

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.05.033

引用格式:樊泰莲,吴瑞,梁国玲,等.氮密互作对‘青燕2号’农艺性状及种子产量影响的综合分析[J].草地学报,2026,34(5):1932—1941

FAN Tai-lian, WU Rui, LIANG Guo-ling, et al. Comprehensive Analyses of the Combined Effects of Nitrogen Application Rate and Sowing Density on the Agronomic Traits and Seed Yield of ‘Qingyan No. 2’ Oats[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(5):1932—1941

氮密互作对‘青燕2号’农艺性状及种子产量影响的综合分析

樊泰莲^{1,2}, 吴瑞^{1,2}, 梁国玲^{1,2*}, 刘文辉^{1,2}, 胡泽龙^{1,2}, 王文虎^{1,2}, 韩明梅³

(1. 青海大学畜牧兽医科学院, 青海 西宁 810016; 2. 青海省青藏高原优良牧草种质资源利用重点实验室, 青海 西宁 810016; 3. 青海绿青新农牧科技有限公司, 青海 西宁 810016)

摘要:为探讨氮密互作对高寒区‘青燕2号’燕麦(*Avena sativa* ‘Qingyan No. 2’)种子产量的影响,筛选出适宜湟中及周边地区‘青燕2号’生产的最佳施氮量和播种密度。本试验采用双因素随机区组试验设计,设4个施氮量0, 45, 90和135 kg·hm⁻²(分别记作N₀, N₁, N₂和N₃), 3个播种密度:100, 170和240 kg·hm⁻²(分别记作S₁, S₂和S₃)。结果显示,施氮量、播种密度及其互作对农艺性状和种子产量的影响均达到极显著($P < 0.01$)或显著($P < 0.05$)。农艺性状随施氮量和播种密度变化明显,穗长、主穗小穗数、主穗穗粒数、主穗穗粒重和千粒重均随着施氮量增加先增加后降低,随播种密度的增加而降低。种子产量随施氮量和播种密度的增加先增加后降低,在施氮量90 kg·hm⁻²和播种密度100 kg·hm⁻²时达到峰值。皮尔森相关性分析表明种子产量与穗长、主穗小穗数、主穗穗粒数、主穗穗粒重和千粒重呈显著正相关。TOPSIS-多准则决策模型分析表明,在施氮量90 kg·hm⁻²和播种密度100 kg·hm⁻²下是适宜于研究区及类似高寒区‘青燕2号’种子生产的最佳施氮量和播种密度。

关键词:‘青燕2号’燕麦;施氮量;播种密度;农艺性状;种子产量

中图分类号:S544.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)05-1932-10

Comprehensive Analyses of the Combined Effects of Nitrogen Application Rate and Sowing Density on the Agronomic Traits and Seed Yield of ‘Qingyan No. 2’ Oats

FAN Tai-lian^{1,2}, WU Rui^{1,2}, LIANG Guo-ling^{1,2*}, LIU Wen-hui^{1,2}, HU Ze-long^{1,2},
WANG Wen-hu^{1,2}, HAN Ming-mei³

(1. Qinghai University College of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, Xining, Qinghai Province 810016, China; 2. Key Laboratory of Superior Forage Germplasm in the Qinghai-Tibetan Plateau, Xining, Qinghai Province 810016, China; 3. Qinghai Lüqingxin Agricultural and Animal Husbandry Technology Co., Ltd, Xining, Qinghai Province 810016, China)

Abstract: To explore the effects of nitrogen application and sowing density interaction on the seed yield of ‘Qingyan No. 2’ oat (*Avena sativa* ‘Qingyan No. 2’) in the high-altitude area, the optimal planting nitrogen amount and sowing density suitable for the production of ‘Qingyan No. 2’ in Huangzhong and its surrounding areas were investigated. This experiment adopted a two-factor randomized block design. Four nitrogen application levels of 0, 45, 90 and 135 kg·hm⁻² (denoted as N₀, N₁, N₂ and N₃) were set, and three sowing densities of 100, 170 and 240 kg·hm⁻² (denoted as S₁, S₂ and S₃) were established. The results showed that the effects of nitrogen application amount, sowing density, and their interaction on agronomic traits and seed yield all

收稿日期:2025-07-07;修回日期:2025-09-14

基金项目:青燕2号燕麦新品种繁育与示范(2023-NK-155)资助

作者简介:樊泰莲(2001-),女,汉族,青海西宁人,硕士研究生,主要从事牧草育种与栽培研究,E-mail:3555299409@qq.com; *通信作者
Author for correspondence, E-mail: qhliangguoling@163.com

reached extremely significant ($P < 0.01$) or significant ($P < 0.05$) levels. Agronomic traits changed significantly with nitrogen application amount and sowing density. The length of the spike, the number of small florets on the main spike, the number of grains on the main spike, the grain weight per spike, and the hundred-grain weight all increased first and then decreased with the increase of nitrogen application amount, and decreased with the increase of sowing density. Seed yield increased first and then decreased with the increase of nitrogen application amount and sowing density, reaching the peak at a nitrogen application amount of $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and a sowing density of $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. Pearson correlation analysis indicated that seed yield was significantly positively correlated with spike length, the number of small florets on the main spike, the number of grains on the main spike, the grain weight per spike, and the hundred-grain weight. TOPSIS-multi-criteria decision-making model analysis indicated that at a nitrogen application amount of $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and a sowing density of $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ were the optimal nitrogen application amount and sowing density for ‘Qingyan No. 2’ seed production in the study area and similar high-altitude areas.

Key words: ‘Qingyan No. 2’ Oats; Nitrogen application; Sowing density; Agronomic characters; Seed yield

燕麦 (*Avena sativa*) 属于禾本科燕麦属一年生草本植物, 须根发达, 分蘖能力强, 具有耐瘠、耐寒、耐旱的生物学特性, 是优良的粮饲兼用作物之一^[1]。目前已在我国高纬严寒地区人工草地普遍种植^[2-3]。我国燕麦种植区域大多位于经济欠发达的农牧交错带, 规模化种植优质燕麦对于提高当地农牧民收入、促进区域经济发展、加速乡村振兴和巩固民族地区稳定等具有重要意义^[4]。不同地区间燕麦品种的生育特性存在显著差异, 其中生育期的差异最为突出, 受品种遗传特性与区域气温条件的双重影响, 燕麦生育期表现出明显的地域分异特征。青海湟中区的年均温低、无霜期短, 呈现典型的高原大陆性气候特征, 导致燕麦生育期压缩。具体而言, 在高寒地区如青藏高原等低温环境, 部分燕麦品种因低温胁迫导致生育进程受阻, 从播种到成熟的时间显著延长, 植株光合积累不足, 籽粒灌浆时间缩短, 表现为成熟度偏低、生长受抑制, 最终造成产量形成受限。随着全球气候变暖, 温度、降雨等气象因子格局发生改变, 对农作物生长发育的影响显著^[5]。

