

DOI: 10.11686/cyxb2025281

http://cyxb.magtech.com.cn

苏志刚, 韩有健, 张建杭, 等. 施氮量与播种量对‘巴青’垂穗披碱草种子产量及质量的影响. 草业学报, 2026, 35(7): 175—187.

SU Zhi-gang, HAN You-jian, ZHANG Jian-hang, *et al.* Effects of nitrogen application and sowing rates on the seed yield and quality of *Elymus nutans* ‘Baqing’. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(7): 175—187.

施氮量与播种量对‘巴青’垂穗披碱草种子产量及质量的影响

苏志刚¹, 韩有健¹, 张建杭², 武俊喜³, 徐雅梅¹, 包赛很那¹, 苗彦军¹, 曹仲华^{4*}

(1. 西藏农牧大学林草学院, 西藏 林芝 860000; 2. 西藏农牧大学植物科学学院, 西藏 林芝 860000; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 4. 西藏农牧大学动物科学学院, 西藏 林芝 860000)

摘要:为探究西藏高寒地区施氮量与播种量对‘巴青’垂穗披碱草种子产量及质量的影响, 采用双因素裂区试验设计, 主区为氮肥添加量, 副区为播种量, 氮肥添加量分别为 N_1 0 kg·hm⁻², N_2 60 kg·hm⁻², N_3 120 kg·hm⁻², N_4 180 kg·hm⁻², N_5 240 kg·hm⁻² 和 N_6 300 kg·hm⁻², 播种量分别为 D_1 15.0 kg·hm⁻², D_2 22.5 kg·hm⁻² 和 D_3 45.0 kg·hm⁻², 利用灰色关联度对‘巴青’垂穗披碱草的种子产量及质量进行综合评价, 明确影响种子产量的关键因素, 筛选‘巴青’垂穗披碱草种子生产最优种植配置组合。结果表明, 施氮量和播种量对‘巴青’垂穗披碱草种子产量及质量影响显著。与‘巴青’垂穗披碱草产量密切相关的主要因素有生殖枝数、小穗数/生殖枝和千粒重等, 对产量贡献因素最大的是千粒重。当播种量为 15.0 kg·hm⁻² 时, 只需要 180 kg·hm⁻² 的施氮量即可达到最大种子产量, 为 1182.55 kg·hm⁻²; 当播种量为 22.5 kg·hm⁻² 时, 需要 240 kg·hm⁻² 的施氮量可达到最大种子产量, 为 1283.29 kg·hm⁻²; 当播种量为 45.0 kg·hm⁻² 时, 需要 300 kg·hm⁻² 的施氮量可达到最大种子产量, 为 1023.34 kg·hm⁻²。因此, 本研究认为当播种量恒定时, ‘巴青’垂穗披碱草对氮素的需求存在理论最大值。经灰色关联度分析得出, 240 kg·hm⁻² 的施氮量与 22.5 kg·hm⁻² 的播种量是‘巴青’垂穗披碱草最优种植配置, 可以获得最佳的种子产量及质量, 可在西藏高寒地区推广使用。

关键词: ‘巴青’垂穗披碱草; 施氮量; 播种量; 种子产量; 种子质量; 综合评价

Effects of nitrogen application and sowing rates on the seed yield and quality of *Elymus nutans* ‘Baqing’

SU Zhi-gang¹, HAN You-jian¹, ZHANG Jian-hang², WU Jun-xi³, XU Ya-mei¹, Baosaihenna¹, MIAO Yan-jun¹, CAO Zhong-hua^{4*}

1. College of Forestry and Grass, Xizang Agriculture and Animal Husbandry University, Linzhi 860000, China; 2. College of Plant Science, Xizang Agriculture and Animal Husbandry University, Linzhi 860000, China; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4. College of Animal Science, Xizang Agriculture and Animal Husbandry University, Linzhi 860000, China

Abstract: In this study, we explored the effects of the nitrogen application rate and sowing rate on the seed yield and quality of *Elymus nutans* ‘Baqing’ in the alpine region of Xizang. An experiment was conducted with a two-factor split-plot design; the main area was nitrogen fertilizer addition and the sub-area was sowing rate. The nitrogen

收稿日期: 2025-07-08; 改回日期: 2025-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(32260342), 西藏自治区科技厅重点研发及转化项目(CGZH2024000084), 西藏农牧学院林学博士点(一期)(533325001)和林芝市科技局重点研发项目(XDZH-2025-01)资助。

作者简介: 苏志刚(2001—), 男, 安徽亳州人, 在读硕士。E-mail: 2809609722@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: caohua73@yahoo.com.cn

fertilization rates were N_1 0 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, N_2 60 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, N_3 120 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, N_4 180 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, N_5 240 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, and N_6 300 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; and the sowing rates were D_1 15.0 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, D_2 22.5 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, and D_3 45.0 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. The seed yield and quality of *E. nutans* ‘Baqing’ were comprehensively evaluated based on grey correlation degree and the key factors affecting seed yield were identified, with an overall aim to determine the optimal planting configuration for *E. nutans* ‘Baqing’ for seed production. The results show that the nitrogen application rate and sowing rate had significant effects on the seed yield and quality of *E. nutans* ‘Baqing’. The main factors closely related to the yield of *E. nutans* ‘Baqing’ were the number of reproductive branches, number of spikelets/reproductive branches, and 1000-seed weight, and the most important factor contributing to yield was 1000-seed weight. At the sowing rate of 15.0 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, nitrogen application at 180 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ was required to achieve the maximum seed yield (1182.55 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$). At the sowing rate of 22.5 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, nitrogen application at 240 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ was required to achieve the maximum seed yield (1283.29 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$). At the sowing rate of 45.0 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, nitrogen application at 300 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ was required to achieve the maximum seed yield (1023.34 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$). These results show that at a constant sowing rate, there is a theoretical maximum value for the nitrogen demand of *E. nutans* ‘Baqing’. The grey correlation analysis revealed that the nitrogen application rate of 240 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ and the sowing rate of 22.5 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ represented the optimal planting configuration for *E. nutans* ‘Baqing’. This combination of nitrogen application rate and sowing rate resulted in the best seed yield and quality, and therefore, should be used widely when cultivating *E. nutans* ‘Baqing’ in the alpine region of Xizang.

Key words: *Elymus nutans* ‘Baqing’; nitrogen application rate; sowing rate; seed yield; seed quality; comprehensive evaluation

垂穗披碱草(*Elymus nutans*)是禾本科(Poaceae)小麦族(Triticeae)披碱草属(*Elymus*)的一种多年生疏丛型牧草,广泛分布于我国青藏高原等高寒地区,适应环境能力强,具有抗寒、耐旱、耐践踏等特性,是退化草地生态修复和人工草地建植的重要物种^[1-2]。其种子产量及质量的高低直接决定了生态恢复与畜牧业生产中的实际应用效果^[3]。然而,西藏高寒地区特殊的气候与土壤条件极大地限制了垂穗披碱草的大田种植,严重阻碍了垂穗披碱草规模化推广与产业化发展^[4]。因此,研究如何通过合理的栽培管理措施提高垂穗披碱草的种子产量及质量,是实际生产中急需解决的问题。

影响种子产量的因素有很多,其中施肥和种植密度是植物生产过程中必须考虑的因素^[5]。播种量作为种植密度的直接调控因子,通过改变群体结构影响个体对光、水、养分的竞争关系,从而影响产量^[6]。播种量过小可能会导致苗间空隙大,土壤水分蒸发量大,还容易滋生杂草,造成土地资源的浪费^[7];播种量过高可能会导致种内相互竞争,降低小穗数与结实率^[8];合理的播种量有利于植物进行光合作用,促进植物对营养元素的吸收,从而提高产量^[9]。泽让东洲^[10]研究发现,适当的播种量和行距可以优化垂穗披碱草的植株构建,从而显著提高垂穗披碱草的产量。王旭成^[11]研究表明,不同播种量显著影响无芒雀麦(*Bromus inermis*)的株高、小穗数、小花数、产量及品质。氮素作为植物生长发育的关键因素之一,对植物的分蘖、穗部发育及籽粒形成具有显著调控作用^[12]。合理的施氮量可促进植物光合产物的积累与分配,提高穗粒数和千粒重,但过量施氮可能会引起烧苗和倒伏等问题,进而抑制产量^[13-14]。谢国平等^[15]发现,施氮可以通过促进垂穗披碱草种子粒数/小穗和生殖枝数的增加,从而提高垂穗披碱草的种子产量。李彤瑶等^[16]研究发现,不同施氮量显著影响披碱草(*Elymus dahuricus*)和老芒麦(*Elymus sibiricus*)的分蘖数、生殖枝数、千粒重和每穗种子数,其中生殖枝数和每穗种子数对披碱草和老芒麦种子产量的形成起到了关键作用。以上研究虽然对垂穗披碱草的开发和利用提供了一些技术指导,但目前针对施氮量与播种量二者如何协同影响垂穗披碱草种子产量及质量的研究仍未见报道。目前,西藏高寒地区垂穗披碱草栽培草地面积不断扩增,且西藏高寒地区土壤氮素利用率较低,盲目施加氮肥容易造成肥料的浪费和环境的污染,进一步凸显了寻找垂穗披碱草施氮量与播种量最佳组合的必要性^[4,17]。

