

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.02.015

引用格式:魏孔涛,曹铨,张正社,等.不同燕麦品种的干草产量和种子产量相关特性及影响因素研究[J].草地学报,2026,34(2):531—542

WEI Kong-tao, CAO Quan, ZHANG Zheng-she, et al. Study on the Yield-Related Traits and Influencing Factors of Hay and Seed Yield in Different Oat (*Avena sativa* L.) Varieties[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(2):531—542

不同燕麦品种的干草产量和种子产量相关特性 及影响因素研究

魏孔涛^{1,2,3#}, 曹铨^{1,2,3#}, 张正社⁴, 张春平^{1,2,3}, 俞 旻^{1,2,3}, 周 泽^{1,2,3},
张 雪^{1,2,3}, 王鑫鑫^{1,2,3}, 岳思玉^{1,2,3}, 董全民^{1,2,3*}

(1. 青海大学畜牧兽医科学院/青海省畜牧兽医科学院, 青海 西宁 810016; 2. 青海省高寒草地适应性管理重点实验室, 青海 西宁 810016; 3. 青海大学三江源区高寒草地生态教育部重点实验室, 青海 西宁 810016;
4. 青海大学省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 青海 西宁 810016)

摘要:为筛选适宜环湖地区推广的优良燕麦品种。以引进的10个燕麦品种为研究对象,评估其产量及相关性状,采用结构方程模型分析影响产量的主要因素。结果表明:‘楷模’和‘艾斯克’生育期较短(132天和125天);‘美达’株高(61.93 cm)和干草产量($12\,672.60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)表现突出;‘巴勒2’和‘黑玫克’在叶面积和叶周长等指标较优;‘爱沃’叶面积指数最高(5.29),且与‘福瑞至’均具较多穗轮层(6.22层);‘楷模’千粒重最大(42.68 g);‘黑玫克’种子产量最高($9963.06\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。随机森林表明,叶面积和单株穗粒重对种子产量有显著作用;结构方程模型显示,品种通过直接效应和叶面积指数的间接效应共同调控产量。综合评价,‘黑玫克’整体优势明显,可作为环湖地区的主栽燕麦品种。

关键词:环青海湖;燕麦品种;干草产量;种子产量

中图分类号:S548

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)02-0531-12

Study on the Yield-Related Traits and Influencing Factors of Hay and Seed Yield in Different Oat (*Avena sativa* L.) Varieties

WEI Kong-tao^{1,2,3#}, CAO Quan^{1,2,3#}, ZHANG Zheng-she⁴, ZHANG Chun-ping^{1,2,3}, YU Yang^{1,2,3},
ZHOU Ze^{1,2,3}, ZHANG Xue^{1,2,3}, WANG Xin-xin^{1,2,3}, YUE Si-yu^{1,2,3}, DONG Quan-min^{1,2,3*}

(1. Academy of Animal and Veterinary Sciences, Qinghai University/Qinghai Academy of Animal and Veterinary Sciences, Xining, Qinghai Province 810016, China; 2. Qinghai Provincial Key Laboratory of Adaptive Management on Alpine Grassland, Xining, Qinghai Province 810016, China; 3. Key Laboratory of the Alpine Grassland Ecology in the Three Rivers Region, Ministry of Education Qinghai University, Xining, Qinghai Province 810016, China; 4. State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining, Qinghai Province 810016, China)

Abstract: To select suitable high-quality oat varieties for cultivation in the Qinghai Lake area, ten introduced oat (*Avena sativa* L.) varieties were evaluated for yield and related traits, and the structural equation modeling was employed to analyze the key factors that affecting yield. The results showed that ‘Model’ and ‘Esker’ had relatively short growth periods (132 and 125 days, respectively). ‘Monida’ exhibited superior plant height (61.93 cm) and hay yield ($12\,672.60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$). ‘Baler 2’ and ‘Haymaker’ performed better in leaf area and leaf perimeter. ‘Everleaf’ had the highest leaf area index (5.29) and, together with ‘Forage’, produced more

收稿日期:2025-03-24;修回日期:2025-06-16

基金项目:青海省科技特派员专项项目(2025-NK-P23)资助

作者简介: #魏孔涛(1995-),男,汉族,甘肃兰州人,博士研究生,主要从事草地生态与草畜平衡, E-mail: weikt123@163.com; #曹铨(1989-),男,汉族,甘肃张掖人,博士,助理研究员,主要从事栽培草地管理与利用研究, E-mail: caoq1989@126.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: qmdong@qhu.edu.cn

spikelet whorls (6.22). ‘Model’ had the highest thousand-grain weight (42.68 g). And ‘Haymaker’ achieved the highest seed yield (9963.06 kg·hm⁻²). Random forest analysis indicated that the leaf area and grain weight per spike had significant effects on seed yield, while structural equation modeling revealed that yield was jointly regulated by both the direct effects of variety and the indirect effects mediated through the leaf area index. Overall evaluation suggested that ‘Haymaker’ had remarkable advantages and could be recommended as the dominant oat variety for the Qinghai Lake area.

Key words: Qinghai Lake area; Oat varieties; Hay yield; Seed yield

燕麦(*Avena sativa*)是一种粮饲兼用的禾本科一年生作物,在全球范围内广泛种植,主要分布于欧洲、北美洲和亚洲等地区^[1],其具有较强的抗逆性,适应性广,能够在土壤肥力较低、降水较少的地区稳定生长,因此在我国北方农牧交错区、高寒地区及半干旱地区种植广泛^[2-3]。同时广泛用于改良退化草地、防风固沙和水土保持等生态工程^[4]。燕麦既可作为粮食作物,也可作为优质饲草,其籽粒富含粗蛋白、矿质元素、膳食纤维和维生素,具有较高的营养和保健价值,广泛应用于畜牧业和食品加工行业^[5]。在饲草利用方面,其产草量高、适口性好,茎叶富含粗蛋白和可消化纤维,适合作为青贮饲料或干草饲料,广泛用于奶牛、绵羊和马等家畜的饲养^[6]。在畜牧业发展迅速的背景下,燕麦作为饲草的需求日益增长,已成为我国北方及青藏高原地区冷季补饲的重要作物。

高寒地区气候条件恶劣,土地贫瘠,农业生产面临诸多限制^[7-8]。在高寒牧区,燕麦不仅可以作为优质的饲草,满足畜牧业的需求,还能通过合理的种植和管理措施,显著提高土地利用效率和经济效益^[9]。研究表明,不同燕麦品种在高寒地区的生长表现存在显著差异,其产量和品质受品种特性、种植技术、土壤肥力和气候条件的综合影响^[10-11]。有研究表明,在三江源区不同燕麦品种产量和营养品质比较试验中,燕麦品种主要通过影响产量和株高进而间接影响燕麦的营养价值^[12];相关研究也证实,在环青海湖地区的燕麦品种评比试验中,品种通过影响株高、茎叶比以及分蘖数间接影响燕麦的营养价值^[13]。近年来,随着高寒地区农业科技的发展,燕麦种质资源的筛选与培育取得了重要进展^[14-15]。一些耐寒、耐旱、高产的燕麦品种逐步推广,并在适应性、产量及饲用品质等方面表现优异。然而,由于不同燕麦品种在高寒环境中的生长特性存在较大差异,尚需进一步开展区域性试验,以筛选适宜高寒地区种植的优质燕麦品种,并优化其栽培管理技术,以提高生产效益。

环青海湖地区作为青海省主要的畜牧业发展基地,在畜产品产出方面占据全省的重要地位,但优质

饲草资源相对匮乏^[16]。燕麦因其耐寒、耐旱、高产、饲用品质优良等特点,成为该地区适宜种植的一年生牧草之一^[17]。目前,环青海湖地区的燕麦种植以青海444、青燕3号以及青燕4号等品种为主^[13,18],尽管现有品种在一定程度上适应了当地环境,但仍存在产量不稳定、品质参差不齐等问题。此外,随着草地畜牧业的快速发展,对优质饲草的需求不断增加,进一步优化燕麦种植品种和栽培技术迫在眉睫。因此,本研究在环青海湖地区引种栽培了来自加拿大的4份高产燕麦品种(‘楷模’‘贝勒’‘贝勒2’‘速锐’)和美国的5份品种(‘艾斯克’‘爱沃’‘福瑞至’‘美达’‘福星’)以及中国的1份品种(‘黑玫克’)等10份燕麦品种,选择这些燕麦品种是因为这些品种具有较强的耐寒性和适应性,并在多个地区引种栽培中均表现出较佳的适应性^[4,19-20]。本试验重点测定其株高、干草产量、相对生长速率、叶面积指标、叶面积指数及与种子产量相关的性状,以期筛选出适应当地生态条件的优质燕麦品种,并为环青海湖地区燕麦的高效种植与推广提供理论依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 试验地自然概况