在高寒地区燕麦的产量除了受自身遗传特征影响, 还与栽培措施息息相关, 其中施氮量和种植密度是影响作物产量的重要因素^[6-8]。传统氮肥施用与播种密度管理模式面临严峻挑战: 过量施氮易引发植株徒长, 茎秆细弱、节间拉长, 抗倒伏能力下降^[9-11], 氮肥过少会导致生长受限, 根系发育不良^[12]; 播种密度过高会造成资源竞争加剧^[13-14], 播种密度过低使肥料利用率降低, 穗粒数减少, 产量损失显著^[15]。燕麦产量对种植密度的响应, 因不同地区和品种间存在差异^[16]。氮肥和密度的增产作用不在于其单一的因素, 还存在明显的交互作用, 将两者有机结合, 才能确保作物的高产高效^[17], 适宜

的栽培措施可有效提高作物产量^[18], 在氮密互作的试验中, 贾志锋^[19]青海东部农业区湟中县对‘青燕1号’ (*Avena sativa* ‘Qingyan No. 1’) 研究发现, 在 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施氮量和 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 播种密度处理下种子产量最高。综上所述, 施氮量和播种密度对作物种子产量的影响因作物种类、品种和地域等条件的不同而差异明显。

现有研究虽证实氮密互作对燕麦群体发育具有调控作用, 但多聚焦平原区温带气候条件^[20-21], 缺乏针对高寒区对新品种‘青燕2号’低温-短生育期耦合作用下氮密互作机制的系统性解析, 并且栽培措施对燕麦产量影响的报道多见各种单一因素的研究^[22-23], 多因素互作研究较少, 尤其是氮密互作对高寒区燕麦农艺性状及种子产量的影响研究, 难以作为生产实践提供有效的参考。因此本研究通过双因素随机区组试验, 以‘青燕2号’燕麦 (*Avena sativa* ‘Qingyan No. 2’) 为对象, 探讨施氮量、播种密度及其交互作用对‘青燕2号’燕麦种子产量的影响, 从农艺性状等方面进行综合评价, 以筛选出适宜青藏高原地区‘青燕2号’燕麦种子生产的最佳施氮量和播种密度, 从而为青藏高原地区及其类似区域种子高效生产提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于青海省西宁市湟中县甘河滩镇下营村 ($36^{\circ}33'48.17'' \text{ N}$, $101^{\circ}32'9.72'' \text{ E}$), 海拔 2592 m , 年平均气温 5.0°C , 年均降水量 514 mm , 年日照时数 2723.4 h , 气候寒冷潮湿, 无霜期极短。试验地地势平坦, 前茬作物为马铃薯。土壤属灰钙土, 土壤有机质 2.41% , 全氮 0.162% , 碱解氮 $83 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速

效磷 $25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $218 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。2024 年生长期, 下营村月均温总体略高于 30 年平均值, 其中 9

月偏暖较为明显。降水量方面, 6 月和 7 月显著偏多, 而其他月份则与历史均值较为接近(表 1)。

表 1 青海省西宁市湟中区甘河滩镇下营村试验地生长季月均温与降水量

Table 1 Monthly average temperature and precipitation during the growing season in Xiaying Village, Ganhetan Town, Huangzhong District, Xining City, Qinghai Province

月份 Month	平均温度 Average temperature / $^{\circ}\text{C}$		降水量 Precipitation/mm	
	30 年均值	2024 年均值	30 年均值	2024 年均值
	30-year average value (1994–2023 年)	The 2024 average	30-year average value (1994–2023 年)	The 2024 average
4 月 April	8.60	9.50	27.80	26.40
5 月 May	12.10	12.10	47.30	49.80
6 月 June	15.00	15.60	74.50	112.70
7 月 July	16.80	16.50	93.70	136.00
8 月 August	15.90	15.80	85.40	85.20
9 月 September	12.20	13.00	61.90	62.50

1.2 供试材料

供试材料为‘青燕 2 号’燕麦 (*Avena sativa* ‘Qingyan No. 2’), 是由青海大学畜牧兽医科学院培育的国家级审定燕麦新品种。该品种千粒重为 41 g 左右, 发芽率 $\geq 95.0\%$, 纯净度 $\geq 98.0\%$, 具有分蘖能力强、粗蛋白含量高、饲用价值高的特点, 可用来青饲、晒制青干草或青贮等, 适宜在青海省海拔 2500~3200 m 区域以及国内其他高寒地区推广应用。

1.3 试验设计

试验于 2024 年开展, 采用随机区组设计, 小区面积 $3 \text{ m} \times 5 \text{ m}$, 4 次重复, 小区间隔 0.5 m, 区组间隔 1 m, 一个小区 15 行, 共 48 个小区。设置 4 个施氮量: 0, 45, 90 和 $135 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (分别记作 N_0 , N_1 , N_2 和 N_3), 3 个播种密度: 100, 170 和 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (分别记作 S_1 , S_2 和 S_3), 处理参考贾志锋^[19]的研究。试验处理为 N_0S_1 , N_0S_2 , N_0S_3 , N_1S_1 , N_1S_2 , N_1S_3 , N_2S_1 , N_2S_2 , N_2S_3 , N_3S_1 , N_3S_2 和 N_3S_3 共 12 个处理组合。氮肥为尿素作为基肥在种植时一次施入(氮含量为 46%)。除氮肥外, 所有小区均以 $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 过磷酸钙(有效 P_2O_5 含量为 14%)作为基肥施入, 一个小区施过磷酸钙 675 g, 48 个小区共施 32.40 kg。种植前进行深耕灭茬、耙耱碎土、平整和镇压紧实等一系列作业, 条播深度 4~5 cm, 行距 20 cm。生育期人工除草 2 次, 均无灌溉, 后期保持其他田间管理一致。

