麦类作物学报 2026,46(10):1327－1337
Journal of Triticeae Crops doi: 10.7606/j.issn.1009-1041.2026.10.07

网络出版时间:2026-09-23
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.s.20260921.1108.002

79 份国内外大麦种质遗传多样性分析与综合评价

杨其志[1],王爱梅[1],郭晋太[2],罗一鸣[1],周定文[1],周子瑜[1],
Vladimir Shvidchenko[3],孙全平[4],武 军[1],刘玉秀[1]

(1.西北农林科技大学农学院,陕西杨凌 712100; 2.洛阳市农林科学院,河南洛阳 471023; 3.赛福林农业技术大学,哈萨克斯坦阿斯塔纳 010011; 4.西藏自治区农牧科学院农业资源与环境研究所,西藏拉萨 850000)

摘 要:为高效挖掘大麦种质资源的遗传潜力并拓宽中国大麦遗传改良的种质基础,以引自哈萨克斯坦、日本、俄罗斯、澳大利亚等国及国内共 79 份大麦种质为材料,系统测定其主要农艺性状、品质性状和籽粒形态指标,并运用 Shannon-Wiener 遗传多样性指数、相关性分析、主成分分析和聚类分析等方法对其开展综合评价。结果表明,供试大麦种质的多数被测性状的遗传多样性丰富,变异系数为 4.69%(粒宽)～42.99%(穗粒数),Shannon-Wiener 多样性指数为 1.26(籽粒长宽比)～2.08(籽粒表面积和粒宽)。国内不同来源大麦被测性状变异系数为 0.85%(株高)～24.39%(产量),国外不同来源大麦被测性状变异系数为 0.91%～23.54%,哈萨克斯坦大麦株高最高,俄罗斯大麦蛋白含量最高。经相关性分析,籽粒淀粉含量与粗蛋白含量、纤维含量呈极显著负相关($P<0.01$),粗蛋白含量与纤维含量呈极显著正相关,千粒重与籽粒表面积、籽粒周长、粒长、粒宽呈极显著正相关。基于逐步回归分析构建的回归模型表明,株高、穗下节长、旗叶长度、纤维含量、千粒重和籽粒周长可作为优质大麦种质筛选的综合评价指标。对 17 个性状进行主成分分析,共提取到 7 个主成分,累计贡献率达 86.257%,涵盖了原始数据的主要信息。结合隶属函数计算综合得分(D 值),其中 D 值排名前 5 的种质为 D-76、王川 P148、2163、HBL002 和丰农啤 1 号,可作为优质亲本用于大麦遗传改良。聚类分析将参试材料分为 3 个类群。

关键词:大麦种质;农艺性状;品质性状;综合评价

中图分类号:S512.3; S330 **文献标识码**:A **文章编号**:1009-1041(2026)10-1327-11

Analysis and Comprehensive Evaluation of Key Traits in 79 Domestic and International Barley Germplasm

Yang Qizhi[1], Wang Aimei[1], Guo Jintai[2], Luo Yiming[1], Zhou Dingwen[1], Zhou Ziyu[1], Vladimir Shvidchenko[3], Sun Quanping[4], Wu Jun[1], Liu Yuxiu[1]

(1. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Luoyang Academy of Agriculture, Luoyang, Henan 471023, China; 3. Seifullin Kazakh Agrotechnical University, Astana 010011, Kazakhstan; 4. Institute of Agricultural Resources and Environment, Xizang Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Lhasa, Xizang 850000, China)

Abstract: To efficiently explore the genetic potential of barley germplasm resources and broaden the genetic basis for barley genetic improvement in China, this study utilized 79 domestic and foreign barley accessions introduced from Kazakhstan, Japan, Russia, Australia, and other countries, as well as domestic sources. Major agronomic traits, quality traits, and grain morphological indicators were systematically measured, and comprehensive evaluations were conducted using methods such as the Shannon-Wiener genetic diversity index, correlation analysis, principal component analysis, and cluster analysis. The results indicated that the genetic variation of the tested barley accessions was sub-

收稿日期:2026-03-16 修回日期:2026-04-08
基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFE0213400);陕西省重点研发计划项目(2024GH-ZDXM-07);国家外专项目(H20250550)
第一作者 E-mail:yqz1057241589@163.com(杨其志)
通讯作者 E-mail:yxliu@nwafu.edu.cn(刘玉秀)

stantial, with coefficients of variation ranging from 4.69%(grain width) to 42.99%(grains per spike), and Shannon-Wiener diversity indices ranging from 1.26(grain length-to-width ratio) to 2.08 (grain surface area and grain width). For domestic barley from different sources, the coefficients of variation for major traits ranged from 0.85%(plant height) to 24.39%(yield), while for foreign barley, they ranged from 0.91% to 23.54%. Barley from Kazakhstan exhibited the tallest plant height, and barley from Russia had the highest protein content on a dry basis. Correlation analysis showed that grain starch content was significantly negatively correlated with crude protein content and fiber content, while crude protein content was significantly positively correlated with fiber content. Thousand-grain weight was significantly positively correlated with grain surface area, grain perimeter, grain length, and grain width($P<0.01$). A regression model constructed based on stepwise regression analysis indicated that plant height, peduncle length, flag leaf length, fiber content, thousand-grain weight, and grain perimeter could serve as key comprehensive evaluation indicators for screening high-quality barley germplasm. Principal component analysis of 17 traits extracted seven principal components, with a cumulative contribution rate of 86.257%, effectively capturing the main information of the original data. Combined with the membership function to calculate comprehensive scores (*D*-values), the top five accessions ranked by *D*-values were D-76, Wangchuan P148, 2163, HBL002, and Fengnongpi 1, which can be utilized as high-quality parental materials for barley genetic improvement. Cluster analysis classified the tested materials into three groups.

Keywords: Barley germplasm; Agronomic traits; Quality traits; Comprehensive evaluation

大麦(*Hordeum vulgare* L.)作为全球第四大禾谷类作物,兼具早熟、抗逆性强及广适性等优点,被全世界广泛种植[1]。大麦不仅是全球饲料产业与酿造工业的重要原料[2],也是部分地区人民的主食作物[3]。

大麦在全球广泛分布,在长期演化过程中对不同气候、纬度和海拔环境的适应性使其生长习性和植株形态形成了丰富的种内遗传多样性。俄罗斯是全球主要大麦产区之一,大麦种植以春大麦为主,占比约 90%,且品种类型中饲料大麦占 90%～95%,啤酒大麦仅占 5%～10%[4]。大麦在哈萨克斯坦农业生产中同样占据重要地位,年种植面积稳定在 150 万 hm^2 以上[5];其大麦种质与美国大麦种质的遗传亲缘关系最为密切[6]。日本二棱大麦具有矮秆、穗下节间短、穗长、穗粒数少、千粒重高的表型特征[7]。俄罗斯、加拿大、澳大利亚、德国等为世界大麦主产国,其种质资源蕴含丰富的优异遗传背景,解析这些国家大麦种质资源的农艺特性与遗传规律,是合理利用外源种质、优化育种亲本选配方案、提升大麦育种效率的重要前提[4-6]。