“国以农为本,农以种为先”,优质牧草种子作为“农业芯片”,是西藏草业和畜牧业稳定发展的关键因素之一^[18-19]。‘巴青’垂穗披碱草作为西藏乡土草种,由于其缺乏系统的理论指导和栽培管理措施,未能充分发挥其种子生产的最大潜力。因此,本研究拟通过大田试验,通过设置不同的施氮量和播种量,探究影响‘巴青’垂穗披碱草种子产量及质量的关键因素,明确施氮量和播种量互作效应下的最优种植配置,系统解析施氮量与播种量对‘巴青’垂穗披碱草产量构成因素、种子表型、产量及质量的影响,以期对‘巴青’垂穗披碱草在西藏高寒地区的种子生产提供技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验在西藏自治区拉萨市林周县卡孜乡进行,年降水量为300~510 mm,主要集中在6—9月,年日照时数在3500 h以上,太阳辐射为6000~8000 MJ·m⁻²·a⁻¹,年均气温2.4~8.2℃,大于0℃年积温平均值为2888℃,无霜期100~120 d。

0~20 cm耕层土壤基本情况为:有机质含量22.79 g·kg⁻¹,土壤pH值6.99,碱解氮含量55.95 mg·kg⁻¹,速效磷含量11.35 mg·kg⁻¹,速效钾含量76.75 mg·kg⁻¹,全氮含量0.99 g·kg⁻¹,全磷含量0.58 g·kg⁻¹,全钾含量18.69 g·kg⁻¹。

1.2 试验材料

供试牧草品种:‘巴青’垂穗披碱草(*E. nutans* ‘Baqing’),该品种于2020年12月由西藏草品种审定委员会审定(品种登记号:XZCS001)。供试肥料:尿素(含N 46%,云南云天化股份有限公司),有机肥(有机质≥45%,N+P₂O₅+K₂O≥5%,pH:5.5~8.5,水分≤30%,青海省湟中县海宁合资化肥厂)。

1.3 试验设计

试验采用双因素裂区设计,主区为氮肥添加量(N₁ 0 kg·hm⁻², N₂ 60 kg·hm⁻², N₃ 120 kg·hm⁻², N₄ 180 kg·hm⁻², N₅ 240 kg·hm⁻²和 N₆ 300 kg·hm⁻²),副区为播种量(D₁ 15.0 kg·hm⁻², D₂ 22.5 kg·hm⁻²和 D₃ 45.0 kg·hm⁻²),以N₁D₁处理作为对照(CK),共18个处理,每个处理3次重复,共54个试验小区。小区面积为18 m²(6 m×3 m),小区周围设1 m保护行。于2023年9月3日进行播种,播种前施有机肥2000 kg·hm⁻²,行距为30 cm,播种方式为条播,播深2~3 cm,播后镇压,次年于分蘖期(2024年5月10日)进行试验施肥处理,采用沟施方式,将每个处理的氮肥一次性施入挖好的沟中,并覆土压实,施肥完成后立即灌水。

1.4 主要指标及测定方法

1.4.1 ‘巴青’垂穗披碱草农艺性状及种子产量测定^[4,20] ‘巴青’垂穗披碱草于2024年8月30日进行种子产量的测定。

穗长:在成熟期,各试验小区随机选取10个果穗完整的生殖枝,用尺子测量穗底部至穗顶端的距离,最后求其平均值。

生殖枝数:在成熟期,各试验小区随机选取3个1 m²的样方统计生殖枝数,最后求其平均值。

种子数/生殖枝:在成熟期,各试验小区随机选取10个完整的生殖枝统计种子数,最后求其平均值。

小穗数/生殖枝:在成熟期,各试验小区随机选取10个果穗完整的生殖枝统计小穗个数,最后求其平均值。

种子粒数/小穗:在成熟期,各试验小区随机选取10个完整的小穗统计穗粒数,最后求其平均值。

千粒重:在成熟期,将各个试验小区收获的种子进行清选处理,数出1000粒种子用1/10000分析天平(PR224ZH/E,奥豪斯仪器有限公司)进行称重,重复5次,最后求其平均值。

种长、种宽:在成熟期,将收获的种子用游标卡尺测量,取平均值作为种长和种宽。

表现种子产量=(小穗数/生殖枝)×千粒重×生殖枝数·m⁻²×(种子粒数/小穗)×10⁻²

实际种子产量:在成熟期,每个小区设置1 m²的样方,人工刈割,自然干燥后脱粒、清选、称重。

1.4.2 ‘巴青’垂穗披碱草氮肥利用效率测定 具体计算方法^[21]如下。

氮肥偏生产力=施氮区实际种子产量/施氮量

氮肥农学效率=(施氮区实际种子产量-不施氮区实际种子产量)/施氮量

1.4.3 ‘巴青’垂穗披碱草种子质量测定 种子质量可通过发芽能力来体现,将各个小区收获的‘巴青’垂穗披碱草种子用0.05%的高锰酸钾溶液消毒处理15 min,随后用蒸馏水冲洗掉种子表面残留的高锰酸钾溶液,在纱布上摊开自然晾干,备用。本试验采用培养皿滤纸培养法^[4],将不同处理的‘巴青’垂穗披碱草种子分别均匀摆放在铺有双层滤纸、灭菌的培养皿内,每个处理3次重复,每个重复50粒种子,在25℃智能人工气候箱(PRX-450B,宁波普朗特仪器有限公司)中培养。箱内环境:湿度75%,12 h黑暗/12 h光照,光照强度为1300 lx。按照胚芽或胚根达到种子长度的1/2为发芽标准,每天记录种子萌发情况,并利用称重法^[22]补充蒸馏水,试验周期为10 d。

发芽率=(试验第10天发芽种子数/处理种子数)×100%

发芽势=(试验第4天发芽种子数/处理种子数)×100%

发芽指数=∑(第*t*天的出苗数/相应出苗天数)

活力指数=发芽指数×平均芽长

根长和芽长是试验第10天从各个处理中随机选取10个幼苗用游标卡尺测量。

1.5 数据处理

使用Microsoft Excel 2019软件进行数据初步处理,使用Origin 2024作图,使用SPSS 27.0对数据进行方差分析和灰色关联度分析等。根据邓聚龙灰色关联系统理论^[23-24]进行灰色关联度分析和评价,将‘巴青’垂穗披碱草种子产量和质量等12个主要性状组合在一起,由于各性状之间单位不一致,为了确保数据的等效性和同序性,在对其关联度分析前,对原始数据进行无量纲化处理,并根据处理后的数据计算各指标与最优指标的绝对值差,通过比较数列(x_i)与最优参考数列(x_0)的相似程度来判断关联系数和关联度,公式如下:

$$\text{关联系数 } \xi_i(k) = \frac{\min \min |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max \max |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max \max |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (1)$$

$$\text{等权关联度 } R_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \xi_i(k) \quad (2)$$

$$\text{权重 } W_i = \frac{R_i}{\sum R_i} \quad (3)$$

$$\text{加权关联度 } R_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \xi_i(k) \times W_i \quad (4)$$

式中: $\xi_i(k)$ 代表 $x_0(k)$ 和 $x_i(k)$ 在*k*点的关联系数; $|x_0(k) - x_i(k)|$ 代表 $x_0(k)$ 数列与 $x_i(k)$ 数列在*k*点的绝对值差; ρ 为分辨系数,取0.5; $\min \min |x_0(k) - x_i(k)|$ 为二级最小差; $\max \max |x_0(k) - x_i(k)|$ 为二级最大差;*N*为样本数。

