

442 份青稞种质资源农艺性状遗传多样性分析与优异种质筛选

周佳浩^{1,2} 王 燕^{1,3} 杨明奇^{1,2} 谢润东^{1,3}
姚有华^{1,3} 吴昆仑^{1,2,3} 姚晓华^{1,3}

(¹青海大学农林科学院, 810016, 青海西宁; ²青海大学农牧学院, 810016, 青海西宁;

³青海省青稞遗传育种重点实验室/国家麦类改良中心青海青稞分中心/青藏高原种质资源研究与利用实验室, 810016, 青海西宁)

摘 要 为研究青藏高原青稞种质资源关键农艺性状的遗传多样性, 基于来自中国青海、西藏、四川、甘肃、云南和国外的 442 份青稞种质资源, 分析 8 个籽粒性状 (籽粒面积、粒长、粒宽、粒厚、籽粒直径、籽粒圆度、千粒重、籽粒硬度) 和 4 个株型性状 (株高、穗下节间长、穗长、芒长) 的表型遗传多样性, 并筛选优异种质。结果表明, 各性状均符合正态分布, 变异系数在 4.31%~32.70%, 其中, 芒长的变异最为显著, 籽粒直径的变异程度最小。遗传多样性指数在 1.84~2.10, 粒宽和籽粒直径的最大, 芒长的最小。相关性分析表明, 各农艺性状间普遍存在相关性, 与千粒重显著相关的性状最多 (9 个), 与株高显著相关的性状最少 (3 个)。主成分分析显示, PC1 的贡献率为 37.621%, 籽粒直径、籽粒面积、粒宽、粒厚和千粒重为主要性状。性状综合分析得分最高的种质为虎达紫、嘎不和胜利白。聚类分析将供试种质资源划分为 5 个类群, 类群 1 种质数量最多 (415 份)、千粒重较大 (43.72 g) 且株高最低 (102.36 cm), 表现出高产和抗倒伏的优异特征。

关键词 青稞; 种质资源; 农艺性状; 遗传多样性; 聚类分析

青稞 (*Hordeum vulgare* L.) 为禾本科大麦属作物, 因其成熟时稃壳与籽粒分离, 所以又称裸大麦^[1]。作为青藏高原地区极具代表性的传统作物, 青稞在该区域的农业生态系统中占据核心地位, 其种植历史悠久, 具有显著的文化与生态适应性价值^[2]。青稞中含有丰富的蛋白质、矿物质、维生素和淀粉等, 是极具营养价值的农作物^[3]。除作为日常食粮外, 青稞由于富含 β -葡聚糖、硒以及多酚类物质, 对于改良饮食结构和改善人体健康状况也有着重要作用^[4]。此外, 青稞作为高寒生态系统中的重要组成部分, 在固定土壤、防止水土流失和维持生态平衡方面发挥着关键作用^[5]。由此可见, 青稞种质资源的性状分析和优异种质筛选对青藏地区人民的饮食、健康和生态具有重要意义。

近年来, 诸多学者结合数学统计方法, 在青稞种质的筛选方面取得了显著进展。牛小霞等^[6]基于逐步回归分析方法, 从 40 份青稞种质的 15 个农艺性状中筛选出株高等 7 个关键性状作为种质资源评

价的核心指标; 卓嘎等^[7]基于西藏地区 310 份青稞种质资源的 6 个重要性状进行遗传多样性分析, 揭示了该地区青稞品种丰富的遗传多样性和显著的地域性差异; 夏腾飞等^[8]则利用聚类分析方法, 对 267 份青稞种质资源的 10 个质量性状和 9 个数量性状进行了综合评价, 成功鉴定出低分蘖、大粒且多穗的高产类群; 刘雅洁等^[9]通过对 75 份青稞种质资源的综合评价, 筛选出优异种质, 为后续育种工作奠定了基础; 旺姆等^[10]对青稞的 6 个表型性状进行综合鉴定, 为未来青稞改良中亲本的选择提供了思路和依据。本研究对 442 份供试青稞种质资源的 12 个农艺性状进行分析, 涵盖性状更全面, 种植规模更大, 研究结果更具普遍性。

