

DOI: 10.11686/cyxb2025186

http://cyxb.magtech.com.cn

王一博, 明雪花, 张建勇, 等. 宁夏干旱区燕麦新种质生产性能和种子产量综合评价研究. 草业学报, 2026, 35(4): 86—99.

WANG Yi-bo, MING Xue-hua, ZHANG Jian-yong, *et al.* Multi-trait evaluation of the production performance and seed yield of new oat germplasm materials in the arid area of Ningxia. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(4): 86—99.

宁夏干旱区燕麦新种质生产性能和种子产量综合评价研究

王一博^{1,2,3}, 明雪花^{1,2,3}, 张建勇⁴, 袁琦⁵, 杜建明⁶, 王斌^{1,2,3}, 王腾飞^{1,2,3}, 张译尹^{1,2,3}, 兰剑^{1,2,3}, 牟乐^{1,2,3*}

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏草业工程技术研究中心, 宁夏 银川 750021; 3. 农业农村部饲草高效生产模式创新重点实验室, 宁夏 银川 750021; 4. 宁夏回族自治区畜牧工作站, 宁夏 银川 750002; 5. 宁夏隆德县观庄畜牧兽医工作站, 宁夏 固原 756300; 6. 宁夏农林科学院林业与草地生态研究所, 宁夏 银川 750021)

摘要:为应对宁夏干旱区旱作燕麦种质资源遗传多样性不足、适宜栽培品种稀缺的产业瓶颈,本研究于2023年在宁夏大学盐池四墩子试验基地,采用单因素随机区组设计对21份燕麦新种质及3个主推品种(CK₁、CK₂、CK₃)进行田间比较试验,通过主成分分析(PCA)与聚类分析系统解析其农艺性状、种子生产性能及发芽特性的遗传差异。结果表明:L₉在穗长(30.13 cm)、单株穗粒数(141.67粒)、粗蛋白产量(0.58 g·株⁻¹)、种子宽(3.36 mm)及实际种子产量(4726.33 kg·hm⁻²)等核心生产指标上表现最优;L₂则兼具株高(159.33 cm)、单株干重(5.69 g)、千粒重(38.53 g)、发芽率(98.67%)及种子产量(4423.53 kg·hm⁻²)的多维度优势。PCA综合评价模型显示,L₉、L₂和L₁₇位列前三,其综合得分较CK₁、CK₂、CK₃提升23.6%~41.8%。基于欧氏距离的聚类分析将参试材料划分为三大类群,其中第II类群(L₂、L₉、L₁₉)在种子产量、发芽特性及生物量积累等关键指标上显著优于其他类群(P<0.05)。本研究筛选出L₂和L₉两个抗旱高产型燕麦种质,其种子产量较区域主栽品种提高18.02%~40.47%。研究结果不仅为干旱区燕麦品种更新提供了可应用的优异种质,还为旱作燕麦育种提供了核心亲本资源。

关键词:燕麦;新种质;生产性能;种子产量;主成分分析;聚类分析

Multi-trait evaluation of the production performance and seed yield of new oat germplasm materials in the arid area of Ningxia

WANG Yi-bo^{1,2,3}, MING Xue-hua^{1,2,3}, ZHANG Jian-yong⁴, YUAN Qi⁵, DU Jian-ming⁶, WANG Bin^{1,2,3}, WANG Teng-fei^{1,2,3}, ZHANG Yi-yin^{1,2,3}, LAN Jian^{1,2,3}, MU Le^{1,2,3*}

1. School of Forestry and Grassland Science, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Ningxia Grassland and Animal Husbandry Engineering Technology Research Center, Yinchuan 750021, China; 3. Key Laboratory of Forage Efficient Production Mode Innovation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yinchuan 750021, China; 4. Ningxia Hui Autonomous Region Animal Husbandry Workstation, Yinchuan 750002, China; 5. Guanzhuang Livestock and Veterinary Workstation in Longde County, Guyuan 756300, China; 6. Institute of Forestry and Grassland Ecology, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750021, China

收稿日期:2025-05-09;改回日期:2025-06-04

基金项目:优质牧草提质增效关键技术与集成示范项目(NGSB-2021-15-02),宁夏高等学校一流学科建设(草学学科)项目(NXYLXK2017A01),“一年两熟”人工草地可持续发展模式研究与示范项目(2021BBF02001)和宁夏抗旱节水优质饲草新品种选育与良种繁育项目(2019NYYZ0402)资助。

作者简介:王一博(2001—),男,河南周口人,在读硕士。E-mail: 573462458@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: mule069@nxu.edu.cn

Abstract: There is limited genetic diversity among dryland oat germplasm resources and a paucity of oat varieties suitable for cultivation in the arid area of Ningxia. To address these problems, we conducted an experiment with a single-factor randomized block design to compare the performance of 21 new oat germplasm materials and three main varieties (CK₁, CK₂, CK₃) at the Yanchi Sidunzi Experimental Base of Ningxia University in 2023. Differences in their agronomic traits, seed production performance, and germination characteristics were analyzed by principal component analysis (PCA) and cluster analysis methods. The results show that the new strain L₉ performed best in terms of core production indexes such as ear length (30.13 cm), grain number per plant (141.67 grains), crude protein yield (0.58 g·plant⁻¹), seed width (3.36 mm), and actual seed yield (4726.33 kg·ha⁻¹). L₂ had multi-dimensional advantages of plant height (159.33 cm), dry weight per plant (5.69 g), 1000-grain weight (38.53 g), germination rate (98.67%), and seed yield (4423.53 kg·ha⁻¹). The PCA multi-trait evaluation model showed that L₉, L₂, and L₁₇ ranked as the top three varieties, with multivariate scores 23.6%–41.8% higher than those of CK₁, CK₂, and CK₃. The cluster analysis based on Euclidean distance divided the test materials into three groups, among which group II (L₂, L₉, L₁₉) showed significantly better performance than the other groups in terms of key indicators such as seed yield, germination characteristics, and biomass accumulation ($P < 0.05$). Two drought-resistant and high-yielding oat germplasm materials, L₂ and L₉, were screened out, and their seed yield was 18.02%–40.47% higher than that of the main varieties in the region. The results of this study not only identify excellent oat germplasm lines for cultivation in arid areas, but also highlight core parental resources for breeding new drought-resistant oat varieties.

Key words: oats; new germplasm; production performance; seed yield; principal component analysis; cluster analysis

种业被视为“芯片”，是确保国家粮食安全的关键，也是推动生态文明建设、维护生物多样性的重要基础^[1-2]。燕麦(*Avena sativa*)作为一年生禾本科饲草，具有生育期短、抗逆性强、产草量高等特性，且其籽粒营养价值高，是家畜的优质饲料之一，在解决季节性饲草短缺问题中发挥着重要的作用^[3-4]，目前在我国西北、华北、西南地区已经大面积推广种植。近年来，全球气候变化加剧了干旱胁迫对农业的威胁，燕麦作为西北干旱区的重要饲草，其抗旱育种已成为保障区域畜牧业可持续发展的关键^[5]。宁夏作为燕麦主要产区之一，该区的燕麦品种普遍存在种性退化、种子产量低、抗逆性差、品系混杂等问题，严重制约着燕麦产业的健康发展^[6]。同时，该区域现有种植的燕麦品种多以国外引进为主^[7]，而种质资源是育种的物质基础，创制抗旱高产的新种质是突破现有困境的核心。因此，加强当地燕麦品种的筛选和育种，获得适宜本地气候、群体表现一致、生产性能好、抗逆性强的燕麦新种质，是畜牧业稳定发展的重要举措。

由于不同地区气候、环境的差异，燕麦所表现的适应性与生长潜能也存在显著的地域性差异。因此，科研工作者们进行了大量育种试验以筛选适宜不同区域生长的燕麦品种。燕麦育种工作在我国北方地区开展得比较早，为此优良燕麦新品种(系)更为丰富^[8]。例如，Zhang等^[9]在甘肃省半干旱地区对10个燕麦品种的农艺性状、产量和营养价值等指标进行综合分析，发现‘Everleaf 126’草产量和种子产量最高，分别为13550.67、5242.33 kg·hm⁻²，且营养品质较为突出。耿小丽等^[10]在甘肃天祝地区对30个燕麦品种(品系)的物候期、主要农艺性状以及干草产量进行评估，得出‘定燕2号’燕麦适宜在该地区推广种植。在南方地区，也有相关研究，如郑曦等^[11]在江苏扬州地区对23个不同燕麦品种(系)的适应性进行评价比较，研究结果表明‘杂叶307’的干草产量和干鲜比及综合得分最高，适宜在该地区种植推广。目前，在宁夏地区也有大量燕麦品种的适应性研究，但筛选出的品种基本是引进品种，非当地选育^[12]。因此，本试验以21个燕麦新种质和当地3个主推燕麦品种为研究对象，采用主成分分析和聚类分析方法对其田间农艺性状、饲草产量、种子产量等指标进行综合评价，筛选出适宜宁夏地区推广种植的燕麦新种质，以期丰富该地区燕麦种质资源，为培育燕麦新品种奠定基础，同时为区域畜牧业发展提供理论依据和技术支持。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