试验地选址于青海省海南藏族自治州共和县的青海大学高原农牧业综合试验基地(101°55'E, 36°17'N),地处环青海湖高海拔区域(平均海拔约3300 m)。该区域属于典型的高原大陆性气候,具有显著的年温差大、辐射强、干旱多风特征。全年温度变幅显著,年均温2℃~5℃,极端低温≤-20℃(冬季),夏季最高温≤20℃。降水呈现季节不均衡性,年降水量250~450 mm(集中在6—8月),年蒸发量达2000~2400 mm。土壤为高山草甸土和黄绵土类型,2024年播种前基础理化指标:表层土壤pH 8.58,全氮0.93 g·kg⁻¹,全磷1.18 g·kg⁻¹。

1.2 供试材料

供试燕麦品种均购自北京正道种业有限公司(表1)。

表 1 供试燕麦品种基本特征
Table 1 The basic characteristics of tested oat varieties

编号 Number	品种名称 Varieties name	英文名 English name	类型 Type	产地 Producing area
P1	楷模	Model	早熟 Early maturity	加拿大 Canada
P2	贝勒	Baler	中熟 Mid maturity	加拿大 Canada
P3	艾斯克	Esker	中熟 Mid maturity	美国 America
P4	贝勒 2	Baler 2	晚熟 Late maturity	加拿大 Canada
P5	爱沃	Everleaf	超晚熟 Ultra-late maturity	美国 America
P6	黑玫克	Haymaker	晚熟 Late maturity	中国 China
P7	福瑞至	Forage	中晚熟 Mid-late maturity	美国 America
P8	美达	Monida	中早熟 Mid-early maturity	美国 America
P9	速锐	Souris	早熟 Early maturity	加拿大 Canada
P10	福星	Fuxing	中晚熟 Mid-late maturity	美国 America

1.3 试验设计

本研究于 2024 年 5 月 10 日开展燕麦品种引种栽培试验。试验采用随机区组设计,设置 30 个小区(含 3 次重复),小区面积 16 m²(4 m×4 m),区间距 0.6 m。燕麦种植采用人工条播,行距 30 cm,单区种植 13 行,播深 3~4 cm,按品种特性调整播种量为 300 kg·hm⁻²(每小区单行种植 36.9 g),同步实施覆土镇压;基肥于播前一次性施用尿素 75 kg·hm⁻²+磷酸二铵 225 kg·hm⁻²;全生育期不灌溉施肥,分蘖期人工除草,其他管理措施与大田一致。

1.4 田间观测与样品采集

1.4.1 物候期观测 采用整体观测法,按照《燕麦种质资源描述规范和数据标准》^[21]观测并记录每个燕麦品种的物候期,以试验小区内燕麦有 50% 进入某物候期为基准,观测、记录每个燕麦品种的出苗期、分蘖期、拔节期、抽穗期、开花期、乳熟期、腊熟期和成熟期。

1.4.2 干草产量及种子产量相关特性测定 取样及测定时间:分别在燕麦开花期(2024 年 8 月 12 日)、乳熟期(2024 年 9 月 3)和完熟期(2024 年 9 月 24 日)进行观测和取样。

(1)株高:在每个试验小区随机选取 10 株长势匀称的燕麦(边行、缺行不取),采用钢卷尺测定燕麦单株基部至顶端的绝对高度,求其平均值。

(2)叶面积指标:在每个试验小区随机选取 10 片完整燕麦旗叶,利用叶面积仪(Yaxin-1241)快速测量其叶片的长度、宽度、周长以及叶面积等数据,求其平均值。

(3)干草产量及相对生长速率:每个测定时期,采用样段法在每个试验小区随机选取 1 m 样段,齐地面刈割,称其鲜草重。带回实验室放于 105 ℃烘箱内杀青 30 min 后,调至 75 ℃烘干至恒重,称其干

草重,折算获得干草产量。

相对生长速率(Relative growth rate, RGR)^[22]:相对生长速率是单位时间内生物量的净积累速率。利用各时期取得的干草产量计算相对生长速率,计算公式如下:

$$RGR = \frac{\ln Y_2 - \ln Y_1}{t_2 - t_1}$$

式中, Y₁、Y₂ 分别表示时间点 t₁ 和 t₂ 时的燕麦干草产量(g·m⁻²); t₂-t₁ 为两次测量的间隔天数。RGR 的单位为 g·g⁻¹·d⁻¹,单位中的 g 表示新增加的生物量,g⁻¹ 代表单位现有的生物量,d⁻¹ 表示单位时间,表示每克生物量每天增加的克数。

(4)光合有效辐射(Photosynthetically active radiation, PAR)^[23]:利用植物冠层分析仪(ACCUPAR LP 80 PAR/LAI Ceptometer)在每个试验小区测定光合有效辐射(μmol·m⁻²·s⁻¹)及叶面积指数,每个小区下冠层测定 3 次重复,上冠层光合有效辐射默认为一样。为保证数据稳定准确,选择晴朗无云的天气,并尽量选择 11:00—14:00 时间段测定。测定时,探杆的始端在两行燕麦中心,末端在行之间的开放空间的中心处;当对下一行进行测定时,保持相同的方向和位置,从而精确地表示整个区域。

(5)种子产量相关特性测定:在燕麦完熟期,在每个试验小区随机选取 10 株长势一致的植株带回实验室进行考种,测量并统计穗长、单株穗轮层数、主穗小穗数、单株穗粒数、单株穗粒重以及千粒重,并通过在每个小区随机选取的 1 m 样段来测定种子产量,并折算单位面积的种子产量(kg·hm⁻²)。

1.5 数据统计与分析

使用软件 Microsoft Excel 2021 进行原始数据整理与预处理。采用软件 SPSS Statistics 26.0 进行单因素方差分析(ANOVA)及 Duncan 多重比较检

验,统计显著性为 $P=0.05$ 。采用软件 Origin 2024 制图。采用软件 R 4.4.3 中 Random Forest 程序包构建随机森林模型,种子产量作为目标因子,其余指标作为解释因子;Piecewise SEM 程序包构建分段式结构方程模型。通过 TOPSIS 模型^[24]综合评价,旨在为环青海湖高寒牧区筛选适应性较佳的燕麦种植品种。

2 结果与分析

2.1 不同燕麦品种物候期

对 10 个燕麦品种的物候期进行比较分析发现,各

品种在不同生育阶段的历期存在明显差异。出苗期均集中于播种后 7~10 天,分蘖期差异较大,其中 P2(‘贝勒’)最早,出苗后 20 天即进入分蘖期。拔节至孕穗期的时间间隔因品种而异,P3(‘艾斯克’)所需时间最短,仅为 6 天,P7(‘福瑞至’)则最长,达 16 天。开花期存在显著差异,P3(‘艾斯克’)最早,于 8 月 1 日开花;而 P1(‘楷模’)最晚,至 9 月 8 日开始开花。成熟期也有所不同,P1(‘楷模’)和 P3(‘艾斯克’)成熟较早;P2(‘贝勒’)与 P7(‘福瑞至’)则延迟至 10 月 1 日。总体而言,燕麦品种间的全生育期差异较小,P1(‘楷模’)和 P3(‘艾斯克’)生育期最短,分别为 132 天和 125 天;P2(‘贝勒’)和 P7(‘福瑞至’)相对较长,为 144 天(表 2)。

表 2 不同燕麦品种的物候期
Table 2 Phenological period of different oat varieties

编号 Number	品种 Variety	物候期(月/日) Phenological period (month/day)										生育天数 Growth duration/d
		播种期 Sowing date	出苗期 Seeding stage	分蘖期 Tillering stage	拔节期 Elongating stage	孕穗期 Boot stage	抽穗期 Heading stage	开花期 Flowering stage	成熟期 Maturation stage			
									乳熟 Milky maturity	腊熟 Wax-ripening	完熟 Full-ripening	
P1	楷模	5月10日	5月20日	6月11日	7月9日	7月19日	7月25日	8月9日	9月10日	9月14日	9月19日	132
P2	贝勒	5月10日	5月17日	6月6日	7月5日	7月16日	7月23日	8月7日	9月22日	9月27日	10月1日	144
P3	艾斯克	5月10日	5月17日	6月9日	7月8日	7月14日	7月20日	8月1日	9月3日	9月8日	9月12日	125
P4	贝勒2	5月10日	5月18日	6月8日	7月7日	7月16日	7月22日	8月5日	9月12日	9月18日	9月22日	135
P5	爱沃	5月10日	5月19日	6月9日	7月4日	7月15日	7月23日	8月7日	9月19日	9月22日	9月29日	142
P6	黑攻克	5月10日	5月17日	6月10日	7月8日	7月16日	7月23日	8月6日	9月21日	9月26日	9月30日	143
P7	福瑞至	5月10日	5月18日	6月9日	7月3日	7月19日	7月27日	8月2日	9月18日	9月23日	10月1日	144
P8	美达	5月10日	5月17日	6月8日	7月5日	7月13日	7月21日	8月3日	9月19日	9月24日	9月30日	143
P9	速锐	5月10日	5月18日	6月11日	7月12日	7月19日	7月26日	8月6日	9月20日	9月25日	9月28日	141
P10	福星	5月10日	5月20日	6月12日	7月3日	7月13日	7月22日	8月2日	9月19日	9月23日	9月27日	140