1.4 测定指标及方法

于 2024 年 8 月 20 日燕麦完熟期进行农艺性状的测定。每个小区随机选取 20 株燕麦, 测定植株株高(使用卷尺从地面垂直量至燕麦穗顶, Plant

Height, PH)、穗长(从连接茎秆的基部量至穗顶端的长度, Spike length, SL)、主穗小穗数(统计附着于穗轴的小穗数, 包括不育小穗但排除退化小穗, spikelet number per spike, SNS)、主穗穗粒数(主茎花序全部籽粒数, Grain number per main spike, GNMS)、主穗穗粒重(主茎花序籽粒重量, Grain weight per spike, GWS)、花序轮层数(花序中分枝的层次数量, Branching order, BO)、千粒重(以克为单位的 1000 粒净种子的重量, Thousand grain weight, TGW)。种子产量: 于燕麦完熟期进行全小区测产, 每个小区 4 次重复, 手工收割后脱粒、装袋、标记, 留茬高度 3~5 cm, 带回实验室风干后测定种子重量。

1.5 数据分析

采用 Excel 2019 整理数据, 用 SPSS 26.0 软件先对‘青燕 2 号’的农艺性状和种子产量进行正态性和方差齐性检验。采用 SPSS 软件方差分析中的多重比较(LSD)对不同施氮量和播种密度处理下各指标在 0.05 水平进行显著性分析。采用 R 4.5.0 (R Development Core Team)plyr 数据包对氮密互作处理下‘青燕 2 号’的农艺性状和种子产量进行多准则决策模型-TOPSIS 综合评价, 筛选适宜当地‘青燕 2 号’种子生产的最佳施氮量和播种密度。

2 结果与分析

2.1 氮密互作对‘青燕 2 号’农艺性状及种子产量的影响

施氮量和播种密度及交互作用下各指标的 P 值见表 2, 施氮量和播种密度对株高、穗长、主穗小穗

数、主穗穗粒数、主穗穗粒重、千粒重和种子产量的影响均达到极显著水平($P<0.01$),施氮量对花序轮层数无显著影响,播种密度对花序轮层达到显著水平($P<0.05$)。施氮量和播种密度的互作效应对

主穗穗粒数和千粒重的影响达到极显著水平($P<0.01$),对穗长、主穗小穗数、主穗穗粒重和种子产量的影响达到显著水平($P<0.05$),对花序轮层数无显著影响。

表 2 施氮量和播种密度及交互作用下各指标的 P 值

Table 2 P -values of each indicator under different nitrogen application levels, seeding densities, and their interactions

项目 Item	株高 PH	穗长 SL	主穗小穗数 SNS	主穗穗粒数 GNMS	主穗穗粒重 GWS	花序轮层 BO	千粒重 TGW	种子产量 Seed yield
施氮量 Nitrogen	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.521	0.000	0.000
播种密度 Sowing density	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.036	0.000	0.000
施氮量×播种密度 Nitrogen×Sowing density	0.318	0.039	0.015	0.000	0.033	0.560	0.003	0.016

同一播种密度下,施氮量对‘青燕2号’燕麦的各农艺性状(除了花序轮层)有显著影响($P<0.05$),燕麦株高、穗长、主穗小穗数、主穗穗粒数、主穗穗粒重、千粒重和种子产量随着施氮量的增加呈现先升高后降低的趋势。 N_1 处理下燕麦株高达156.85 cm,较 N_0 , N_2 , N_3 处理分别提高2.03%, 0.89%和1.76%。当施氮量从0增加至 $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 3个播种密度下燕麦穗长均值由26.82 cm增加到29.72 cm,主穗小穗数均值由56.67个上升到71.50个,主穗穗粒数均值由106.97粒增加到138.93粒,主穗穗粒重均值由3.62 g增加到4.70 g,千粒重均值由34.61 g增加到37.52 g,种子产量均值由 $2579.70\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 上升到 $2744.82\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;而施氮量进一步增加至 $135\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,燕麦穗长降至25.50 cm,主穗小穗数降至54.13个,主穗穗粒数降至101.57粒,主穗穗粒重降至3.25 g,千粒重降至33.12 g,燕麦种子产量降至 $2545.89\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, N_2 处理较最低 N_3 处理分别高16.55%, 32.09%, 36.78%, 45.23%, 13.29%, 7.81%(表3)。

同一施氮量下,播种密度对‘青燕2号’燕麦的各农艺性状均有显著影响($P<0.05$)。株高随播种密度的增加先降低后增加, S_1 处理下株高(157.06 cm)达峰值,较 S_2 处理高2.48%。燕麦穗长、主穗小穗数、主穗穗粒数、主穗穗粒重、千粒重和种子产量随着播种密度的上升总体呈降低趋势($P<0.05$),播种密度从 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增加到 $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,4个施氮量下燕麦穗长均值从29.29 cm下降至25.41 cm,主穗小穗数均值由69.90个下降至52.35个,主穗穗粒数均值由134.70粒下降至100.38粒,主穗穗粒重均值由4.59 g下降至3.12 g,千粒重均值由37.33 g下降至33.29 g,燕麦种子产量均值从 $2765.45\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 下降至 $2489.57\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, S_1 较最低 S_3 处理分别高15.27%, 33.52%, 34.19%,

47.12%, 13.29%, 11.08%(表3)。总体来看, N_2S_1 处理下燕麦穗长、主穗小穗数、主穗穗粒数、主穗穗粒重、千粒重和种子产量最高,分别为31.45 cm, 81.00个, 155.30粒, 5.27 g, 39.81 g, $2885.65\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,显著高于其他各处理, N_1S_1 处理次之(表3)。

2.2 氮密互作下种子产量与农艺性状的相关性分析

对‘青燕2号’的种子产量与农艺性状进行Mantel检验和皮尔森相关性分析,结果表明(图1),种子产量与穗长、主穗小穗数、主穗穗粒数、主穗穗粒重和千粒重呈强正相关($P<0.01$),与花序轮层显著相关($P<0.05$),与株高不相关。主穗穗粒数与主穗穗粒重和千粒重呈强正相关($P<0.01$),主穗小穗数与主穗穗粒重和主穗穗粒数呈强正相关($P<0.01$),株高与穗长、主穗小穗数、主穗穗粒数、主穗穗粒重和千粒重呈显著弱相关($P<0.05$)。

2.3 ‘青燕2号’农艺性状重要性分析

为确定株高、穗长、主穗小穗数、主穗穗粒数、主穗穗粒重、花序轮层和千粒重对种子产量的影响,采用随机森林模型通过置换重要性(Permutation importance)方法量化了7个农艺性状对目标变量(种子产量)的预测贡献度(图2),结果表明,各因子总体能够解释种子产量变异的57.57%,模型通过特征重要性排序客观量化性状价值,提供明确的育种优先级:主穗穗粒数(GNMS)>主穗小穗数(SNS)>主穗穗粒重(GWS)>千粒重(TGW)。主穗穗粒数(GNMS)置换重要性值最高,其随机置换导致模型均方误差(MSE)增幅最大,且达到极显著水平($P<0.01$),表明主穗穗粒数是产量预测的最关键因子。主穗小穗数(SNS)重要性值仅次于主穗穗粒数(GNMS),MSE增幅显著($P<0.01$),凸