该试验于2023年在宁夏盐池县花马池镇宁夏大学四墩子草学野外科学观测研究站(37°46′26″ N, 107°26′16″ E, 海拔1380 m)开展,2023年该区域月平均降水量和气温如图1所示。该地属典型大陆性季风气候,年均降水量260 mm左右,年均潜在蒸发量2000 mm。年均气温9.8℃,最低气温-7.5℃,最高气温23.8℃,年日照时数达3000 h,无霜期163 d。试验地土壤类型为灰钙土,pH值为8.5,有机质含量为5.45 g·kg⁻¹,碱解氮含量为89.65 mg·kg⁻¹,速效氮含量为22.23 mg·kg⁻¹,速效钾含量为113.21 mg·kg⁻¹,速效磷含量为21.24 mg·kg⁻¹。

1.2 试验材料

3个燕麦对照(CK₁、CK₂、CK₃)为宁夏本地主推品种;21个燕麦新种质信息为课题组培育的新种质,将其分别命名为L₁、L₂、…、L₂₁(表1)。

1.3 试验设计

于2023年3月6日,采用单因素随机区组试验设计,选取地势平坦的地块进行燕麦种质评比试验。小区面积为3 m×5 m(15 m²),小区间隔1 m,每个种质3次重复,总计72个小区。燕麦播种量为120 kg·hm⁻²,播种方式为条播,行距30 cm,播深3~4 cm。在播种前撒施磷酸二铵120 kg·hm⁻²(N≥18%, P₂O₅≥46%)和硫酸钾90 kg·hm⁻²(K₂O≥46%)作为基肥,在拔节期施尿素150 kg·hm⁻²(N≥46%)。以节水栽培模式,于燕麦生长季灌水3次(2023年5月21日、6月18日、7月10日),每次灌水量为82.5 mm;灌水方式采用地面滴灌,滴灌带间隔60 cm,滴头间隔25 cm。根据当地生产方式对试验地进行人工除草管理。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 农艺性状和粗蛋白产量 农艺性状指标于燕麦抽穗期至灌浆期测定。每个小区随机选取燕麦10株,用卷尺测量从地面至最高点的自然高度,取其平均值。每个小区随机选取10株长势均匀的燕麦,在距离地面10 cm处用游标卡尺测量其茎粗,取其平均值。在每个小区随机选取燕麦10株,自然风干,用电子天平称量干重。

粗蛋白产量计算公式为:粗蛋白产量(g·株⁻¹)=单株干草产量(g·株⁻¹)×粗蛋白含量(%)^[13]。

1.4.2 种子产量及构成因素 于成熟期(7月22日)对每个燕麦种质随机选取长势均匀且具有代表性的燕麦10株,取地上部分,测量其主生殖枝的穗部长度、单株穗粒重、单株穗粒数、轮生层数。将所有燕麦种质进行人工脱粒后测定其千粒重。在每个小区内随机选取3个1 m²长势均匀的燕麦刈割后测定实际种子产量,然后换算为每hm²种子产量。

1.4.3 种子发芽特性 发芽势、发芽率、根长和苗长:按照GB/T 2930.4-2017方法进行发芽试验。用分析天平称取燕麦成熟种子1 g,自来水浸泡3 min,倒掉漂浮种子(连同自来水),将剩余种子置于滤纸上室内自然晾干后,用75%酒精处理30 s,5%NaClO浸泡20 min,无菌蒸馏水清洗3次,最后用无菌滤纸将种子表面水分吸干。将种子置于直径为9 cm玻璃培养皿中(内铺双层滤纸和4层灭菌纸中保湿),每个试验设置3次重复。进一步,挑选籽粒饱满、大小一致的种子各100粒分别置于上述培养皿中,保持种子湿润,最后,将上述处理好的种子放置于植物种子培养室中,28℃黑暗条件(表面覆盖遮光性强的黑布)下,培养2 d,第3天去掉黑布,使其在28℃、14 h光照/10 h黑暗条件下,继续培养。每隔1 d补充适量蒸馏水。以根、芽长度均超过种子直径一半为发芽标准,从第3天开始每日记录种子发芽数,第6天发芽数用于计算发芽势,第14天发芽数计算发芽率。从每个培养皿中随机选

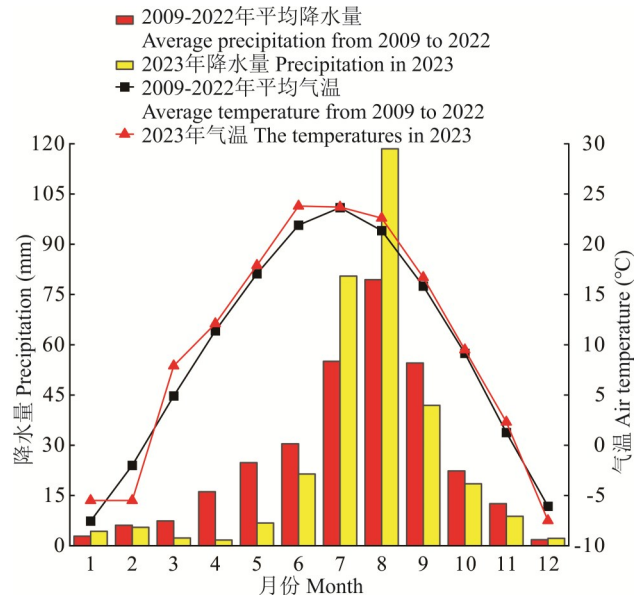


图1 试验地月平均降水量和气温

Fig. 1 The average monthly precipitation and air temperature of the experimental field

取 2 粒萌发的种子,用直尺分别测量其根长、苗长^[14]。发芽势和发芽率计算公式如下:

$$\text{发芽势} = \frac{\text{第6天发芽数}}{\text{供试种籽粒数}} \times 100\%^{[15]}$$

$$\text{发芽率} = \frac{\text{第14天发芽数}}{\text{供试种籽粒数}} \times 100\%$$

1.5 数据处理与分析

采用 Excel 2021 软件整理数据,利用 SPSS Statistics 27.0 软件进行方差分析、Duncan 多重比较和主成分分析(principal component analysis, PCA),主成分分析方法参照吴海艳等^[16]的步骤。使用 Origin 2024 作图。

2 结果与分析

2.1 不同燕麦种质株高和茎粗比较

L₂ 的株高最高,较 CK₁、CK₂、CK₃ 显著提高了 28.83%、49.84%、25.46%,且与其他 20 个燕麦种质均存在显著差异($P < 0.05$)。L₁₆ 株高最低,仅 89.33 cm,较 CK₁、CK₂、CK₃ 显著下降 27.77%、15.99%、29.66%。从茎粗来看,排名前三的分别为 L₉(7.69 mm)、L₁₀(9.24 mm)、L₁₃(8.35 mm),L₁₀ 显著大于 CK₁(7.43 mm)、CK₂(5.93 mm)、CK₃(4.61 mm),L₇(3.31 mm)的茎粗最小,显著小于除 CK₃、L₁、L₄、L₁₄ 和 L₁₆ 外的其他燕麦种质(图 2)。

2.2 不同燕麦种质单株干重和粗蛋白产量比较

不同燕麦种质单株干重和粗蛋白产量均存在显著差异($P < 0.05$)。就单株干重而言,排名前四的燕麦种质分别为 L₂、L₉、L₁₀ 和 L₁₃,其单株干重均超过了 5 g,显著高于 CK₂ 和 CK₃,L₁₆ 单株干重值最小,仅为 1.61 g,较 CK₁、CK₂、CK₃ 分别低 62.38%、38.55% 和 8.00%。从粗蛋白产量来看,L₉ 的粗蛋白产量最高(0.58 g·株⁻¹),较 CK₁、CK₂、CK₃ 分别显著高 31.82%、100%、222.22%,L₁₆ 的粗蛋白产量最小(0.18 g·株⁻¹),显著低于 CK₁(图 3)。

2.3 不同燕麦种质种子长和种子宽比较

不同燕麦种质的种子长和种子宽均存在显著差异($P < 0.05$)。其中,L₁₇ 的种子长最大,为 15.46 mm,较 CK₁、CK₂、CK₃ 分别高出 27.87%、5.24%、24.48%,L₁₁ 的种子长最小,仅为 10.82 mm,较 CK₁、CK₂、CK₃ 分别低 10.50%、26.34%、12.88%。就种子宽而言,L₉ 表现最为突出,其种子宽达到 3.36 mm,而 L₂₀ 的种子宽最小,为 2.27 mm,与 L₉ 相比显著降低了 32.44%(图 4)。

2.4 不同燕麦种质种子发芽特性

4 个发芽指标中,发芽势的变异系数最大,为 44.54%,说明不同燕麦种质间发芽势差异较大;发芽率的变异系数最小,为 2.41%,说明不同燕麦种质间发芽率的差异较小。24 个燕麦种质的平均发芽率为 93.01%,L₂ 的发芽率最高(98.67%),较 CK₁、CK₂、CK₃ 分别高出 2.43%、6.87%、3.50%;CK₃、L₁₃、L₁₅ 发芽势最低(11.33%),显著小于 L₁、L₁₂、L₁₈、CK₁、CK₂,其中 L₁₂ 的发芽势最高(51.33%),较 CK₁、CK₂、CK₃ 分别高出 22.21%、24.20%、