注:表中所示数据年份均为 2024 年

Note: All data years listed in the table refer to 2024

2.2 不同燕麦品种干草产量性状及种子产量相关性

2.2.1 不同燕麦品种干草产量性状 不同燕麦品种在同一生育期的株高表现出不同差异(图 1)。在开花期,品种 P3、P8 和 P9 的株高显著高于其他品种($P<0.05$),分别为 61.93, 59.46 和 59.27 cm;在乳熟期,品种 P6 和 P8 的株高显著高于其他品种($P<0.05$),分别为 90.69 和 92.32 cm;在完熟期,品种 P8 的株高表现出较高水平,显著高于其他品种($P<0.05$),达到 106.84 cm。品种 P8 在三个生育期均表现出较高的株高,长势良好,且燕麦株高随生育期推进稳步增加。

不同燕麦品种的干草产量在开花期差异不显著,在乳熟期和完熟期表现出显著差异($P<0.05$,图 2)。在乳熟期,干草产量在 7216.23~12 672.60 kg·hm⁻²,

品种 P6 和 P8 的干草产量较高,分别为 12 154.31 和 12 672.60 kg·hm⁻²,显著高于 P7(7216.23 kg·hm⁻², $P<0.05$);在完熟期,干草产量在 11 377.09~21 478.59 kg·hm⁻²,品种 P8 的干草产量最高,达到 21 478.59 kg·hm⁻²,显著高于其他品种($P<0.05$)。

不同燕麦品种的鲜干比在同一生育期表现出不同差异(图 3)。在开花期、乳熟期和完熟期,品种 P5 的鲜干比均最高,分别为 6.56, 4.68 和 3.05,且显著高于其他品种($P<0.05$)。整体上,不同燕麦品种的鲜干比随生育期推进逐渐降低,燕麦干草比重越来越高。

不同燕麦品种从开花期—乳熟期和乳熟期—完熟期的相对生长速率呈现出不同差异(图 4)。在开花期—乳熟期,不同燕麦的相对生长速率在 0.014~0.033 g·g⁻¹·d⁻¹,品种 P6 的相对生长速率

最高,达到 $0.033\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,显著高于其他品种 ($P<0.05$)。在乳熟期—完熟期,不同燕麦的相对生长速率在 $0.009\sim0.046\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,品种 P7 的相

对生长速率最高,达到 $0.046\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,显著高于其他品种 ($P<0.05$)。整体上,大部分供试燕麦品种的相对生长速率在生育末期低于生育前期。

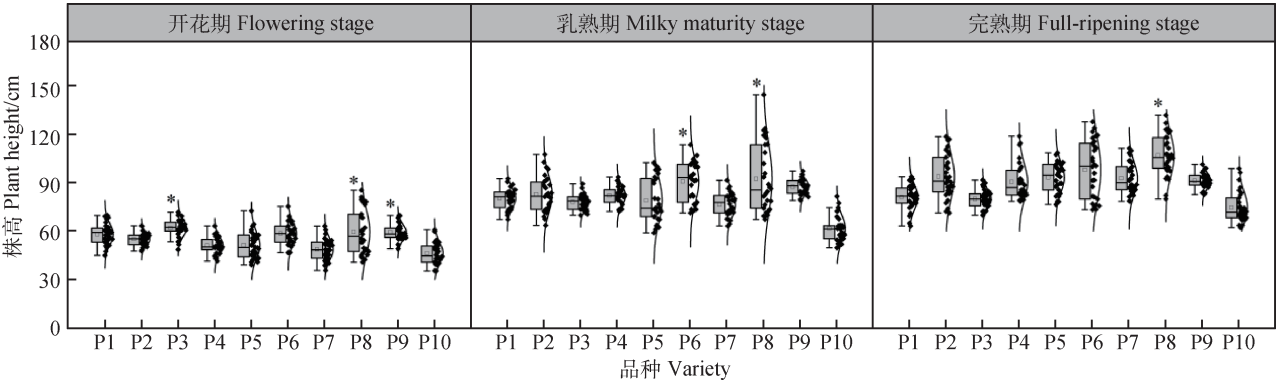


图 1 不同燕麦品种的株高

Fig. 1 Plant height of different oat varieties

注:图中 P1—P10 分别代表楷模、贝勒、艾斯克、贝勒 2、爱沃、黑玫克、福瑞至、美达、速锐、福星,*代表差异显著 ($P<0.05$),下同
Note: P1—P10 in the figure represent exemplary, Model, Baler, Esker, Baler 2, Everleaf, Haymaker, Forage, Monida, Souris, Fuxing, respectively. * represents significant differences ($P<0.05$), the same applies below

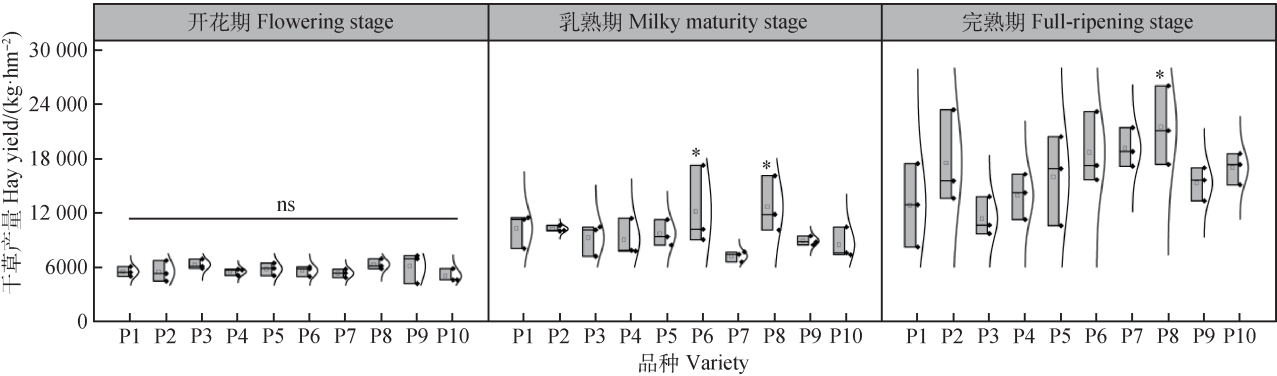


图 2 不同燕麦品种的干草产量

Fig. 2 Hay yield of different oat varieties

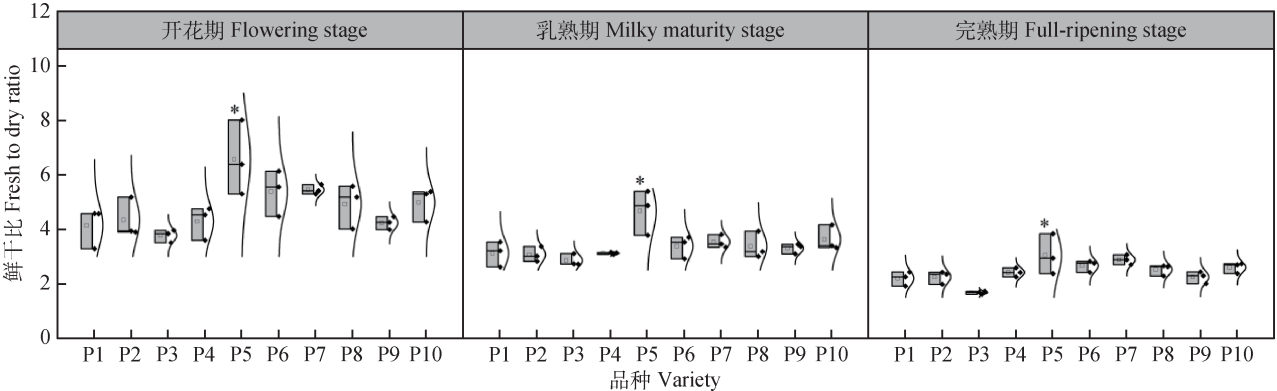


图 3 不同燕麦品种的鲜干比

Fig. 3 Fresh to dry ratio of different oat varieties

2.2.2 不同燕麦品种叶面积及叶面积指数 对 10 份燕麦品种在 3 个生育期的叶面积和叶面积指数进行差异性分析,开花期,叶面积在 $1892.62\sim$

3190.22 mm^2 ,其中‘贝勒 2’和‘爱沃’的叶面积较高,分别为 3190.22 和 2963.65 mm^2 ,显著高于其他品种 ($P<0.05$),在乳熟期和完熟期,‘黑玫克’均具有较高