2 结果与分析

2.1 施氮量与播种量对‘巴青’垂穗披碱草种子产量构成因素的影响

如图1所示,施氮量与播种量对‘巴青’垂穗披碱草的产量构成因素有显著影响($P < 0.05$)。在相同施氮量条件下,‘巴青’垂穗披碱草的生殖枝数随着播种量增加呈上升趋势。当播种量处在D₁和D₂水平时,生殖枝数随着施氮量增加呈先升高后降低的变化趋势,当播种量处在D₃水平时,生殖枝数随着施氮量增加呈上升趋势。其中,N₆D₃处理下的生殖枝数最多,达1408.89个·m⁻²。在相同施氮量条件下,‘巴青’垂穗披碱草的小穗数/生殖枝和穗长随着播种量增加呈下降趋势。当播种量处在D₁和D₂水平时,小穗数/生殖枝和穗长随着施氮量增加呈先升高后降低的变化趋势;当播种量处在D₃水平时,穗长和小穗数/生殖枝随着施氮量增加呈上升趋势。其中,N₄D₁处理下的穗长和小穗数/生殖枝生长状况最佳,穗长为15.28 cm,小穗数/生殖枝为25.47。在相同施氮量条件下,随着播种量的增加,‘巴青’垂穗披碱草的种子粒数/小穗呈先升高后降低的趋势。当播种量处在D₁和D₂水平时,种子粒数/小穗随着施氮量增加呈先升高后降低的趋势;当播种量处在D₃水平时,种子粒数/小穗随着施氮量增加呈升高的趋势。其中,N₅D₂处理下的种子粒数/小穗最多,达4.43粒。随着播种量的增加,当施氮量处在N₁、N₂、N₅和N₆水平时,‘巴青’垂穗披碱草的种子数/生殖枝呈先升高后降低的趋势,当施氮量处在N₃和N₄水平时,

种子数/生殖枝呈降低的趋势。随着施氮量的增加,当播种量处在 D_1 和 D_2 水平时,种子数/生殖枝呈先升高后降低的趋势,当播种量处在 D_3 水平时,种子数/生殖枝呈升高的趋势。其中, N_5D_2 处理下的种子数/生殖枝最多,达 110.99 粒。当施氮量处在 N_1 、 N_2 和 N_5 水平时,‘巴青’垂穗披碱草的千粒重随着播种量增加呈先升高后降低的趋势;当施氮量处在 N_3 、 N_4 和 N_6 水平时,千粒重随着播种量的增加呈降低趋势。随着施氮量的增加,当播种量处在 D_1 和 D_2 水平时,千粒重呈先升高后降低的趋势,当播种量处在 D_3 水平时,千粒重呈升高的趋势。其中, N_5D_2 处理下的千粒重最大,达 4.53 g。

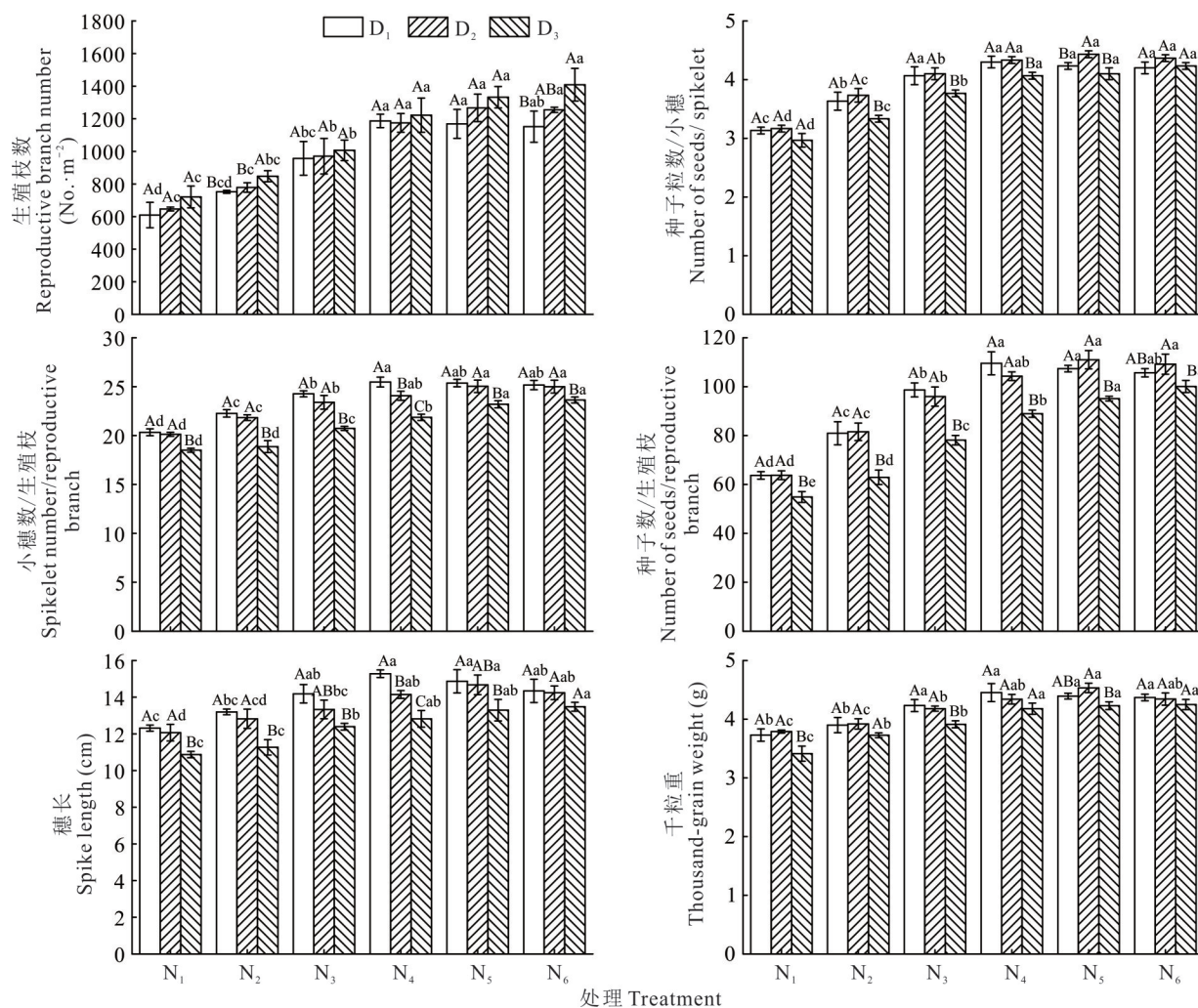


图 1 施氮量与播种量对‘巴青’垂穗披碱草种子产量构成因素的影响

Fig. 1 Effects of nitrogen application rate and sowing rate on seed yield components of *E. nutans* ‘Baqing’

不同大写字母表示同一施氮量下不同播种量之间差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一播种量下不同施氮量之间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。 Different uppercase letters indicate that the difference among different sowing rates under the same nitrogen application rate is significant ($P < 0.05$), and different lowercase letters indicate that the difference among different nitrogen application rates under the same sowing rate is significant ($P < 0.05$). The same below.

2.2 施氮量与播种量对‘巴青’垂穗披碱草种子产量的影响

如图 2 所示,施氮量与播种量对‘巴青’垂穗披碱草的表现种子产量和实际种子产量有显著影响 ($P < 0.05$)。随着播种量的增大,当施氮量处在 N_1 、 N_2 和 N_5 水平时,‘巴青’垂穗披碱草的表现种子产量呈先升高后降低的趋势,当施氮量处在 N_3 和 N_4 水平时,表现种子产量呈降低趋势,当施氮量处在 N_6 水平时,表现种子产量呈升高趋势。随着施氮量的增加,当播种量处在 D_1 和 D_2 水平时,表现种子产量呈先升高后降低的变化趋势,当播种量处在