表 1 供试材料信息

Table 1 Information on test materials

材料 Material	类型 Type	来源 Source
CK ₁ (梦龙 Menglong)	品种 Variety	北京百斯特草业有限公司 Beijing Best Grass Industry Co., Ltd.
CK ₂ (喜韵 Xiyun)	品种 Variety	宁夏西贝农林牧生态科技有限公司 Ningxia Xibei Agriculture Forestry Animal Husbandry Ecological Technology Co., Ltd.
CK ₃ (当地燕麦 Local oats)	品种 Variety	宁夏西贝农林牧生态科技有限公司 Ningxia Xibei Agriculture Forestry Animal Husbandry Ecological Technology Co., Ltd.
L ₁	种质 Germplasm	航天选育 Aerospace breeding
L ₂	种质 Germplasm	杂交选育 Cross breeding
L ₃	种质 Germplasm	杂交选育 Cross breeding
L ₄	种质 Germplasm	杂交选育 Cross breeding
L ₅	种质 Germplasm	杂交选育 Cross breeding
L ₆	种质 Germplasm	杂交选育 Cross breeding
L ₇	种质 Germplasm	杂交选育 Cross breeding
L ₈	种质 Germplasm	杂交选育 Cross breeding
L ₉	种质 Germplasm	杂交选育 Cross breeding
L ₁₀	种质 Germplasm	航天选育 Aerospace breeding
L ₁₁	种质 Germplasm	杂交选育 Cross breeding
L ₁₂	种质 Germplasm	杂交选育 Cross breeding
L ₁₃	种质 Germplasm	杂交选育 Cross breeding
L ₁₄	种质 Germplasm	杂交选育 Cross breeding
L ₁₅	种质 Germplasm	杂交选育 Cross breeding
L ₁₆	种质 Germplasm	杂交选育 Cross breeding
L ₁₇	种质 Germplasm	穗选选育 Spike selection breeding
L ₁₈	种质 Germplasm	杂交选育 Cross breeding
L ₁₉	种质 Germplasm	杂交选育 Cross breeding
L ₂₀	种质 Germplasm	杂交选育 Cross breeding
L ₂₁	种质 Germplasm	穗选选育 Spike selection breeding

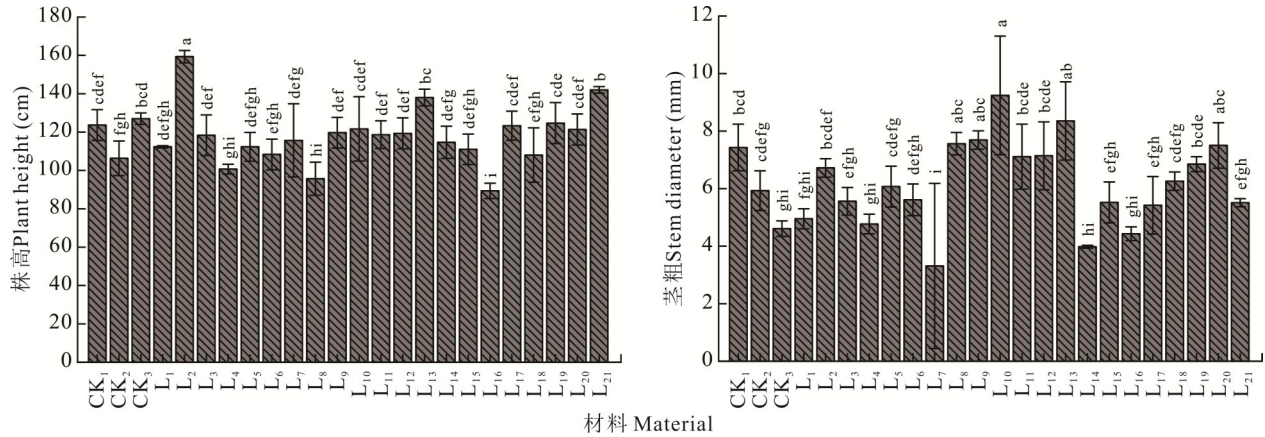


图2 供试燕麦种质株高和茎粗的比较

Fig. 2 Comparison of plant height and stem thickness of test oat germplasm

CK₁、CK₂、CK₃为宁夏本地主推品种(对照),L₁~L₂₁为燕麦新种质,不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05),下同。CK₁、CK₂、CK₃ are local main cultivated varieties (controls) in Ningxia, and L₁~L₂₁ are new oat germplasm; Different lowercase letters indicate significant differences among treatments (P<0.05); The same below.

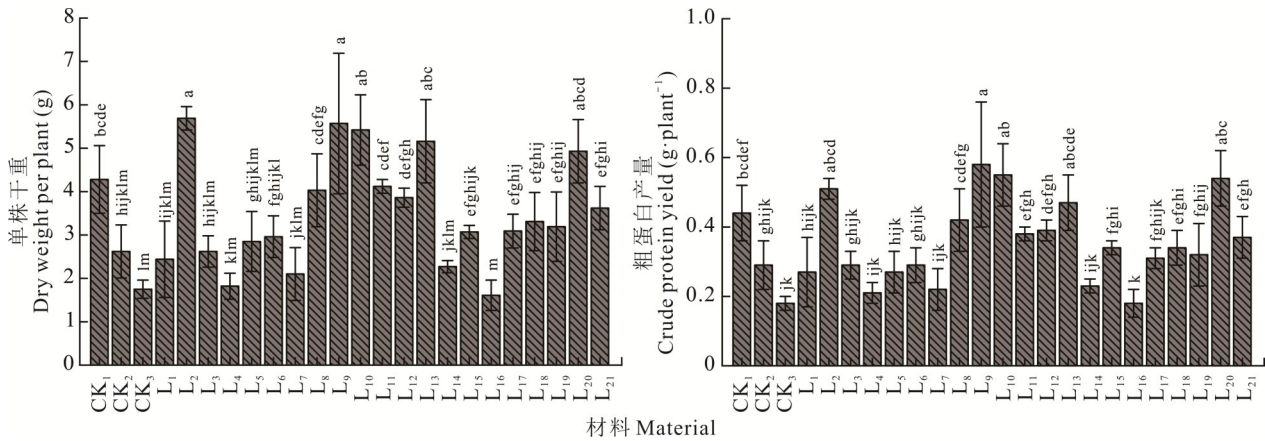


图3 供试燕麦种质单株干重和粗蛋白产量的比较

Fig. 3 Comparison of dry weight per plant and crude protein yield of test oat germplasm

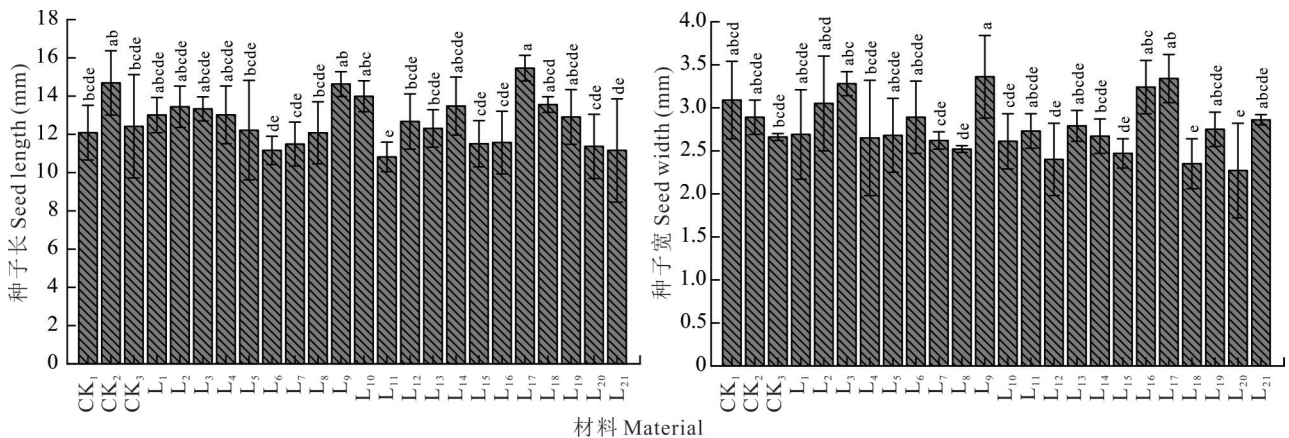


图4 供试燕麦种质种子长和种子宽的比较

Fig. 4 Comparison of seed length and seed width of test oat germplasm

353.05%;L₁₆的苗长指标最高(12.00 cm),较CK₁、CK₂、CK₃分别高出100.00%、28.62%、183.69%;L₂的根长最长(6.00 cm),较CK₁、CK₂、CK₃分别高出6.57%、16.96%、62.16%(表2)。