青藏高原作为我国青稞的主要种植区, 种植历史悠久, 并且极端的高原气候^[11]使得该地区有着更加丰富的遗传资源。因此, 在青藏高原地区开展青稞种质资源的研究对于加速青稞品种遗传改良进程、筛选优异种质、培育具有优良农艺性状和适应

作者简介: 周佳浩, 研究方向为青稞遗传育种, E-mail: 3525478909@qq.com; 王燕为共同第一作者, 研究方向为青稞遗传育种, E-mail: 1041530613@qq.com

姚晓华为通信作者, 研究方向为青稞遗传育种, E-mail: yaoxiaohua009@126.com; 吴昆仑为共同通信作者, 研究方向为青稞遗传育种, E-mail: wklqaaf@126.com

基金项目: 青海大学科研实力提升专项 (2025KTST09); 青海省科技特派员专项 (2025-NK-P01); 青海大学农牧学院农科拔尖创新人才科研训练项目 (NKX202509)

收稿日期: 2025-05-18; 修回日期: 2025-07-22; 网络出版日期: 2025-10-17

性的新品种有重要意义。本研究以来自中国青海、西藏、四川、甘肃和国外的 442 份青稞种质资源为材料，对 8 个籽粒性状（籽粒面积、粒长、粒宽、粒厚、籽粒直径、籽粒圆度、千粒重、籽粒硬度）和 4 个株型性状（株高、穗下节间长、穗长、芒长）进行遗传多样性分析、相关性分析、主成分分析和聚类分析，并建立线性回归模型，以分析青藏高原青稞的遗传多样性、筛选优良种质以及探索不同性状之间的相关性，为培育优良品种提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