表 3 不同施氮量和播种密度对‘青燕 2 号’农艺性状及种子产量的多重比较

Table 3 Two-factor analysis of variance for multiple comparisons of agronomic traits and seed yield of ‘Qingyan No. 2’ under different nitrogen application rates and sowing densities

测定指标 Measurement index	播种密度 Sowing density	施氮量 Nitrogen application rate				
		N ₀	N ₁	N ₂	N ₃	AVE
株高 PH/cm	S ₁	154.99±3.29 ^{Ba}	160.18±1.95 ^{Aa}	157.98±2.86 ^{Aa}	155.09±3.20 ^{Ba}	157.06±0.46 ^a
	S ₂	152.39±4.62 ^{Aa}	153.67±3.23 ^{Ac}	153.59±2.89 ^{Ab}	153.39±3.37 ^{Aa}	153.26±0.57 ^c
	S ₃	153.82±3.48 ^{Aa}	156.71±2.79 ^{Ab}	154.81±3.40 ^{Ab}	153.92±2.25 ^{Aa}	154.82±0.48 ^b
	AVE	153.73±0.70 ^B	156.85±0.50 ^A	155.46±0.56 ^{AB}	154.13±0.55 ^B	
穗长 SL/cm	S ₁	28.50±1.33 ^{Ba}	29.20±1.55 ^{Aa}	31.45±1.67 ^{Aa}	28.00±1.76 ^{Ba}	29.29±0.25 ^a
	S ₂	26.90±1.51 ^{Bcb}	27.90±1.60 ^{Ba}	29.00±1.49 ^{Ab}	25.95±2.11 ^{Cb}	27.44±0.27 ^b
	S ₃	25.05±1.19 ^{Bc}	25.35±1.31 ^{Bb}	28.70±1.77 ^{Ab}	22.55±0.83 ^{Cc}	25.41±0.21 ^c
	AVE	26.82±0.25 ^B	27.48±0.27 ^B	29.72±0.30 ^A	25.50±0.30 ^C	
主穗小穗数 SNS/个	S ₁	62.50±5.85 ^{Ba}	76.70±6.25 ^{Aa}	81.00±5.16 ^{Aa}	59.40±6.64 ^{Ba}	69.90±0.95 ^a
	S ₂	59.50±5.89 ^{Bca}	63.70±6.67 ^{Bb}	70.80±7.16 ^{Ab}	56.70±4.50 ^{Ca}	62.68±0.97 ^b
	S ₃	48.00±5.21 ^{Bcb}	52.40±6.69 ^{Bc}	62.70±4.67 ^{Ac}	46.30±2.21 ^{Cb}	52.35±0.79 ^c
	AVE	56.67±1.03 ^C	64.27±1.20 ^B	71.50±1.05 ^A	54.13±0.88 ^C	
主穗穗粒数 GNMS/粒	S ₁	117.50±4.28 ^{Ba}	155.30±3.92 ^{Aa}	155.50±4.30 ^{Aa}	110.50±5.68 ^{Ca}	134.70±0.73 ^a
	S ₂	114.10±5.36 ^{Ca}	120.00±3.92 ^{Bb}	142.80±6.86 ^{Ab}	107.90±4.82 ^{Da}	121.20±0.85 ^b
	S ₃	89.30±5.12 ^{Cb}	107.20±6.34 ^{Bc}	118.70±4.83 ^{Ac}	86.30±6.00 ^{Cb}	100.38±0.89 ^c
	AVE	106.97±0.90 ^C	127.57±0.89 ^B	138.93±0.99 ^A	101.57±1.00 ^C	
主穗穗粒重 GWS/g	S ₁	4.12±0.27 ^{Ba}	5.05±0.52 ^{Aa}	5.27±0.53 ^{Aa}	3.92±0.28 ^{Ba}	4.59±0.07 ^a
	S ₂	3.82±0.51 ^{Bca}	4.17±0.51 ^{Bb}	4.82±0.27 ^{Ab}	3.58±0.31 ^{Cb}	4.10±0.07 ^b
	S ₃	2.91±0.23 ^{Bb}	3.23±0.58 ^{Bc}	4.08±0.30 ^{Ac}	2.26±0.26 ^{Cc}	3.12±0.06 ^c
	AVE	3.62±0.07 ^C	4.15±0.10 ^B	4.72±0.07 ^A	3.25±0.05 ^C	
花序轮层数 BO/层	S ₁	6.00±0.00 ^{Aa}	5.90±0.74 ^{Aa}	6.00±0.67 ^{Aa}	5.50±0.86 ^{Aa}	5.85±0.10 ^a
	S ₂	5.50±0.71 ^{Ab}	5.80±0.42 ^{Aa}	5.80±0.63 ^{Aa}	5.80±0.79 ^{Aa}	5.73±0.10 ^{ab}
	S ₃	5.60±0.52 ^{Aab}	5.60±0.52 ^{Aa}	5.40±0.70 ^{Aa}	5.30±0.82 ^{Aa}	5.48±0.10 ^b
	AVE	5.70±0.09 ^A	5.77±0.11 ^A	5.73±0.12 ^A	5.53±0.15 ^A	
千粒重 TGW/g	S ₁	36.04±0.79 ^{Ca}	38.61±0.96 ^{Ba}	39.81±0.73 ^{Aa}	34.84±0.74 ^{Da}	37.33±0.13 ^a
	S ₂	34.41±1.18 ^{Cb}	36.35±0.88 ^{Bb}	37.72±0.67 ^{Ab}	33.80±1.13 ^{Ca}	35.57±0.16 ^b
	S ₃	33.38±0.99 ^{Bc}	34.05±1.02 ^{ABc}	35.02±0.85 ^{Ac}	30.72±1.47 ^{Cb}	33.29±0.18 ^c
	AVE	34.61±0.18 ^C	36.34±0.17 ^B	37.52±0.14 ^A	33.12±0.21 ^D	
种子产量 Seed yield/(kg·hm ⁻²)	S ₁	2694.13±126.53 ^{Ba}	2811.83±60.86 ^{Aa}	2885.65±89.94 ^{Aa}	2670.20±85.33 ^{Ba}	2765.45±14.81 ^a
	S ₂	2567.73±80.05 ^{Bb}	2686.17±78.79 ^{Ab}	2711.40±77.53 ^{Ab}	2548.77±130.50 ^{Bb}	2628.52±14.93 ^b
	S ₃	2477.24±61.24 ^{Bc}	2424.94±62.50 ^{Bc}	2637.40±108.31 ^{Ab}	2418.70±92.59 ^{Bc}	2489.57±13.22 ^c
	AVE	2579.70±17.05 ^{BC}	2640.98±12.39 ^B	2744.82±16.94 ^A	2545.89±19.12 ^C	