表 2 供试燕麦种质的种子发芽特性

Table 2 Seed germination characteristics of the tested oat germplasms

材料 Material	发芽率 Germination rate (%)	发芽势 Germination energy (%)	苗长 Seedling length (cm)	根长 Root length (cm)
CK ₁	96.33±1.53abc	42.00±14.00ab	6.00±1.97defgh	5.63±1.10abc
CK ₂	92.33±2.52bcdefg	41.33±5.03abc	9.33±4.12abcde	5.13±1.23abcde
CK ₃	95.33±0.58abcd	11.33±1.15d	4.23±1.19fgh	3.70±1.39abcde
L ₁	93.67±2.52bcdef	40.67±28.45abc	9.93±1.36abcd	3.60±1.47abcde
L ₂	98.67±1.53a	22.00±14.42bcd	9.87±0.57abcd	6.00±0.36a
L ₃	97.33±2.08ab	27.33±4.16abcd	5.20±0.35efgh	3.53±1.21abcde
L ₄	96.33±3.21abc	16.67±11.55bcd	5.37±0.75efgh	4.13±1.91abcde
L ₅	92.00±2.00cdefg	20.00±10.58bcd	6.00±3.06defgh	4.07±0.15abcde
L ₆	88.67±3.06g	12.67±6.11d	5.37±3.11efgh	3.57±2.93abcde
L ₇	97.33±0.58ab	37.33±7.02abcd	7.80±1.32bcdef	3.63±1.57abcde
L ₈	88.67±1.53g	21.33±14.19bcd	3.13±1.72gh	3.40±1.08cde
L ₉	93.33±2.89bcdefg	37.33±6.11abcd	6.40±0.70cdefgh	5.90±0.70ab
L ₁₀	92.00±5.20cdefg	18.00±10.00bcd	6.90±1.30bcdefgh	4.53±1.29abcd
L ₁₁	90.00±5.00efg	36.00±12.00abcd	10.43±4.73abc	4.53±0.74abcd
L ₁₂	89.33±1.15fg	51.33±11.02a	6.40±1.21cdefgh	3.17±1.16cde
L ₁₃	82.67±4.16h	11.33±9.24d	6.20±2.13cdefgh	3.60±1.97abcde
L ₁₄	90.67±2.08defg	38.00±10.39abcd	6.53±0.38cdefgh	3.47±0.78bcde
L ₁₅	94.67±0.58abcde	11.33±4.62d	5.73±1.68defgh	2.93±1.36de
L ₁₆	82.33±1.53h	31.33±14.19abcd	12.00±3.60a	5.43±0.92abc
L ₁₇	96.00±2.00abc	18.00±2.00bcd	11.10±2.43ab	5.57±0.47abc
L ₁₈	93.00±2.65bcdefg	42.67±32.58ab	2.80±1.21h	1.90±0.50e
L ₁₉	96.33±2.08abc	28.00±15.62abcd	6.97±3.25bcdefgh	4.97±0.99abcd
L ₂₀	97.67±1.15ab	14.67±13.32cd	7.40±0.26bcdefg	4.97±0.12abcd
L ₂₁	97.67±1.53ab	31.33±16.04abcd	6.53±1.80cdefgh	3.57±0.06abcde
变异系数 CV (%)	2.41	44.54	27.60	27.58

2.5 不同燕麦种质种子产量构成因素的比较

不同燕麦种质在穗长、单株穗粒重、单株穗粒数、轮生层数、千粒重和每花序小穗数间均存在显著差异 ($P < 0.05$)。穗长平均值为 23.26 cm, L₁₅ 最高 (32.50 cm), 较 CK₁、CK₂、CK₃ 显著高出 39.31%、51.16%、48.40%; 单株穗粒数方面, L₉ 表现最突出, 其单株穗粒数最大 (141.67 粒), 较 CK₁、CK₂、CK₃ 显著高出 185.22%、114.65%、132.25%, L₁₃ 的单株穗粒数最低, 仅为 39.33 粒, 与 L₉ 相差 102.34 粒; 从单株穗粒重来看, L₁₀ 的单株穗粒重最高, 达到 3.72 g, 较 CK₁、CK₂、CK₃ 分别高出 50.61%、24.41%、100%, L₁₆ 最低 (1.25 g), 较 L₁₀ 显著低 66.40%; 轮生层数方面, L₁₀ 和 L₁₉ 的轮生层数最大, 均为 6.00 层, 较 CK₁、CK₂、CK₃ 分别高出 20.00%、38.57%、20.00%; 就千粒重而言, L₂ 的千粒重最大, 为 38.53 g, 显著高于 ($P < 0.05$) 其他燕麦种质, L₄ 的千粒重最小, 为 19.65 g, L₂ 较 L₄ 显著高出 96.08%; 每花序小穗数方面, L₁₅ 最大 (30.33), 较 CK₁、CK₂、CK₃ 分别高出 19.74%、33.79%、19.74%, L₁₁ 最小, 仅为 19.33, L₁₅ 比 L₁₁ 高出 56.91% (表 3)。

从实际种子产量来看, L₂、L₉、L₁₉ 显著高于除 L₃、L₅、L₁₅、L₂₀ 外的其他燕麦种质, 相较于 CK₁、CK₂、CK₃ 分别显著高于 52.71%、32.21%、66.40%, 63.17%、41.26%、77.80%, 50.64%、30.42%、64.15%, 而 L₁₆ 的实际种子产量最小, 较 CK₁、CK₂、CK₃ 分别下降了 16.72%、27.90%、9.25% (图 5)。

表3 供试燕麦种质的种子产量构成因素

Table 3 Seed yield components of the tested oat germplasm

材料 Material	穗长 Ear length (cm)	单株穗粒重 Grain weight per spike per plant (g)	单株穗粒数 Number of grains per spike per plant	轮生层数 Whorl number	千粒重 Thousand grain weight (g)	每花序小穗数 Number of spikelets per inflorescence
CK ₁	23.33±3.20bcdef	2.47±0.49abcdef	49.67±20.55efg	5.00±1.00ab	27.99±1.83fghi	25.33±5.03abc
CK ₂	21.50±1.74cdef	2.99±1.41abcd	66.00±12.17defg	4.33±0.58b	29.77±2.67cdefg	22.67±7.23abc
CK ₃	21.90±4.42cdef	1.86±0.29bcdef	61.00±6.08defg	5.00±1.00ab	29.30±0.78defgh	25.33±6.43abc
L ₁	25.60±1.56abcde	1.31±0.62ef	41.67±2.52g	5.67±0.58ab	29.12±0.82defgh	30.00±1.73ab
L ₂	24.60±2.81bcde	2.83±0.78abcde	68.33±8.39defg	5.00±1.00ab	38.53±0.14a	24.33±8.14abc
L ₃	23.03±2.84bcdef	2.30±1.17abcdef	108.67±39.63abc	5.33±0.58ab	24.90±2.80ij	27.67±3.51abc
L ₄	18.60±4.88ef	1.42±0.06def	65.67±17.01defg	4.67±0.58ab	19.65±0.47l	27.00±9.64abc
L ₅	22.87±7.74cdef	2.58±0.83abcdef	85.00±27.22bcde	5.67±0.58ab	30.17±0.79cdef	22.00±4.00abc
L ₆	25.97±2.14abcde	2.30±0.78abcdef	80.00±21.66bcdef	5.33±0.58ab	28.65±2.81efghi	24.67±2.52abc
L ₇	16.57±1.66f	2.14±1.58bcdef	47.00±2.65fg	4.67±0.58ab	25.78±1.35hij	21.00±2.00bc
L ₈	21.37±1.86def	3.27±0.84ab	66.67±20.74defg	5.00±0.00ab	26.24±2.04ghij	24.67±2.52abc
L ₉	30.10±2.55ab	2.03±0.96bcdef	141.67±26.63a	4.67±0.58ab	23.46±3.28ij	22.00±1.73abc
L ₁₀	28.73±4.04abc	3.72±0.50a	50.00±4.58efg	6.00±1.00a	33.13±1.25bc	27.00±3.46abc
L ₁₁	19.97±5.66def	2.82±0.50abcdef	81.00±14.93bcdef	5.00±0.00ab	32.12±1.22bede	19.33±1.15c
L ₁₂	20.67±4.36def	3.16±0.83abc	78.67±27.93cdef	5.00±0.00ab	25.70±1.64hij	26.33±2.89abc
L ₁₃	26.17±0.15abcd	2.78±0.77abcdef	39.33±4.51g	5.67±0.58ab	32.86±1.34bcd	26.00±4.58abc
L ₁₄	25.77±4.68abcde	1.65±0.07cdef	109.00±17.35abc	5.00±0.00ab	25.31±2.24ij	22.67±2.52abc
L ₁₅	32.50±2.26a	2.70±0.32abcdef	94.00±32.08bed	5.67±1.53ab	30.19±1.29cdef	30.33±5.51a
L ₁₆	23.33±6.02bcdef	1.25±0.30f	45.33±16.17fg	5.00±0.00ab	28.38±1.69efghi	21.33±2.52abc
L ₁₇	21.47±3.17cdef	2.22±1.27abcdef	93.33±3.51bcd	5.00±0.00ab	34.34±1.39b	23.00±0.00abc
L ₁₈	18.63±0.47ef	2.01±0.72bcdef	75.33±6.81cdefg	5.33±0.58ab	20.41±4.22kl	24.67±3.51abc
L ₁₉	22.37±1.88cdef	2.26±0.66abcdef	114.67±25.40ab	6.00±1.00a	27.14±3.11fghij	29.67±6.66ab
L ₂₀	21.63±4.86cdef	2.57±0.42abcdef	76.00±2.65cdefg	5.00±1.00ab	34.06±1.02b	21.67±2.52abc
L ₂₁	21.30±3.04def	2.70±0.24abcdef	75.67±10.60cdefg	4.33±0.58b	29.48±1.25cdefgh	22.00±5.29abc
变异系数CV (%)	14.37	29.09	19.91	11.15	6.46	15.90

