

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.06.035

引用格式:苏志刚,韩有健,张建杭,等.施氮量与播种量对‘巴青’垂穗披碱草饲草生产性能及营养品质的影响[J].草地学报,2026,34(6):2329–2340

SU Zhi-gang, HAN You-jian, ZHANG Jian-hang, et al. Effects of Nitrogen Application Rate and Seeding Rate on Forage Production Performance and Nutritional Quality of *Elymus nutans* ‘Baqing’[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(6):2329–2340

施氮量与播种量对‘巴青’垂穗披碱草饲草生产性能及营养品质的影响

苏志刚,韩有健,张建杭,陈盈熹,杜金龙,顾涛,郝小玉,苗彦军*
(西藏农牧大学,西藏林芝 860000)

摘要:为缓解西藏高寒地区因饲草短缺带来的压力,本试验以‘巴青’垂穗披碱草(*Elymus nutans* ‘Baqing’)为研究对象,采用双因素裂区设计,主区为氮肥添加量,副区为播种量,氮肥添加量为 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,播种量为 D_1 15.0 kg·hm⁻², D_2 22.5 kg·hm⁻²和 D_3 45 kg·hm⁻²,从而筛选出‘巴青’垂穗披碱草饲草生产最优种植配置组合。结果表明,在相同播种量条件下,随着施氮量的增加,‘巴青’垂穗披碱草饲草生产性能及营养品质均有不同程度的提高。在相同施氮量条件下,随着播种量的增加,‘巴青’垂穗披碱草饲草生产性能及营养品质大致呈现先升后降的趋势。经主成分分析得出,240 kg·hm⁻²的施氮量与22.5 kg·hm⁻²的播种量是‘巴青’垂穗披碱草饲草生产最优种植配置,上述最优种植配置对‘巴青’垂穗披碱草在西藏拉萨高寒地区的推广利用具有一定理论参考价值和生产指导意义。

关键词:‘巴青’垂穗披碱草;施氮量;播种量;饲草产量;营养品质

中图分类号:S543.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)06-2329-12

Effects of Nitrogen Application Rate and Seeding Rate on Forage Production Performance and Nutritional Quality of *Elymus nutans* ‘Baqing’

SU Zhi-gang, HAN You-jian, ZHANG Jian-hang, CHEN Ying-xi, DU Jin-long, GU Tao,
HAO Xiao-yu, MIAO Yan-jun*

(Xizang Agriculture and Animal Husbandry University, Linzhi, Xizang 860000, China)

Abstract: In order to alleviate the pressure caused by the shortage of forage grass in the alpine region of Xizang, *Elymus nutans* ‘Baqing’ was used as the research object in this experiment. A two-factor split-plot design was used. The main plot was the amount of nitrogen fertilizer added, and the sub-plot was the sowing rate. The amount of nitrogen fertilizer added was 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 and N_6 300 kg·hm⁻². The sowing rate was D_1 15.0 kg·hm⁻², D_2 22.5 kg·hm⁻² and D_3 45 kg·hm⁻², so as to screen out the optimal planting configuration combination of ‘Baqing’ forage production. The results showed that under the same sowing rate, with the increase of nitrogen application rate, the production performance and nutritional quality of ‘Baqing’ were increased to varying degrees. Under the same nitrogen application rate, with the increase of sowing rate, the production performance and nutritional quality of ‘Baqing’ showed a trend of increasing first and then decreasing. Principal component analysis showed that 240 kg·hm⁻² nitrogen application rate and 22.5 kg·hm⁻² sowing rate were the optimal planting configuration for the

收稿日期:2025-07-30;修回日期:2025-10-04

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);国家自然科学基金项目(U21A20240);西藏农牧大学林学博士点(一期)(533325001)资助

作者简介:苏志刚(2001-),男,汉族,安徽亳州人,硕士研究生,主要从事草地恢复及野生牧草种质资源选育相关研究,E-mail:2809609722@qq.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail:myj666@126.com

production of ‘Baqing’. The above optimal planting configuration has certain theoretical reference value and production guiding significance for the promotion and utilization of ‘Baqing’ in the alpine region of Lhasa, Xizang.

Key words: *Elymus nutans* ‘Baqing’; Nitrogen application rate; Seeding rate; Forage production; Nutritional quality

受全球气候变化和过度放牧等因素影响,青藏高原高寒草地退化问题日益严重,人工草地建设已成为缓解草畜矛盾、保障牧区饲草供给的重要途径^[1-2]。垂穗披碱草(*Elymus nutans*)作为青藏高原高寒地区重要的多年生优质禾本科(Poaceae)牧草,因其抗逆性强、适口性好、营养价值高,在当地畜牧业可持续发展和生态建设中发挥着不可替代的作用^[3-4]。因此,开展垂穗披碱草相关研究具有极强的现实意义和应用价值^[5]。尽管垂穗披碱草有较好的环境适应性,但部分高寒地区低温、干旱、生长季短和土壤贫瘠等环境因素严重限制了垂穗披碱草的生产性能,如何通过合理的栽培管理措施提高垂穗披碱草的产量和营养品质,是当前高寒牧区人工草地建设的关键问题^[6-7]。

近年来,优化栽培管理措施被认为是提升高寒地区牧草产量和品质的有效手段^[8-9]。其中,种植密度与施氮量通过调控群体结构和养分供应直接影响牧草的光合产物积累和营养品质形成,是饲草生产过程中必须考虑的因素^[10-11]。播种量是调节种植密度的关键因素之一,播种量过高可能导致个体竞争加剧,降低单株生长势,而播种量过低则无法充分利用土地资源,适宜的播种量可以优化光能利用和群体结构,从而提高牧草产量^[12-14]。陈芸莹等^[15]研究表明,当播种方式为撒播时,燕麦的鲜草和干草产量随着播种量的增加呈先增高后降低的趋势;当播种方式为条播时,燕麦的鲜草和干草产量随着播种量的增加呈逐渐上升趋势。Elfatih等^[16]研究发现,紫花苜蓿的干草产量随着播种量增加而增加,当播种量为 $25.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,干草产量达到最大值。王生文等^[17]研究发现,老芒麦饲草的营养品质随着播种量的增加总体呈先增后减的趋势。这些研究虽然在一定程度上反映了植物对密度的响应,但却忽略了植物生长过程中群体结构与养分供应的协同。氮素作为植物生长发育所必需的营养元素,在提高产量和改良土壤等方面发挥着关键作用^[18]。氮肥施用直接影响植物的氮代谢,进而调控粗蛋白、粗脂肪、中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维等

关键营养指标,但过量施氮可能导致氮素利用率下降,甚至造成环境污染^[19-20]。青藏高原土壤氮素含量相对较低,合理的施氮量是提高垂穗披碱草饲草生产性能的关键^[7]。Yong等^[21]研究发现,合理施氮可以提高植物间作系统的固氮率和氮肥利用率。陈鑫等^[22]研究发现,施氮不仅对垂穗披碱草的株高、叶长、叶宽和茎粗等都有促进作用,还可以促进其光合及呼吸作用。宋建超等^[23]研究表明,施氮不仅可以提高垂穗披碱草饲草产量和营养品质,还可以降低杂草与垂穗披碱草竞争养分和空间的能力。