目前,国内外关于大麦种质资源遗传多样性的研究已有较多报道,且多基于表型性状、分子标记等不同层面开展。郜战宁等[1]对 143 份大麦材料的 7 个农艺性状进行分析与综合评价,构建了多性状综合评价方程。牛小霞等[8]采用相关分析、聚类分析等方法对 97 份大麦材料开展研究,筛选出矮秆、高抗条锈病、高蛋白含量的优异种质资源。李赢等[9]对 398 份裸大麦种质资源的遗传多样性进行分析,发现其表型性状具有丰富的遗传变异,为裸大麦种质资源的高效利用及育种亲本选择提供了参考。Setotaw 等[10]利用表型组选择法对埃塞俄比亚大麦种质的农艺性状进行预测,实现了低成本筛选具有育种潜力种质的目标。Ghazy 等[11]通过表型性状分析将沙特阿拉伯大麦种质划分为 4 个主要类群,并从中筛选出耐旱性优异的种质材料。总体看来,现有研究多聚焦于特定国家或地区的大麦种质资源评价,针对多国跨区域大麦种质的系统性评价与比较分析仍较为缺乏。为此,本研究以引自哈萨克斯坦、日本、加拿大、丹麦、俄罗斯、澳大利亚、英国、德国共 48 份国外大麦种质及 31 份国内大麦种质为试验材料,基于主要农艺性状、品质性状和籽粒形态指标开展综合评价,旨在筛选出综合性状优良的大麦种质资源,为优质高产大麦新品种选育与亲本选配提供材料支撑和参考。

1　材料与方法

1.1　供试材料与设计

供试材料为国内外 79 份大麦种质,其中 48 份引自国外(日本 24 份、哈萨克斯坦 10 份、俄罗斯 4 份、丹麦 2 份、加拿大 2 份、澳大利亚 4 份、英国 1 份、德国 1 份),31 份为国内种质(江苏 17 份、陕西 3 份、新疆 3 份、甘肃 2 份、浙江 2 份、安徽 2 份、上海 2 份)。21 份材料为六棱大麦,其余为二棱大麦。试验于 2023—2024 和 2024—2025 年度大麦生长季在西北农林科技大学试验农场一站(108°4′36″E,34°15′35″N,海拔 446 m)进行。每份种质种植 2 行,行长 2.0 m,行距 0.2 m,每行播种 80 粒,重复 3 次。采用人工播种,田间管理措施同大田生产。试验田土壤类型为塿土,pH 为 7.90,表层(0～20 cm)土壤养分见表 1。

表 1　表层土壤养分

Table 1　Surface soil nutrients

土层 Soil layer/cm	有机质 Organic matter/(g·kg^{-1})	全氮 Total nitrogen/(g·kg^{-1})	硝态氮 Nitrate nitrogen/(mg·kg^{-1})	全磷 Total phosphorus/(g·kg^{-1})	速效磷 Available phosphorus/(mg·kg^{-1})	全钾 Total potassium/(g·kg^{-1})	速效钾 Available potassium/(mg·kg^{-1})
0～20	18.03	1.14	12.94	0.94	26.18	11.32	242.79

1.2　测定项目与方法

参考《大麦种质资源数据质量控制规范》[12],于灌浆期各行随机选取 10 株植株,调查大麦旗叶长度和宽度;于蜡熟期测定株高、穗下节长、芒长、穗长和主穗穗粒数。成熟期人工收获,经晾晒、脱粒后称重,计算含水量为 12%时的籽粒产量。

采用近红外分析仪(DA 7250, Perten, Sweden)测定籽粒粗蛋白(干基)和淀粉(干基)含量、含水量和粗纤维(干基)含量。利用自动考种及千粒重分析系统(SC-G,深圳万深有限公司,中国)测定籽粒表面积、周长、长度、宽度及长宽比。重复 5 次,取平均值。

1.3　数据处理

用 Excel 进行数据统计分析,用 SPSS 22.0 进行主成分分析、聚类分析,用 Origin 2021 绘图。数据均为两年平均值。

2　结果与分析

2.1　大麦种质主要性状表现

由表 2 可知,79 份国内外大麦种质被测性状的变异系数为 4.69%～42.99%,其中主穗穗粒数的变异系数最大(42.99%),淀粉含量(6.73%)、籽粒表面积(9.99%)、籽粒周长(6.72%)、粒长(7.09%)及粒宽(4.69%)的变异系数小于 10%;Shannon-Wiener 多样性指数范围为 1.26～2.08,其中株高(2.05)、旗叶长(2.05)、旗叶宽(2.04)、千粒重(2.01)、籽粒表面积(2.08)、粒宽(2.08)和产量(2.05)的多样性指数均大于 2,表明供试大麦种质多数指标具有较为丰富的遗传多样性。

2.2　种质来源对大麦种质主要性状的影响

2.2.1　国内不同地区大麦种质主要性状比较

国内不同地区供试大麦种质的被测性状变异系数为 0.85%～24.39%(表 3)。陕西大麦主穗穗粒数最高(48.17 粒),显著高于新疆大麦($P<0.05$);千粒重(36.33 g)和粒宽最低(0.34 cm),显著低于新疆大麦。株高、穗下节长等性状各地区之间无显著差异。

2.2.2　不同国家大麦主要性状比较

不同国家供试大麦被测性状变异系数为 0.91%～23.54%(表 4)。来自哈萨克斯坦的大麦株高最高(97.20 cm),显著高于株高最低(79.27 cm)的中国大麦($P<0.05$);穗长为 11.12 cm,显著高于中国、日本、俄罗斯和澳大利亚大麦。日本大麦蛋白含量最低(13.08%),显著低于俄罗斯大麦(15.24%)。俄罗斯大麦旗叶长最短(10.45 cm),显著低于中国、哈萨克斯坦、日本和澳大利亚大麦;产量为 550 kg·hm^{-2},显著低于产量最高(1 075 kg·hm^{-2})的中国大麦。淀粉含量等其他性状各国家之间无显著差异。

2.3　大麦种质主要性状相关性分析

对供试大麦种质的主要性状进行相关性分析,结果(图 1)显示,产量与株高、穗长、穗下节长、千粒重、籽粒表面积、粒长、粒宽均呈正相关,但仅与粒宽的相关性达到极显著水平($P<0.01$),与籽粒蛋白含量、淀粉含量呈负相关,但均未达到显著水平,这表明高产与优质(高蛋白/高淀粉)难