2.6 不同燕麦种质综合评价

2.6.1 各指标间相关性分析 株高与单株干重、发芽率、千粒重、粗蛋白产量之间呈显著正相关关系 ($P < 0.05$); 茎粗与单株干重、单株穗粒重、粗蛋白产量呈显著正相关关系 ($P < 0.05$); 单株干重与单株穗粒重、千粒重、粗蛋白产量、实际种子产量呈显著正相关关系 ($P < 0.05$); 单株穗粒重与千粒重、粗蛋白产量呈显著正相关关系 ($P < 0.05$); 种子宽和千粒重都与根长、苗长呈显著性正相关关系 ($P < 0.05$); 穗长与穗重、轮生层数呈显著性正相关关系 ($P < 0.05$); 每花序小穗数与轮生层数呈显著正相关关系 ($P < 0.05$); 根

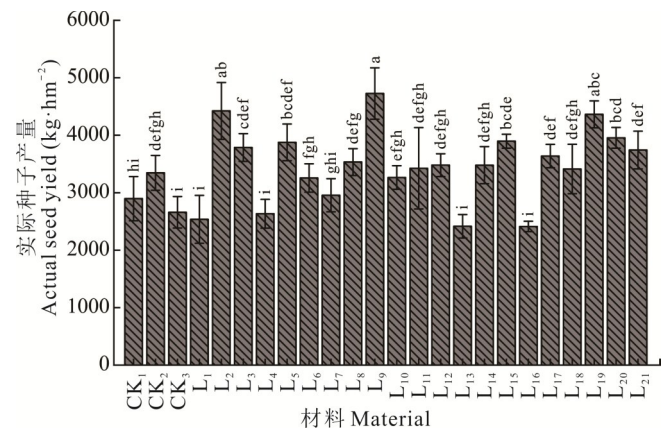


图5 供试燕麦种质实际种子产量

Fig. 5 Actual seed yield of the tested oat germplasm

长和苗长之间呈显著正相关关系 ($P < 0.05$) ; 粗蛋白产量和实际种子产量之间呈显著正相关关系 (图 6, $P < 0.05$)。

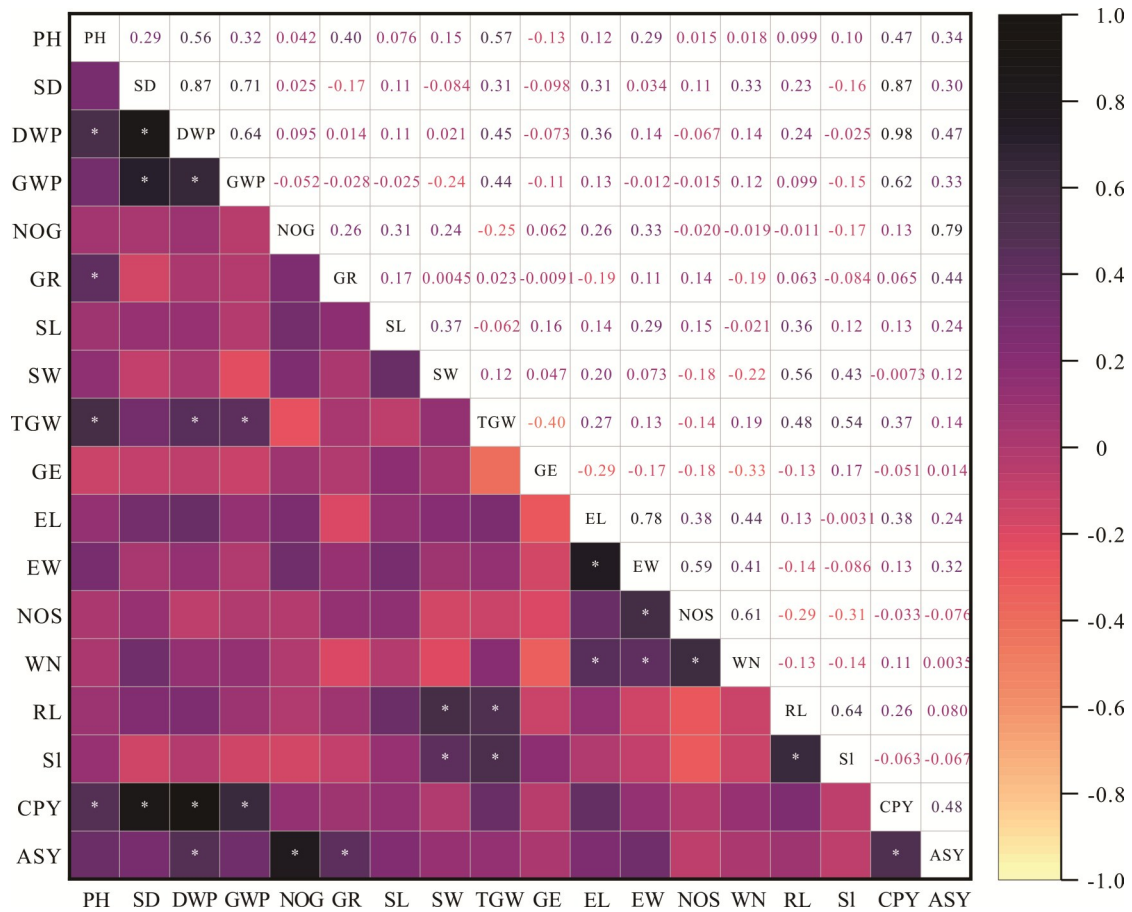


图 6 供试燕麦种质不同指标间相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis of different indices of the tested oat germplasm

PH: 株高 Plant height; SD: 茎粗 Stem diameter; DWP: 单株干重 Dry weight per plant; GWP: 单株穗粒重 Grain weight per spike per plant; NOG: 单株穗粒数 Number of grains per spike per plant; GR: 发芽率 Germination rat; SL: 种子长 Seed length; SW: 种子宽 Seed width; TGW: 千粒重 Thousand grain weight; GE: 发芽势 Germination energy; EL: 穗长 Ear length; EW: 穗重 Ear weight; NOS: 每花序小穗数 Number of spikelets per inflorescence; WN: 轮生层数 Whorl number; RL: 根长 Root length; SI: 苗长 Seedling length; CPY: 粗蛋白产量 Crude protein yield; ASY: 实际种子产量 Actual seed yield.

2.6.2 不同燕麦种质主成分综合评价 对燕麦生产性能、发芽特征、种子产量等 18 个指标进行主成分分析。特征值、方差贡献率和载荷如表 4 所列, 根据特征值大于 1 的原则, 可提取 6 个主成分, 累积方差贡献率达到 81.719%, 解释了总体信息的 81.719%。第一主成分中单株干重和粗蛋白产量载荷值较大, 其权重系数分别为 0.903、0.885。第二主成分中每花序小穗数载荷绝对值最高, 权重系数为 -0.736。第三主成分载荷绝对值最大的是单株穗粒数, 权重系数为 0.686。第四主成分中载荷绝对值最大的是苗长, 权重系数为 0.563。第五、第六主成分中载荷绝对值最高的是发芽率, 其权重系数为 -0.701、0.478。

将原始数据进行标准化后导入 SPSS 软件建立综合评价模型, 得出公因子 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 、 Y_5 和 Y_6 。 Y_1 中 L_2 得分最高, Y_2 中 L_{17} 得分最高, Y_3 中 L_9 得分最高, Y_4 中 L_{16} 得分最高, Y_5 中 L_9 得分最高, Y_6 中 L_1 得分最高。代入 $Y = (26.283Y_1 + 16.260Y_2 + 13.971Y_3 + 11.450Y_4 + 8.011Y_5 + 5.743Y_6) / 81.719$ 计算, 得出不同种质燕麦综合得分, L_9 得分最高 (1.913), 24 份燕麦的排名顺序为 $L_9 > L_2 > L_{17} > L_{10} > CK_1 > L_{19} > CK_2 > L_{13} > L_{20} > L_3 > L_{11} > L_{15} > L_1 > L_{16} > L_{21} > L_5 > L_{14} > L_{12} > L_6 > L_8 > CK_3 > L_4 > L_7 > L_{18}$ (表 5)。

表4 供试燕麦种质各因子特征值和累计贡献率

Table 4 Characteristic value and cumulative contribution rates of the tested oat germplasm

项目 Item	主成分 Principal component					
	I	II	III	IV	V	VI
株高 Plant height	0.624	0.180	0.008	0.025	-0.538	0.207
茎粗 Stem diameter	0.793	-0.137	-0.383	-0.138	0.326	0.107
单株干重 Dry weight per plant	0.903	0.068	-0.276	-0.159	0.125	0.056
单株穗粒重 Grain weight per spike per plant	0.647	-0.101	-0.478	-0.229	-0.013	0.022
单株穗粒数 Number of grains per spike per plant	0.266	0.023	0.686	-0.455	0.120	-0.392
发芽率 Germination rat	0.140	0.155	0.379	-0.365	-0.701	0.238
种子长 Seed length	0.241	0.172	0.539	-0.042	0.275	0.472
种子宽 Seed width	0.138	0.570	0.468	0.313	0.232	-0.041
千粒重 Thousand grain weight	0.584	0.266	-0.278	0.532	-0.356	-0.086
发芽势 Germination energy	-0.230	0.305	0.077	-0.388	0.378	0.478
穗长 Ear length	0.559	-0.367	0.354	0.403	0.253	-0.220
穗重 Ear weight	0.411	-0.459	0.611	0.271	-0.063	0.050
每花序小穗数 Number of spikelets per inflorescence	0.115	-0.736	0.307	0.206	-0.088	0.402
轮生层数 Whorl number	0.291	-0.674	0.022	0.373	0.060	0.041
根长 Root length	0.416	0.716	0.165	0.283	0.089	0.006
苗长 Seedling length	0.046	0.669	0.038	0.563	0.029	0.090
粗蛋白产量 Crude protein yield	0.885	0.044	-0.241	-0.217	0.160	0.062
实际种子产量 Actual seed yield	0.617	0.121	0.421	-0.479	-0.111	-0.280
特征值 Eigenvalue	4.731	2.927	2.515	2.061	1.442	1.034
方差贡献率 Variance contribution rate (%)	26.283	16.260	13.971	11.450	8.011	5.743
累计贡献率 Accumulative contribution rate (%)	26.283	42.544	56.515	67.965	75.976	81.719