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生产性能和营养品质的研究仍未见报道。为弥补这一领域研究的不足,本试验以‘巴青’垂穗披碱草(*E. nutans* ‘Baqing’)为研究对象,通过设置不同的播种量和施氮量,系统研究二者对其农艺性状、饲草产量及营养品质的影响,从而筛选出‘巴青’垂穗披碱草饲草生产的最优种植配置。以期高寒地区‘巴青’垂穗披碱草的科学栽培提供理论依据,缓解饲草短缺为畜牧业带来的压力,对推动高寒牧区人工草地建设和畜牧业可持续发展具有重要意义。

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,该地区属高原温带季风半干旱气候,昼夜温差大。太阳辐射为 $6000\sim 8000\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,大于 0°C 年积温均值为 2888°C ,年平均气温 $2.4\sim 8.2^{\circ}\text{C}$,年平均降雨量为 $300\sim 510\text{ mm}$,主要集中在6—9月份,年日照时数在 3500 h 以上,无霜期 $100\sim 120\text{ d}$ 。 $0\sim 20\text{ cm}$ 耕层土壤基本情况为:有机质含量 $22.79\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤pH值为6.99,全氮含量 $0.99\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷含量 $0.58\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全钾含量 $18.69\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮含量 $55.95\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷含量 $11.35\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾含量 $76.75\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验材料

供试牧草种子:‘巴青’垂穗披碱草,该品种于2020年12月由西藏自治区第二届草品种审定委员会审定野生驯化栽培品种(品种登记号:XZCS001)。供试肥料:尿素(含N 46%,制造商:云南云天化股份有限公司)。

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,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 kg·hm⁻²,共18个处理,以 N_1D_1 处理作为对照(CK),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,播种方式为条播,行距为30 cm,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,施肥采用沟施,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

农艺性状及产量测定参照《披碱草属牧草种质资源描述规范和数据标准》^[24]。

1.4.1 ‘巴青’垂穗披碱草农艺性状的测定 株高:在开花期,各试验小区随机选取10株,用尺子测量‘巴青’垂穗披碱草垂直植株高度,最后求其绝对株高平均值。

旗叶长和旗叶宽:在开花期,各试验小区随机选取10株,用尺子测量旗叶长和旗叶宽,最后求其平均值。

草层高度:在开花期,各试验小区随机选取10株,将尺子垂直立于地面,测量草层顶部叶片自然伸展的平均高度到地面的垂直距离,计算平均草层高度。

鲜干比:在开花期,每个小区随机选取1 m²的样方测量单位面积鲜草产量,之后在烘箱中105℃杀青15 min,再置于65℃下烘干至样品恒重,得到干草产量,最后计算各试验小区鲜草产量与干草产量的比值。

地下生物量:在成熟期,各小区随机选取50 cm的‘巴青’垂穗披碱草样段,用水清洗根部土壤,之后用滤纸滤除水分,烘干后测量得到地下生物量。

茎粗:在成熟期,各试验小区随机选取10个生殖枝用游标卡尺(精度0.01 mm)测量,最后求其平均值。

倒伏率:在乳熟期,目测各试验小区内倒伏植株占整个小区植株的百分比。

1.4.2 ‘巴青’垂穗披碱草饲草产量的测定 于‘巴青’垂穗披碱草开花期测量饲草产量,测产时每个小区设置1 m²的样方,将样方内所有植株刈割,除去杂草称重得到单位面积鲜草产量,烘干后得到单位面积干草产量。

1.4.3 ‘巴青’垂穗披碱草饲草营养品质的测定^[25-27] 将测量干重后的‘巴青’垂穗披碱草整株粉碎,装入自封袋后密封保存,用于牧草品质分析。

粗蛋白(Crude protein, CP):采用凯氏定氮法测定;

粗脂肪(Ether extract, EE):利用乙醚浸提法测定;

粗灰分(Crude ash, Ash):采用高温灼烧法测定;

酸性洗涤纤维(Acid detergent fiber, ADF):采用聚酯纤维滤网袋法;

中性洗涤纤维(Neutral detergent fiber, NDF):采用聚酯纤维滤网袋法。

1.4.4 ‘巴青’垂穗披碱草相对饲喂价值的计算^[28] 相对饲喂价值(Relative feeding value, RFV)=干物质采食率(Dry matter intake, DMI)×干物质消化率(Digestible dry matter, DDM)/1.29;

干物质采食率(DMI)=120/中性洗涤纤维(NDF);

干物质消化率(DDM)=88.9-0.779×酸性洗涤纤维(ADF)。

1.5 数据处理

使用Microsoft Excel 2019软件进行数据初步处理,使用SPSS 27对数据进行差异显著性检验、方差分析和主成分分析,使用Origin 2024作图。

2 结果与分析

2.1 施氮量与播种量对‘巴青’垂穗披碱草农艺性状的影响

如图1所示,施氮量与播种量对‘巴青’垂穗披碱草的农艺性状有显著影响($P<0.05$)。在相同的施氮量条件下,随着播种量的增加,‘巴青’垂穗披碱草的株高呈现先升高后降低趋势。在相同播种量条件下,随着施氮量的增加,株高呈现先升高后降低的趋势。其中, N_5D_2 处理下的株高最大,达110.86 cm。当施氮量处在 N_1, N_2, N_3 和 N_4 水平时,‘巴青’垂穗披碱草的茎粗随着播种量增加呈下降趋势;当施氮量处在 N_5 和 N_6 水平时,茎粗随着播种量增加呈先升高后降低的趋势。在相同播种量条件下,茎粗随着施氮量增加呈现先升高后降低的趋势。其中, N_4D_1 处理下的茎粗最大,达2.31 mm。在相同的施氮量条件下,‘巴青’垂穗披碱草的地下生物量随着播种量增加呈现上升趋势。在相同播种量条件下,地下生物量随着施氮量增加呈现先升高后降低的趋势。其中, N_4D_3 处理下的地下生物量最大,达76.36 g·m⁻²。在相同的施氮量条件下,随着播种量的增加,‘巴青’垂穗披碱草的旗叶长呈现先升高后降低趋势。在相同播种量条件下,随着施氮量的增加,旗叶长呈现先升高后降低的趋势。其中, N_5D_2 处理下的旗叶长最大,达14.95 cm。在相同的施氮量条件下,随着播种量的增加,‘巴青’垂穗披碱草的旗叶宽呈现先升高后降低趋势。当播种量水平处在 D_1 和 D_2 水平时,旗叶宽随着施氮量增加呈现先升高后降低的趋势;当播种量水平处在 D_3 水平时,旗叶宽随着施氮量增加呈现上升的趋势。其中, N_5D_2 处理下的旗叶宽最大,达0.68 cm。在相同的施氮量条件下,随着播种量的增加,‘巴青’垂穗披碱草的草层高度呈现先升高后降低趋势。在相同播种量条件下,随着施氮量的增加,草层高度呈现先升高后降低的趋势。其中, N_5D_2 处理下的草层高度最大,达55.08 cm。当播种量处在 D_1 水平时, N_4 和 N_6 处理之间差异显著($P<0.05$);当播种量处在 D_2 水平时, N_2 和 N_3 处理之间差异显著($P<0.05$);当播种量处在 D_3 水平时,不同施氮量水平之间无显著差异。其中, N_1D_3 处理下的鲜干比最大,达3.71。在相同的施氮量条件下,‘巴青’垂穗披碱草的倒伏率随着播种量增加呈现上升趋势。在相同播种量条件下,倒伏率随着施氮量增加呈现上升的趋势。其中, N_6D_3 处理下的倒伏率最大,达93%。