表 2 大麦种质的农艺、品质和籽粒性状分析

Table 2 Analysis of agronomic, quality, and grain traits in barley germplasm

性状 Trait	范围 Rang	平均值±标准差 Mean±SD	变异系数 CV/%	多样性系数 H'
PH/cm	65.50～119.30	86.90±13.40	15.45	2.05
PL/cm	18.10～38.30	27.10±4.50	16.68	1.99
FLL/cm	8.80～19.30	13.80±1.90	14.06	2.05
FLW/cm	0.90～1.80	1.30±0.20	17.15	2.04
AL/cm	0.00～16.70	12.40±2.20	17.63	1.85
SL/cm	5.20～12.80	8.50±1.70	19.94	1.98
SPPMS	21.00～84.00	40.00±17.00	42.99	1.56
GY/(kg·hm^{-2})	200～1 825	950±325	35.31	2.05
DCP	9.90～20.44	13.54±1.64	12.09	1.74
SDB	34.41～59.93	50.48±3.40	6.73	1.50
CFD	1.65～14.98	5.11±1.39	27.24	1.47
TGW/g	24.42～53.25	41.90±5.60	13.00	2.01
GSA/cm^2	0.13～0.28	0.22±0.02	9.99	2.08
GLWR	1.88～6.12	2.50±0.50	18.29	1.26
GP/cm	1.49～2.60	2.19±0.15	6.72	1.88
GL/cm	0.60～1.00	0.86±0.06	7.09	1.83
GW/cm	0.32～0.39	0.36±0.02	4.69	2.08

PH:株高;PL:穗下节长;AL:芒长;SL:穗长;SPPMS:主穗穗粒数;GY:籽粒产量;DCP:籽粒粗蛋白含量;SDB:淀粉含量;CFD:粗纤维含量;TGW:千粒重;GSA:籽粒表面积;GLWR:籽粒长宽比;GP:籽粒周长;GL:粒长;GW:粒宽。下同。

PH: Plant height; PL: Peduncle length; AL: Awn length; SL: Spike length; SPPMS: Grains per main spike; GY: Grain yield; DCP: Basis crude protein content; SDB: Basis starch content; CFD: Basis crude fiber content; TGW: Thousand grain weight; GSA: Grain surface area; GLWR: Grain length-to-width ratio; GP: Grain perimeter; GL: Grain length; GW: Grain width. The same in tables 3－8 and figure 1.

表 3 国内不同地区大麦主要性状比较

Table 3 Comparison of main traits of barley in different regions of China

性状 Trait	江苏 Jiangsu	陕西 Shannxi	新疆 Xinjiang	变异系数 CV/%
PH/cm	75.79±6.29a	84.53±5.30a	84.54±17.02a	5.05
PL/cm	25.27±3.17a	26.36±0.84a	29.89±3.12a	7.26
FLL/cm	13.90±1.61a	12.76±0.30a	13.37±0.48a	3.47
FLW/cm	1.28±0.16a	1.37±0.15a	1.39±0.03a	3.47
AL/cm	11.91±1.28a	10.88±1.19a	12.19±1.01a	4.85
SL/cm	7.50±0.71a	7.96±1.85a	7.00±0.73a	5.24
SPPMS	32.77±12.5ab	48.17±11.55a	27.39±3.48b	24.39
GY/(kg·hm^{-2})	1 075±350a	1 075±275a	1 050±275a	0.85
DCP/%	13.56±0.85a	13.47±0.43a	14.01±0.44a	1.72
SDB/%	49.50±3.20a	50.05±0.41a	48.60±1.21a	1.21
CFD/%	5.15±0.51a	5.25±0.29a	5.27±0.18a	0.94
TGW/g	42.16±5.09ab	36.33±9.12b	46.54±2.85a	10.04
GSA/cm^2	0.22±0.02a	0.21±0.03a	0.23±0.03a	4.41
GLWR	2.40±0.16a	2.57±0.05a	2.38±0.07a	3.56
GP/cm	2.20±0.14a	2.16±0.08a	2.31±0.10a	2.80
GL/cm	0.86±0.05a	0.87±0.03a	0.88±0.02a	0.97
GW/cm	0.36±0.02ab	0.34±0.01b	0.38±0.01a	3.50

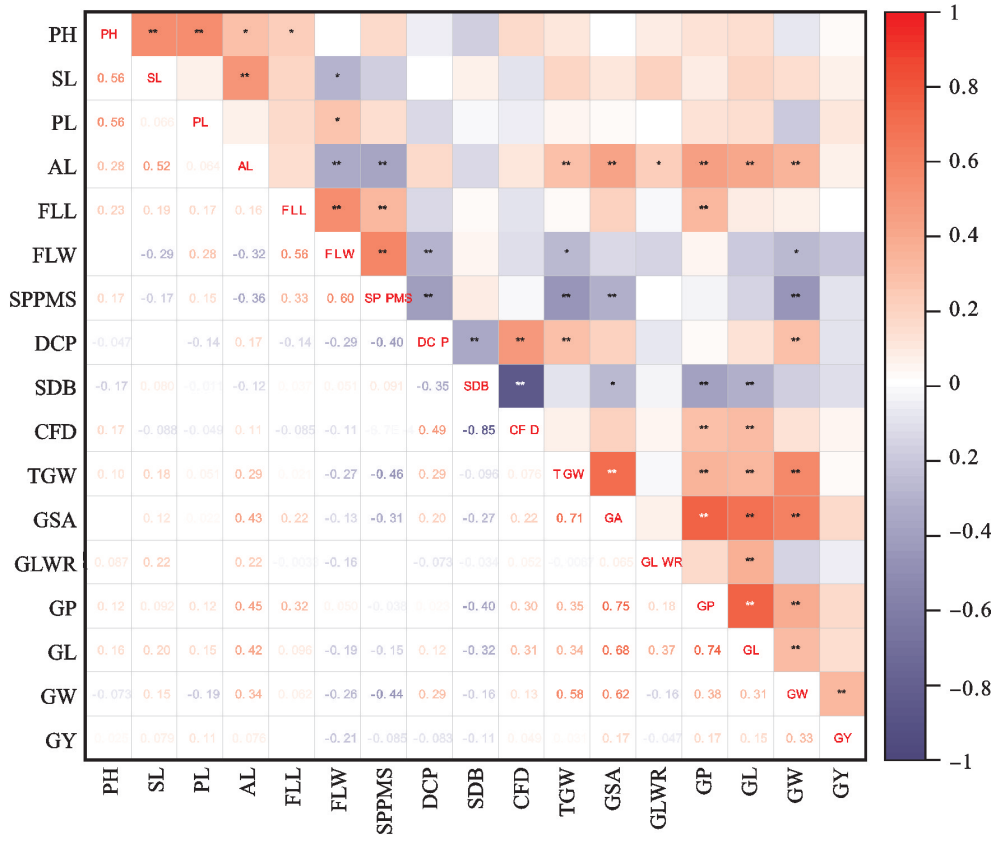
同列数据后不同字母表示不同地区间在 0.05 水平上差异显著。表 4 同。

Different letters following data in the same column mean significant difference among different regions at 0.05 level. The same in table 4.