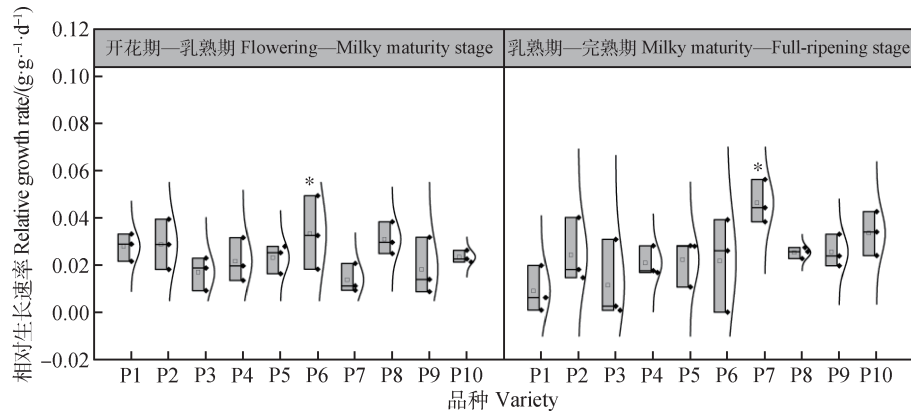


图 4 不同燕麦品种的相对生长速率

Fig. 4 Relative growth rates of different oat varieties

的叶面积,显著优于其他燕麦品种($P < 0.05$)。‘贝勒 2’在开花期的叶周长最高,为 566.20 mm,‘黑玫克’在乳熟期和完熟期的叶周长均表现较优,显著高于其他品种($P < 0.05$)。‘贝勒 2’在开花期的叶长和叶宽表现较优,分别为 273.83 mm 和 16.82 mm,‘黑玫克’在

乳熟期、完熟期的叶长和叶宽均表现较优,显著高于其他品种($P < 0.05$)。‘爱沃’在 3 个生育期的叶面积指数均表现较优,分别为 5.29, 4.56 和 2.62,显著高于其他品种($P < 0.05$)。整体上,燕麦的叶面积指数随着生育期推进而逐渐降低(表 3)。

表 3 不同燕麦品种的叶面积及叶面积指数

Table 3 Leaf area and leaf area index of different oat varieties

生育期 Growth period	品种 Variety	叶面积 Leaf area/mm ²	叶周长 Leaf circumference/mm	叶长 Leaf length/mm	叶宽 Leaf width/mm	叶面积指数 Leaf area index
开花期 Flowering stage	楷模	2175.43±161.12 ^b	427.07±26.44 ^c	208.83±13.20 ^c	14.95±0.78 ^a	2.71±0.38 ^{cd}
	贝勒	1892.62±127.96 ^b	382.38±27.92 ^c	197.50±14.27 ^c	13.95±0.69 ^a	3.24±0.14 ^{bcd}
	艾斯克	2082.43±137.48 ^b	429.58±17.69 ^c	210.33±9.04 ^c	15.38±0.48 ^a	2.05±0.48 ^d
	贝勒 2	3190.22±218.86 ^a	566.20±13.26 ^a	273.83±7.04 ^a	16.82±1.42 ^a	2.85±0.68 ^{cd}
	爱沃	2963.65±251.55 ^a	536.00±30.78 ^{ab}	255.33±14.05 ^{ab}	16.35±1.29 ^a	5.29±0.55 ^a
	黑玫克	2566.00±367.21 ^{ab}	459.45±50.37 ^{bc}	231.33±19.14 ^{bc}	16.05±1.58 ^a	4.46±0.22 ^{ab}
	福瑞至	2112.08±246.67 ^b	395.65±50.23 ^c	194.83±24.86 ^c	15.20±0.68 ^a	3.60±0.17 ^{bc}
	美达	2258.22±235.82 ^b	439.33±31.27 ^c	210.00±11.55 ^c	16.87±1.23 ^a	2.53±0.64 ^{cd}
	速锐	1968.88±192.29 ^b	409.85±21.02 ^c	201.17±10.44 ^c	15.15±0.66 ^a	2.48±0.38 ^{cd}
	福星	2253.47±103.83 ^b	452.42±15.62 ^{bc}	224.33±8.52 ^{bc}	14.03±0.43 ^a	3.33±0.19 ^{bcd}
乳熟期 Milky maturity stage	楷模	2746.13±389.15 ^b	475.48±34.79 ^b	229.50±13.81 ^b	18.17±1.71 ^{bc}	2.53±0.33 ^{bc}
	贝勒	2282.10±206.12 ^{bc}	434.07±26.40 ^b	205.50±8.78 ^{bc}	16.08±1.00 ^{cde}	3.32±0.30 ^{abc}
	艾斯克	1559.22±215.06 ^{cd}	351.27±41.61 ^{cd}	173.00±17.43 ^{cd}	13.85±1.00 ^{de}	2.10±0.25 ^c
	贝勒 2	2492.18±292.19 ^b	458.23±26.69 ^b	219.50±10.69 ^b	17.60±1.62 ^{bcd}	3.05±0.50 ^{abc}
	爱沃	2935.95±153.52 ^b	453.95±18.73 ^b	215.33±6.50 ^b	20.47±0.68 ^{ab}	4.56±1.08 ^a
	黑玫克	4003.97±305.10 ^a	588.25±13.51 ^a	267.83±6.22 ^a	23.43±1.53 ^a	4.53±0.23 ^a
	福瑞至	2184.55±313.40 ^{bc}	418.83±26.52 ^{bc}	203.00±11.66 ^{bc}	16.92±1.20 ^{bcd}	3.40±0.30 ^{abc}
	美达	2154.03±181.50 ^{bc}	418.95±13.11 ^{bc}	204.17±5.56 ^{bc}	15.85±1.38 ^{cde}	3.94±0.14 ^{ab}
	速锐	1345.07±107.62 ^d	329.62±13.95 ^d	165.67±7.02 ^d	12.38±0.55 ^c	2.79±0.43 ^{bc}
	福星	2423.78±271.99 ^b	422.07±25.58 ^{bc}	207.00±11.97 ^b	17.18±1.25 ^{bcd}	3.30±0.24 ^{abc}
完熟期 Full-ripening stage	楷模	1971.70±156.24 ^{bcd}	395.52±23.78 ^c	188.67±8.91 ^c	15.63±1.02 ^{cd}	1.68±0.60 ^{ab}
	贝勒	1901.35±128.65 ^{cde}	395.28±22.42 ^c	190.83±9.47 ^c	14.85±0.78 ^d	2.01±0.14 ^{ab}
	艾斯克	1620.28±203.81 ^c	389.98±37.12 ^c	182.33±12.25 ^c	15.40±1.11 ^{cd}	1.72±0.12 ^{ab}
	贝勒 2	2334.10±204.09 ^{bcd}	443.52±28.18 ^{bc}	211.50±14.24 ^{bc}	16.47±1.53 ^{bcd}	2.25±0.47 ^{ab}
	爱沃	3218.20±192.77 ^a	507.65±17.75 ^{ab}	235.83±7.78 ^{ab}	20.18±1.10 ^a	2.62±0.63 ^a
	黑玫克	3151.92±162.06 ^a	527.87±29.17 ^a	245.83±14.18 ^a	19.50±0.59 ^{ab}	2.74±0.35 ^a
	福瑞至	2524.72±336.74 ^b	411.03±29.38 ^c	198.17±12.06 ^c	19.40±1.79 ^{ab}	2.13±0.44 ^{ab}
	美达	2385.32±202.36 ^{bc}	412.70±27.09 ^c	199.67±13.87 ^c	18.52±0.53 ^{abc}	2.70±0.42 ^a
	速锐	1753.85±137.86 ^{de}	379.13±16.30 ^c	184.17±8.28 ^c	15.20±1.01 ^{cd}	0.93±0.15 ^b
	福星	2227.03±94.12 ^{cd}	411.10±13.85 ^c	200.67±7.82 ^c	16.83±0.39 ^{abcd}	1.81±0.29 ^{ab}