2.2 施氮量与播种量对‘巴青’垂穗披碱草饲草产量的影响

如图2所示,施氮量与播种量对‘巴青’垂穗披碱草的鲜草和干草产量均有显著影响($P<0.05$)。当施氮量处在 N_1, N_2, N_3, N_4 和 N_5 水平时,‘巴青’垂穗披碱草的鲜草产量随着播种量增加呈现先升高后降低趋势;当施氮量处在 N_6 水平时,鲜草产量随着播种量增加呈现升高的趋势。在相同播种量条件下,鲜草产量随着施氮量增加呈现先升高后降低的趋势。其中, N_5D_2 处理下的鲜草产量最大,达19 980.62 kg·hm⁻²。在相同施氮量条件下,随着播种量的增加,‘巴青’垂穗披碱草的干草产量呈现先升高后降低趋势。在相同播种量条件下,随着施氮量的增加,干草产量呈现先升高后降低的趋势。其中, N_5D_2 处理下的干草产量最大,达5492.05 kg·hm⁻²。

2.3 施氮量与播种量对‘巴青’垂穗披碱草饲草营养品质的影响

如图3所示,施氮量与播种量对‘巴青’垂穗披碱草饲草的营养品质有显著影响($P<0.05$)。随着播种量的增加,当施氮量处在 N_1 和 N_4 水平时,‘巴青’垂穗披碱草的粗蛋白含量呈现下降趋势;当施氮量处在 N_2, N_3, N_5 和 N_6 水平时,粗蛋白含量呈现先升高后下降的趋势。在相同播种量条件下,随着施氮量的增加,粗蛋白含量呈现先升高后降低的趋势。其中, N_5D_2 处理下的粗蛋白含量最高,达14.26%。当施氮量处在 N_1, N_2, N_3, N_4 和 N_5 水平时,‘巴青’垂穗披碱草的粗脂肪含量随着播种量增加呈现先升高后降低趋势;当施氮量处在 N_6 水平时,粗脂肪含量随着播种量增加呈现下降的趋势。当播种量处在 D_1 和 D_2 水平时,粗脂肪含量随着施氮量增加呈现先升高后降低的趋势;当播种量处在 D_3 水平时,粗脂肪含量随着施氮量增加呈现上升的趋势;其中, N_5D_2 处理下的粗脂肪含量最高,达4.28%。在相同的施氮量条件下,‘巴青’垂穗披碱草的粗灰分含量随着播种量增加呈现下降趋势。在相同播种量条件下,粗灰分含量随着施氮量增加呈现先下降后上升的趋势。其中, N_5D_3 处理下的粗灰分含量最低,为7.02%。在相同的施氮量条件下,‘巴青’垂穗披碱草的酸性洗涤纤维含量随着播种量增加呈现先下降后上升趋势。在相同播种量条件下,酸性洗涤纤维含量随着施氮量增加大致呈现波动式增减的趋势。其中, N_5D_2 处理下的酸性洗

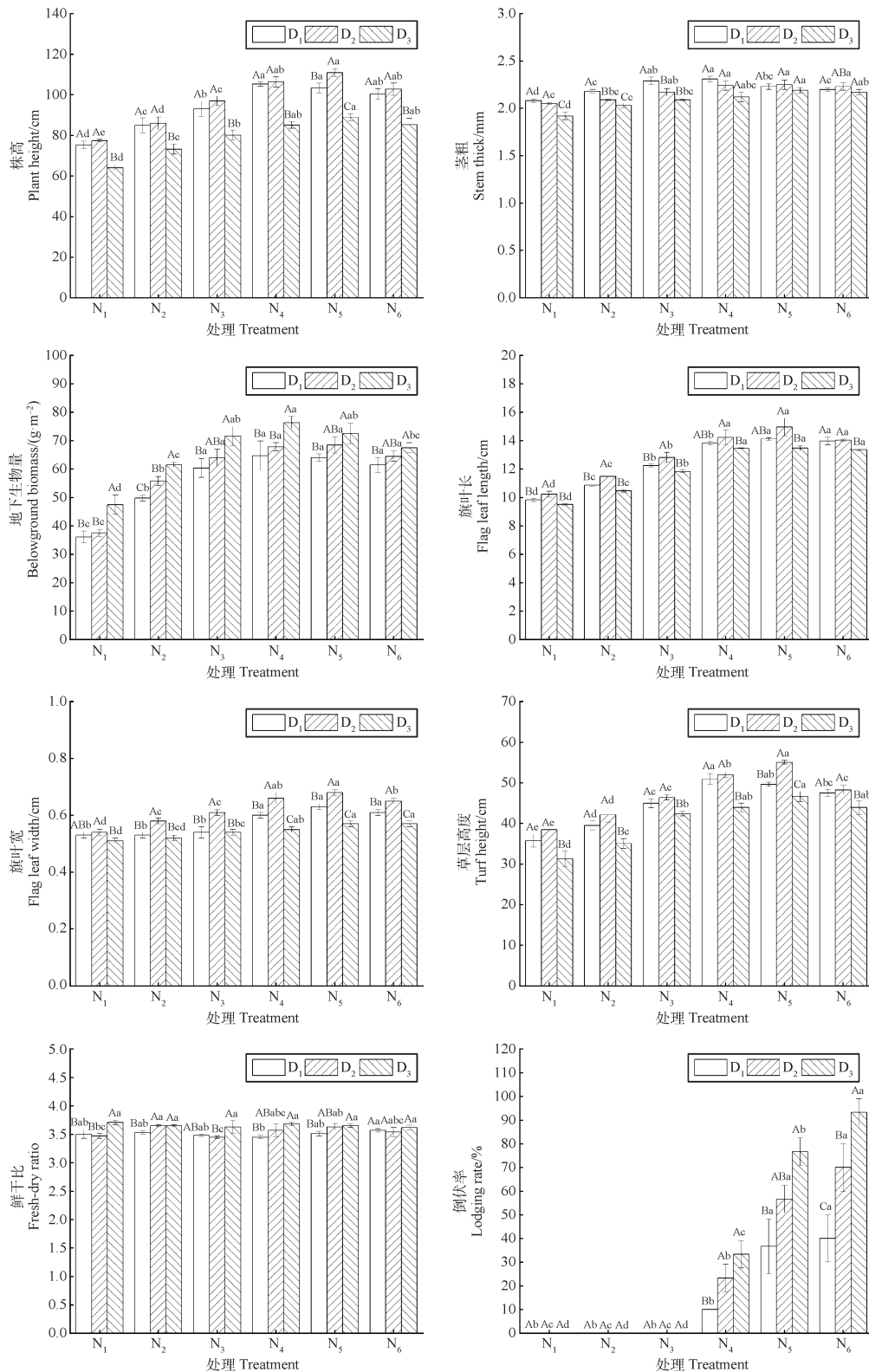


图1 施氮量与播种量对‘巴青’垂穗披碱草农艺性状的影响

Fig. 1 Effects of nitrogen application rate and seeding rate on agronomic traits of *Elymus nutans* 'Baqing'