表 4　国内外不同地区大麦主要性状比较

Table 4　Comparative analysis of main barley traits across different domestic and international regions

性状 Trait	中国 China	哈萨克斯坦 Kazakhstan	日本 Japan	俄罗斯 Russia	澳大利亚 Australia	变异系数 CV/%
PH/cm	79.27±10.23b	97.20±12.65a	92.82±12.49ab	85.95±11.94ab	86.81±11.1ab	3.46
PL/cm	26.05±3.52a	27.30±5.41a	29.07±4.28a	25.72±1.34a	26.33±4.71a	5.39
FLL/cm	13.63±1.38a	14.08±1.31a	14.43±2.39a	10.45±0.67b	13.93±1.95a	13.69
FLW/cm	1.28±0.16a	1.16±0.21a	1.39±0.26a	1.11±0.10a	1.18±0.24a	9.85
AL/cm	12.16±1.47a	13.83±1.20a	12.21±3.22a	13.03±1.04a	11.48±0.89a	5.17
SL/cm	7.90±1.31b	11.12±1.15a	8.68±1.63b	6.85±0.48b	8.33±0.91b	9.99
SPPMS	32.98±11.79a	33.22±8.38a	47.11±18.74a	27.34±2.82a	48.42±18.89a	23.54
GY/(kg·hm^{-2})	1 075±325a	825±275ab	875±325ab	550±225b	900±150ab	20.48
DCP/%	13.49±0.77ab	13.84±0.62ab	13.08±1.83b	15.24±2.77a	13.21±1.30b	7.14
SDB/%	49.99±2.83a	50.99±2.4a	51.08±3.10a	49.75±0.70a	51.35±1.43a	1.38
CFD/%	5.08±0.48a	4.70±1.04a	4.99±1.02a	5.43±0.41a	4.84±0.33a	4.97
TGW/g	41.99±5.62a	43.60±4.72a	42.04±4.91a	44.90±4.16a	42.58±5.36a	2.88
GSA/cm^2	0.22±0.02a	0.21±0.01a	0.22±0.03a	0.23±0.01a	0.22±0.01a	2.00
GLWR	2.41±0.15a	2.85±1.12a	2.41±0.20a	2.42±0.11a	2.33±0.18a	1.76
GP/cm	2.20±0.13a	2.18±0.09a	2.20±0.20a	2.15±0.03a	2.19±0.07a	0.94
GL/cm	0.86±0.04a	0.86±0.08a	0.86±0.07a	0.87±0.02a	0.82±0.08a	2.27
GW/cm	0.36±0.02a	0.35±0.01a	0.36±0.02a	0.36±0.01a	0.35±0.01a	0.91



*：$P<0.05$；**：$P<0.01$。表 7 同。

*: $P<0.05$; **: $P<0.01$. The same in table 7.

图 1　大麦种质资源 17 个性状的相关系数

Fig. 1　Correlation coefficients of the 17 traits in barley germplasm resources

以协同实现。株高与穗长、穗下节长呈极显著正相关，与芒长呈显著正相关（$P<0.05$），表明株高与穗部性状存在密切关联。

分析品质性状的相关性，发现籽粒淀粉含量与蛋白含量、纤维含量均呈极显著负相关，蛋白含量与纤维含量呈极显著正相关，推测是因为籽粒内部光合产物的碳代谢与氮代谢存在竞争机制。千粒重与籽粒表面积、籽粒周长、粒长、粒宽呈极显著正相关，表明籽粒形态指标（表面积、周长、长、宽）对千粒重均具有显著正效应。

综上，供试大麦种质的关键性状之间存在紧密的关联性与制约关系，在育种实践中需综合考虑大麦性状间的关系，避免片面提升某一目标性状而导致其他性状下降。

2.3 大麦种质主要性状的主成分分析

对 17 个性状数据进行 KMO 检验和 Bartlett 检验，KMO 检验值为 0.66，Bartlett 球形检验结果显著（$P<0.05$），说明适合进行主成分分析。基于 17 个性状进行主成分分析，根据累计贡献率≥80%的原则，共提取了 7 个主成分（PC1～PC7），其贡献率依次为 26.216%、15.492%、12.351%、10.619%、8.239%、7.214%和 6.126%，累计贡献率达到 86.257%（表 5），表明这 7 个主成分可代表原始数据的主要信息。

进一步解析各主成分的特征发现，PC1 中，籽粒表面积、籽粒宽度、千粒重、籽粒周长和籽粒长度的载荷量较高（表 5），说明这些指标在大麦种质主要性状和综合评价中具有主导作用，界定为籽粒形态因子；PC2 中，旗叶长和旗叶宽的载荷量较高且为正值，反映旗叶形态特征，故界定为旗叶形态因子；PC3 中，淀粉含量、纤维含量和蛋白含量的载荷量绝对值较大，主要体现籽粒品质性状，定义为籽粒品质因子；PC4 中，株高、芒长的载荷量绝对值较大，表征植株主要农艺形态特征，为主要农艺性状因子；PC5 中，籽粒长宽比的载荷量绝对值高于其他性状，归为籽粒形态因子；PC6 中，产量的载荷量最高，为产量因子；PC7 中，穗下节长的载荷量绝对值高于其他性状，为农艺性状因子。

表 5 大麦种质资源 17 个性状的主成分分析

Table 5 Principal component analysis of the 17 traits in barley germplasm resources

性状 Trait	主成分特征 Eigenvector of the principal component						
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
PH	−0.072	0.395	0.049	0.422	−0.180	0.498	0.275
SL	0.142	−0.167	−0.160	0.834	0.188	−0.057	−0.033
PL	−0.072	0.395	0.049	0.422	−0.180	0.498	0.275
AL	0.475	−0.180	0.048	0.575	0.317	−0.145	−0.043
FLL	0.305	0.720	−0.106	0.263	−0.001	−0.116	−0.110
FLW	−0.100	0.884	−0.026	−0.148	−0.155	−0.079	−0.127
SPPMS	−0.417	0.713	0.011	−0.098	0.112	0.075	0.059
DCP	0.255	−0.420	0.512	0.023	−0.260	0.095	−0.380
SDB	−0.133	−0.015	−0.927	−0.026	−0.067	0.116	−0.097
CFD	0.073	−0.056	0.946	−0.005	0.060	0.051	−0.023
TGW	0.754	−0.203	0.004	0.136	−0.174	0.172	−0.120
GSA	0.912	0.037	0.142	−0.006	0.144	0.171	0.057
GLWR	−0.064	−0.066	0.012	0.141	0.834	0.067	−0.072
GP	0.699	0.304	0.293	0.047	0.391	0.031	0.180
GL	0.575	0.030	0.265	0.073	0.546	0.354	0.146
GW	0.767	−0.220	0.051	0.026	−0.221	−0.223	0.220
GY	0.169	−0.138	0.029	0.034	−0.050	−0.022	0.895
方差贡献率 Variance contribution/%	26.216	15.492	12.351	10.619	8.239	7.214	6.126
累计贡献率 Accumulative contribution/%	26.216	41.708	54.059	64.678	72.917	80.131	86.257