注:表中不同小写字母表示同一生育期下同一指标不同燕麦品种间的显著差异性($P < 0.05$)

Note: Different lowercase letters in the table indicate significant differences ($P < 0.05$) between different oat varieties in the same growth period and indicator

2.2.3 不同燕麦品种种子产量相关特性 对 10 份燕麦品种的种子产量相关性状进行差异性分析,结果显示‘爱沃’和‘福瑞至’的穗轮层数表现较佳,都为 6.22 层,显著高于其他品种($P<0.05$)。‘贝勒’‘贝勒 2’和‘黑玫克’的穗长表现较佳,分别为 20.00, 21.83 和 21.26 cm,显著优于其他品种($P<0.05$)。不同燕麦品种的主穗小穗数差异不显著。‘爱沃’的单株穗粒

数最高,为 34.11 个。‘黑玫克’的单株穗粒重最高,为 1.58 g,显著高于其他品种($P<0.05$)。不同燕麦品种的千粒重在 15.14~42.68 g,‘楷模’的千粒重最高,为 42.68 g,其次为‘艾斯克’,达 42.06 g。不同燕麦品种的种子产量在 7065.34~9963.06 kg·hm⁻²,‘黑玫克’单位面积的种子产量最高,达 9963.06 kg·hm⁻²,显著高于其他燕麦品种($P<0.05$,表 4)。

表 4 不同燕麦品种的种子产量相关性状

Table 4 Seed yield related traits of different oat varieties

品种 Variety	穗轮层数 Number of spikelet layers	穗长 Spike length/ cm	主穗小穗数 Main spike number	单株穗粒数 Grain number per spike	单株穗粒重 Spike grain weight/g	千粒重 Thousand-grain weight/g	种子产量 Seed yield/ (kg·hm ⁻²)
楷模	5.11±0.26 ^{bc}	15.58±0.83 ^b	12.44±1.14 ^a	30.00±5.11 ^{ab}	1.23±0.08 ^{bcd}	42.68±0.65 ^a	7558.01±52.31 ^e
贝勒	5.22±0.32 ^{bc}	20.00±1.77 ^a	14.44±2.03 ^a	31.89±5.92 ^{ab}	1.13±0.10 ^{bcd}	36.91±0.83 ^c	7123.22±74.59 ^f
艾斯克	4.78±0.15 ^c	13.39±0.33 ^{bc}	13.44±0.82 ^a	19.56±1.19 ^b	1.02±0.08 ^{cde}	42.06±1.27 ^{ab}	7065.34±90.65 ^f
贝勒 2	5.22±0.28 ^{bc}	21.83±1.23 ^a	14.56±0.67 ^a	29.00±2.19 ^{ab}	0.94±0.09 ^{def}	29.24±0.65 ^d	8328.66±88.61 ^d
爱沃	6.22±0.22 ^a	13.98±0.84 ^{bc}	14.44±1.36 ^a	34.11±4.25 ^a	0.73±0.09 ^{ef}	15.14±0.61 ^g	8884.56±114.49 ^c
黑玫克	5.67±0.24 ^{ab}	21.26±0.92 ^a	12.33±0.87 ^a	29.33±3.93 ^{ab}	1.58±0.19 ^a	28.02±0.86 ^d	9963.06±140.55 ^a
福瑞至	6.22±0.15 ^a	14.30±0.48 ^{bc}	11.67±0.78 ^a	26.89±3.07 ^{ab}	0.67±0.05 ^f	19.51±0.55 ^f	8236.80±97.45 ^d
美达	4.67±0.24 ^c	15.48±1.01 ^b	14.00±1.81 ^a	29.33±5.54 ^{ab}	1.43±0.13 ^{ab}	29.69±0.59 ^d	9298.60±96.91 ^b
速锐	4.67±0.29 ^c	14.48±0.54 ^{bc}	12.56±0.60 ^a	25.00±2.20 ^{ab}	1.29±0.10 ^{abc}	40.35±0.33 ^b	8454.92±133.93 ^d
福星	5.56±0.18 ^{ab}	12.03±0.53 ^c	11.56±0.77 ^a	20.33±2.70 ^b	0.72±0.10 ^{ef}	25.67±0.70 ^e	7194.40±91.02 ^f

2.3 不同变量对燕麦种子产量的重要性分析

基于随机森林方法来评估不同变量对燕麦种子产量的重要性以及影响程度。将种子产量作为目标变量,其他生长和产量相关性状作为解释变量,叶面积、单株穗粒重、叶面积指数以及穗轮层数对种子产量具有显著影响,其中叶面积、单株穗粒重和叶面积指数的影响最大,对种子产量具有较大的贡献。品种和主穗小穗数虽有一定影响,但未达到显著水平。而株高、干草产量、穗长等变量的均方误差增加百分比较低,它们对于种子产量的贡献较小,影响较弱(图 5)。

2.4 品种对燕麦干草产量和种子产量的影响过程

采用分段式结构方程模型探讨品种如何影响干草产量和种子产量的路径。通过调整和完善模型,拟合度良好($Fisher's C=0.734, P=0.693$),品种对干草产量和种子产量具有直接效应,效应值分别为 0.1699 和 -0.2170。品种对叶面积指数具有直接效应,叶面积指数对干草产量具有显著负效应、对种子产量具有显著正效应,效应值分别为 -0.5970 和 0.5139。品种还通过影响叶面积指数进而间接影响燕麦的干草产量和种子产量(图 6)。

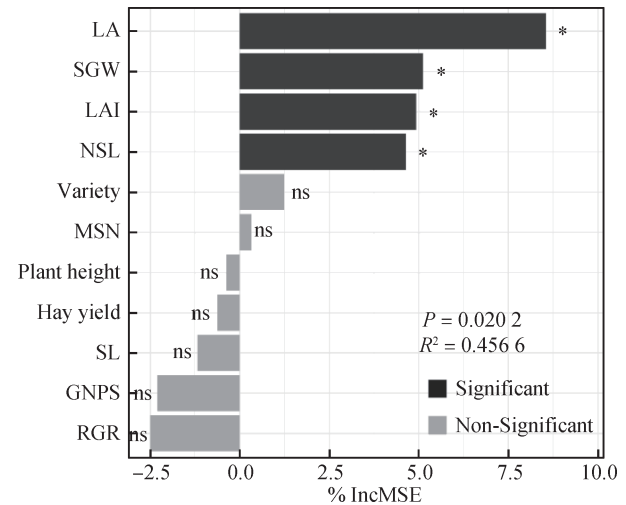


图 5 不同变量对种子产量的重要性分析

Fig. 5 Analysis of the importance of different variables on seed yield

注:图中 LA、SGW、LAI、NSL、Variety、MSN、Plant height、Hay yield、SL、GNPS、RGR、%IncMSE 分别表示叶面积、单株穗粒重、叶面积指数、穗轮层数、品种、主穗小穗数、株高、干草产量、穗长、单株穗粒数、相对生长速率以及均方误差增加百分比;*表示显著差异($P<0.05$),ns 表示无显著差异

Note: In the figure, LA, SGW, LAI, NSL, Variety, MSN, Plant height, Hay yield, SL, GNPS, RGR, and %IncMSE represent leaf area, spike grain weight, leaf area index, number of spikelet layers, variety, main spike number, plant height, hay yield, spike length, grain number per spike, relative growth rate, and percentage increase in mean squared error, respectively. * indicates a significant difference ($P<0.05$), ns indicates no significant difference