注: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的差异显著($P < 0.05$)。下同

Note: Different uppercase letters indicate that the difference between different seeding rates under the same nitrogen application rate is significant ($P < 0.05$), and different lowercase letters indicate that the difference between different nitrogen application rates under the same seeding rate is significant ($P < 0.05$). The same as below

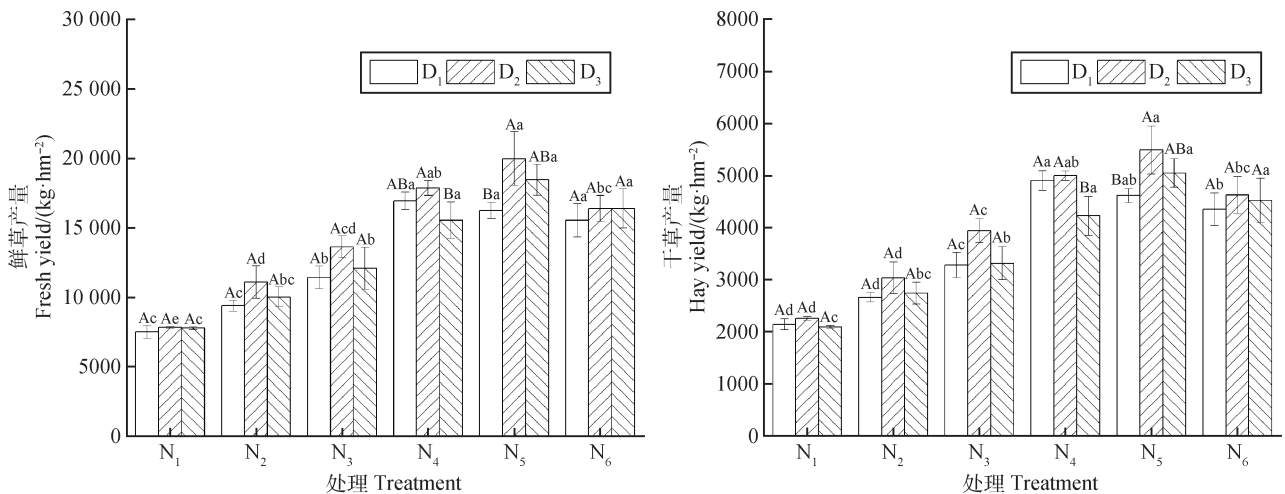


图2 施氮量与播种量对‘巴青’垂穗披碱草饲草产量的影响

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

涤纤维含量最低,为35.41%。在相同的施氮量条件下,‘巴青’垂穗披碱草的中性洗涤纤维含量随着播种量增加呈现先下降后上升趋势。当播种量处在D₁和D₃水平时,N₁与其他施氮处理之间差异显著($P<0.05$)。当播种量处在D₂水平时,不同施氮处理之间无显著性差异。其中,N₃D₂处理下的中性洗涤纤维含量最低,为66.31%。在相同的施氮量条件下,‘巴青’垂穗披碱草的干物质采食率随着播种量增加呈现先升高后降低趋势。当播种量处在D₁和D₂水平时,干物质采食率随着施氮量增加呈现先升高后稳定的趋势;当播种量处在D₃水平时,干物质采食率随着施氮量增加大致呈现波动式增减的趋势。在相同的施氮量条件下,‘巴青’垂穗披碱草的干物质消化率随着播种量增加呈现先升高后降低趋势。当播种量处在D₁和D₂水平时,干物质消化率随着施氮量增加大致呈现波动式增减的趋势;当播种量处在D₃水平时,干物质消化率随着施氮量增加呈现先升高后降低的趋势。其中,N₅D₂处理下的干物质消化率最高,为61.31%。在相同的施氮量条件下,‘巴青’垂穗披碱草的相对饲喂价值随着播种量增加呈现先升高后降低趋势。当播种量处在D₁水平时,N₂,N₃,N₅,N₆处理与N₁处理之间差异显著;当播种量处在D₂水平时,N₃,N₅,N₆处理与N₁处理之间差异显著;当播种量处在D₃水平时,N₁处理与其他处理之间差异显著($P<0.05$)。其中,N₃D₂处理下的相对饲喂价值最大,为85.90。

2.4 ‘巴青’垂穗披碱草产量性状和营养品质的主成分分析及综合评价

PCA分析能够充分地反映牧草各指标间起主导作用的综合指标。由于农艺性状间的相关性易导致信息重叠,为消除重叠信息间的不利影响,对‘巴青’垂穗披碱草的18项相关指标进行主成分分析(表1)。根据特征值 >1 和累积贡献率 $\geq 85\%$ 的原则,可提取到3个主要成分,贡献率分别为66.127%,12.848%,7.987%,累计贡献率达86.962%。第一主成分的特征值为11.903,此成分中载荷较高的有株高、旗叶长、旗叶宽、草层高度、鲜草产量、干草产量、粗蛋白、粗脂肪和相对饲喂价值。第二主成分特征值为2.313,此成分载荷较高的有倒伏率、地下生物量、鲜干比和中性洗涤纤维。第三主成分的特征值为1.438,此成分载荷较高的有茎粗和酸性洗涤纤维。根据林海明等^[29]和赵宁等^[30]方法将原始数据进行标准化后导入SPSS,可以得出3个主成分的公因子值F₁、F₂和F₃,代入 $F = (66.127F_1 + 12.848F_2 + 7.987F_3)/86.962$,得出‘巴青’垂穗披碱草不同施氮量和播种量处理的综合得分,其中N₅D₂处理综合得分最高,为4.221;其次是N₄D₂处理,综合得分为2.872。因此,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,综合表现最好,其次的种植配置为180 kg·hm⁻²的施氮量与22.5 kg·hm⁻²的播种量。