2.4　大麦种质综合评价

基于隶属函数法对参试大麦种质的 7 个主成分得分进行归一化处理,依据各主成分的方差贡献率确定权重系数依次为 0.302、0.176、0.144、0.124、0.091、0.080、0.072,计算得到各参试大麦种质的综合得分 D 值。结果显示,79 份大麦种质的 D 值范围为−2.00～1.21,排名前 5 位的种质依次为 D-76、王川 P148、2163、HBL002 和丰农啤 1 号,排名后 5 位的种质依次为 0306、蒲石麦 5 号、西安 91-2-2、BOM601-1-4 和 D-26(表 6)。

D 值排名前 5 位大麦种质的平均株高(91.4 cm)、穗长(9.2 cm)、千粒重(49.6 g)和蛋白含量(14.8%)均明显高于排名后 5 位种质(平均株高 74.9 cm、穗长 7.4 cm、千粒重 36.7 g、蛋白含量 13.2%)。

对 17 个性状与 D 值进行相关性分析可知,D 值与株高、穗下节长、芒长、旗叶长度、纤维干基含量、千粒重、籽粒表面积、籽粒周长、籽粒长度及籽粒宽度均呈极显著正相关($P<0.01$),与穗长和产量呈显著正相关($P<0.05$)(表 7)。

表 6　大麦种质资源排名前 5 位和末 5 位的 17 个性状

Table 6　Top five and bottom five accessions for each of the 17 traits in barley germplasm resources

品种名称 Variety name	PH/cm	SL/cm	PL/cm	AL/cm	FLL/cm	FLW/cm	SPPMS	DCP	SDB	CFD	TGW/g	GA/cm²	RLWG	GP/cm	GL/cm	GW/cm	GY/(kg·hm⁻²)
D-76	90.8	9.2	32.6	15.4	17.5	1.3	23	19.25	49.66	6.57	51.08	27.88	2.71	2.50	1.00	0.37	1 300
王川 P148 Wangchun P148	77.5	7.0	30.9	14.0	17.1	1.7	78	11.52	51.38	5.11	44.22	25.31	2.80	2.60	1.00	0.37	800
2163	92.1	7.9	30.5	14.5	16.3	1.3	31	15.89	49.33	5.22	50.63	23.90	2.32	2.54	0.89	0.39	1 000
HBL002	109.7	12.3	37.3	13.9	15.8	1.3	30	14.01	50.05	5.01	48.97	23.12	2.67	2.28	0.95	0.36	800
丰农啤 1 号 Fengnongpi 1	86.7	9.8	25.1	12.6	16.5	1.3	29	13.32	50.76	4.91	53.25	25.45	2.33	2.26	0.91	0.39	925
0306	74.7	8.8	27.7	11.9	13.2	1.4	32	11.95	59.93	2.35	37.85	19.52	2.35	1.98	0.81	0.35	1 050
蒲石麦 5 号 Pushimai 5	76.9	7.1	21.8	10.6	13.5	1.1	29	13.72	52.58	4.11	43.98	19.86	2.18	1.99	0.77	0.36	1 025
西安 91-2-2 Xian 91-2-2	87.6	7.2	25.2	12.0	12.6	1.3	51	13.39	49.80	5.30	24.42	16.45	2.63	2.05	0.83	0.33	900
BOM601-1-4	65.5	8.9	24.6	12.6	12.9	1.3	29	12.97	59.88	2.16	40.53	18.96	2.41	1.98	0.85	0.35	475
D-26	70.1	5.2	28.6	0.0	8.8	1.6	49	13.83	56.49	2.91	36.77	12.60	1.88	1.49	0.60	0.32	225

表 7　大麦种质资源 17 个性状与 D 值间的相关系数

Table 7　Correlation coefficients between the 17 traits and D value in barley germplasm resources

性状 Trait	D 值 D value	性状 Trait	D 值 D value	性状 Trait	D 值 D value
PH	0.40**	SPPMS	0.02	RLWG	0.14
SL	0.23*	DCP	0.07	GP	0.87**
PL	0.36**	SDB	−0.41	GL	0.76**
AL	0.48**	CFD	0.35**	GW	0.43**
FLL	0.55**	TGW	0.48**	GY	0.24*
FLW	0.14	GSA	0.80**		

以综合得分(D 值)为因变量、17 个性状为自变量进行逐步回归分析,构建最优回归模型为 $Y=-6.111+1.142X_{14}+0.006X_1+0.085X_{11}+0.054X_5+0.051X_{10}+0.014X_3$,其中 X_{14}、X_1、X_{11}、X_5、X_{10}、X_3 分别代表籽粒周长、株高、千粒重、旗叶长度、纤维干基含量和穗下节长。该模型的相关系数(R)=0.988,决定系数(R^2)=0.979,上述 6 个性状可解释 D 值总变异的 97.4%;F 检验值为 362.989($P<0.01$)。回归系数均通过显著性检验($P<0.05$),说明籽粒周长、株高、千粒重、旗叶长度、纤维干基含量及穗下节长对大麦种质综合得分影响显著,可作为优质种质筛选的关键指标。

基于 17 个性状数据和 D 值对参试大麦种质进行聚类分析。79 份材料被划分为 3 个类群(图 2 和表 8)。

第Ⅰ类群含 54 份种质,占比 68.35%,均为二棱大麦,表现为植株较高(株高均值明显高于另两类群),穗长较长,千粒重较高(均值较第Ⅱ类群高 12.3%),籽粒表面积较大,但主穗穗粒数较少(均值较第Ⅱ类群低 18.7%);其余性状与另两类群相近或略优。