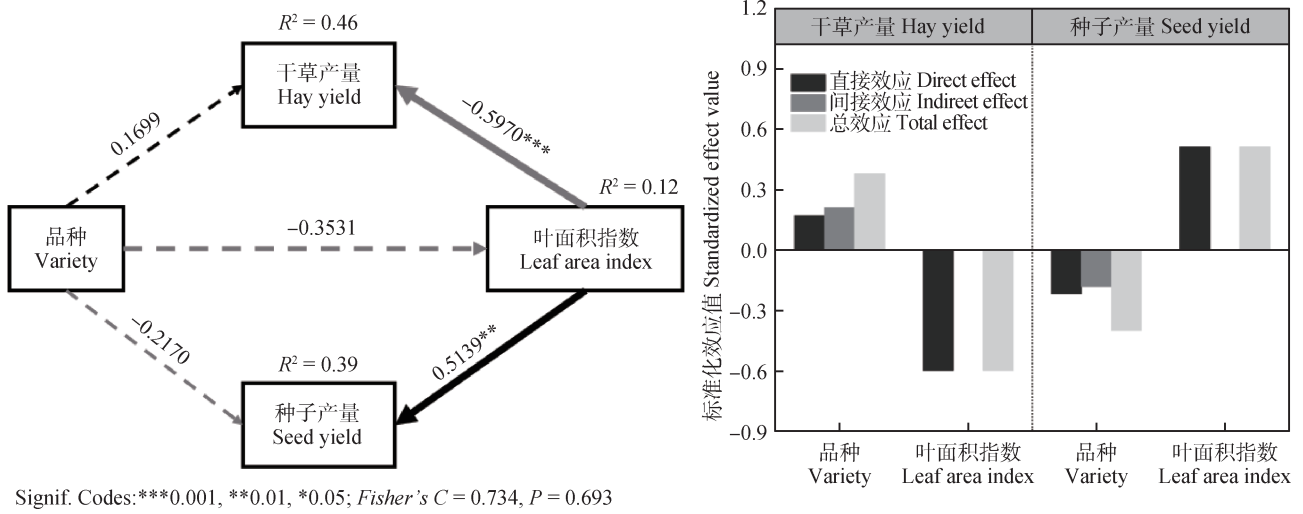


图 6 品种对干草产量和种子产量的影响路径

Fig. 6 The impact path of varieties on hay yield and seed yield

注:实线和虚线分别表示显著和不显著的路径关系。图中数值为标准化路径系数。*, **, ***分别表示在 0.05, 0.01, 0.001 水平上差异显著
Note: Line types, solid=significant paths ($P<0.05$), dashed=non-significant paths. Path coefficients: Standardized β -values shown adjacent to arrows significance levels: * $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$

2.5 不同燕麦品种综合评价

从燕麦的干草产量和种子产量相关性状进行综合评价(图 7)。评价结果显示,品种黑玫克的相对贴合度最高(0.822),综合评价较优,其次为美达(0.649);品种福星的综合评价较低(0.286)。综上,黑玫克在干草产量和种子产量相关性状方面表现较佳,可作为环青海湖地区主推种植的燕麦品种。

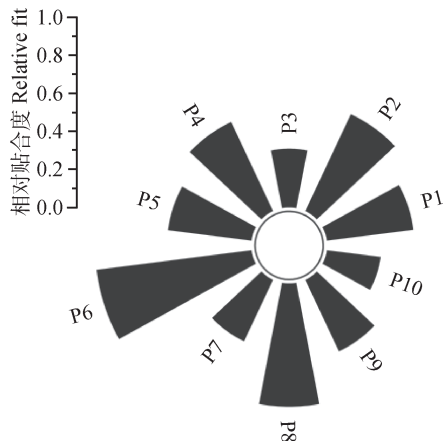


图 7 不同燕麦品种干草产量及种子产量性状综合评价

Fig. 7 Comprehensive evaluation of hay yield and seed yield traits of different oat varieties

3 讨论

3.1 不同燕麦品种物候期及干草产量性状比较

物候期与牧草自身的生物学特性、播种时间、土壤墒情以及当地的气候环境有直接关系^[25]。明

确牧草的物候期对于草类作物的收获以及植株生长过程中发生的变化至关重要^[26]。燕麦生育期的长短受多方面因素影响,也是燕麦自身对外界环境适应性的反应和表现^[27]。本研究中,播种期在5月中上旬,而燕麦出苗期集中在播种后7~10天,孕穗期、抽穗期、开花期分别集中于7月中旬、7月中下旬和8月上旬;燕麦基本均在10月前达到成熟,生育天数在125~144天,最短的品种为‘楷模’和‘艾斯克’,生育天数最长的为品种‘贝勒’和‘福瑞至’,且在该区域引种栽培的燕麦生育期普遍要长于其他地方。这是因为温度是影响燕麦物候期的关键因素之一。青藏高原气温较低、海拔高,温度对燕麦生育期的影响更为显著,海拔直接影响气温、气压和土壤温度等环境因素。高海拔地区气温低、生长季短,燕麦的生育期会相应延长^[28]。此外,不同燕麦品种的遗传特性决定了其对环境的适应性和生育期长短,早熟燕麦品种主要通过缩短拔节期-孕穗期、开花期-完熟期的时间来适应高寒地区的短生长季^[28],周镇磊等^[29]研究也指出燕麦生育期受品种和环境因素的综合影响。

只有充分了解不同地理来源的燕麦品种在特定生长环境中的适应性表现,才能准确判断某一品种的生产特性和利用价值^[11]。株高是影响饲草产量的关键农艺性状,能够反映出不同品种干草产量的差异^[30],产量作为衡量作物生产性能和经济效益的重要指标,是生产追求的最高目标^[31]。本研究

中,‘美达’的株高在3个生育期均表现较高,显著高于其他品种,平均为86.21 cm;这与王金兰等^[12]研究的燕麦株高82.2~89.7 cm的结果一致,但远低于在甘肃陇中地区研究的燕麦平均株高128.31 cm^[27],其原因可能跟研究区的气候条件、土壤墒情、海拔以及有效积温有关,高寒地区因其气温寒冷、高海拔等特征限制了燕麦的生长发育,导致株高普遍较低。通常情况下,株高较高的品种,产量也相对较高^[32],本研究发现,‘美达’的干草产量在乳熟期和完熟期表现较高,分别为1267.20和2147.75 kg·hm⁻²,其株高表现也较佳,这与景芳等^[27]的研究结果相似。相对生长速率是指单位时间内生物体生长速度与其初始大小的比值,通常用于衡量植物的生长能力,本研究中用来评估燕麦不同品种的生长能力和对环境的适应性。本研究中,开花期一乳熟期的相对生长速率要高于乳熟期一完熟期,这可能是由于高寒地区气温较低,生长季较短,燕麦的相对生长速率可能在早期较高,但随着温度下降,生长速率会逐渐降低密切相关,这与徐长林^[33]在东祁连山高寒牧区不同燕麦品种生长特性比较研究的结论相一致。

3.2 不同燕麦品种叶面积指数比较

叶面积指数是指单位地表面上叶片的总面积与该地表面积之比,它是反映植物群体生长状况和植被覆盖程度的重要指标,直接影响植物的光合作用、蒸腾作用和能量平衡^[34-35]。本研究中,‘爱沃’在3个生育期的叶面积指数均表现较优,分别为5.29,4.56和2.62,显著高于其他品种,且品种间有显著差异。这是因为不同燕麦品种在生长过程中对叶面积指数的积累和分配存在显著差异,一些品种通过优化叶片结构和分布,能够在有限的生长期实现更高的光能利用效率,不同燕麦品种在不同生长阶段对光合有效辐射的截获和利用能力存在显著差异^[36-38]。本研究通过随机森林来评估不同变量对燕麦种子产量的重要性以及影响程度,结果表明叶面积、单株穗粒重、叶面积指数以及穗轮层数对种子产量具有显著影响,这是因为叶面积和叶面积指数是影响燕麦种子产量的重要因素,叶面积的大小直接影响光合作用的效率,进而影响生物量积累和种子产量。研究表明,燕麦的鲜草产量和种子产量与叶面积指数呈显著正相关,较高的叶面积指数意味着更强的光能截获能力和更高的光合作用

效率,从而促进生物量积累和种子产量的提高^[39]。穗轮层数是影响燕麦种子产量的另一个重要因素,穗轮层数越多,通常意味着更多的小穗和穗粒数,从而提高种子产量。相关研究表明,穗轮层数与燕麦的种子产量呈显著正相关^[39],单株穗粒重也决定了燕麦种子产量的大小,这与本研究随机森林分析的结果相一致。本研究通过构建分段结构方程模型,结果表明品种通过影响叶面积指数进而间接影响燕麦的干草产量和种子产量,这是由于叶面积指数作为影响植物光合作用和生物量积累的重要因素之一,其大小直接决定植物的光能利用效率,进而影响干草产量和种子产量^[40]。也有研究证实,较高的叶面积指数有助于提高燕麦的穗粒数和千粒重,进而增加种子产量^[41]。而适应高寒环境的燕麦品种通过优化叶片结构和提高光合效率,能够在低温条件下更有效地提高光能利用率。