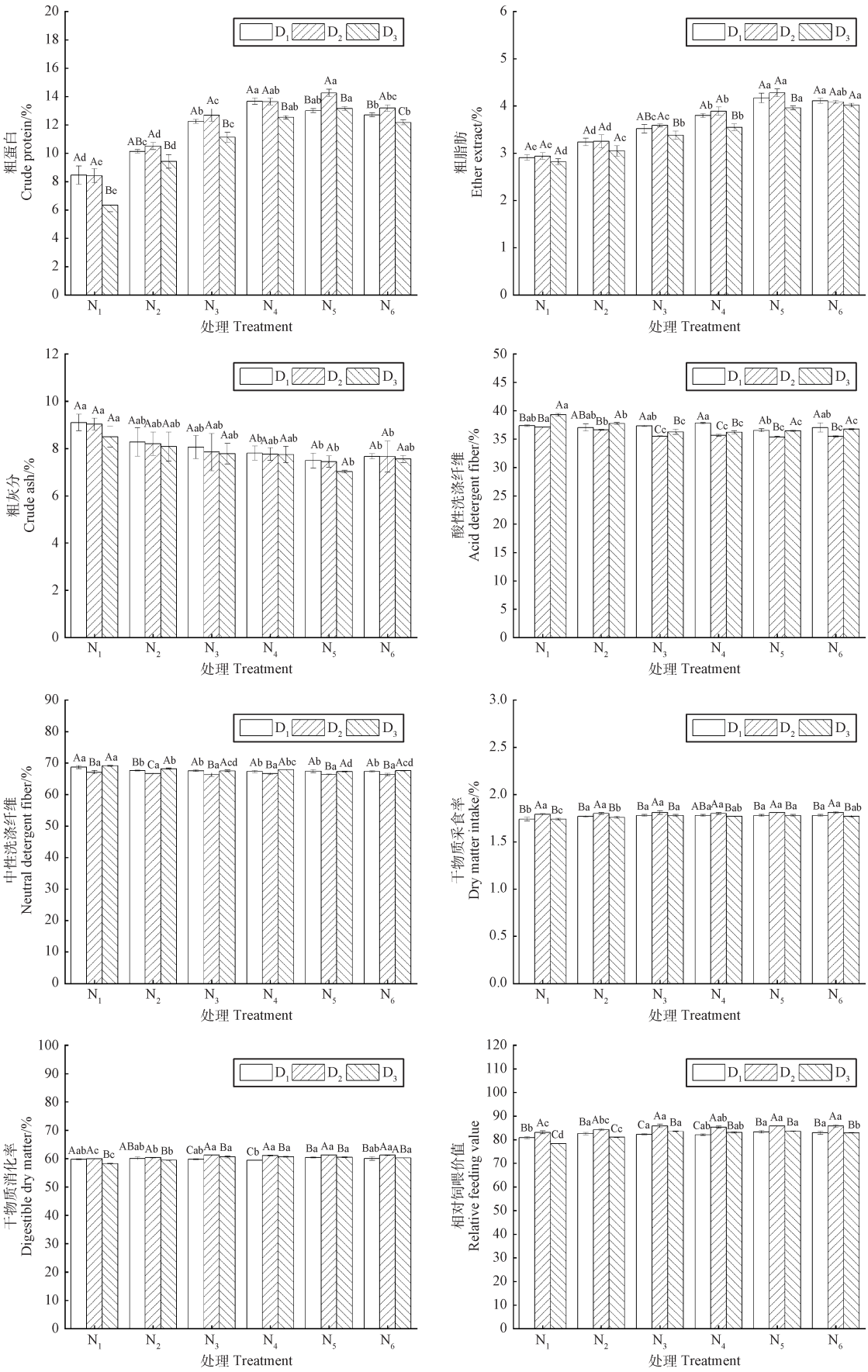


图 3 施氮量与播种量对‘巴青’垂穗披碱草饲草营养品质的影响

Fig. 3 Effects of nitrogen application rate and sowing rate on nutritional quality of *Elymus nutans* ‘Baqing’ forage

表 1 ‘巴青’垂穗披碱草各因子特征值和累计贡献率
Table 1 Characteristic value and cumulative contribution rate of each factor of *Elymus nutans* ‘Baqing’

指标 Index	主成分 Principal components		
	PC I	PC II	PC III
株高 Plant height	0.905	-0.156	0.318
倒伏率 Lodging rate	0.617	0.471	-0.098
茎粗 Stem thick	0.776	-0.088	0.478
地下生物量 Belowground biomass	0.715	0.466	-0.205
旗叶长 Flag leaf length	0.953	0.192	0.146
旗叶宽 Flag leaf width	0.873	-0.130	0.109
草层高度 Turf height	0.952	-0.045	0.202
鲜草产量 Fresh yield	0.914	0.334	0.051
干草产量 Hay yield	0.926	0.282	0.106
鲜干比 Fresh-dry ratio	-0.102	0.693	-0.566
粗蛋白 Crude protein	0.958	0.084	0.135
粗脂肪 Ether extract	0.918	0.242	0.171
粗灰分 Crude ash	-0.674	-0.473	0.148
酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber	-0.780	0.293	0.440
中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber	-0.770	0.499	0.187
干物质采食率 Dry matter intake	0.766	-0.473	-0.195
干物质消化率 Digestible dry matter	0.781	-0.294	-0.440
相对饲喂价值 Relative feeding value	0.835	-0.426	-0.345
特征值 Eigenvalues	11.903	2.313	1.438
贡献率 Contribution rate/%	66.127	12.848	7.987
累计贡献率 Cumulative contribution/%	66.127	78.975	86.962

表 2 ‘巴青’垂穗披碱草不同施氮量和播种量处理的公因子值及综合排名

Table 2 Common factor values and comprehensive ranking of different nitrogen application rates and seeding rates of *Elymus nutans* ‘Baqing’

处理 Treatment	F ₁	F ₂	F ₃	F	排序 Ranking
N ₁ D ₁	-5.337	-1.081	0.701	-4.154	17
N ₂ D ₁	-2.449	-1.133	0.243	-2.007	14
N ₃ D ₁	-0.666	-0.542	1.641	-0.436	11
N ₄ D ₁	1.661	0.263	3.001	1.578	6
N ₅ D ₁	2.440	0.523	1.228	2.046	4
N ₆ D ₁	1.662	0.709	1.065	1.466	7
N ₁ D ₂	-3.706	-2.807	-0.260	-3.256	16
N ₂ D ₂	-0.823	-1.391	-1.476	-0.967	13
N ₃ D ₂	2.155	-2.458	-0.761	1.206	8
N ₄ D ₂	3.910	-0.637	-0.080	2.872	2
N ₅ D ₂	5.592	0.057	-0.427	4.221	1
N ₆ D ₂	3.963	-0.762	-0.622	2.844	3
N ₁ D ₃	-7.608	2.071	0.126	-5.468	18
N ₂ D ₃	-4.069	1.047	-0.666	-3.001	15
N ₃ D ₃	-0.808	0.204	-1.581	-0.730	12
N ₄ D ₃	0.537	1.681	-1.211	0.545	10
N ₅ D ₃	2.342	2.168	-0.648	2.042	5
N ₆ D ₃	1.205	2.088	-0.272	1.200	9

3 讨论

3.1 施氮量与播种量对‘巴青’垂穗披碱草饲草农艺性状及产量的影响

施氮量与播种量是影响植物产量的关键因素,选择适宜的施氮量和播种量是植物获得高产、高效的基础^[31-32]。密度制约是植物种群的一个普遍特征^[33]。种群中个体可利用的资源总量有限,导致相邻植株间存在竞争,从而影响植物生长发育^[34]。刘启林等^[35]研究发现,随着播种量的增加,老芒麦的株高和茎粗呈下降趋势,分蘖数和生殖枝数呈先升后降的趋势。本研究表明,高播种量对株高、茎粗、草层高度、旗叶长和旗叶宽均影响显著($P<0.05$),表明密度制约效应明显。郑春风等^[36]研究发现,箭筈豌豆的鲜草产量随着播种量的增加呈现上升趋势。普华才让^[37]研究发现,燕麦的鲜草和干草产量均随着播种量的增加呈现先增后降的趋势。本研究中‘巴青’垂穗披碱草饲草产量随着播种量的增加呈现先升高后降低的趋势。一方面是高播种量会导致植物对于营养需求竞争激烈,显著抑制了植物的生长发育;另一方面是高播种量会导致植物叶片相互重叠无法充分利用光照造成资源竞争,导致植物光合速率降低,进而抑制生长^[38-39]。适宜的施加氮肥能够增加叶片中的叶绿素含量,促进植物的光合作用,使得植物固定的光合产物增多^[40-41],从而增加植物饲草产量。大量研究^[23,28,42]证实,氮肥是限制垂穗披碱草产量的主要因子,合理施用氮肥对垂穗披碱草的增产有积极作用。本研究发现,不同密度的‘巴青’垂穗披碱草对氮肥的需求不同,这说明施氮在一定程度上可以起到增产效果,但过度施氮并不能显著提高产量,并且造成资源浪费。虽然各学者研究品种、地点和气候等条件不同,但其研究结果的相似性也进一步证明施氮量和种植密度对作物产量的影响存在阈值^[43-46]。陈鑫等^[28]研究发现,垂穗披碱草的地下生物量和地上生物量随着种植年限的增加而增加,建植第二年的饲草产量显著高于第一年。同时也有其他研究认为^[47],多年生牧草播种两年后,产量会随着种植年限的增加而降低。因此,‘巴青’垂穗披碱草的饲草生产性能可能会随着种植年限的增加发生变化。