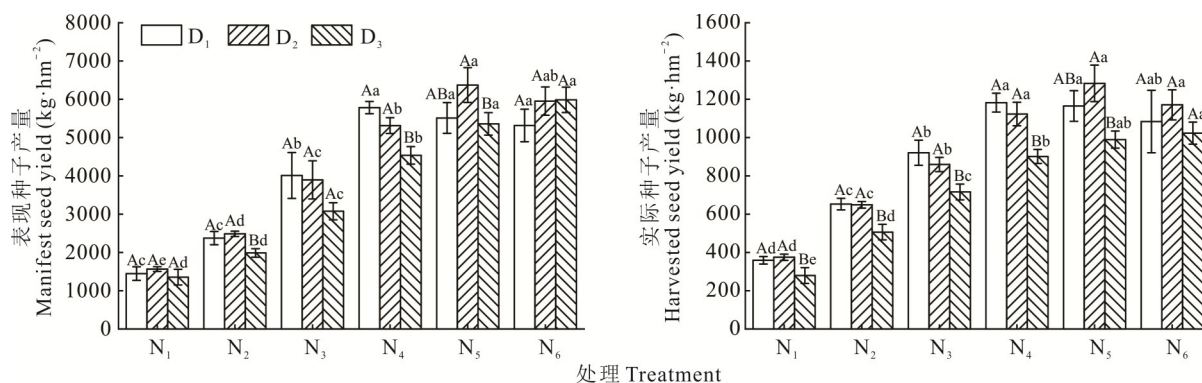


图2 施氮量与播种量对‘巴青’垂穗披碱草种子产量的影响

Fig. 2 Effects of nitrogen application rate and sowing rate on seed yield of *E. nutans* ‘Baqing’

D₃水平时,表现种子产量呈升高的趋势。其中,N₅D₂处理下的表现种子产量最大,达6372.4 kg·hm⁻²。随着播种量的增大,当施氮量处在N₁、N₅和N₆水平时,‘巴青’垂穗披碱草的实际种子产量呈先升高后降低的趋势,当施氮量处在N₂、N₃和N₄水平时,实际种子产量呈降低趋势。随着施氮量的增加,当播种量处在D₁和D₂水平时,实际种子产量呈先升高后降低的趋势,分别在N₄和N₅水平达到最大,当播种量处在D₃水平时,实际种子产量呈升高的趋势,在N₆水平达到最大。其中,N₅D₂处理下的实际种子产量最大,达1283.29 kg·hm⁻²。

2.3 施氮量与播种量对‘巴青’垂穗披碱草种子表型性状的影响

如图3所示,施氮量与播种量对‘巴青’垂穗披碱草的种子长度、宽度有显著影响($P < 0.05$)。当施氮量处在N₁、N₂、N₃和N₅水平时,‘巴青’垂穗披碱草的种子长度随着播种量的增加呈先升高后降低的趋势;当施氮量处在N₄和N₆水平时,种子长度随着播种量的增加而减小。当播种量处在D₁和D₂水平时,种子长度随着施氮量的增加呈先升高后降低的趋势;当播种量处在D₃水平时,种子长度随着施氮量的增加呈升高的趋势。其中,N₅D₂处理下的种子长度最大,达8.1 mm。当施氮量处在N₃和N₆水平时,‘巴青’垂穗披碱草的种子宽度随着播种量的增加呈先升高后降低的趋势;当施氮量处在N₁、N₂、N₄和N₅水平时,种子宽度随着播种量的增加而减小。当播种量处在D₁水平时,种子宽度随着施氮量的增加呈先升高后降低的变化趋势;当播种量处在D₂和D₃水平时,种子宽度随着施氮量的增加呈升高的趋势。其中,N₅D₁处理下的种子宽度最大,达1.59 mm。当施氮量处在N₁、N₂、N₃、N₄和N₆水平时,‘巴青’垂穗披碱草的种子长宽比在不同播种量处理下差异不显著;当施氮量处在N₅水平时,种子长宽比在D₁和D₂处理间差异显著($P < 0.05$)。当播种量处

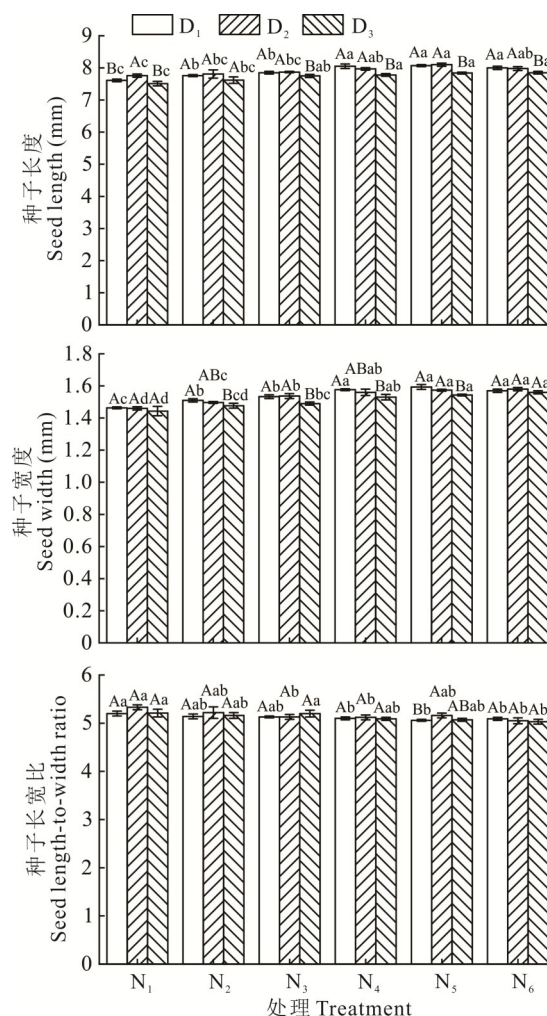


图3 施氮量与播种量对‘巴青’垂穗披碱草种子表型性状的影响

Fig. 3 Effects of nitrogen application rate and sowing rate on seed phenotypic traits of *E. nutans* ‘Baqing’

在 D_1 水平时, 种子长宽比在 N_1 与 N_4 、 N_5 、 N_6 处理之间差异显著 ($P < 0.05$); 当播种量处在 D_2 水平时, 种子长宽比在 N_1 与 N_3 、 N_4 、 N_6 处理之间差异显著 ($P < 0.05$); 当播种量处在 D_3 水平时, 种子长宽比在 N_1 与 N_6 处理之间差异显著 ($P < 0.05$)。其中, N_1D_2 处理下的长宽比最大, 达 5.33。

2.4 施氮量与播种量对‘巴青’垂穗披碱草种子质量的影响

如图 4 所示, 施氮量与播种量对‘巴青’垂穗披碱草种子的各项萌发指标有显著影响 ($P < 0.05$)。在相同施氮量条件下, 随着播种量的增大, ‘巴青’垂穗披碱草种子的发芽率、发芽势呈先升高后降低的趋势。在相同播种量条件下, 随着施氮量的增加, 发芽率、发芽势呈先升高后降低的趋势。其中, N_4D_2 处理下的种子发芽率和发芽势最大, 发芽率为 71.33%, 发芽势为 42%。当施氮量处在 N_1 、 N_3 、 N_4 和 N_5 水平时, ‘巴青’垂穗披碱草种子的发芽指数随着播种量的增加呈先升高后降低的趋势; 当施氮量处在 N_2 和 N_6 水平时, 发芽指数随着播种量的增加而减少。在相同播种量条件下, 发芽指数随着施氮量的增加呈先升高后降低的趋势。其中, N_5D_2 处理下的发芽指数最大, 达 34.63。当施氮量处在 N_1 和 N_5 水平时, ‘巴青’垂穗披碱草种子的活力指数随着播种量的增加呈先升高后降低的趋势; 当施氮量处在 N_2 、 N_3 、 N_4 和 N_6 水平时, 活力指数随着播种量的增加而减少。在相同播种量条件下, 活力指数随着施氮量的增加呈先升高后降低的变化趋势。其中, N_5D_2 处理下的活力指数最大, 达 230.20。

当施氮量处在 N_1 、 N_2 、 N_4 、 N_5 和 N_6 水平时, ‘巴青’垂穗披碱草种子的根长随着播种量的增加呈先升高后降低的趋势; 当施氮量处在 N_3 水平时, 根长随着播种量的增加而减少。在相同播种量条件下, 根长随着施氮量的增加呈先升高后降低的趋势。其中, N_5D_2 处理下的根长最大, 达 5.88 cm。当施氮量处在 N_1 、 N_5 和 N_6 水平时, ‘巴青’垂穗披碱草种子的芽长随着播种量的增加呈先升高后降低的趋势; 当施氮量处在 N_2 和 N_3 水平时, 芽长随着播种量的增加呈先降低后升高的趋势; 当施氮量处在 N_4 水平时, 芽长随着播种量的增加呈降低的趋势。在相同播种量条件下, 芽长随着施氮量的增加呈先升高后降低的趋势。其中, N_5D_2 处理下的芽长最大, 达 6.75 cm。