2.6.3 聚类分析 本试验采用聚类分析法对21个燕麦新种质和3个主推燕麦品种依据18个农艺性状进行聚类分析(图7),可将其分为三大类群。其中L₂、L₉、L₁₉聚为一类,为生产性能高的类群;CK₂、L₁₈、L₁₁、L₁₄、L₁₂、L₈、L₁₀、L₆、L₂₀、L₁₅、L₅、L₁₇、L₂₁、L₃聚为一类,为生产性能中等的类群;L₁、L₁₆、L₄、CK₃、L₁₃、L₇、CK₁聚为一类,为生产性能较弱的类群;其中L₂、L₉和L₁₉可作为优势种质在当地推广种植。

3 讨论

3.1 不同燕麦种质生产性能的比较

株高是衡量燕麦生产性能的重要指标^[16-17]。在甘肃山丹半干旱区种植的15个燕麦品种株高为70.66~117.14 cm^[18];也有在内蒙古中西部地区种植的5个燕麦品种株高介于88.36~146.15 cm^[19]。而在本研究中,21个燕麦新种质和3个主推燕麦品种株高介于89.33~159.33 cm,整体略高于前人的研究结果,但低于韩重阳等^[20]在凉山高海拔地区的研究,说明不同燕麦种质在不同地理环境下表现出的个体差异较大,此现象可能是海拔、降水量差异以及燕麦自身的遗传特性等因素所导致的。研究发现,高海拔地区通常光照强度大,能够为燕麦的生长提供更多光资源,而低海拔地区光照强度较小,对燕麦的正常发育产生一定影响^[21]。凉山地区降水量充沛,有助于燕麦株高、产量等指标的正常发展,宁夏地区气候干旱,降水量较少则会引发干旱胁迫,可能会影响燕麦生长。另外,本研究发现,L₂株高最高,显著高于CK₁、CK₂、CK₃。因此,在今后的品种选育工作中也应充分考虑燕麦在不同环境的适应性及高产稳定性,以培育出稳定高产的燕麦品种(系)。燕麦通常出现的倒伏类型为茎倒伏,茎秆

表 5 供试燕麦种质公因子值及综合排名

Table 5 Common factor values and comprehensive rankings of the tested oat germplasms

材料 Material	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y	排名 Ranking
CK ₁	0.706	1.063	-0.824	-0.080	0.369	1.382	0.420	5
CK ₂	-0.632	2.180	0.181	-0.134	0.904	1.035	0.404	7
CK ₃	-2.042	-0.937	0.221	0.759	-1.918	-0.151	-0.898	21
L ₁	-1.618	-1.311	0.982	2.382	0.001	2.061	-0.134	13
L ₂	4.386	2.090	0.595	0.925	-2.061	0.680	1.903	2
L ₃	-0.392	-0.537	2.167	-0.804	-0.201	0.064	0.010	10
L ₄	-3.520	-0.474	0.671	-0.517	-0.434	0.502	-1.191	22
L ₅	-0.069	-0.615	-0.008	0.056	-0.270	-1.324	-0.258	16
L ₆	-0.613	-1.380	-0.044	0.922	0.179	-1.791	-0.459	19
L ₇	-3.434	1.407	-0.987	-0.796	-1.520	0.337	-1.230	23
L ₈	-0.092	-1.228	-2.316	-1.697	1.152	-0.759	-0.848	20
L ₉	3.400	1.616	3.234	-1.717	2.479	-0.812	1.913	1
L ₁₀	3.887	-1.679	-1.562	1.069	0.814	1.062	0.953	4
L ₁₁	0.135	2.152	-2.403	-0.344	0.338	-1.013	-0.025	11
L ₁₂	0.116	-0.892	-0.986	-1.690	0.975	1.266	-0.361	18
L ₁₃	2.044	-1.674	-2.533	2.185	0.787	0.219	0.290	8
L ₁₄	-1.776	-0.226	1.964	-0.414	0.565	-0.619	-0.326	17
L ₁₅	1.221	-3.777	1.626	1.024	-0.899	-1.281	-0.116	12
L ₁₆	-3.564	2.186	-0.517	3.137	2.116	-1.034	-0.225	14
L ₁₇	0.616	2.853	1.668	1.251	-0.412	0.283	1.206	3
L ₁₈	-1.898	-1.866	-0.368	-2.717	0.731	1.080	-1.278	24
L ₁₉	1.173	-1.140	1.956	-0.368	-0.473	0.250	0.405	6
L ₂₀	1.896	0.837	-2.073	-1.001	-1.389	-1.056	0.071	9
L ₂₁	0.068	1.350	-0.644	-1.431	-1.832	-0.381	-0.226	15

节间特征对燕麦倒伏起关键影响,而茎的粗细程度则是反映植株抗倒伏能力强弱的重要标志^[22]。本研究结果表明,L₁₀种质的茎秆最为粗壮,达到9.24 mm,显著高于张伟等^[23]在呼伦贝尔地区种植的10个燕麦品种(2.60~4.89 mm)。因此,在燕麦育种过程中,选育抗倒伏能力强的品种方便机械作业,对实际生产具有重要意义。

3.2 不同燕麦种质种子产量及构成因素的比较

种子产量在育种目标中具有重要的地位,其受穗长、单株穗粒数、单株穗粒重和千粒重等因素的影响^[24]。本试验中21个燕麦新种质和3个主推燕麦品种在宁夏干旱区的种子产量为2412.30~4726.33 kg·hm⁻²,略高于川西北高寒地区^[25]以及陇中黄土高原半干旱区^[26]的燕麦种子产量,显著低于郭兴燕等^[27]在宁夏引黄灌区种植的燕麦种子产量(3341.70~6328.60 kg·hm⁻²),原因可能是不同燕麦种质的种子产量受气候条件、管理措施和种植密度的影响。千粒重是种子产量的重要指标,其标志着种子的发育程度,千粒重越大,表明种子越饱满,发育越完全^[28]。本研究中的千粒重与前人在内蒙古地区种植的燕麦结果相似^[29],尽管海拔存在差异,但由于气候条件以及燕麦自身的适应性导致两地燕麦的千粒重相差不大。此外,在本研究中,21个燕麦种质和3个主推燕麦品种的穗长为16.57~32.50 cm,高于高兴发等^[30]在乌蒙山区选用的17份裸燕麦品种(13.60~22.40 cm),但低于李鸿飞等^[31]在呼伦贝尔地区引进的18份燕麦品种(14.87~35.03 cm),表明除了受气候、土壤等环境条件的影响外,还与小区面积、施肥量、行距等因素有关。例如,高兴发等^[30]的化肥施肥量为450 kg·hm⁻²,本研究的管理措施与之存在明显差异。