第Ⅱ类群含 22 份种质,占比 27.85%,其中 18 份为六棱大麦,3 份为二棱大麦;此类群种质表现为植株较矮,穗长较短,千粒重较低(均值较第Ⅰ

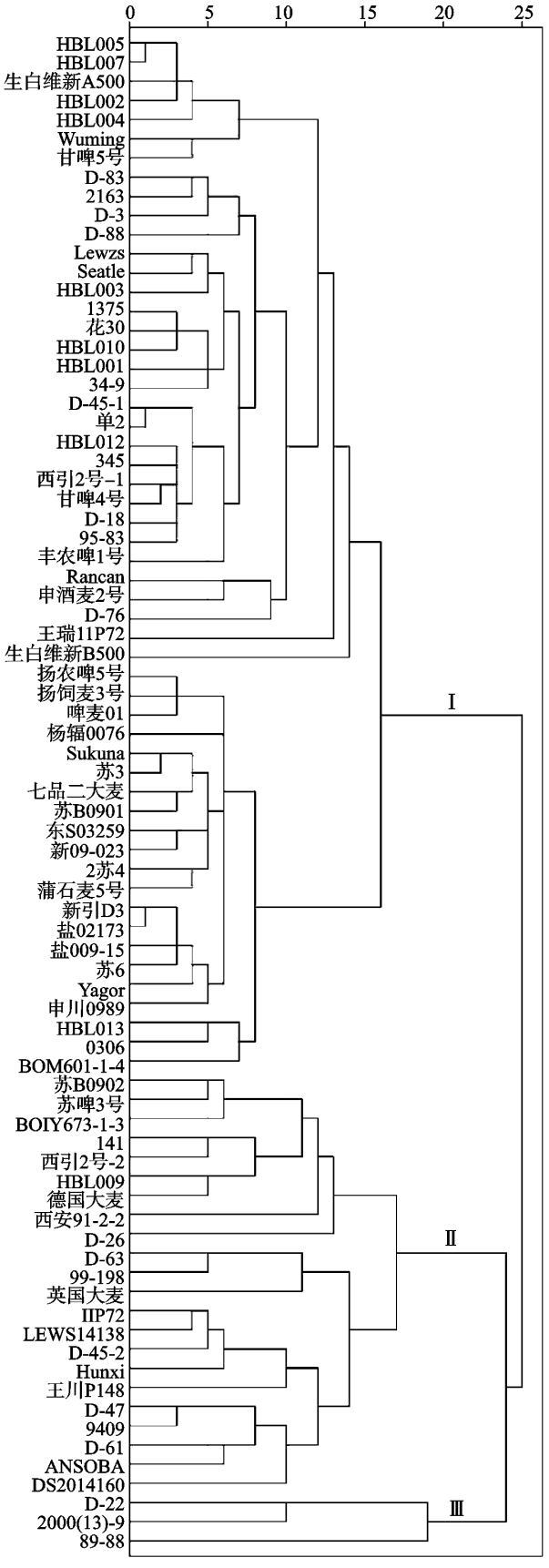


图 2 参试大麦种质资源聚类图

Fig. 2 Cluster analysis of the tested barley germplasm resources

表 8 参试大麦种质资源不同类群主要性状

Table 8 Mean values of major traits for different clusters of barley germplasm resources

性状 Traits	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
PH/cm	86.1	80.4	81.8
SL/cm	8.8	8.0	7.9
SPPMS	29.2	42.6	44.4
DCP	14.0	13.6	13.6
SDB	50.4	50.4	50.3
TGW/g	43.9	41.0	40.5
GA/cm^2	22.2	21.6	21.5
GP/cm	2.2	2.2	2.2
GL/cm	0.9	0.9	0.9
GW/cm	0.4	0.4	0.4
GLWR	2.5	2.4	2.4

类群低 12.3%),籽粒表面积较小,但主穗穗粒数较高,均值较第Ⅰ类群高 18.7%;其余性状与另两类群相近或略优。

第Ⅲ类群含 3 份种质,占比 3.80%,均为六棱大麦,主穗穗粒数最高(均值较第Ⅰ、Ⅱ类群分别高 25.6%、8.2%),株高居中,穗长最短(均值较第Ⅰ类群低 21.4%),千粒重最低(均值较第Ⅰ类群低 15.8%),籽粒表面积最小;其余指标与另两类群无显著差异。

3 讨论

3.1 大麦种质主要性状表现

对种质资源开展变异系数与遗传多样性分析,有助于揭示各性状指标的离散程度,反映不同种质的遗传背景差异及抗逆性强弱[13];为种质资源的系统分类与评价、定向筛选与高效利用以及专用型大麦新品种选育提供参考。通常认为,当变异系数大于 10%时,性状具有较高选择潜力,提示样本间存在显著差异[14]。本研究中,79 份大麦种质 17 个性状的变异系数范围为 4.69%～42.99%,其中 12 个性状变异系数大于 10%,表明供试材料的大多性状间存在显著差异,可为优异种质筛选奠定基础。供试种质的 Shannon-Wiener 指数范围为 1.26～2.08,与李赢等[9]报道的 0.66～2.02 部分一致,略低于田朋佳等[15]报道的 1.96～3.00,与马艳明等[16](1.37～2.04)、郜战宁等[17](1.22～2.02)报道的大麦种质遗传多样性范围相近,表明参试的 79 份国内外大麦种质具有较丰富的遗传变异,可为大麦品种改良与

新种质创制提供遗传基础。

3.2　种质来源对大麦主要性状影响

环境是大麦育种过程中的关键选择压力,育种的核心目标之一是筛选适应特定环境的植株[18]。不同国家和地区之间环境差异较大,导致其育种目标及育成品种或品系的主要性状存在差异[19-20]。本研究表明,陕西大麦的主穗穗粒数高于新疆大麦,但新疆大麦的千粒重和粒宽大于陕西大麦,这可能与两地不同的生态条件和育种目标有关。陈晓东等[21]认为,不同大麦种植区间籽粒蛋白质含量与淀粉含量存在差异。本研究中,中国 3 个地区间大麦种质的平均蛋白含量和淀粉含量差异不显著,这可能与供试品种(系)不同和样本量大小有关。本研究中,中国大麦株高最低,产量最高;哈萨克斯坦大麦株高最高,穗长最长;俄罗斯大麦产量最低,但蛋白含量最高;日本大麦和澳大利亚大麦主要性状与中国大麦类似,但日本大麦蛋白含量较低,这与郑波等[4]、张小燕等[5]、苗雨等[22]的部分研究结论一致。

3.3　大麦种质主要性状相关性及主成分分析

相关性分析旨在解析性状间的关联性,可为育种中利用次要性状对主要性状的间接效应、实现性状协同改良及制定综合选择策略提供关键依据[23]。本研究对参试大麦种质 17 个性状的相关性分析表明,株高与穗长、穗下节长等呈显著正相关,这与赵盟[24]、吕二锁等[25]的研究结果一致;产量与株高、穗长、穗下节长、千粒重、籽粒表面积、籽粒长度、籽粒宽度呈正相关,与蛋白含量、淀粉含量呈负相关,这与徐银萍等[26]、张英虎等[27]的部分研究结论相符。这表明这些性状可能协同作用于产量形成,可作为高产育种的综合选择指标。此外,淀粉含量与蛋白含量、纤维含量呈负相关,蛋白含量与纤维含量呈正相关,提示籽粒内部光合产物的碳代谢与氮代谢可能存在竞争关系。