2.5 施氮量与播种量对‘巴青’垂穗披碱草氮肥利用效率的影响

如图 5 所示, 施氮量与播种量对‘巴青’垂穗披碱草的氮肥偏生产力和氮肥农学效率有显著影响 ($P < 0.05$)。当施氮量处在 N_2 、 N_3 和 N_4 水平时, ‘巴青’垂穗披碱草的氮肥偏生产力随着播种量的增加而减少; 当施氮量处在 N_5 和 N_6 水平时, 氮肥偏生产力随着播种量的增加呈先升高后降低的趋势。在相同播种量条件下, 氮肥偏生产力随着施氮量的增加而降低。其中, N_2D_1 处理下的氮肥偏生产力最大, 达 $10.88 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。当施氮量处在 N_2 、 N_3 和 N_4 水平时, ‘巴青’垂穗披碱草的氮肥农学效率随着播种量的增加而减少; 当施氮量处在 N_5 和 N_6 水平时, 氮肥农学效率随着播种量的增加呈先升高后降低的趋势。当播种量处在 D_2 水平时, 氮肥农学效率随着施氮量的增加呈先降

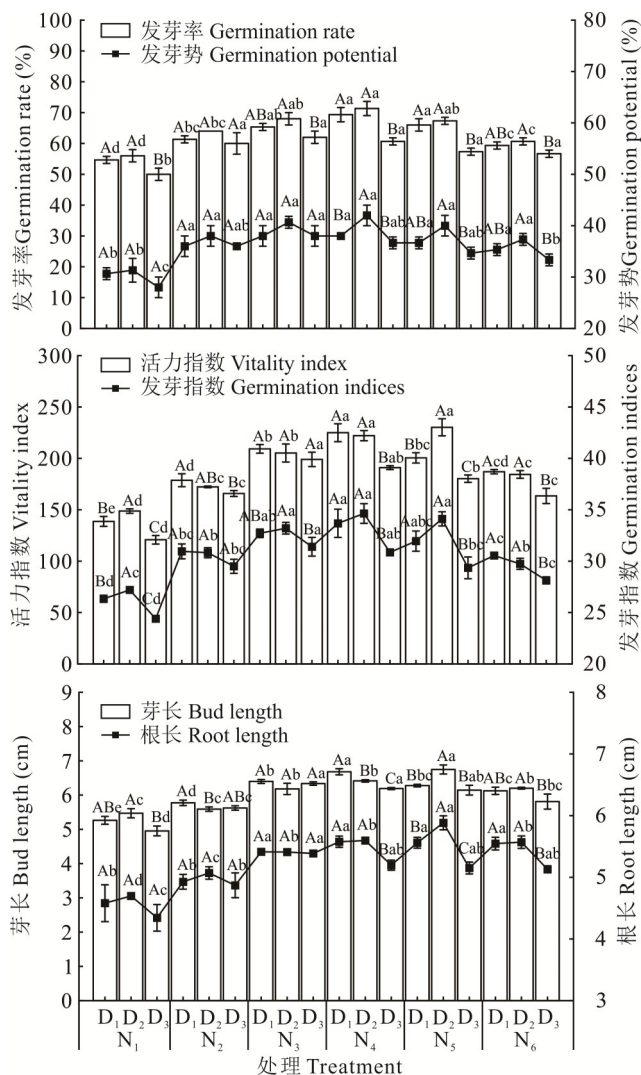


图 4 施氮量与播种量对‘巴青’垂穗披碱草种子质量的影响

Fig. 4 Effects of nitrogen application rate and sowing rate on seed quality of *E. nutans* ‘Baqing’

低后升高再降低的变化趋势;当播种量处在 D_1 和 D_3 水平时,氮肥农学效率随着施氮量的增加而减少。其中, N_2D_1 处理下的氮肥农学效率最大,达 $4.89 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

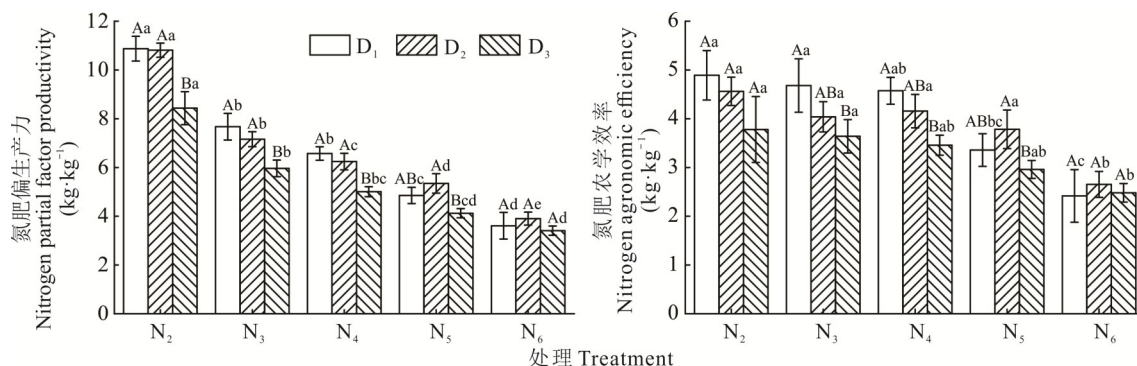


图5 施氮量与播种量对‘巴青’垂穗披碱草氮肥利用效率的影响

Fig. 5 Effects of nitrogen application rate and sowing rate on nitrogen use efficiency of *E. nutans* ‘Baqing’

2.6 ‘巴青’垂穗披碱草种子产量及质量灰色关联度分析

为明确‘巴青’垂穗披碱草种子生产最优的施氮量和播种量配比,将生殖枝数、小穗数/生殖枝、种子粒数/小穗、发芽率、发芽势、发芽指数和实际种子产量等13个指标进行了灰色关联度分析。利用公式(1)计算得出关联系数(表1),根据权重公式计算各指标对应的权值,赋予各性状不同权重。根据公式(3)计算得出‘巴青’垂穗披碱草种子产量与质量评价系统中各因素所占权重大小依次为: $x_6 > x_3 > x_4 = x_{12} > x_9 = x_{11} > x_1 > x_7 = x_8 > x_5 > x_{10} > x_2 > Y$, ‘巴青’垂穗披碱草种子产量与质量评价体系中构成因素权重最高的是千粒重,为0.084,其次为小穗数/生殖枝,为0.083,说明在影响种子产量的各构成因素中,千粒重和小穗数/生殖枝与‘巴青’垂穗披碱草种子产量和质量密切相关。

将关联系数代入公式(2),计算各性状指标的关联度(表1),在‘巴青’垂穗披碱草种子产量和质量的客观性评价中,加权关联度值和等权关联度值均能合理地反映不同处理各性状指标与最优性状指标的差异,通过加权关联度公式(4)得出18个不同处理的关联度值(表2),且等权排序结果与加权排序结果基本一致。 N_5D_2 处理的加权关联系数和等权关联系数均最高,分别为0.955和0.953,其次是 N_4D_1 处理,分别为0.918和0.913, N_1D_3 处理得分最低,分别为0.534和0.527。因此, $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的施氮量与 $22.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的播种量是‘巴青’垂穗披碱草最优种植配置,可以获得最佳的种子产量及质量,其次的种植配置为 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的施氮量与 $15.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的播种量。

3 讨论

不同植物对施氮量和播种量的适宜范围存在差别,合理的播种量和施氮量是提高种子产量的关键措施^[25-26]。播种量过大会导致植物叶片相互重叠造成光合作用受阻,引起资源竞争;播种量过小则会导致基本苗不足,进而无法发挥出高产潜力;而适宜播种量可构建合理群体结构,保证植物正常生长发育,是高产的基础^[27-28]。邵生荣等^[29]研究发现,随着播种量的增加,苏丹草(*Sorghum sudanense*)种子产量呈先升高后降低的趋势,其通过增加千粒重和单位面积总穗数从而增加种子产量,具体因年份的不同有所差异。武慧娟等^[30]研究发现,当行距为30和60 cm时,红豆草(*Onobrychis viciaefolia*)种子产量随着播种量的增加呈先升后降的趋势,当行距为90 cm时,种子产量随着播种量的增加而逐渐降低。这说明播种量的高低取决于栽培管理环境和植物种类的综合影响,在物种和种植区域不同的情况下应综合类比。本研究发现,‘巴青’垂穗披碱草的种子产量随着播种量的增大呈先升高后降低的趋势。前人研究得出‘阿坝’垂穗披碱草在行距45 cm、播种量为 $22.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,可以获得较高的种子产量^[10],本研究与其略有差异,可能是试验方法、试验区气候条件以及品种不同所导致。