注:表中数值为(平均值±标准差)。同列不同小写字母表示同一施氮量下不同播种密度处理间差异显著($P<0.05$);同行不同大写字母表示同一播种密度下不同施氮量处理间差异显著($P<0.05$)

Note: The values in the table are the (mean±standard deviation). Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$) among different sowing densities under the same nitrogen application rate; Different uppercase letters in the same row indicate significant differences ($P<0.05$) among different nitrogen application rates under the same sowing density

显小穗数作为潜在库容量的核心地位。主穗穗粒重(GWS)增幅极显著($P<0.01$),反映籽粒干物质积累对产量的直接贡献。千粒重(TGW)MSE增幅显著($P<0.05$),说明籽粒充实度对产量预测也具有重要作用。穗长(SL)、花序轮层(BO)、株高(PH)重要性值均 $<4\%$,表明这些形态性状的置换对MSE无显著影响。

2.4 氮密互作处理综合评价

采用TOPSIS-多准则决策模型,对不同氮密互作处理下‘青燕 2 号’的株高、穗长、主穗小穗数、主穗穗粒数、主穗穗粒重、花序轮层、千粒重和种子产量进行综合评价(图 3)。结果表明,氮密互作处理下贴合度大小顺序为 $N_2S_1>N_1S_1>N_2S_2>N_1S_2>N_0S_1>N_2S_3>N_3S_1>N_0S_2>N_3S_2>N_1S_3>N_0S_3>N_3S_3$ 。

‘青燕2号’在 N_2S_1 处理的贴合度最高,为 0.98, N_3S_3 处理的贴合度最低,为 0.01。因此, N_2S_1 处理是适 宜于该研究区及‘青燕2号’种子生产的最佳施氮量 和播种密度。

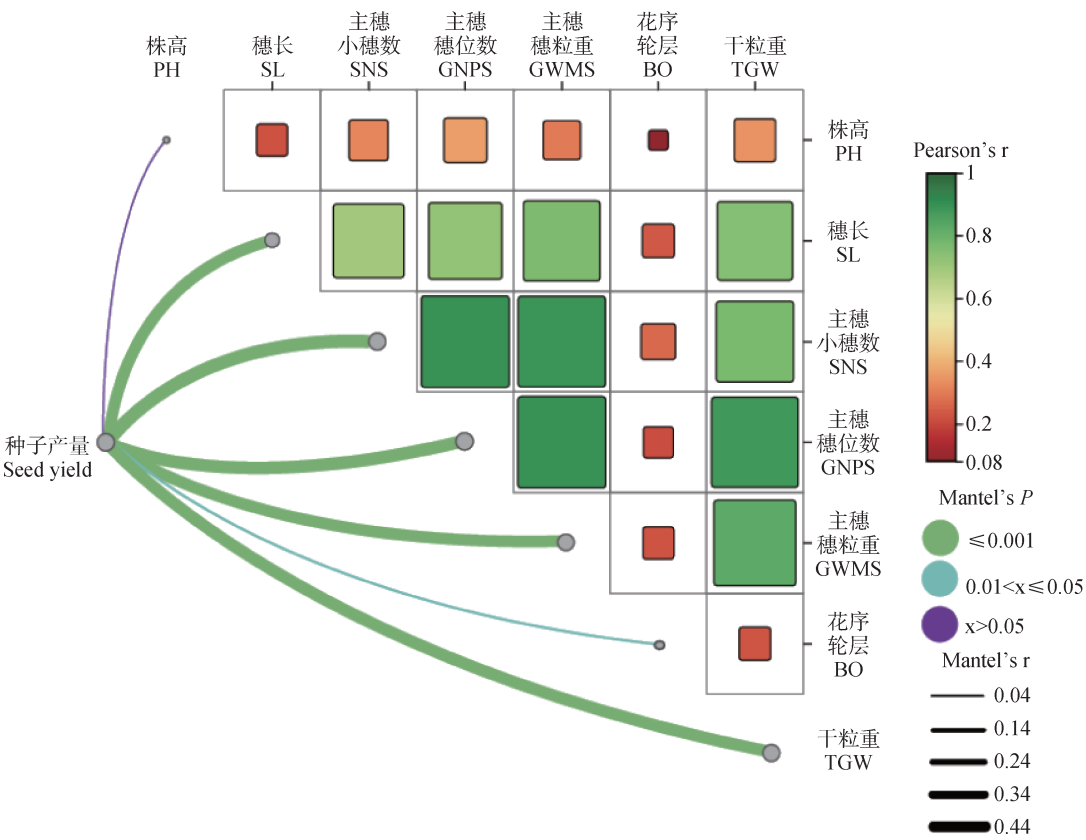


图1 ‘青燕2号’种子产量与农艺性状 Mantel 检验与 Pearson 相关性

Fig. 1 Mantel test and Pearson correlation of seed yield and agronomic traits of ‘Qingyan No. 2’ variety

注:曼特尔检验 P 值部分绿色圆点表示检验结果的 P 值 ≤ 0.01 ,即种子产量与农艺性状指标的相关性极高;紫色圆点表示检验结果的 P 值 > 0.05 ,即种子产量与农艺性状指标无相关性;浅蓝色圆点表示检验结果的 P 值介于 0.01 与 0.05 之间,即种子产量与农艺性状指标的相关性较高。曼特尔检验相关系数部分最细线条 $r=0.04$ 代表种子产量与农艺性状指标间关联强度为 0.04,较细线条 $r=0.14$ 代表种子产量与农艺性状指标间关联强度为 0.14,中等线条 $r=0.24$ 代表种子产量与农艺性状指标间关联强度为 0.24,较粗线条 $r=0.34$ 代表种子产量与农艺性状指标间关联强度为 0.34,最粗线条 $r=0.44$ 代表种子产量与农艺性状指标间关联强度为 0.44