3.3 不同燕麦品种种子产量相关性状比较

种子产量是燕麦籽实生产性能的直接体现,而燕麦品种评比试验最主要的目的就是确定具有卓越种子产量的燕麦品种,用于畜牧业生产^[42]。千粒重、单株穗粒数、单株种子产量以及穗长等指标是构成种子产量的主要因素^[43]。本研究中,不同燕麦品种的穗轮层数、穗长、单株穗粒数以及单株穗粒重均表现出显著差异,其中‘爱沃’的穗轮层数最高(6.22),‘贝勒2’的穗长最长(21.83 cm),‘爱沃’的单株穗粒数最多(34.11),‘黑玫克’的单株穗粒重最高(1.58 g);不同燕麦品种的千粒重在15.14~42.68 g,楷模的千粒重最高(42.68 g);‘黑玫克’单位面积的种子产量最高,为9963.06 kg·hm⁻²。相关研究也证实,在环境条件、栽培管理相同的情况下,不同燕麦品种的性状表现不同,其对燕麦穗粒数和千粒重具有极显著差异^[44]。千粒重作为种子质量的标志,是影响种子产量重要的农艺性状。有研究表明,千粒重与种子产量具有显著相关性,千粒重也标志着燕麦种子的发育程度,种子越饱满、发育越完全,种子产量就越高^[45]。

筛选和综合评价引种栽培的燕麦品种,不仅要从小麦的表型特征、饲草产量以及营养品质评价,更要关注其种子产量和光能利用率。本研究通过对不同品种燕麦的干草产量性状、种子产量相关性状以及光能利用率等层面进行TOPSIS综合评价发现,‘黑玫克’的综合表现较优,可作为环青海湖

地区种植的首推品种。由于‘黑玫克’的叶片宽而平展、茎秆粗壮直立,抗倒伏能力优于其他品种,且具有较强的抗寒和耐旱能力,其抗寒特性使其能够适应高寒地区的低温环境。此外,‘黑玫克’作为青贮饲料具有更优的特性^[46]。因此,在特定地区引种栽培时,应充分考虑不同燕麦品种的遗传特性和生长特性,并结合当地的环境条件、土壤条件以及气候特征,选择适宜种植和利用的优良品种,以充分发挥品种的生产和生态潜力,实现经济效益的最大化。

4 结论

环青海湖地区燕麦品种比较结果表明,不同品种在产量及相关性状上存在显著差异,且这些差异体现了干草产量与种子产量形成的多维度调控因素。结构方程模型与随机森林分析揭示,叶面积、叶面积指数、单株穗粒重和穗轮层数是决定种子产量的核心因子,说明叶部生长与穗部结构在物质积累与产量形成中发挥协同作用。生育后期相对生长速率下降,提示了产量优势依赖于前期快速生长和器官建成。综合性状表现突出的‘黑玫克’可作为环青海湖地区的核心推广品种,而‘爱沃’和‘楷模’等品种在特定性状上的优势也为育种改良提供了材料。因此,本研究不仅筛选出适宜的主推品种,也揭示了燕麦干草与种子产量形成的关键性状及其作用路径,为该地区燕麦品种选择与高效栽培提供了理论依据。

参考文献

- [1] 杨海鹏. 我国燕麦属内的种及其检索[M]. 北京:农业出版社,1989:75-83
YANG H P. Species and identification keys of the Genus *Avena* in China[M]. Beijing: Agriculture Press, 1989: 75-83
- [2] 王筱,李夺,潘翔磊,等. 赤峰半干旱区10个饲用燕麦品种适应性评价[J]. 草业科学,2023,40(2):521-529
WANG X, LI D, PAN X L, et al. Adaptability evaluation of 10 forage oat varieties in Chifeng semiarid area[J]. Pratacultural Science, 2023, 40(2): 521-529
- [3] 郑殿升. 中国燕麦的多样性[J]. 植物遗传资源学报,2010,11(3):249-252
ZHENG D S. Diversity of oat in China[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2010, 11(3): 249-252
- [4] 景芳,刘彦明,南铭,等. 12个燕麦品种在黄土高原沟壑区生产性能及适应性[J]. 草业科学,2024,41(5):1175-1188
JING F, LIU Y M, NAN M, et al. Production performance and adaptability of 12 oat varieties in the Gully Region of Loess Plateau[J]. Pratacultural Science, 2024, 41(5): 1175-1188
- [5] 王慧,杨富,姜超,等. 燕麦品种(系)的营养品质综合评价[J]. 麦类作物学报,2021,41(2):203-211
WANG H, YANG F, JIANG C, et al. Comprehensive evaluation of nutritional quality of oats varieties (lines)[J]. Journal of Triticeae Crops, 2021, 41(2): 203-211
- [6] OBA M, ALLEN M S. Evaluation of the importance of the digestibility of neutral detergent fiber from forage: effects on dry matter intake and milk yield of dairy cows[J]. Journal of Dairy Science, 1999, 82(3): 589-596
- [7] LI X L, GAO J, BRIERLEY G, et al. Rangeland degradation on the Qinghai-Tibet plateau: implications for rehabilitation[J]. Land Degradation & Development, 2013, 24(1): 72-80
- [8] WANG X M, ZHOU D Y, JIANG G H, et al. How can the sustainable goal of cultivated land use in the Qinghai-Tibet Plateau be realized? —based on a research framework of cultivated land use patterns[J]. Frontiers in Environmental Science, 2023, 11: 1134136
- [9] 周青平,颜红波,梁国玲,等. 不同燕麦品种饲草和籽粒生产性能分析[J]. 草业学报,2015,24(10):120-130
ZHOU Q P, YAN H B, LIANG G L, et al. Analysis of the forage and grain productivity of oat cultivars[J]. Acta Pratacultural Sinica, 2015, 24(10): 120-130
- [10] 关皓,许多,李海萍,等. 高寒地区17个燕麦品种营养品质及瘤胃降解特性研究[J]. 草业学报,2024,33(9):185-198
GUAN H, XU D, LI H P, et al. A study of nutritional quality and rumen degradation characteristics of 17 oat varieties in high cold regions [J]. Acta Pratacultural Sinica, 2024, 33(9): 185-198
- [11] 李晶,南铭,刘彦明,等. 不同燕麦品种产量和品质及饲喂性能综合评价[J]. 草地学报,2023,31(4):1089-1098
LI J, NAN M, LIU Y M, et al. Comprehensive evaluation of the yield, quality and feeding performance on different oat varieties[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(4): 1089-1098
- [12] 王金兰,王小军,刘启林,等. 不同燕麦品种在三江源区的生产性能和营养品质综合评价[J]. 草业学报,2024,33(10): 83-95
WANG J L, WANG X J, LIU Q L, et al. A multi-trait evaluation of production performance and nutritional quality of different oat varieties in the Sanjiangyuan area [J]. Acta Pratacultural Sinica, 2024, 33(10): 83-95
- [13] 王小军,王金兰,琚泽亮,等. 环青海湖地区不同饲用燕麦品种生产性能和营养品质综合评价[J]. 中国农业科学,2024,57(19):3730-3742
WANG X J, WANG J L, JU Z L, et al. Comprehensive evaluation on production performance and nutritional quality of different varieties of forage oat in the Qinghai Lake area [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2024, 57(19): 3730-3742
- [14] ZHANG G L, CHAI J K, ZHAO G Q, et al. Study on the adaptability of 15 oat varieties in different ecological regions [J]. Agronomy, 2025, 15(2): 391