3.2 施氮量与播种量对‘巴青’垂穗披碱草饲草营养品质的影响

施氮量与播种量是影响植物营养品质的重要

因素,适宜的施氮量和播种量是改善植物营养品质的前提^[48-49]。牧草营养价值的高低直接影响其饲喂效果,粗蛋白含量越高,酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维含量越低,饲草品质越好^[50]。本研究发现,随着播种量的增加,‘巴青’垂穗披碱草的粗蛋白含量大致呈现先升高后降低趋势,酸性洗涤纤维含量和中性洗涤纤维含量大致呈现先降低后升高的趋势。有研究认为^[51-52],播种量对苜蓿的酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维无显著影响。而吕会刚等^[53]研究发现,随着播种量的增加,紫花苜蓿的粗蛋白含量呈现上升趋势,酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维含量呈现下降趋势。这说明品种、试验区气候条件以及试验方法不同可能会导致牧草的营养品质产生差异。宋建超等^[23]研究发现,施氮处理显著增加了垂穗披碱草的粗蛋白和粗脂肪含量,这与本试验研究结果基本一致。付东青等^[54]研究显示,适宜的施氮量和种植密度可以增加燕麦饲草的粗蛋白含量和相对饲喂价值。马莉^[55]研究表明,播种量与施氮量及其交互作用均对盐地碱蓬的饲草品质有显著影响,增施氮肥可显著提高碱蓬的粗蛋白含量和相对饲喂价值,随着播种量的增大,粗蛋白含量和相对饲喂价值呈先增后减的趋势。本研究结果也同样表明,适宜的施氮量与播种量组合可以显著提高垂穗披碱草粗蛋白、粗脂肪和相对饲喂价值,但酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维含量则与前人^[52-53]的研究结果略有差异。一方面可能是不同品种对营养成分的吸收和转化存在差异,另一方面可能因为施氮量影响了不同播种量下‘巴青’垂穗披碱草的营养生殖分配^[56]。粗脂肪是饲料的一个重要组成部分,但当饲料中粗脂肪含量超过5.00%时就会降低反刍家畜消化功能,且容易引起腹泻^[57]。本研究中,各‘巴青’垂穗披碱草的粗脂肪含量均未超过5.00%,最高为4.28%。

4 结论

在西藏自治区拉萨市高寒地区,不同施氮量和播种量对‘巴青’垂穗披碱草饲草生产性能及营养品质均有显著影响,施氮量和播种量过大会降低‘巴青’垂穗披碱草饲草产量及营养品质,且一定范围内增施氮肥可以缓解‘巴青’垂穗披碱草群体的密度制约效应。240 kg·hm⁻²的施氮量与22.5 kg·hm⁻²的播种量是‘巴青’垂穗披碱草饲草生产最优种植

配置,鲜草产量达19 980.62 kg·hm⁻²,干草产量达5492.05 kg·hm⁻²,粗蛋白含量达14.26%。上述饲草生产最优种植配置不仅可以缓解西藏高寒地区饲草短缺带来的压力,而且还对‘巴青’垂穗披碱草在西藏高寒地区的推广利用具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 王传旗,邓时梅,张文静,等. 论西藏草业发展[J]. 草学,2018(1):74-79
WANG C Q, DENG S M, ZHANG W J, et al. On the development of grass industry in Xizang[J]. Journal of Grassland and Forage Science, 2018(1):74-79
- [2] 徐长虹,张晓强,马斌,等. 饲用油菜与饲用玉米秸秆在西藏日喀则的混合青贮营养品质研究[J]. 西藏农业科技,2024,46(3):34-36
XU C H, ZHANG X Q, MA B, et al. Study on the nutritional quality of mixed silage of feed rape and feed corn straw in Shigatse, Xizang[J]. Tibet Journal of Agricultural Sciences, 2024, 46(3):34-36
- [3] 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[J]. 草学,2025(1):43-51,58
LEI B X, WANG M T, WANG C Q, et al. Effect of different fertilization treatments on production performance of *Elymus nutans* ‘Baqing’[J]. Journal of Grassland and Forage Science, 2025(1):43-51,58
- [4] 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[J]. 黑龙江畜牧兽医,2024(14):88-94
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[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2024, (14):88-94
- [5] 高浩诚,牧仁,焦婷,等. 施氮对高寒垂穗披碱草草地根际、非根际土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报,2023,37(6):276-282
GAO H C, MU R, JIAO T, et al. Effects of nitrogen application on soil fertility in rhizosphere and non-rhizosphere of *Elymus nutans* in alpine region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(6):276-282
- [6] 苏志刚,韩有健,翟亚军,等. 垂穗披碱草种质资源研究进展[J]. 草学,2025(5):1-11,24
SU Z G, HAN Y J, ZHAI Y J, et al. Research progress on germplasm resources of *Elymus nutans* [J]. Journal of Grassland and Forage Science, 2025(5):1-11,24
- [7] 宋建超,杨航,鱼小军,等. 氮磷肥配施对高寒区垂穗披碱草饲草产量及营养品质的影响[J]. 草地学报,2022,30(3):731-742
SONG J C, YANG H, YU X J, et al. Effect of combined application of nitrogen and phosphorus fertilizer on the forage yield and nutritional quality of *Elymus nutans* in alpine region[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(3):731-742
- [8] 童永尚,张春平,董全民,等. 氮素添加对多年生高寒栽培草地饲草生产性能和营养品质的影响[J]. 植物科学学报,2025, 43(1):102-110