Note: In the P -value section of the Mantel test, the green dots indicate that the P -value of the test result is ≤ 0.01 , meaning that the correlation between seed yield and agronomic trait indicators is extremely high; the purple dots indicate that the P -value of the test result is > 0.05 , meaning that there is no correlation between seed yield and agronomic trait indicators; the light blue dots indicate that the P -value of the test result is between 0.01 and 0.05, meaning that the correlation between seed yield and agronomic trait indicators is relatively high. In the correlation coefficient section of the Mantel test, the thinnest line $r = 0.04$ represents the strength of the correlation between seed yield and agronomic trait indicators as 0.04, the thinner line $r=0.14$ represents the strength of the correlation as 0.14, the medium line $r=0.24$ represents the strength of the correlation as 0.24, the thicker line $r=0.34$ represents the strength of the correlation as 0.34, and the thickest line $r=0.44$ represents the strength of the correlation as 0.44

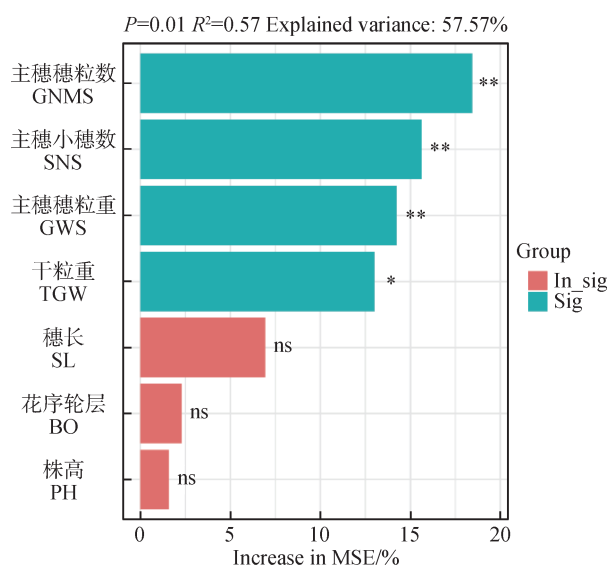


图2 ‘青燕2号’氮密互作处理农艺性状重要性分析

Fig. 2 Analysis of the importance of agronomic traits in the Nitrogen-Mineral interaction treatment of ‘Qingyan No. 2’

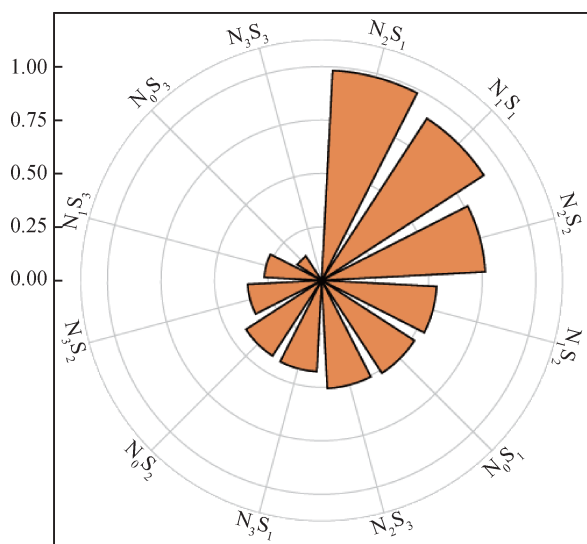


图3 ‘青燕2号’氮密互作处理综合评价

Fig. 3 Comprehensive evaluation of nitrogen-mineral interaction treatment of ‘Qingyan No. 2’ variety

3 讨论

选择适宜的种植密度和施氮量是发挥燕麦生产潜力、降低生产成本的关键^[24]。其中,种子产量最直接地受其产量组分(小穗数、穗粒数和穗粒重)的影响^[25],燕麦最终的产量形成也正是这些组分相互协调的复杂过程^[26]。本研究通过分析氮密互作对‘青燕2号’燕麦农艺性状和种子产量的影响,揭示了两者在调控燕麦生长发育中的重要作用。本试验结果显示,在同一施氮量下,穗长、主穗小穗数、主穗穗粒数、主穗穗粒重、千粒重和种子产量均

随播种密度的增加呈现持续降低的变化规律,这表明过高或过低的播种密度均不利于燕麦的生长和产量形成。这与 Roussis 等^[27]和吴维群等^[28]的研究结果相似,合理增加播种密度可显著提升燕麦种子产量,过度密植会抑制单株分蘖与穗部发育,反致减产。类似地,在同一播种密度下,这些性状指标随施氮量的增加呈现出先增加后降低的趋势,说明施氮量同样需要精准调控,过多或过少的氮肥投入均会对燕麦生长产生负面影响^[29],这与 Qiao 等^[30]的研究结果相似,施氮对燕麦生长有积极影响,但过度施用具有抑制作用。段连学等^[31]和白雪琴等^[32]的结果也表明,不同施氮量对燕麦种子产量及构成因素影响效果不同,合理增加施氮量会促进燕麦生长,提高种子产量。这说明施氮量和播种密度对燕麦的农艺性状具有显著影响。当播种密度或施氮量超过一定阈值时,植株间的竞争加剧,资源分配不均,导致生长受阻,性状指标下降,从而降低产量。

农艺性状影响种子产量,探究农艺性状与种子产量之间的关系为选育高产优产资源提供理论基础^[33]。产量构成因素对种子产量起决定作用,构成禾本科种子产量的影响因素主要包括生殖枝数、小穗数、小花数、穗粒重以及千粒重等^[34]。刘晓园等^[35]研究发现,小穗数/花序、种子数/小穗与无芒雀麦种子产量呈显著正相关。温丽等^[36]指出千粒重和穗长与种子产量是正相关关系。吴瑞等^[37]结果表明单序籽粒数是影响老芒麦种子产量的最关键因素。本研究中主穗穗粒数和种子产量存在显著正相关关系,说明主穗穗粒数是决定籽实产量的核心因素之一,其数量增加可直接提升主穗产量潜力^[38]。选择合理的栽培措施提高穗粒数,能有效促进小穗发育、减少退化,最终实现穗粒数与籽实产量的协同提升。本研究随机森林模型表明,氮密互作主要通过影响主穗穗粒数、主穗小穗数、主穗穗粒重和千粒重来促进‘青燕2号’的种子产量,说明这些性状对种子产量具有显著的贡献。排列首位的是主穗穗粒数,较高的穗粒数意味着更强的籽粒库容,能够更高效地吸纳光合产物,促进干物质向籽实的转运与积累。在群体水平上,穗粒数的提升可弥补单位面积穗数不足的局限,通过优化产量构成因素实现增产^[39]。因此,在‘青燕2号’实际种子生产中,适宜的氮密互作处理下,可通过提高穗粒数来实现种子高产。此外,本研究通过 TOPSIS-多准则