氮素作为植物生长发育所必需的营养元素之一,在提高作物产量和改善品质等方面发挥着重要作用^[31]。在环境复杂的高寒地区,虽然植物自身对次生环境具有较好的适应性,但贫瘠的土壤依然限制着植物的生长发育,

表 1 不同种植配置下‘巴青’垂穗披碱草各指标的关联系数
Table 1 Relational coefficient of each index of *E. nutans* ‘Baqing’ under different planting configurations

处理 Treatment	关联系数 Relational coefficient												Y
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	
N ₁ D ₁	0.668	0.408	0.660	0.572	0.479	0.688	0.626	0.592	0.620	0.496	0.638	0.640	0.352
N ₂ D ₁	0.742	0.456	0.757	0.684	0.591	0.737	0.736	0.733	0.786	0.636	0.706	0.731	0.443
N ₃ D ₁	0.845	0.550	0.892	0.825	0.779	0.855	0.823	0.804	0.876	0.811	0.830	0.883	0.581
N ₄ D ₁	1.000	0.713	1.000	0.929	0.968	0.957	0.933	0.804	0.934	0.945	0.882	0.975	0.833
N ₅ D ₁	0.935	0.696	0.990	0.897	0.923	0.927	0.840	0.755	0.835	0.752	0.877	0.849	0.809
N ₆ D ₁	0.864	0.682	0.971	0.881	0.891	0.916	0.699	0.711	0.768	0.676	0.872	0.809	0.716
N ₁ D ₂	0.650	0.420	0.651	0.578	0.479	0.705	0.645	0.606	0.646	0.525	0.660	0.674	0.356
N ₂ D ₂	0.709	0.466	0.733	0.712	0.596	0.743	0.792	0.804	0.781	0.609	0.739	0.695	0.442
N ₃ D ₂	0.754	0.557	0.828	0.839	0.743	0.834	0.893	0.925	0.904	0.783	0.829	0.823	0.542
N ₄ D ₂	0.841	0.702	0.877	0.945	0.866	0.902	1.000	1.000	1.000	0.917	0.889	0.888	0.758
N ₅ D ₂	0.908	0.795	0.958	1.000	1.000	1.000	0.875	0.891	0.963	1.000	1.000	1.000	1.000
N ₆ D ₂	0.851	0.781	0.955	0.963	0.960	0.903	0.723	0.779	0.735	0.663	0.880	0.828	0.817
N ₁ D ₃	0.576	0.445	0.588	0.542	0.436	0.612	0.567	0.540	0.569	0.452	0.599	0.595	0.333
N ₂ D ₃	0.598	0.495	0.602	0.612	0.475	0.688	0.711	0.733	0.725	0.583	0.694	0.701	0.392
N ₃ D ₃	0.674	0.578	0.678	0.722	0.569	0.741	0.749	0.804	0.807	0.743	0.823	0.866	0.470
N ₄ D ₃	0.708	0.747	0.735	0.825	0.663	0.835	0.723	0.755	0.782	0.697	0.770	0.826	0.568
N ₅ D ₃	0.750	0.878	0.815	0.839	0.732	0.853	0.666	0.691	0.720	0.643	0.758	0.814	0.631
N ₆ D ₃	0.768	1.000	0.845	0.897	0.799	0.863	0.655	0.655	0.676	0.574	0.753	0.738	0.659
关联度 Relevance degree	0.769	0.632	0.807	0.792	0.719	0.820	0.759	0.755	0.785	0.695	0.789	0.796	0.595
权重 Weight	0.079	0.065	0.083	0.082	0.074	0.084	0.078	0.078	0.081	0.072	0.081	0.082	0.061

注：Y 表示实际种子产量， $x_1 \sim x_{12}$ 分别表示穗长、生殖枝数、小穗数/生殖枝、种子粒数/小穗、种子数/生殖枝、千粒重、发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、根长、芽长。
Note: Y represent harvested seed yield, $x_1 \sim x_{12}$ represent spike length, reproductive branch number, spikelet number/reproductive branch, seed number/spikelet, seed number/reproductive branch, thousand-grain weight, germination rate, germination potential, germination indices, vitality index, root length, bud length, respectively.

从而导致植物产量下降^[32-33]。大量研究表明,适宜的施氮量可以增加千粒重、小穗数/生殖枝和生殖枝数等种子产量构成因素,从而提高种子产量^[34-35]。宋江湖等^[36]研究发现,施氮量与垂穗披碱草种子产量、生殖枝数和千粒重等极显著相关;段连学等^[37]研究发现,燕麦(*Avena sativa*)的氮肥偏生产力和氮肥农学效率随着施氮量的增加而降低;本试验结果与其相似。

牧草种子产量构成因素是确保种子高产的关键因子,可以通过调节施氮量和播种量来提高种子产量构成因素,从而确保种子高产^[38-39]。赵梦雨等^[40]研究结果表明,随着播种量的增加,紫花苜蓿(*Medicago sativa*)的产量呈先增大后减少的趋势,当播种量为 3 kg·hm⁻²时达到最大种子产量,其通过增加千粒重、每花序结荚数、每荚种子数、生殖枝数和花序数/生殖枝等增加种子产量。杨泽鹏等^[41]通过设置不同的施氮量与播种量配置种植油菜(*Brassica napus*),发现 180 kg·hm⁻²施氮量和 4.5 kg·hm⁻²播种量可以获得较高的种子产量。本研究发现,240 kg·hm⁻²的施氮量与 22.5 kg·hm⁻²的播种量处理时可以达到最大种子产量,‘巴青’垂穗披碱草的生殖枝数、种子粒数/小穗、千粒重和穗长等种子产量构成因素随着施氮量的增加呈先增高后降低的趋势,从而导致产量随着施氮量的增加呈先升高后降低的趋势,这与乔安海等^[42]和谢国平等^[15]的研究结果趋同。本研究发现,‘巴青’垂穗披碱草作为喜食氮素的植物,对氮素的需求量较大,随着播种量的增加,对氮素的需求量也随之增加。当播种量为 15.0 kg·hm⁻²时,只需要 180 kg·hm⁻²的施氮量即可达到最大种子产量,为 1182.55 kg·hm⁻²;当播种量为 22.5

$\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,需要 $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的施氮量可达到最大种子产量,为 $1283.29\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;当播种量为 $45.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,需要 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的施氮量可达到最大种子产量,为 $1023.34\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,且该试验设置的最大施氮量梯度为 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。因此,增施氮肥可以缓解‘巴青’垂穗披碱草群体的密度制约效应,本研究认为当播种量恒定时,‘巴青’垂穗披碱草对氮素的需求存在理论最大值。过量施加氮肥,对‘巴青’垂穗披碱草的增产效果减弱,甚至会导致种子产量略微下降。这是因为施氮量对增加作物产量存在一个阈值,施氮量过大反而会抑制作物生长发育,引起肥料资源的浪费,从而造成产量不增反降的效果,本试验与前人研究结果相似^[34,43]。另外,‘巴青’垂穗披碱草种子成熟后落粒性极强,可以通过加强田间管理、选择适当的收获时间等栽培管理措施来提高种子产量^[15,44]。

种子活力是衡量种子质量的重要指标之一,主要依靠种子发芽指数、发芽势、活力指数、发芽率、芽长和根长体现^[20]。许赵佳^[4]通过对比‘巴青’垂穗披碱草种子储藏前后的萌发指标发现,在同一试验地点,种子经过储藏之后比当年收获种子的发芽率高。说明‘巴青’垂穗披碱草种子在收获当年可能存在“后熟”现象,因此未来可以深入剖析其种子内源物质进一步研究。仇春辰等^[45]研究发现,适宜的施氮量可以通过提高羊草(*Leymus chinensis*)种子的发芽率从而提升种子质量。乔安海等^[42]研究表明,施氮可以通过提高垂穗披碱草种子的发芽率、酸性磷酸酯酶的活性以及芽长,从而提升种子质量。王琴等^[46]研究发现,不同行距和播量对无芒雀麦的活力指数和发芽势有显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$)影响,对发芽指数和发芽率均没有显著影响。本研究结果表明,随着施氮量和播种量的增加,‘巴青’垂穗披碱草的萌发指标呈先升高后降低的趋势。这与前人的研究结果略有差异,可能与培养箱设置的条件不同有关。另一方面,试验方法、材料和气候环境等条件的不同也会导致研究结果存在差异。

