 2015, 37(4): 108–113.
- [28] Meng X J, Du X C, Wu H J, *et al.* Effects of sowing rate and row spacing on the performance of forage rye seeds. Pratacultural Science, 2019, 36(9): 2312–2318.
- 孟祥君, 杜笑村, 武慧娟, 等. 播量与行距对饲用黑麦种子生产性能的影响. 草业科学, 2019, 36(9): 2312–2318.
- [29] Shao S R, Yao A X, Liu C X. Effect of spacing and seeding rate on seed productivity on Ningnong sudangrass. Chinese Journal of Grassland, 1997(2): 12–15.
- 邵生荣, 姚爱兴, 刘彩霞. 不同行距及播种量对宁农苏丹草种子生产性能的影响. 中国草地学报, 1997(2): 12–15.
- [30] Wang X C, Wang X, Wang Q, *et al.* Effects of row spacing and seeding rate on seed yield and its components of *Agropyron mongolicum*. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(9): 2882–2889.
- 王旭成, 王星, 王琴, 等. 行距和播量对沙芦草种子产量及其构成因子的影响. 草地学报, 2023, 31(9): 2882–2889.
- [31] Abel S, Gislum R, Boelt B. Path and correlation analysis of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) seed yield components. Journal of Agronomy and Crop Science, 2017, 203(4): 338–344.
- [32] Tao Q B, Xi X H, Zhang Q, *et al.* Research progress on vigor estimation for forage seeds. Acta Prataculturæ Sinica, 2023, 32(10): 200–225.
- 陶奇波, 郗西虎, 张倩, 等. 牧草种子活力评价方法研究进展. 草业学报, 2023, 32(10): 200–225.
- [33] Wang Q, Li X Y, Wang X C, *et al.* Effects of row spacing and sowing rate on seed yield and quality of *Bromus inermis* in arid area of Ningxia. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(9): 2505–2513.
- 王琴, 李小云, 王旭成, 等. 宁夏干旱区行距与播量对无芒雀麦种子产量和质量的影响. 草地学报, 2022, 30(9): 2505–2513.