决策模型综合分析表明,在施氮量为 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,播种密度为 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,‘青燕2号’的种子产量显著最高,为 $2885.65 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,是该研究区‘青燕2号’种子生产理想的施氮量和播种密度。这说明在调控种子产量时,需要综合考虑施氮量和播种密度对关键性状的影响,通过优化施氮量和播种密度的组合,实现对种子产量的有效调控。

4 结论

在相同施氮量条件下,‘青燕2号’燕麦的穗长、主穗小穗数、主穗穗粒数、主穗穗粒重、千粒重和种子产量均随播种密度的增加而递减;而在相同播种密度条件下,上述农艺性状与产量指标随施氮量增加均呈现先升后降的变化趋势。在施氮量 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 与播种密度 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的协同作用下,‘青燕2号’燕麦种子产量达 $2885.65 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 峰值,TOPSIS-多准则决策模型综合分析证实 N_2S_1 处理为研究区及类似高寒区‘青燕2号’燕麦种子生产的理想氮密互作组合。

参考文献

- [1] 孟利芳,姚晓翠,但瑶,等. 施肥对盐碱地饲用燕麦根际土壤微生物多样性的影响[J]. 草地学报,2023,31(10):2960-2967
MENG L F, YAO X C, DAN Y, et al. Effects of the fertilization on the microbial diversity in the rhizospheric soil of forage oats in salt-alkali land[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(10): 2960-2967
- [2] 许涛,祁娟,蒲小鹏,等. 甘南玛曲七种主要饲草营养价值比较[J]. 中国草地学报,2012,34(3):113-116
XU T, QI J, PU X P, et al. Comparison of the yields and nutrients of seven forage species in Maqu County[J]. Chinese Journal of Grassland, 2012, 34(3): 113-116
- [3] 侯建杰,赵桂琴,焦婷,等. 不同含水量及晒制方法对燕麦青干草品质的影响[J]. 中国草地学报,2014,36(1):69-74
HOU J J, ZHAO G Q, JIAO T, et al. Effects of moisture contents and drying methods on oat hay quality[J]. Chinese Journal of Grassland, 2014, 36(1): 69-74
- [4] 孙洪仁,王显国,张运龙,等. 我国籽实和饲草燕麦土壤氮素丰缺指标与推荐施氮量研究[J]. 西南民族大学学报(自然科学版),2024,50(3):237-246
SUN H R, WANG X G, ZHANG Y L, et al. Study on nitrogen abundance and deficiency index and recommended nitrogen application rate of seed and forage oat soil in China[J]. Journal of Southwest University for Nationalities (Natural Science Edition), 2024, 50(3): 237-246
- [5] 杨力军,赵志刚,范青慈. 几种燕麦引种栽培及品种比较试验研究[J]. 青海草业,2002,11(2):1-4
YANG L J, ZHAO Z G, FAN Q C. Report on oat variety introduction and comparison trial[J]. Qinghai Prataculture, 2002, 11(2): 1-4
- [6] 曹晓云,周秉荣,周华坤,等. 气候变化对青藏高原植被生态系统的影响研究进展[J]. 干旱气象,2022,40(6):1068-1080
CAO X Y, ZHOU B R, ZHOU H K, et al. Research progress on the influence of climate change on vegetation ecosystem in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Arid Meteorology, 2022, 40(6): 1068-1080
- [7] 李虎,陈传华,刘广林,等. 种植密度和施氮量对桂育9号农艺性状及产量的影响[J]. 作物杂志,2019(6):99-103
LI H, CHEN C H, LIU G L, et al. Effects of nitrogen fertilizer application rate and planting density on agronomic traits and yield of Guiyu 9[J]. Crops, 2019(6): 99-103
- [8] 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
- [9] 孙怀恩,谭旭良,张俊超,等. 施氮量和植物生长调节剂对青引2号燕麦抗倒能力及产量品质的影响[J]. 草学,2022(3):24-30
SUN H E, TAN X L, ZHANG J C, et al. Effects of Nitrogen Application Rate and Plant Growth Regulator on Lodging Resistance, Yield and Quality of Qingyin No. 2 Oats[J]. Journal of Grassland and Forage Science, 2022(3): 24-30
- [10] MAO L P, ZHANG H B, YANG Z N, et al. Site-specific effects of fertilizer on hay and grain yields of oats: evidence from large-scale field experiments[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2025, 105(4): 2429-2439
- [11] 马力. 保水剂与氮肥对燕麦产量及产量构成因素的影响[J]. 青海草业,2018,27(3):7-11
MA L. Effect of applying nitrogen and super absorbent polymers on yield of oats[J]. Qinghai Prataculture, 2018, 27(3): 7-11
- [12] 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
- [13] ZHANG H B, LIU C T, MAO L P, et al. Divergent response of hay and grain yield of oat: effects of environmental factors and sowing rate[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(1): 233-242
- [14] 杨志雪,刘景辉,米俊珍,等. 播量对缩行带状滴灌燕麦抗倒伏能力和产量的影响[J]. 作物学报,2024,50(11):2831-2847
YANG Z X, LIU J H, MI J Z, et al. Effect of seeding rates on lodging resistance and yield of oat under reduced strip drip irrigation[J]. Acta Agronomica Sinica, 2024, 50(11): 2831-2847
- [15] 梁艳,倪苗,董海娟,等. 不同播量和行距对鄂尔多斯地区饲用燕麦种子产量的影响[J]. 现代畜牧科技,2025(4):65-67