- TONG Y S, ZHANG C P, DONG Q M, et al. Effects of nitrogen addition on forage production performance and nutritional quality of perennial alpine cultivated grassland [J]. Plant Science Journal, 2025, 43(1): 102-110
- [9] 徐正辉, 俞慧云, 杨浩, 等. 营养及生殖生长关键期氮磷肥配施对老芒麦产草量及营养价值的影响[J]. 中国饲料, 2024(19): 137-145
- XU Z H, YU H Y, YANG H, et al. The effect of nitrogen and phosphorus fertilizer combined application on the yield and nutrition value in vegetative growth and reproductive growth stages of local *Elymus sibiricus* [J]. China Feed, 2024(19): 137-145
- [10] 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[J]. 草业学报, 2017, 26(2): 123-135
- WANG Y H, WANG C Z, LI D F, et al. Effects of seeding rate on plant number, production performance, and quality of alfalfa [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(2): 123-135
- [11] 徐玥, 邱青璐, 田晓. 不同施氮量对黑麦草生产性能和营养品质的影响[J]. 饲料研究, 2025, 48(5): 144-148
- XU Y, QIU Q L, TIAN X. Effects of different nitrogen application rates on production performance and nutritional quality of ryegrass [J]. Feed Research, 2025, 48(5): 144-148
- [12] 刘陈, 王伟妮, 廖世鹏, 等. 内蒙古黄河灌区麦后复种油菜绿肥不同耕作模式下的适宜播种量[J]. 草业科学, 2025(3): 709-718
- LIU C, WANG W N, LIAO S P, et al. Suitable sowing amount under different tillage modes of green manure for multiple cropping rape after wheat in Yellow River irrigation area of Inner Mongolia [J]. Journal of Grassland and Forage Science, 2025(3): 709-718
- [13] JEFFERSON P G, CUTFORTH H W. Sward age and weather effects on alfalfa yield at a semi-arid location in southwestern Saskatchewan [J]. Canadian Journal of Plant Science, 1997, 77(4): 595-599
- [14] 南丽丽, 师尚礼, 郭全恩, 等. 甘肃荒漠灌区播量和行距对紫花苜蓿营养价值的影响[J]. 草业学报, 2019, 28(1): 108-119
- 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 [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(1): 108-119
- [15] 陈芸莹, 姜臻, 张新, 等. 播量与播种方式对四川阿坝地区燕麦牧草产量和品质的影响[J]. 草学, 2023(3): 19-26
- CHEN Y Y, JIANG Z, ZHANG X, et al. Effects of sowing rate and method on the yield and quality of *Avena sativa* L. cv. Magnum [J]. Journal of Grassland and Forage Science, 2023(3): 19-26
- [16] ABDEL-RAHMAN E M, ABU SUWAR A O. Effect of seedling rate on growth and yield of two alfalfa (*Medicago sativa* L.) Cultivars [J]. International Journal of Sudan Research, 2012, 2(2): 141-154
- [17] 王生文, 史静, 宫旭胤, 等. 播量与留茬高度对老芒麦产量及品质的影响[J]. 草业科学, 2015, 32(1): 107-113
- WANG S W, SHI J, GONG X Y, et al. Effects of sowing rate and stubble height on the yield and quality of *Elymus sibiricus* [J]. Pratacultural Science, 2015, 32(1): 107-113
- [18] FRANCIS B, ARAVINDAKUMAR C T, BREWER P B, et al. Plant nutrient stress adaptation: A prospect for fertilizer limited agriculture [J]. Environmental and Experimental Botany, 2023, 213: 105431
- [19] HULL R J, LIU H B. Turfgrass nitrogen: physiology and environmental impacts [J]. International Turfgrass Society Research, 2005, 10: 962-975
- [20] SHI J C, YASUOR H, YERMIYAHU U, et al. Dynamic responses of wheat to drought and nitrogen stresses during re-watering cycles [J]. Agricultural Water Management, 2014, 146: 163-172
- [21] YONG T W, CHEN P, DONG Q, et al. Optimized nitrogen application methods to improve nitrogen use efficiency and nodule nitrogen fixation in a maize-soybean relay intercropping system [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(3): 664-676
- [22] 陈鑫, 焦婷, 牧仁, 等. 氮添加对高寒人工草地垂穗披碱草 (*Elymus nutans*) 生长及光合特性的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(8): 1964-1971
- CHEN X, JIAO T, MU R, et al. Effects of nitrogen addition on growth and photosynthetic characteristics of *Elymus nutans* in alpine artificial grassland [J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(8): 1964-1971
- [23] 宋建超, 鱼小军, 魏孔涛, 等. 施氮对高寒区垂穗披碱草饲草生产性能及营养品质的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(7): 1555-1564
- SONG J C, YU X J, WEI K T, et al. Effects of nitrogen application on production performance and nutritional quality of *Elymus nutans* in alpine region [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(7): 1555-1564
- [24] 袁庆华, 谷安琳, 李向林, 等. 披碱草属牧草种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010: 1-3
- YUAN Q H, GU A L, LI X L, et al. Description specification and data standard of *Elymus* germplasm resources [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2010: 1-3
- [25] 杨胜. 饲料分析及饲料质量检测技术[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1998: 330-338
- YANG S. Feed Analysis and Feed Quality Monitoring Technology [M]. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1998: 330-338
- [26] VAN SOEST P J, ROBERTSON J B, LEWIS B A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition [J]. Journal of Dairy Science, 1991, 74(10): 3583-3597
- [27] 宋金昌, 牛一兵. 饲料分析与饲料质量检测技术[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2012: 42-92
- SONG J C, NIU Y B. Feed analysis and feed quality detection technology [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2012: 42-92