- [15] KUMAR R, VARGHESE S, JAYASWAL D, et al. Agromorphological and genetic variability analysis in oat germplasms with special emphasis on food and feed[J]. PLoS One, 2023, 18(2):e0280450
- [16] 杨予海, 孙佳妮. 环青海湖地区畜牧业和饲料业现状及发展的思考[J]. 饲料工业, 2006, 27(23):61-63
YANG Y H, SUN J N. Thoughts on the present situation and development of animal husbandry and feed industry around Qinghai Lake[J]. Feed Industry, 2006, 27(23):61-63
- [17] 徐丽君, 韩春燕, 李建忠, 等. 刍议我国燕麦产业发展新动态、面临新挑战及新对策[J]. 草地学报, 2024, 32(12):3661-3669
XU L J, HAN C Y, LI J Z, et al. New trends, challenges and countermeasures of oat industry in China[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(12):3661-3669
- [18] 周鹏宇, 崔占鸿, 王迅, 等. 青海省共和县4种燕麦品种营养及对牦牛饲用潜力的评价[J]. 草业科学, 2024, 41(12):2972-2983
ZHOU P Y, CUI Z H, WANG X, et al. Nutritional evaluation of four oat varieties and their potential for yak feeding in Gonghe County, Qinghai Province[J]. Pratacultural Science, 2024, 41(12):2972-2983
- [19] 董志晓, 苟文龙, 刘英杰, 等. 15份饲用燕麦品种在凉山地区的生产性能和营养价值评价[J]. 草业科学, 2024, 41(11):2651-2663
DONG Z X, GOU W L, LIU Y J, et al. Evaluation of production performance and nutritional value of 15 feed barley varieties in the Liangshan Region[J]. Pratacultural Science, 2024, 41(11):2651-2663
- [20] 张仲鹏, 郝曦煜, 李峰, 等. 黑龙江中南部不同品种和刘割时期对燕麦饲草产量和品质的影响[J]. 草业科学, 2024, 41(12):2928-2938
ZHANG Z J, HAO X Y, LI F, et al. Effects of different varieties and cutting time on the yield and quality of oat forage in central and southern Heilongjiang province[J]. Pratacultural Science, 2024, 41(12):2928-2938
- [21] 郑殿升, 王晓鸣, 张京. 燕麦种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006:55-57
ZHENG D S, WANG X M, ZHANG J. Descriptive specifications and data standards for oat germplasm resources[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006:55-57
- [22] 程洁茹, 钟全林, 邹宇星, 等. 氮磷配施对刨花楠幼苗相对生长速率与细根性状关系的影响[J]. 生态学杂志, 2023, 42(8):1811-1819
CHENG J R, ZHONG Q L, ZOU Y X, et al. Effects of different ratios of nitrogen and phosphorus addition on the relationship between relative growth rate and fine root traits of *Machilus pauhoi* seedlings[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(8):1811-1819
- [23] 曹铨. 黄土高原苹果树/鸭茅复合系统产量、光能利用及蒸散发特征研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020:11-14
CAO Q. Production, light utilization and evapotranspiration in apple tree and cocksfoot agroforestry systems on the Loess Plateau of China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020:11-14
- [24] WEI K T, XIANG H, LIU Y F, et al. Mixed cropping of *Medicago ruthenica*-*Bromus inermis* exhibits higher yield and quality advantages in the Longxi Loess Plateau region of Northwest China[J]. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2024, 8:1411687
- [25] 徐雅梅, 张卫红, 蔺永和, 等. 锰对西藏不同地域野生赖草萌发的影响及评价[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(5):73-79
XU Y M, ZHANG W H, LIN Y H, et al. Effects and evaluations on germination period of wild *Leymus secalinus* in different regions of Tibet under the $MnCl_2$ stress[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(5):73-79
- [26] WILMAN D. Some changes in grass crops during periods of uninterrupted growth[J]. The Journal of Agricultural Science, 2004, 142(2):129-140
- [27] 景芳, 任生兰, 边芳, 等. 16个燕麦品种在甘肃陇中地区的适应性评价与筛选[J]. 中国草地学报, 2023, 45(1):68-76
JING F, REN S L, BIAN F, et al. Adaptability evaluation and screening of 16 oat varieties in longzhong area of Gansu[J]. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(1):68-76
- [28] 任春燕, 梁国玲, 刘文辉, 等. 青藏高原高寒地区早熟燕麦资源筛选和适应性评价[J]. 草业学报, 2023, 32(9):116-129
REN C Y, LIANG G L, LIU W H, et al. Screening and adaptability evaluation of early maturing oats in alpine regions of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(9):116-129
- [29] 周镇磊, 刘建明, 曹东, 等. 不同燕麦品种草产量、农艺性状和饲草品质的比较[J]. 作物杂志, 2024(1):132-140
ZHOU Z L, LIU J M, CAO D, et al. Comparison of grass yield, agronomic traits and forage quality of different oat varieties[J]. Crops, 2024(1):132-140
- [30] 肖雪君, 周青平, 陈有军, 等. 播种量对高寒牧区林纳燕麦生产性能及光合特性的影响[J]. 草业科学, 2017, 34(4):761-771
XIAO X J, ZHOU Q P, CHEN Y J, et al. Effect of seeding rate on production performance and photosynthetic characteristics of *Avena sativa* cv. LENA in alpine pastoral regions[J]. Pratacultural Science, 2017, 34(4):761-771
- [31] 孙建平, 董宽虎, 蒯晓妍, 等. 晋北农牧交错区引进燕麦品种生产性能及饲用价值比较[J]. 草业学报, 2017, 26(11):222-230
SUN J P, DONG K H, KUAI X Y, et al. Comparison of productivity and feeding value of introduced oat varieties in the agro-pasture ecotone of northern Shanxi[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(11):222-230
- [32] 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
- [33] 徐长林. 高寒牧区不同燕麦品种生长特性比较研究[J]. 草业学报, 2012, 21(2):280-285

- XU C L. A study on growth characteristics of different cultivars of oat (*Avena sativa*) in alpine region[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(2): 280-285
- [34] 董震, 杨贵军, 孙林, 等. 多层离散各向异性辐射传输模型在玉米叶面积指数垂直分布反演中的应用[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2021, 47(4): 439-450
- DONG Z, YANG G J, SUN L, et al. Application of multi-layer discrete anisotropic radiative transfer model in vertical distribution inversion of maize leaf area index[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2021, 47(4): 439-450
- [35] FANG H L, BARET F, PLUMMER S, et al. An overview of global leaf area index (LAI): methods, products, validation, and applications[J]. *Reviews of Geophysics*, 2019, 57(3): 739-799
- [36] 彭先琴, 周青平, 刘文辉, 等. 川西北高寒地区 6 个燕麦品种生长特性的比较分析[J]. *草业科学*, 2018, 35(5): 1208-1217
- PENG X Q, ZHOU Q P, LIU W H, et al. A comparative analysis of growth characteristics of six oat cultivars in the north-western Sichuan alpine region[J]. *Pratacultural Science*, 2018, 35(5): 1208-1217
- [37] ALADOS I, FOYO-MORENO I, ALADOS-ARBOLEDAS L. Photosynthetically active radiation: measurements and modelling[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 78(1/2): 121-131
- [38] 于治广, 同洁, 米俊珍, 等. 水旱条件对不同燕麦品种光合特性和同化物积累的影响[J]. *北方农业学报*, 2021, 49(3): 22-28
- YU Z G, YAN J, MI J Z, et al. Effects of water and drought conditions on photosynthesis characteristics and assimilate accumulation on different oat varieties[J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2021, 49(3): 22-28
- [39] 岳武. 燕麦主要农艺性状与产量的相关性及其灰色关联度分析[J]. *辽宁农业科学*, 2017(2): 33-36
- YUE W. Correlation and grey correlation analysis between main agronomic characters and yield of oat[J]. *Liaoning Agricultural Sciences*, 2017(2): 33-36
- [40] 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
- MA X L, MA X, JU Z L, et al. 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
- [41] 贾志锋, 马祥, 琚泽亮, 等. 施氮量和播种量对燕麦光合特性、激素含量及种子产量的影响[J]. *草地学报*, 2021, 29(2): 293-302
- JIA Z F, MA X, JU Z L, et al. Effects of nitrogen application rate and sowing rate on photosynthetic characteristics, phytohormone content and grain yield of oat[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(2): 293-302
- [42] SILORIYA P N, RATHI G S, MEENA V D. Relative performance of oat (*Avena sativa* L.) varieties for their growth and seed yield[J]. *African Journal of Agricultural Research*, 2014, 9(3): 425-431
- [43] 张光雨, 沈振西, 邵小明, 等. 西藏当雄 10 个引进燕麦品种的生产性能和营养品质比较[J]. *草地学报*, 2019, 27(4): 1083-1089
- ZHANG G Y, SHEN Z X, SHAO X M, et al. A comparative study of yield and nutritive value of ten imported oat varieties in damxung county of Xizang, China[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(4): 1083-1089
- [44] 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
- [45] 柴继宽, 赵桂琴, 师尚礼. 燕麦种子产量构成因子与产量的关联性分析[J]. *草地学报*, 2012, 20(1): 49-53
- CHAI J K, ZHAO G Q, SHI S L. Association analysis between seed yield and yield components of oats[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2012, 20(1): 49-53
- [46] 秦子阳, 张洪瑞, 王召明, 等. 基于康奈尔净碳水化合物-蛋白质体系评价添加剂对高寒地区不同品种燕麦青贮品质的影响[J]. *动物营养学报*, 2025, 37(1): 637-647
- QIN Z Y, ZHANG H R, WANG Z M, et al. Evaluation of effects of additives on silage quality of different varieties of oats in alpine regions based on Cornell net carbohydrate and protein system[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2025, 37(1): 637-647

(责任编辑 彭露茜)