主成分分析旨在通过降维处理多元数据,提取少数彼此独立的综合变量(主成分),以去除原始指标冗信息,更清晰地揭示数据核心结构与变异模式[28]。门秀丽等[29]对内蒙古大麦种质进行了主成分分析,筛选出 4 个主成分因子,分别反映株高、主穗长、主穗粒数及主穗粒重。本研究共提取 7 个主成分(PC1～PC7),累计贡献率达 86.257%,其中 PC1 为籽粒形状因子,PC2 为旗叶因子,PC3 为籽粒品质因子,PC4 为主要农艺性状因子,PC5 为籽粒长宽比因子,PC6 为产量因子,PC7 为穗下节长因子。这表明籽粒大小、旗叶发育、籽粒品质、主要农艺性状、籽粒长宽比、产量及穗下节长因子对参试大麦种质资源综合性状差异具有较大贡献。

3.4　大麦种质综合评价

种质资源综合评价是挖掘优异资源并指导育种实践的重要环节[30]。综合评价值(D 值)可为育种者提供直观、可量化且便于比较的参考指标[31]。本研究采用隶属函数法对主成分得分进行标准化转换,计算得出参试种质的 D 值,发现 D-76、王川 P148、2163、HBL002 及丰农啤 1 号的 D 值较高(位列前 5)。其中,D-76,千粒重较高,产量最高,籽粒大,可作为大粒高产亲本;王川 P148 穗粒数较多,蛋白质含量最高,植株矮小,可作为多粒、高蛋白、矮秆亲本;2163 综合性状均衡,可作为优良中间亲本;HBL002 株高最高、穗下节长长,可用于改良株型结构;丰农啤 1 号千粒重最大,淀粉含量最高,可用作酿造专用大麦亲本。对 D 值与 17 个性状进行逐步回归分析,构建回归方程并筛选关键指标,发现籽粒周长、株高、千粒重、旗叶长度、纤维含量及穗下节长对 D 值影响显著($P<0.05$),可作为大麦种质资源综合评价的核心指标。

聚类分析是一种基于样本间相似性度量实现分组的重要多元统计方法,其核心原理是将研究对象划分为组内同质性较高、组间异质性显著的若干类群,为识别与筛选具有特定利用价值的种质类群提供客观分组依据[32],该方法已在作物种质评价中广泛应用。郜战宁等[17]将 58 份大麦种质材料划分为多粒型、高产型、多穗型等品种(系);董攀等[33]通过聚类分析对小麦品种(系)进行分类,成功筛选出矮秆、分蘖力强及优质小麦种质。本研究采用系统聚类法对 79 份供试大麦种质进行分析,将其划分为 3 个类群。类群Ⅰ以植株较高、穗长较长、千粒重较高及籽粒表面积较大为主要特征,但穗粒数相对较少;类群Ⅱ表现为植株较矮、穗长较短、千粒重较低及籽粒表面积较小,而穗粒数显著较高;类群Ⅲ则以植株高度中等、穗长最短、千粒重最低及籽粒表面积最小为特征。上述结果表明,不同类群在农艺性状与籽粒特性上存在较大差异,大麦育种中需依据目标性状(如高产、优质或特殊用途)定向选择亲本材料,以实现种质资源的高效利用。

4 结论

79 份大麦种质 17 个被测性状的 Shannon-Wiener 遗传多样性指数为 1.26～2.08，变异系数为 4.69%～42.99%，多数指标具有较丰富的遗传多样性；综合性状排名前 5 的材料为 D-76、王川 P148、2163、HBL002 和丰农啤 1 号，可作为大麦新品种选育的亲本。

参考文献：

[1]郜战宁，杨永乾，王树杰，等. 143 份大麦种质资源的综合评价[J]. 作物杂志，2023(5)：59.
Gao Z N，Yang Y Q，Wang S J，*et al*. Comprehensive evaluation of 143 barley germplasm resources [J]. *Crops*，2023(5)：59.

[2]Jiang C C，Kan J H，Gao G Q，*et al*. Barley2035：A decadal vision for barley research and breeding [J]. *Molecular Plant*，2025，18(2)：195.

[3]赵 锋，包奇军，潘永东，等. 70 份大麦种质资源遗传多样性评价[J]. 作物杂志，2023(6)：54.
Zhao F，Bao Q J，Pan Y D，*et al*. Comprehensive evaluation of genetic diversity in 70 barley germplasms [J]. *Crops*，2023(6)：54.

[4]郑 波，李庆良，楼雷鸣，等. 俄罗斯麦芽品质特征及啤酒生产性能[J]. 大麦与谷类科学，2024，41(3)：38.
Zheng B，Li Q L，Lou L M，*et al*. Study on quality characteristics of Russian malt and brewing performance in beer production [J]. *Barley and Cereal Sciences*，2024，41(3)：38.

[5]Turuspekov Y，Sariev B，Chudinov V，*et al*. Genotype × environment interaction patterns for grain yield of spring barley in different regions of Kazakhstan [J]. *Genetika*，2013，49(2)：224.

[6]Genievskaya Y，Almerekova S，Sariev B，*et al*. Marker-trait associations in two-rowed spring barley accessions from Kazakhstan and the USA [J]. *PLoS One*，2018，13(10)：e0205421.

[7]张小燕，张跃进，潘高峰. 日本不同棱型大麦种质资源农艺性状的差异[J]. 麦类作物学报，2006，26(6)：38.
Zhang X Y，Zhang Y J，Pan G F. Study on germplasm resource among different rowed barley [J]. *Journal of Triticeae Crops*，2006，26(6)：38.

[8]牛小霞，柳小宁，潘永东，等. 97 份大麦种质资源农艺性状分析与评价[J]. 种子，2021，40(8)：68.
Niu X X，Liu X N，Pan Y D，*et al*. Analysis and evaluation of agronomic traits of 97 barley germplasm resources [J]. *Seed*，2021，40(8)：68.

[9]李 赢，刘海翠，石晓旭，等. 398 份裸大麦种质资源表型性状遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报，2023，24(5)：1311.
Li Y，Liu H C，Shi X X，*et al*. Phenotypic diversity analysis of 398 naked barley germplasm resources [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*，2023，24(5)：1311.

[10]Setotawa T，Wilde P，Vasquez Bm A，*et al*. The potential of phenomic selection for the joint Ethiopian malt barley breeding program [J]. *The Plant Phenome Journal*，2024，7(1)：e70003.

[11]Ghazyi A，Ali A M，Ibrahim I E，*et al*. Characterization of improved barley germplasm under desert environments using agro-morphological and SSR markers [J]. *Agronomy*，2024，14(8)：1716.

[12]张 京，刘 旭. 大麦种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京. 中国农业出版社，2006：1.
Zhang J，Liu X. Descriptors and data standard for barley (*Hordeum vulgare* L.) [M]. Beijing：China Agriculture Press，2006：1.

[13]张向前，刘景辉，齐冰洁，等. 燕麦种质资源主要农艺性状的遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报，2010，11(02)：168.
Zhang X Q，Liu J H，Qi B J，*et al*. Genetic diversity analysis of main agronomic traits in oat germplasm resources [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*，2010，11(02)：168.