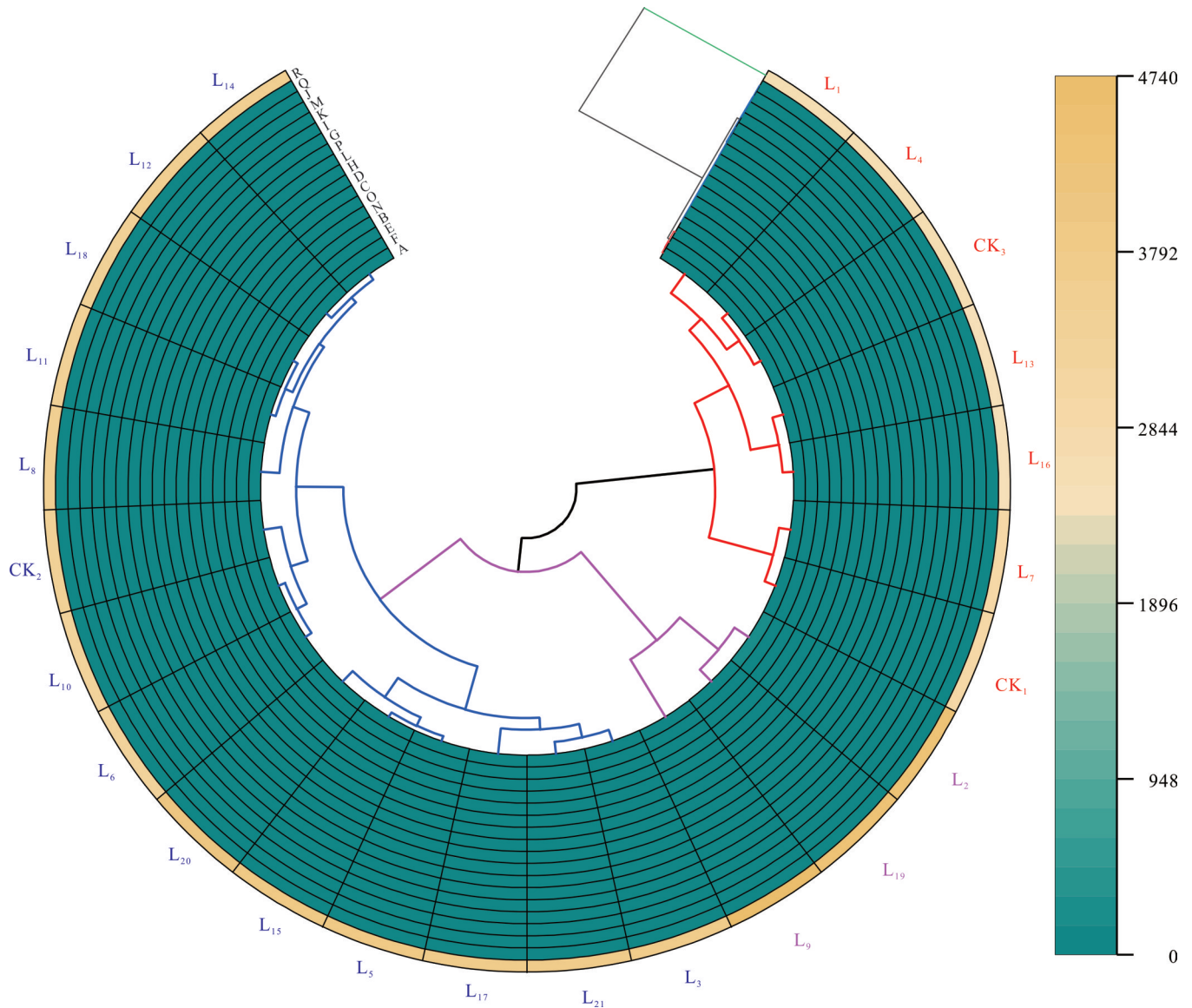


图7 供试燕麦种质农艺性状聚类分析

Fig. 7 Clustering analysis of agronomic traits of the tested oat germplasm

A: 株高 Plant height; B: 茎粗 Stem diameter; C: 单株干重 Dry weight per plant; D: 单株穗粒重 Grain weight per spike per plant; E: 单株穗粒数 Number of grains per spike per plant; F: 发芽率 Germination rate; G: 种子长 Seed length; H: 种子宽 Seed width; I: 千粒重 Thousand grain weight; J: 发芽势 Germination energy; K: 穗长 Ear length; L: 穗重 Ear weight; M: 每花序小穗数 Number of spikelets per inflorescence; N: 轮生层数 Whorl number; O: 根长 Root length; P: 苗长 Seedling length; Q: 粗蛋白产量 Crude protein yield; R: 实际种子产量 Actual seed yield.

3.3 不同燕麦种质的种子发芽特性比较

种子发芽特性是体现种子生产力高低的指标,而发芽率是衡量种子品质好坏的重要指标,发芽率越高,说明种子饱满度越好,整齐度越高,种胚发育越好,种子生活力越高^[32]。有研究表明,在北方农牧交错区种植的7个燕麦发芽率和发芽势介于62.67%~96.00%和16.67%~78.67%^[33],而本试验的发芽率和发芽势分别为82.33%~98.67%和11.33%~51.33%,与前人研究结果具有明显差异,可能是因为种子生长发育的环境等因素不同导致。不同种质种子的遗传背景差异会直接影响种子的内在品质^[34];光照强度过强或过弱都可能抑制种子的萌发过程,充足且适宜的光照才有利于种子萌发。温度是影响种子发芽的重要因素,不同种质的燕麦种子对温度的需求有所不同,温度过低导致种子进入休眠状态、过高则会抑制种子的正常萌发^[35]。根长和苗长通常是用于评价燕麦生长发育的重要指标,能够直接反映燕麦种质间在生长初期的差异性、发育部位的优先性和生物量的积累。李德明等^[36]研究结果显示,燕麦根长为6.68~19.32 cm;高志昊等^[37]则发现燕麦根长为4.01~14.14 cm,而

本研究燕麦根长整体低于上述研究结果。另有研究表明,燕麦的根长和苗长分别为 3.36~5.96 和 5.10~7.56 cm^[38],本研究的根长和苗长(1.57~6.70 和 2.80~12.00 cm)与之相比略高,这可能是因为水培时缺氧从而导致根系长短不一。

3.4 不同燕麦种质的综合评价

主成分分析能够有效简化复杂的选择程序,并精准把握作物的综合性状,这种分析方法在农作物性状的评价和筛选中得到广泛应用^[39]。聚类分析通过计算不同种质之间的相似性或差异性,将性状相近的种质聚为一类^[40]。聚类分析中,第 II 类群 L₂、L₉、L₁₉ 的突出表现可能与其遗传背景相关(均为杂交选育,表 1),杂交种质通过基因重组整合了高产和抗逆特性。此外,主成分分析显示,L₂、L₉ 在单株干重和粗蛋白产量等核心指标上载荷较高(表 4),表明其兼具生物量和品质优势,相较于内蒙古中西部地区聚类研究^[19],本研究筛选的类群更侧重于旱区适应性,这可能与试验地年均降水量仅 260 mm 的胁迫环境有关。因此 L₂、L₉ 可作为抗旱高产核心种质,为宁夏燕麦品种更新提供材料支撑。

4 结论

本研究的 21 个燕麦新种质和 3 个主推燕麦品种在宁夏干旱区均能正常生长发育,种子产量为 2412.30~4726.33 kg·hm⁻²,其中,L₂、L₉、L₁₉ 的种子产量位于前三。在主成分分析中,L₉ 综合得分最高,其次是 L₂、L₁₇、L₁₀、CK₁。聚类分析中 L₂、L₉、L₁₉ 为生产性能高的一类,结合两种分析方法综合考虑,在所有试验材料中,最适宜在宁夏干旱地区种植的燕麦种质为 L₂ 和 L₉。

参考文献 References:

- [1] Liang G L, Qin Y, Wei X X, *et al.* Evaluation on productivity and quality of oat strain I-D in the alpine regions of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(4): 917-927.
梁国玲,秦燕,魏小星,等. 青藏高原高寒区 I-D 燕麦品系饲草生产性能及品质评价. *草地学报*, 2018, 26(4): 917-927.
- [2] 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. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(9): 116-129.
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. *草业学报*, 2023, 32(9): 116-129.
- [3] Ye X L, Gan Z, Wan Y, *et al.* Advances and perspectives in forage oat breeding. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(2): 160-177.
叶雪玲,甘圳,万燕,等. 饲用燕麦育种研究进展与展望. *草业学报*, 2023, 32(2): 160-177.
- [4] Zhou Q P, Hu X W, Wang H, *et al.* The important role of oat in reinforcing the foundation of food security. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(10): 171-182.
周青平,胡晓炜,汪辉,等. 燕麦在维护国家粮食安全中的重要作用. *草业学报*, 2024, 33(10): 171-182.
- [5] Lin D D, Zhao G Q, Ju Z L, *et al.* Comprehensive evaluation of drought resistance of 15 oat varieties at the seedling stage. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(11): 108-121.
蔺豆豆,赵桂琴,琚泽亮,等. 15 份燕麦材料苗期抗旱性综合评价. *草业学报*, 2021, 30(11): 108-121.
- [6] Jing F, Bian F, Ren S L, *et al.* Analysis of oat seed yield and related agronomic characteristics in semi-arid regions. *Pratacultural Science*, 2024, 41(2): 356-370.
景芳,边芳,任生兰,等. 半干旱地区燕麦种子产量及其相关农艺性状. *草业科学*, 2024, 41(2): 356-370.
- [7] Dong J L, He J L, Du J M, *et al.* Adaptability evaluation of different forage oat varieties in Yinbei area of Ningxia. *Acta Agrestia Sinica*, 2025: 1-19. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3362.S.20250312.1105.002.html>.
董嘉莉,何建龙,杜建民,等. 宁夏银北地区不同饲用燕麦品种适应性评价. *草地学报*, 2025: 1-19. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3362.S.20250312.1105.002.html>.
- [8] Yang Z, Yang X, Huang Y, *et al.* Potential impacts of climate change on the spatial distribution pattern of naked oats in China. *Agronomy*, 2025, 15(2): 362.
- [9] Zhang G, Chai J, Zhao G, *et al.* Comprehensive evaluation of different oat varieties in semi-arid areas of Gansu Province. *Agronomy*, 2025, 15(3): 707.
- [10] Geng X L, Han T H, Zhang S P, *et al.* Adaptability evaluation of 30 oat germplasm in Tianzhu. *Acta Agrestia Sinica*, 2019,

27(6): 1743–1750.

耿小丽, 韩天虎, 张少平, 等. 30个燕麦品种(品系)在甘肃天祝地区的适应性评价. 草地学报, 2019, 27(6): 1743–1750.