- LIANG Y, NI M, DONG H J, et al. Effect of different sowing rates and row spacing on seed yield of forage oats in Ordos Region [J]. *Modern Animal Husbandry Science & Technology*, 2025(4):65-67
- [16] 武慧娟, 马隆喜, 耿小丽, 等. 不同播量和行距对‘夏燕1号’牧草产量、种子产量及农艺性状的影响[J]. *中国草食动物科学*, 2023, 43(2):23-27, 36
- WU H J, MA L X, GENG X L, et al. Effects of different sowing rates and row spacing on forage yield, seed yield and agronomic traits of ‘xiayan No. 1’ [J]. *China Herbivore Science*, 2023, 43(2):23-27, 36
- [17] 曹倩, 贺明荣, 代兴龙, 等. 密度、氮肥互作对小麦产量及氮素利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(4):815-822
- CAO Q, HE M R, DAI X L, et al. Effects of interaction between density and nitrogen on grain yield and nitrogen use efficiency of winter wheat [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2011, 17(4):815-822
- [18] 冯学颖. 宽幅条播对燕麦抗倒伏性、光合特性及产量品质的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021:41-43
- FENG X Y. Effects of broad drilling on lodging resistance, photosynthetic characteristics and yield and quality of oat [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021:41-43
- [19] 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[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2021:95-96
- JIA Z F. Effect of nitrogen application levels and sowing densities on grain yield and related traits of oat in alpine region [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2021:95-96
- [20] 朱志龙. 氮肥水平和播种密度互作对燕麦产量和干物质累积转运的影响[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2018:2-5
- ZHU Z L. Effects of Interaction of Nitrogen Fertilizer Level and Sowing Density on Yield and Dry Matter Accumulation and Transport of Oats [D]. Shenyang: Liaoning University, 2018:2-5
- [21] 刘昱茜. 播种密度和施氮量对沿海盐碱地燕麦生长、生理、产量及品质的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2022:14-15
- LIU Y Q. Effects of sowing density and nitrogen application rate on Growth, Physiology, Yield and Quality of Oat in Coastal Saline-alkali Lands [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022:14-15
- [22] 许国芬, 周青平, 颜红波, 等. 施氮水平对燕麦产量与养分吸收的影响[J]. *中国草地学报*, 2009, 31(6):20-24
- XU G F, ZHOU Q P, YAN H B, et al. Effects of fertilizer N on yield and nutrients uptake of oat [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2009, 31(6):20-24
- [23] 马祥, 贾志锋, 刘勇. 播期对青燕1号燕麦产量、光合及生物学特性的影响[J]. *西北师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 57(3):83-89
- MA X, JIA Z F, LIU Y. Effect of sowing date on growth characteristics of oat [J]. *Journal of Northwest Normal University (Natural Science)*, 2021, 57(3):83-89
- [24] 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
- [25] 宋江湖. 西藏野生垂穗披碱草种子产量与水肥关系的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008:20-24
- SONG J H. Studies on the effects of fertilization, irrigation and some other means to the seed production of wild *Elymus nutans* in tibet area [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2008:20-24
- [26] 刘卓, 杨彦军, 王琼, 等. 施氮量对燕麦种子产量及其构成因子的影响[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2020(16):100-104
- LIU Z, YANG Y J, WANG Q, et al. Effects of nitrogen application on seed yield and its components of oat (*Avena sativa* L.) [J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2020(16):100-104
- [27] ROUSSIS I, KAKABOUKI I, BESLEMES D, et al. Nitrogen uptake, use efficiency, and productivity of *Nigella sativa* L. in response to fertilization and plant density [J]. *Sustainability*, 2022, 14(7):3842
- [28] 吴维群, 唐宗英, 邓菊芬, 等. 行距和播量对白三叶生育及种子产量的影响[J]. *草地学报*, 2006, 14(2):116-119
- WU W Q, TANG Z Y, DENG J F, et al. Effect of row spacing and sowing rate on the growth and seed yield of white clover [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2006, 14(2):116-119
- [29] 马小龙, 马祥, 琚泽亮, 等. 氮肥减施与施氮时期对高寒区燕麦光合特性及产量的影响[J]. *草地学报*, 2024, 32(10):3215-3224
- Effects of nitrogen fertilizer reduction and nitrogen application period on photosynthetic characteristics and yield of oats in alpine region [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(10):3215-3224
- [30] QIAO Y J, ZHAO L M, GAO D, et al. Study on optimal nitrogen application for different oat varieties in dryland regions of the Loess Plateau [J]. *Plants*, 2024, 13(21):2956
- [31] 段连学, 马祥, 琚泽亮, 等. 高寒地区氮肥运筹对‘青海甜燕麦’农艺性状和种子产量的影响[J]. *草地学报*, 2022, 30(6):1576-1583
- DUAN L X, MA X, JU Z L, et al. Effects of nitrogen fertilizer management on agronomic traits and seed yield of *Avena sativa* L. Qinghai in alpine region [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(6):1576-1583
- [32] 马雪琴, 赵桂琴, 龚建军. 播期与氮肥对燕麦种子产量构成要素的影响[J]. *草业科学*, 2010, 27(8):88-92
- MA X Q, ZHAO G Q, GONG J J. Effect of sowing date and nitrogen fertilizer on seed yield and its components of oats in alpine area [J]. *Pratacultural Science*, 2010, 27(8):88-92
- [33] 刘慢, 秦燕, 刘文辉, 等. 青藏高原高寒区不同无芒雀麦种质资源种子产量评价[J]. *中国草地学报*, 2024, 46(3):70-80
- LIU M, QIN Y, LIU W H, et al. Seed yield comparison of *Bromus inermis* germplasm in the alpine Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(3):70-80

- [34] 郭兴燕,田忠,梁丹妮,等. 11个燕麦品种种子产量与主要农艺性状的通径分析[J]. 草地学报,2017,25(1):142-147
GUO X Y, TIAN Z, LIANG D N, et al. Path-coefficient analysis of seed yield with main agronomic characters in 11 oat varieties[J]. Acta Agrestia Sinica, 2017, 25(1): 142-147
- [35] 刘晓园. 行距和播种量对无芒雀麦种子产量及产量构成因子的影响[D]. 通辽:内蒙古民族大学,2012:32-33
- [36] 温丽,毕盛楠,徐兴健,等. 饲用燕麦种子产量与产量相关性状相关性分析及综合评价[J]. 土壤与作物,2023,12(1):69-75
WEN L, BI S N, XU X J, et al. Correlation analysis and comprehensive evaluation of seed yield and yield-related traits in oat (*Avena sativa*)[J]. Soils and Crops, 2023, 12(1): 69-75
- [37] 吴瑞,刘文辉,张永超,等. 青藏高原地区不同老芒麦种质资源生产性能评价[J]. 植物遗传资源学报,2020,21(4):855-865
WU R, LIU W H, ZHANG Y C, et al. Performance evaluation of different *Elymus sibiricus* L. germplasm resources in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2020, 21(4): 855-865
- [38] 张蕾,王玲莉,房娜娜,等. 稳定性肥料在中国不同区域的施用效果及施用量[J]. 植物营养与肥料学报,2021,27(2):215-230
ZHANG L, WANG L L, FANG N N, et al. Effect of stabilized fertilizer in different regions of China and the suitable application rate[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(2): 215-230
- [39] ARRIGONI A C, LÁZARO L, ROGERS W J, et al. Incidence of nitrogen fertilization and nitrogen/sulfur complementary fertilization on protein accumulation, yield, and end-use quality of bread wheat cultivars[J]. Cereal Research Communications, 2025(53):2717-2727
- (责任编辑 刘婷婷)