- [28] 陈鑫,焦婷,马淑敏,等. 高寒人工草地垂穗披碱草营养品质及其地上、地下生物量对氮素添加的响应[J]. 草原与草坪, 2023,43(4):20-26
CHEN X, JIAO T, MA S M, et al. Response of nutrient quality, aboveground biomass and underground biomass of *Elymus nutans* to nitrogen addition in alpine artificial grassland [J]. Grassland and Turf, 2023, 43(4): 20-26
- [29] 林海明,张文霖. 主成分分析与因子分析的异同和SPSS软件——兼与刘玉玫、卢纹岱等同志商榷[J]. 统计研究, 2005, 22(3):65-69
LIN H M, ZHANG W L. The relationship between principal component analysis and factor analysis and SPSS software—to discuss with comrade Liu Yumei, Lu Wendai etc [J]. Statistical Research, 2005, 22(3): 65-69
- [30] 赵宁,赵秀芳,赵来喜,等. 不同燕麦品种在坝上地区的适应性评价[J]. 草地学报, 2009, 17(1):68-73
ZHAO N, ZHAO X F, ZHAO L X, et al. Adaptability evaluation of different *Avena sativa* varieties in Bashang, Hebei Province [J]. Acta Agrestia Sinica, 2009, 17(1): 68-73
- [31] 苏志刚,韩有健,翟亚军,等. 披碱草属牧草萌发、生长发育及产量的研究进展[J]. 中国饲料, 2025(13):178-184
SU Z G, HAN Y J, ZHAI Y J, et al. Research progress on germination, growth and development and yield of *Elymus* [J]. China Feed, 2025(13): 178-184
- [32] 毋玲玲,魏玉杰,宿翠翠,等. 不同种植密度与氮肥互作对红花产量及品质的影响[J]. 草业科学, 2024, 41(2):404-415
WU L L, WEI Y J, SU C C, et al. Effects of planting density and nitrogen fertilizer concentration on yield and quality of safflower [J]. Pratacultural Science, 2024, 41(2): 404-415
- [33] 武慧娟,张裕,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[J]. 草业科学, 2023, 40(12):3084-3094
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’ [J]. Pratacultural Science, 2023, 40(12): 3084-3094
- [34] 周琦,李岚涛,张露露,等. 氮肥和播种量互作对冬小麦产量、生长发育和生态特性的影响[J]. 作物学报, 2023, 49(11):3100-3109
ZHOU Q, LI L T, ZHANG L L, et al. Effects of interaction of nitrogen level and sowing rate on yield, growth, and ecological field characteristics of winter wheat [J]. Acta Agronomica Sinica, 2023, 49(11): 3100-3109
- [35] 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[J]. 中国农业科学, 2024, 57(14):2744-2754
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 [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2024, 57(14): 2744-2754
- [36] 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[J]. 中国土壤与肥料, 2024(6):215-221
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* [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2024(6): 215-221
- [37] 普华才让. 播量对甘南高寒牧区饲用燕麦产量的影响[J]. 畜牧兽医杂志, 2025, 44(3):94-97
PU H C R. Effect of sowing quantity on the yield of *Avena sativa* L. in Gannan alpine pastoral area [J]. Journal of Animal Science and Veterinary Medicine, 2025, 44(3): 94-97
- [38] 王亚梁,朱德峰,向镜,等. 杂交稻低播量精量播种育秧及机插秧特性[J]. 中国水稻科学, 2020, 34(4):332-338
WANG Y L, ZHU D F, XIANG J, et al. Characteristics of seedling raising and mechanized transplanting of hybrid rice with a low seeding rate by precise seeding method [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2020, 34(4): 332-338
- [39] 王鑫,刘场,岳跃森,等. 播种量对高羊茅无土草皮质量的影响[J]. 草地学报, 2025, 33(1):208-212
WANG X, LIU Y, YUE Y S, et al. Effects of sowing rate on quality of *Festuca arundinacea* soilless sod [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(1): 208-212
- [40] YAO X Q, LIU Q. Changes in morphological, photosynthetic and physiological responses of Mono Maple seedlings to enhanced UV-B and to nitrogen addition [J]. Plant Growth Regulation, 2006, 50(2): 165-177
- [41] EL GENDY A G, EL GOHARY A E, OMER E A, et al. Effect of nitrogen and potassium fertilizer on herbage and oil yield of chervil plant (*Anthriscus cerefolium* L.) [J]. Industrial Crops and Products, 2015, 69: 167-174
- [42] 邓时梅. 施氮和刈割措施对不同地区巴青野生垂穗披碱草产量和品质的影响[D]. 拉萨:西藏大学, 2019:1-5
DENG S M. Effects of nitrogen application and cutting on the yield and quality of wild *Elymus nutans* of Baqing county in different areas of Tibet [D]. Lasa: Tibet University, 2019: 1-5
- [43] 蒋紫薇,刘桂宇,安昊云,等. 种植密度与施氮对玉米/秣食豆间作系统饲草产量、品质和氮肥利用的影响[J]. 草业学报, 2022, 31(7):157-171
JIANG Z W, LIU G Y, AN H Y, et al. Effects of planting density and nitrogen application on forage yield, quality and nitrogen use efficiency in a maize/forage soybean intercropping system [J]. Acta Pratacultural Sinica, 2022, 31(7): 157-171
- [44] 李丽,李宁,盛建东,等. 施氮量和种植密度对紫花苜蓿生长及种子产量的影响[J]. 草地学报, 2012, 20(1):54-57, 62
LI L, LI N, SHENG J D, et al. Effects of nitrogen fertilizer and planting density on alfalfa growth and seed yield [J]. Acta Agrestia Sinica, 2012, 20(1): 54-57, 62
- [45] 雷占兰,周华坤,刘泽华,等. 密度氮肥交互处理下高寒地区燕麦的生长特性与生殖分配[J]. 草业科学, 2014, 31(6):1110-1119
LEI Z L, ZHOU H K, LIU Z H, et al. The growth performance and reproductive allocation of *Avena sativa* under density and nitrogen interaction [J]. Pratacultural Science, 2014, 31(6): 1110-1119
- [46] 王佩. 种植密度和施氮量对关中地区夏玉米产量及氮肥利用

- 效率的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2023:1-7
- WANG P. Effects of planting density and N application on the yield and N fertilizer use efficiency of summer maize in Guanzhong area[D]. Yangling:Northwest A & F University, 2023: 1-7
- [47] 金鑫. 高寒区不同龄级老芒麦产量、光合及解剖结构特征分析[D]. 兰州:甘肃农业大学,2021:13-18
- JIN X. Research on the yield, photosynthetic and anatomical structure of characteristics of the different planting ages of *Elymus sibiricus* L. in alpine regions [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2021: 13-18
- [48] 王佳. 种植模式、密度和施氮对河西地区饲用玉米产量、品质及水氮利用的影响[D]. 兰州:兰州大学,2022:1-7
- WANG J. Effects of planting method, density and nitrogen rate on yield, quality and water and nitrogen utilization of forage maize in Hexi region[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022: 1-7
- [49] 周丽,付薇,孟军江,等. 种植密度和施氮量对贵州地区爱沃燕麦产量、品质和经济效益的影响[J]. 饲料研究, 2024, 47(2):101-105
- ZHOU L, FU W, MENG J J, et al. Effects of planting density and nitrogen fertilizing level on yield, quality, and economic benefit of Ever-leaf oat in Guizhou region [J]. Feed Research, 2024, 47(2):101-105
- [50] 陈希,姜婉茹,高铭遥,等. 不同粗饲料苜蓿干草和稻秸对湖羊饲喂效果的比较研究[J]. 动物营养学报, 2020, 32(11): 5285-5292
- CHEN X, JIANG W R, GAO M Y, et al. Comparative study on feeding effect of different roughages alfalfa hay and rice straw on hu sheep[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2020, 32(11):5285-5292
- [51] 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[J]. 草业学报, 2022, 31(5):61-75
- 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[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(5):61-75
- [52] 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 [J]. Agronomy Journal, 2008, 100(1):191-197
- [53] 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[J]. 草业学报, 2019, 28(3): 164-174
- LÜ 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[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(3):164-174
- [54] 付东青,王彦超,宋磊,等. 施氮量和种植密度对石河子复播早熟饲用燕麦生产性能的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(10): 2364-2371
- FU D Q, WANG Y C, SONG L, et al. Effects of nitrogen application rate and planting density on production performance of early maturing forage oat in Shihezi, Xinjiang [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(10):2364-2371
- [55] 马莉,喜伟,杨晓军. 播种量与施氮水平对盐地碱蓬生长和饲喂品质的影响[J]. 中国草地学报, 2025, 47(5):102-112
- MA L, XI W, YANG X J. Effect of sowing rate and nitrogen application level on growth and feeding quality of *Suaeda salsa* [J]. Chinese Journal of Grassland, 2025, 47(5):102-112
- [56] 高阳,赵力兴,朱铁霞,等. 施氮量对科尔沁沙地燕麦生物量及物质分配规律的影响[J]. 草地学报, 2018, 26(5): 1168-1172
- GAO Y, ZHAO L X, ZHU T X, et al. Effects of nitrogen application rate on *Avena sativa* biomass and substance distribution in horqin sandy land[J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(5): 1168-1172
- [57] 韩华雯,孙丽娜,姚拓,等. 不同促生菌株组合对紫花苜蓿产量和品质的影响[J]. 草业学报, 2013, 22(5):104-112
- HAN H W, SUN L N, YAO T, et al. Effects of bio-fertilizers with different PGPR strain combinations on yield and quality of alfalfa[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2013, 22(5):104-112

(责任编辑 刘婷婷)