- [11] Zheng X, Wei Z W, Wu Z N, *et al.* Adaptability evaluation of different *Avena sativa* varieties in Yangzhou area. *Acta Agrestia Sinica*, 2013, 21(2): 272–279.
郑曦, 魏臻武, 武自念, 等. 不同燕麦品种(系)在扬州地区的适应性评价. 草地学报, 2013, 21(2): 272–279.
- [12] Wang T F, Chang Y R, Deng X, *et al.* Adaptability evaluation of feed oat varieties in rainfed area of Ningxia. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(7): 1755–1762.
王腾飞, 常怡然, 邓雪, 等. 饲用燕麦品种在宁夏雨养区的适应性评价. 草地学报, 2022, 30(7): 1755–1762.
- [13] Wang T F, Ma X, Liu J L, *et al.* Analysis of the yield, quality and economic benefits from multiple cropping of fodder oats in the Yellow River irrigation area. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(4): 27–37.
王腾飞, 马霞, 刘金龙, 等. 引黄灌区复种饲用燕麦种植模式产量、品质及经济效益分析. 草业学报, 2025, 34(4): 27–37.
- [14] Yang C H, Sun Y, Li M L, *et al.* Quality analysis on main forage and turfgrass seeds in the domestic market of China. *Journal of Grass Land and Forage Science*, 2022(5): 53–60.
杨春华, 孙彦, 李曼莉, 等. 我国市场流通主要草种子质量分析. 草学, 2022(5): 53–60.
- [15] Guo M, Zong J, Zhang J, *et al.* Effects of temperature and drought stress on the seed germination of a peatland lily (*Lilium concolor* var. *megalanthum*). *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1462655.
- [16] Wu H Y, Qu Z, Liu Z M, *et al.* Comparative study on production performance of oat varieties based on principal component analysis. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(9): 1967–1973.
吴海艳, 曲珍, 刘昭明, 等. 基于主成分分析的燕麦品种生产性能的比较研究. 草地学报, 2021, 29(9): 1967–1973.
- [17] Zhang G, Chai J, Zhao G, *et al.* Study on the adaptability of 15 oat varieties in different ecological regions. *Agronomy*, 2025, 15(2): 391.
- [18] Zhang G L, Zhou H W, Mu P, *et al.* Study on adaptability of 15 oat varieties in semi-arid area of Shandan. *Grassland and Turf*, 1–13. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1156.s.20241010.0841.002.html>.
张官禄, 周宏伟, 慕平, 等. 15个燕麦品种在山丹半干旱区的适应性研究. 草原与草坪, 1–13. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1156.s.20241010.0841.002.html>.
- [19] Ye W X, Shi F L, Zhao M L, *et al.* Screening of suitable forage oat varieties in central and western regions of Inner Mongolia. *Chinese Journal of Grassland*, 2022, 44(3): 66–71.
叶文兴, 石凤翎, 赵萌莉, 等. 适宜内蒙古中西部地区饲用燕麦品种筛选. 中国草地学报, 2022, 44(3): 66–71.
- [20] Han C Y, Feng J P, Feng H H, *et al.* Comprehensive evaluation of the production performance of different forage oat varieties in high altitude areas of Liangshan mountains. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2024(19): 88–92.
韩重阳, 冯家平, 冯华昊, 等. 凉山高海拔地区不同饲用燕麦品种生产性能综合评价. 现代农业科技, 2024(19): 88–92.
- [21] Luo F, Mi W B, Li W, *et al.* Effects of planting patterns on forage yield and nutritional quality in different alpine ecological regions. *Pratacultural Science*, 2024, 41(8): 1934–1947.
罗峰, 米文博, 李文, 等. 不同高寒草地生态区种植模式对饲草产量和营养品质的影响. 草业科学, 2024, 41(8): 1934–1947.
- [22] Yang B, Wang Y T, Liu J L, *et al.* Comprehensive evaluation and screening of lodging resistance of different oat varieties. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(5): 1408–1417.
杨冰, 王玉婷, 刘金龙, 等. 不同燕麦品种茎秆抗倒性的综合评价及筛选. 草地学报, 2025, 33(5): 1408–1417.
- [23] Zhang W, Zhou Q P, Chen Y J, *et al.* Comparison of production performance and forage quality of ten introduced oat varieties in Hulunbuir, China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(12): 129–142.
张伟, 周青平, 陈有军, 等. 呼伦贝尔地区10个引进燕麦品种生产性能及饲草品质比较. 草业学报, 2021, 30(12): 129–142.
- [24] Cai L Y, Song Z P, Xu J, *et al.* The identification and evaluation of 18 germplasm materials of *Avena*. *Chinese Journal of Grassland*, 2007, 29(4): 21–27.
蔡丽艳, 宋志萍, 徐静, 等. 18份燕麦属牧草种质材料的鉴定与评价. 中国草地学报, 2007, 29(4): 21–27.
- [25] 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. *Pratacultural Science*, 2018, 35(5): 1208–1217.
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. 草业科学, 2018, 35(5): 1208–1217.
- [26] Zhang C J, Ren S L, Bian F, *et al.* Study on the grain yield and nutritional value of nine oat varieties in the semi-arid area of the

- Loess Plateau in Central Gansu. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(11): 3082–3089.
- 张成君, 任生兰, 边芳, 等. 陇中黄土高原半干旱区9个燕麦品种籽粒产量及其营养价值研究. *草地学报*, 2022, 30(11): 3082–3089.
- [27] Guo X Y, Liang D N, Lan J. Research on productive performance and nutritive value of 11 oat varieties in Ningxia irrigation area. *Crops*, 2016(4): 105–111.
- 郭兴燕, 梁丹妮, 兰剑. 宁夏引黄灌区燕麦品种生产性能及营养价值研究. *作物杂志*, 2016(4): 105–111.
- [28] Devi R, Sood K V, Arora A. Stability analysis for seed yield and related traits of oat (*Avena sativa* L.) under varied conditions of north-western Himalayas. *International Journal of Environment and Climate Change*, 2023, 13(11): 2409–2418.
- [29] Wang R L, Wu J Y, Liu H J, *et al.* Comparative study on production performance and nutritional quality of ten oat varieties in Inner Mongolia. *Feed Research*, 2023, 46(10): 128–133.
- 王润莲, 武俊英, 刘慧军, 等. 内蒙古地区10个燕麦品种生产性能及营养品质的比较研究. *饲料研究*, 2023, 46(10): 128–133.
- [30] Gao X F, Nie Y Y, Xu L J, *et al.* Adaptability evaluation of oat introduction in winter fallow field of Wumeng mountain area under drought condition. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(11): 215–227.
- 高兴发, 聂莹莹, 徐丽君, 等. 干旱条件下乌蒙山区冬闲田燕麦引种适应性评价. *草业学报*, 2024, 33(11): 215–227.
- [31] Li H F, Zhou B W, Zhang M, *et al.* Adaptability evaluation of different oat varieties introduced in the Hulunbuir region. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(4): 60–72.
- 李鸿飞, 周帮伟, 张森, 等. 不同燕麦品种在呼伦贝尔地区的引种适应性评价. *草业学报*, 2024, 33(4): 60–72.
- [32] Yang H L, Xu C L, Yu X J, *et al.* Comparative study on the performance of 14 oat (*Avena sativa*) germplasm in Huangcheng town of Sunan County, Gansu Province. *Pratacultural Science*, 2016, 33(1): 129–135.
- 杨海磊, 徐长林, 鱼小军, 等. 14份燕麦种质在肃南皇城镇的生产性能比较. *草业科学*, 2016, 33(1): 129–135.
- [33] Yuan B, Xu L J, Zhao Y R, *et al.* Selection and evaluation of multiple cropping oats for suitable varieties in a farming-pastoral ecotone in northern China. *Pratacultural Science*, 2024, 41(3): 652–663.
- 袁波, 徐丽君, 赵雅茹, 等. 北方农牧交错区复种燕麦品种的筛选与评价. *草业科学*, 2024, 41(3): 652–663.
- [34] 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. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(19): 3730–3742.
- 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. *中国农业科学*, 2024, 57(19): 3730–3742.
- [35] Tang S, Mao G, Yuan Y, *et al.* Optimization of oat seed steeping and germination temperatures to maximize nutrient content and antioxidant activity. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(9): e14683.
- [36] Li D M, Zhang R, Wu H J, *et al.* Genetic diversity analysis and comprehensive evaluation of 35 oat varieties in high cold and humid areas of Tianzhu County. *Pratacultural Science*, 2023, 40(12): 3114–3123.
- 李德明, 张榕, 武慧娟, 等. 天祝县高寒阴湿区35份燕麦主要性状的遗传多样性分析及生产性能综合评价. *草业科学*, 2023, 40(12): 3114–3123.
- [37] Gao Z H, Li X Y, Lan J, *et al.* Comparison and evaluation of seed germination indexes of different forage-type oat cultivars under PEG-6000 stress. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(5): 1210–1218.
- 高志昊, 李雪颖, 兰剑, 等. 干旱胁迫条件下不同饲用燕麦品种种子萌发指标比较与评价. *草地学报*, 2022, 30(5): 1210–1218.
- [38] Lv Y C, Bai L R, Li H F, *et al.* Comparison of salt tolerance of oat cultivars at germination stage. *Seed*, 2013, 32(12): 92–94.
- 吕亚慈, 白丽荣, 李会芬, 等. 不同燕麦品种萌发期耐盐性的比较. *种子*, 2013, 32(12): 92–94.
- [39] Zhang Q, Wei Z W, Yan T F, *et al.* Identification and evaluation of genetic diversity of agronomic traits in oat germplasm resources. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(2): 309–316.
- 张琦, 魏臻武, 闫天芳, 等. 燕麦种质资源农艺性状遗传多样性的鉴定评价. *草地学报*, 2021, 29(2): 309–316.
- [40] Gezahagn K, Walegn W, Habte J, *et al.* Multivariate analysis for yield and yield-related traits of oat (*Avena sativa* L.) genotypes in Ethiopia. *Ecological Genetics and Genomics*, 2023, 28: 100184.