4 结论

在西藏自治区拉萨市高寒地区,与‘巴青’垂穗披碱草种子产量密切相关的主要因素有千粒重、种子粒数/小穗、生殖枝数和小穗数/生殖枝等,可以采用适当措施增加上述因素从而提高种子产量。综合评价发现, $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的施氮量与 $22.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的播种量是‘巴青’垂穗披碱草种子生产最优的种植配置,实际种子产量达 $1283.29\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。上述最优种植配置对‘巴青’垂穗披碱草在西藏高寒地区的推广利用具有一定的理论参考价值和生产指导意义。

参考文献 References:

- [1] Miao J M, Zhang X Q, Chen S Y, *et al.* Gliadin analysis of *Elymus nutans* Griseb. from the Qinghai-Tibetan Plateau and Xinjiang, China. Grassland Science, 2011(3): 127-134.
- [2] Su Z G, Han Y J, Zhai Y J, *et al.* Research progress on germplasm resources of *Elymus nutans*. Journal of Grassland and Forage

表2 不同种植配置下‘巴青’垂穗披碱草的综合排序

Table 2 Comprehensive ordination of *E. nutans* ‘Baqing’ under different planting configurations

处理 Treat- ment	加权关联度 Weighted rele- vance degree	加权序位 Weighted order	等权关联度 Equal weight cor- relation degree	等权序位 Equal weight order
N ₁ D ₁	0.581	17	0.572	17
N ₂ D ₁	0.681	14	0.672	14
N ₃ D ₁	0.805	7	0.797	7
N ₄ D ₁	0.918	2	0.913	2
N ₅ D ₁	0.857	4	0.853	4
N ₆ D ₁	0.810	6	0.804	6
N ₁ D ₂	0.593	16	0.584	16
N ₂ D ₂	0.687	13	0.679	13
N ₃ D ₂	0.797	8	0.789	8
N ₄ D ₂	0.896	3	0.891	3
N ₅ D ₂	0.955	1	0.953	1
N ₆ D ₂	0.837	5	0.834	5
N ₁ D ₃	0.534	18	0.527	18
N ₂ D ₃	0.623	15	0.616	15
N ₃ D ₃	0.717	12	0.709	12
N ₄ D ₃	0.746	11	0.741	11
N ₅ D ₃	0.756	10	0.753	10
N ₆ D ₃	0.761	9	0.760	9

- Science, 2025(5): 1–11, 24.
- 苏志刚, 韩有健, 翟亚军, 等. 垂穗披碱草种质资源研究进展. 草学, 2025(5): 1–11, 24.
- [3] Lei B X, Wang M T, Wang C Q, *et al.* Effect of different fertilization treatments on production performance of *Elymus nutans* ‘Baqing’. Journal of Grassland and Forage Science, 2025(1): 43–51, 58.
- 雷变霞, 王明涛, 王传旗, 等. 不同施肥处理对‘巴青’垂穗披碱草生产性能的影响. 草学, 2025(1): 43–51, 58.
- [4] Xu Z J. Study on the effects of combined application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on seed yield and related traits of *Elymus nutans* Griseb ‘Baqing’. Linzhi: Xizang Agricultural and Animal Husbandry University, 2024.
- 许赵佳. 氮磷钾肥配施对巴青垂穗披碱草种子产量及相关性状影响的研究. 林芝: 西藏农牧学院, 2024.
- [5] Wang C Y, Wang Z Y, Huang R, *et al.* Effects of planting density and fertilization level on agronomic traits and grain starch characteristics of malting barley. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2025, 40(1): 22–30.
- 王楚轶, 王紫阳, 黄蓉, 等. 种植密度和施肥水平对啤酒大麦农艺性状和籽粒淀粉特性的影响. 云南农业大学学报(自然科学), 2025, 40(1): 22–30.
- [6] Li M Y, Li D N, Wang B, *et al.* The effect of mixed sowing and sowing rate of different alfalfa varieties on the yield and quality of forage. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(5): 61–75.
- 李满有, 李东宁, 王斌, 等. 不同苜蓿品种混播和播种量对牧草产量及品质的影响. 草业学报, 2022, 31(5): 61–75.
- [7] He B. Cultivation technology of high yield of *Deschampsia cespitosa* and regulation mechanism of cycocel. Xining: Qinghai University, 2024.
- 何斌. 发草高产栽培技术及矮壮素调控机理. 西宁: 青海大学, 2024.
- [8] 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.
- 华铎泽, 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.
- [9] Hua X Z. Research on seed production technology of *Poa pratensis* L. cv Qinghai. Xining: Qinghai University, 2024.
- 华铎泽. 青海草地早熟禾种子生产技术研究. 西宁: 青海大学, 2024.
- [10] Zerangdongzhou. Effects of different row spacing and seeding rate on component traits and seed yield of *Elymus nutans* Griseb. cv. ‘Aba’. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2019.
- 泽让东洲. 不同行距和播种量对阿坝垂穗披碱草植株构件组成和种子产量的影响. 成都: 四川农业大学, 2019.
- [11] 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.
- [12] Tao Y, Pu W, Cui K S, *et al.* Effect of nitrogen fertilizer levels on the growth and yield of female ears of spring maize in hilly areas. Journal of Sichuan Agricultural University, 2025, 43(5): 1146–1156.
- 陶冶, 蒲玮, 崔阔澍, 等. 氮肥水平对丘陵地区春玉米雌穗生长及产量的影响. 四川农业大学学报, 2025, 43(5): 1146–1156.
- [13] Ibell T P, Xu Z H, Blake T, *et al.* Effects of weed control and fertilization at early establishment on tree nitrogen and water use in an exotic F_1 hybrid pine of subtropical Australia. Journal of Soils and Sediments, 2013, 13(9): 1538–1552.
- [14] Liu W. Effects of row spacing and nitrogen fertilizer on seed yield and nitrogen use efficiency of *Leymus secalinus*. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2021.
- 刘伟. 行距和氮肥对赖草种子产量及氮素利用率的影响. 晋中: 山西农业大学, 2021.
- [15] Xie G P, Hu T M, Wang Q Z, *et al.* A study on the impact of nitrogen application and harvest time on the seed yield of Tibetan wild *Elymus nutans* in Lhasa valley, Tibett. Acta Prataculturae Sinica, 2010, 19(2): 89–96.
- 谢国平, 呼天明, 王俭珍, 等. 施N量和收获时间对西藏野生垂穗披碱草种子产量影响研究. 草业学报, 2010, 19(2): 89–96.
- [16] Li T Y, Zhou Q P, Chen Y J, *et al.* Effects of nitrogen application rate on seed yield and nitrogen use efficiency of *Elymus*. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(3): 80–90.
- 李彤瑶, 周青平, 陈有军, 等. 氮肥用量对披碱草属牧草种子产量和氮肥利用效率的影响. 草业学报, 2023, 32(3): 80–90.
- [17] Xiao J Y, Zhang G Y, Wang J W, *et al.* Effects of fertilization and harvest period on *Pennisetum flaccidum* yield and forage quality in the Lhasa river valley. Pratacultural Science, 2024, 41(6): 1347–1358.
- 肖健宇, 张光雨, 王江伟, 等. 施肥和收获期对拉萨河谷地区白草产量和饲用品质的影响. 草业科学, 2024, 41(6): 1347–

1358.