[14]刘 峰，李建波. 绿豆主要农艺性状的遗传参数分析[J]. 作物杂志，2010(2)：81.
Liu F，Li J B. Genetic parameters analysis of main agronomic traits in mungbean [J]. *Crops*，2010(2)：81.

[15]田朋佳，廖文华，高小丽，等. 140 份西藏大麦种质资源遗传多样性分析[J]. 西南农业学报，2022，35(1)：16.
Tian P J，Liao W H，Gao X L，*et al*. Genetic diversity analysis of 140 barley germplasm resources in Tibet [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*，2022，35(1)：16.

[16]马艳明，赵连佳，王 威，等. 大麦种质资源表型性状遗传差异分析[J]. 新疆农业科学，2022，59(11)：2628.
Ma Y M，Zhao L J，Wang W，*et al*. Genetic diversity analysis of main agronomic characters of barley germplasm resources [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*，2022，59(11)：2628.

[17]郜战宁，杨永乾，冯 辉，等. 58 份大麦品种(系)主要农艺性状的遗传多样性分析[J]. 江苏农业科学，2025，53(2)：144.
Gao Z N，Yang Y Q，Feng H，*et al*. Genetic diversity analysis of agronomic traits of 58 barley varieties(lines) [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*，2025，53(2)：144.

[18]官秀娇，杨晓梦，赵 塔，等. 播种季节及地点对大麦苗粉抗氧化酶活性的影响[J]. 麦类作物学报，2025，45(5)：608.
Guan X J，Yang X M，Zhao T，*et al*. Effects of sowing season and site on the antioxidant enzyme activity of barley grass powder [J]. *Journal of Triticeae Crops*，2025，45(5)：608.

[19]朱昊华，范 超，王俊仁，等. 不同生态类型大麦品种(系)杂交后代主要农艺性状的分析[J]. 大麦与谷类科学，2022，39(1)：1.
Zhu H H，Fan C，Wang J R，*et al*. Analysis of the main agronomic characters of hybrid progenies of barley varieties (lines) under different ecological types [J]. *Barley and Cereal Sciences*，2022，39(1)：1.

[20]王 蕾，张想平，李润喜，等. 大麦农艺性状和子粒支链淀粉的多元分析与评价[J]. 作物杂志，2018(5)：71.
Wang L，Zhang X P，Li R X，*et al*. Multivariate analysis and

evaluation on agronomic traits and grain amylopectin content of barley [J]. *Crops*, 2018(5): 71.

[21]陈晓东,赵 斌,季昌好,等. 不同地理来源大麦种质蛋白质含量分析[J]. 中国农学通报,2013,29(3):76.
Chen X D, Zhao B, Ji C H, *et al*. Analysis of protein content of barley germplasm from different geographical origins [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(3): 76.

[22]苗 雨,陈翠霞,马艳明,等. 276 份中亚大麦种质资源表型性状的遗传多样性分析[J]. 新疆农业科学,2024,61(8):1888.
Miao Y, Chen C X, Ma Y M, *et al*. Genetic diversity analysis of phenotypic traits of 276 Central Asian barley germplasm resources [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2024, 61(8): 1888.

[23]蒋 莹,常 蕾,王 安,等. 143 份大麦种质资源主要农艺性状遗传多样性分析[J]. 江苏农业科学,2020,48(14):94.
Jiang Y, Chang L, Wang A, *et al*. Genetic diversity of main agronomic characters of 143 barley germplasm resources [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48(14): 94.

[24]赵 盟,王春超,张仁旭,等. 中国大麦育成品种产量相关性状鉴定评价[J]. 植物遗传资源学报,2022,23(5):1371.
Zhao M, Wang C C, Zhang R X, *et al*. Evaluation of the yield-related traits of Chinese barley cultivars [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2022, 23(5): 1371.

[25]吕二锁,马 宇,徐寿军,等. 大麦核心种质资源主要农艺性状的综合分析和评价[J]. 种子,2024,43(9):59.
Lü E S, Ma Y, Xu S J, *et al*. Comprehensive analysis and evaluation of main agronomic characters of *Hordeum vulgare* core germplasm resources [J]. *Seed*, 2024, 43(9): 59.

[26]徐银萍,潘永东,刘强德,等. 大麦种质资源成株期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J]. 作物学报,2020,46(3):448.
Xu Y P, Pan Y D, Liu Q D, *et al*. Drought resistance identification and drought resistance indexes screening of barley resources at mature period [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(3): 448.

[27]张英虎,陈 和,陈 健,等. 2007—2014 年江苏沿海地区大麦品种(系)产量与产量构成分析[J]. 浙江农业学报,2015,27(9):1510.
Zhang Y H, Chen H, Chen J, *et al*. Analysis of yield and yield components of barley varieties(lines) in coastal area in Jiangsu during 2007 to 2014 [J]. *Journal of Zhejiang Agriculture*, 2015, 27(9): 1510.

[28]齐海祥,薛海楠,王金波,等. 六棱大麦种质资源光合特性和物质生产能力的综合评价[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版),2021,36(3):217.
Qi H X, Xue H N, Wang J B, *et al*. Comprehensive evaluation of photosynthetic characteristics and material production capacity of germplasm resources of six rowed barley [J]. *Journal of Inner Mongolia University for Nationalities (Natural Sciences)*, 2021, 36(3): 217.

[29]门秀丽,马 岩,李建波,等. 内蒙古多棱大麦种质资源产量相关性状的遗传多样性评价[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版),2023,38(1):39.
Men X L, Ma Y, Li J B, *et al*. Genetic diversity evaluation of yield related traits of multi-row barley rermplasm resources in Inner Mongolia [J]. *Journal of Inner Mongolia University for Nationalities (Natural Sciences)*, 2023, 38(1): 39.

[30]卢 晶,余 波,江 谧,等. 58 份青稞种质资源遗传多样性评价[J]. 作物杂志,2025(2):20.
Lu J, Yu B, Jiang M, *et al*. Assessment of genetic diversity in 58 germplasm resources of highland barley [J]. *Crops*, 2025(2): 20.

[31]孙东雷,卞能飞,陈志德,等. 花生种质资源表型性状的综合评价及指标筛选[J]. 植物遗传资源学报,2018,19(5):865.
Sun D L, Bian N F, Chen Z D, *et al*. Comprehensive evaluation and index screening of phenotypic traits in peanut germplasm resources [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2018, 19(5): 865.

[32]赖俊声,江锡兵,龚榜初,等. 板栗地方品种质量性状多样性分析[J]. 浙江农业科学,2016,57(8):1196.
Lai J S, Jiang X B, Gong B C, *et al*. Diversity analysis of quality traits of local chestnut varieties [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2016, 57(8): 1196.

[33]董 攀,李 伟,郑有良. 波兰小麦主要农艺性状分析[J]. 麦类作物学报,2007,27(2):216.
Dong P, Li W, Zheng Y L. Analysis on the agronomic traits of *Triticum polonicum* L. [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2007, 27(2): 216.