- [18] Wang C Q, Deng S M, Zhang W J, *et al.* Development of grass industry in Tibet. *Journal of Grassland and Forage Science*, 2018(1): 74–79.
王传旗, 邓时梅, 张文静, 等. 论西藏草业发展. *草学*, 2018(1): 74–79.
- [19] Liu Y J, Li C L. Research on seed security in China under a holistic approach to national security: current situation, problems and approaches. *Journal of Northwest A&F University (Social Science Edition)*, 2022, 22(2): 16–26.
刘育金, 李春雷. 总体国家安全观下我国种子安全问题. *西北农林科技大学学报(社会科学版)*, 2022, 22(2): 16–26.
- [20] Song J C. Effect of combined application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer on seed yield, quality of *Elymus nutans* and soil properties of grassland in alpine region. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2022.
宋建超. 氮磷钾肥配施对高寒区垂穗披碱草种子产量、质量和土壤特性的影响. 兰州: 甘肃农业大学, 2022.
- [21] Zhang L J, Qin Y K, Chen J Y. Effects of nitrogen application rate on cotton yield formation and nitrogen utilization efficiency under rape-cotton double cropping straw returning condition. *Crops*, 2024, 40(4): 158–163.
张丽娟, 秦宇坤, 陈俊英. 油棉两季秸秆还田下施氮量对棉花产量形成及氮肥利用效率的影响. *作物杂志*, 2024, 40(4): 158–163.
- [22] Su Z G, Long J T, Gao G R, *et al.* Effects of low temperature and drought stress on seed germination of four *Elymus* L. species. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2024(14): 88–94.
苏志刚, 龙建廷, 高国荣, 等. 低温和干旱胁迫对4种披碱草属种子萌发的影响. *黑龙江畜牧兽医*, 2024(14): 88–94.
- [23] Wang M T, Zhao Y H, Miao Y J, *et al.* Study on forage quality of mixed planting *Medicago sativa* L. and *Festuca elatensis* L. in Nyingchi valley, Tibet. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(6): 1590–1596.
王明涛, 赵玉红, 苗彦军, 等. 西藏林芝河谷地带紫花苜蓿和高羊茅混播牧草品质研究. *草地学报*, 2022, 30(6): 1590–1596.
- [24] Li H F, Zhou B W, Zhang M, *et al.* Adaptability evaluation of different oat varieties introduced in the Hulunbuir region. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(4): 60–72.
李鸿飞, 周帮伟, 张森, 等. 不同燕麦品种在呼伦贝尔地区的引种适应性评价. *草业学报*, 2024, 33(4): 60–72.
- [25] Ren Y X. Studies on the regulation of fertilization and planting density on the growth of triticale and soil physical and chemical properties in the valley area of Tibet. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2024.
任昱鑫. 施肥和种植密度对西藏河谷区小黑麦生长及土壤理化特性的调控作用研究. 兰州: 甘肃农业大学, 2024.
- [26] Garrison C S. Technological advances in grass and legume seed production and testing. *Advances in Agronomy*, 1960(12): 41–125.
- [27] Dan J L B, Xie W D, Wang Y X, *et al.* A study of the seeding rate selection of thunbergii, an indigenous ecological grass in the alpine steppe of northern Xizang. *Journal of Plateau Agriculture*, 2025, 9(1): 73–77, 99.
旦久罗布, 谢文栋, 王有侠, 等. 藏北高寒草原乡土生态草梭罗草播种量筛选试验研究. *高原农业*, 2025, 9(1): 73–77, 99.
- [28] Zhao X X, Cui G L, Li Z H, *et al.* Optimization of seeding ratio and seeding rate of three cool-season turfgrasses in the northern subtropical region. *Journal of Grassland and Forage Science*, 2023(5): 43–50, 86.
赵小雪, 崔高磊, 李正华, 等. 北亚热带地区3种冷季型草坪草混播比例及播种量优化. *草学*, 2023(5): 43–50, 86.
- [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(2): 13–16.
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(2): 13–16.
- [30] 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 viciifolia* ‘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.
- [31] Wu J Z, Li S J, Li G Q, *et al.* Effects of irrigation and topdressing nitrogen at jointing stage on grain yield and quality of furrow-seeding wheat in dryland. *North China Agricultural Journal*, 2023, 38(3): 100–107.
吴金芝, 李淑靖, 李国强, 等. 拔节期灌溉和追施氮肥对旱地沟播小麦产量和品质的影响. *华北农学报*, 2023, 38(3): 100–107.
- [32] Wang R Q, Zhao W M, Wei L P, *et al.* Screening and growth-promoting characterization of antagonistic bacteria in the rhizosphere of oilseed rape on the plateau in Linzhi. *China Plant Protection*, 2021, 41(10): 16–23, 37.
王瑞琪, 赵为民, 魏丽萍, 等. 西藏林芝油菜根际拮抗细菌筛选及其促生特性研究. *中国植保导刊*, 2021, 41(10): 16–

- 23, 37.
- [33] Zhang G Y, Shen Z X, Zhong Z M, *et al.* Different nitrogen fertilizer levels; effects on the grain yield trait and soil nutrient of forage rye in Tibet. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(18): 19–24.
张光雨, 沈振西, 钟志明, 等. 不同施氮水平对西藏饲用黑麦种子产量性状和土壤养分的影响. 中国农学通报, 2021, 37(18): 19–24.
- [34] 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.
- [35] Wang Q, Wang X C, Li X Y, *et al.* Effect of “3414” fertilization on seed yield and quality of *Bromus inermis* in arid area of Ningxia. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(12): 3470–3480.
王琴, 王旭成, 李小云, 等. “3414”施肥效应对宁夏干旱区无芒雀麦种子产量和质量的影响. 草地学报, 2022, 30(12): 3470–3480.
- [36] Song J H, Hu T M, Wang Q Z, *et al.* Correlation analysis of nitrogen application rate and Tibetan wild *Elymus nutans* seed yield and its yield factors. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2008, 36(5): 22–26.
宋江湖, 呼天明, 王佳珍, 等. 施N量与西藏野生垂穗披碱草种子产量及产量因子的相关性分析. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(5): 22–26.
- [37] Duan L X, Ma X, Ju Z L, *et al.* Impact of reduced and split nitrogen fertilization on oat biomass and nitrogen use efficiency in alpine regions. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(10): 3185–3193.
段连学, 马祥, 琚泽亮, 等. 高寒地区氮肥减量分期施用对燕麦生物量及氮肥利用率的影响. 草地学报, 2024, 32(10): 3185–3193.
- [38] Bai Y Y, Wang C, Chen F, *et al.* Effects of nitrogen application amount and frequency on seed yield and nitrogen use efficiency of buffalograss. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(8): 2630–2637.
白燕燕, 王储, 陈芬, 等. 施氮量和施氮频次对野牛草种子产量和氮肥利用效率的影响. 草地学报, 2024, 32(8): 2630–2637.
- [39] He B, Zhang M, Wang Y L, *et al.* The relationship between different agronomic measures and seed yield and yield components of *Deschampsia cespitosa*. Pratacultural Science, 2024, 41(2): 371–381.
何斌, 张敏, 王彦龙, 等. 不同农艺措施与发草种子产量及产量构成因素的关系. 草业科学, 2024, 41(2): 371–381.
- [40] Zhao M Y, Wang B, Wang T F, *et al.* Effects of different seeding rates on seed yield and components of alfalfa. Pratacultural Science, 2023, 40(11): 2871–2878.
赵梦雨, 王斌, 王腾飞, 等. 不同播种量对紫花苜蓿种子产量及构成因素的影响. 草业科学, 2023, 40(11): 2871–2878.
- [41] Yang Z P, Wan K J, Zheng S H, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer and seeding amount configuration on yield formation of rapeseed by aerial seeding. Crops, 2025, 41(3): 225–232.
杨泽鹏, 万柯均, 郑盛华, 等. 氮肥和播种量配置对无人机飞播油菜产量形成的影响. 作物杂志, 2025, 41(3): 225–232.
- [42] Qiao A H, Han J G, Gong A Q, *et al.* Effect of nitrogen fertilizer application on *Elymus nutans* seed quality and yield in Qinghai–Tibet Plateau. Acta Agrestia Sinica, 2006(1): 48–51, 56.
乔安海, 韩建国, 巩爱岐, 等. 氮肥对垂穗披碱草种子产量和质量的影响. 草地学报, 2006(1): 48–51, 56.
- [43] Jia Z F. Effect of nitrogen application levels and sowing densities on grain yield and related traits of oat in alpine region. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2021.
贾志锋. 施氮量和播种密度对高寒区燕麦种子产量及其相关性状的影响研究. 兰州: 甘肃农业大学, 2021.
- [44] Zhao Y Q, Zhang J C, Zhao X H, *et al.* Assessment of seed shattering and analysis of agronomic traits in *Elymus nutans*. Pratacultural Science, 2017, 34(8): 1711–1720.
赵永强, 张俊超, 赵旭红, 等. 垂穗披碱草落粒性评价及农艺性状的相关性分析. 草业科学, 2017, 34(8): 1711–1720.
- [45] Qiu C C, Hu Y T, Yan H, *et al.* Effects of nitrogen application rate and harvest time on *Leymus chinensis* seed yield. Pratacultural Science, 2024, 41(11): 2695–2705.
仇春辰, 胡雨彤, 严涵, 等. 施氮量和收获时间对羊草种子产量的影响. 草业科学, 2024, 41(11): 2695–2705.
- [46] 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.