442 份供试青稞品种由中国农业科学院国家作物物质库提供（表 1）。

表 1 供试青稞品种
Table 1 Highland barley varieties tested

编号 Code	品种 Variety	编号 Code	品种 Variety	编号 Code	品种 Variety	编号 Code	品种 Variety	编号 Code	品种 Variety
23_2	肚里黄	23_70	晋内嘎布	23_130	春青稞	23_180	吉丁浅兰	23_255	马绕
23_3	麻青稞	23_71	本地白青稞	23_131	兰六棱	23_181	吉丁	23_256	扎仁
23_4	木选 1 号	23_72	白青稞	23_132	嘎列	23_182	吉丁紫	23_257	扎仁
23_6	湟中瓦兰青稞	23_73	杂青稞	23_133	白青稞	23_183	车多	23_258	扎布那
23_7	湟源 1（黄四棱）	23_77	易贡隆青稞	23_134	苏马	23_185	嘎拉黄	23_259	扎尼玛
23_8	大通瓦兰	23_78	纳沙	23_135	紫六棱	23_186	翁珠	23_260	扎尼嘎不
23_9	乐都青稞	23_80	纳沙	23_136	早熟青稞	23_187	帕当嘎布	23_261	扎瑞
23_11	民和青稞	23_81	门巴青稞	23_137	灰壳	23_188	二季青稞	23_262	木扎
23_12	化隆红青稞	23_82	兰青稞	23_140	黑青稞	23_189	山则青稞	23_263	瓦尼
23_13	循化 4（紫四棱）	23_83	年楚	23_141	杂塘	23_190	乃东兰	23_264	中长侧短紫青稞
23_14	门源白青稞	23_84	六十天	23_142	欧姆兰	23_192	加热白青稞	23_265	中间型大麦
23_15	门源亮兰青稞	23_85	塞包	23_143	六棱	23_193	扎尼马	23_266	长芒白青稞
23_16	祁连花腰青稞（兰四棱）	23_87	嘎基彭错	23_145	白青稞	23_195	耐那	23_267	长芒白青稞
23_17	贵德麻青稞	23_88	嘎不	23_146	乌鸦黑	23_196	欧泽	23_268	长芒白青稞
23_18	察汗乌苏红胶泥	23_89	多布九	23_147	兰青稞	23_198	白密穗	23_270	长芒白青稞
23_20	德令哈青稞	23_91	紫青稞	23_148	吉塘兰	23_199	玛若	23_271	长芒白青稞
23_21	湟中黄青稞	23_93	米如	23_149	索朗紫	23_200	雄马	23_273	长芒青稞
23_22	互助红胶泥	23_97	班那岗白	23_151	黑青稞	23_201	仁进里	23_274	长芒青稞
23_23	互助藏青稞	23_98	通路西卡兰	23_152	黑青稞	23_203	六棱青稞	23_276	长芒密穗
23_24	互助六棱	23_100	酣久马	23_154	长芒白	23_206	紫青稞	23_277	长芒紫青稞
23_25	乐都黑六棱	23_103	白青稞	23_155	本地青稞	23_207	黄青稞	23_278	长芒黑青稞
23_27	循化黑青稞	23_105	索柱	23_156	卡娃胛波	23_210	囊中	23_279	长芒黑青稞
23_28	循化 2 号（紫）	23_106	青稞	23_157	黑青稞	23_211	永 2677	23_280	长芒黑青稞
23_29	循化青稞（紫）	23_107	紫青稞	23_158	耐那	23_214	阳西白	23_281	长芒蓝青稞
23_36	三岩龙本地青稞	23_110	班那岗兰	23_159	黑青稞	23_215	希德白	23_282	什伯赤热
23_39	高山紫黑青稞	23_112	农仁兰	23_160	岬托黄	23_217	库龙黄	23_283	乌久
23_40	巴底春青稞	23_113	白青稞	23_162	白玉	23_218	扎西岗青稞	23_285	玉粒
23_41	松潘灰青稞	23_114	芒六棱	23_163	长勾芒	23_219	穷让黄	23_288	卡热白
23_42	白青稞	23_115	亚加白	23_164	本地青稞	23_222	苏如	23_289	四棱蓝青稞
23_43	小春黑青稞	23_116	吉那	23_165	白青稞	23_223	穷结紫青稞	23_290	生尺马绕
23_44	六棱短芒	23_117	长芒白（冬播）	23_166	哈扎白	23_237	二粒	23_291	白青稞
23_45	巴塘八十天早青稞	23_118	长白冬	23_167	黑青稞	23_240	乃那	23_292	白青稞
23_46	黑水青稞 2 号	23_119	短芒冬播	23_168	紫青稞	23_242	乃那	23_294	白青稞
23_48	色尔古	23_120	白青稞	23_169	普兰白青稞	23_243	乃玛久布	23_295	白青稞
23_52	绿青稞	23_121	加查白壳	23_170	旱地早熟	23_244	乃青	23_297	白青稞
23_54	德甘拉青稞	23_122	紫红大棱	23_171	柳乡兰	23_245	乃拿扎仁	23_298	白青稞
23_60	W8-2	23_123	白青稞	23_172	虎达紫	23_246	乃嘎布	23_299	白青稞
23_64	黑青稞	23_124	查久	23_173	穷让旱地白	23_247	乃嘎布	23_300	白青稞
23_65	列旺色列	23_125	扎尼玛	23_174	荣乡白	23_248	下盐井尼嘎	23_301	白青稞
23_66	查九青稞	23_126	查久	23_176	卡至白	23_250	门勒	23_302	白青稞
23_67	花籽	23_127	那缺黑	23_177	申吉则兰	23_251	门琼-1	23_309	白青稞
23_68	拉木兰青稞	23_128	浪波	23_178	木嘎	23_252	门嘎如乃那	23_311	白青稞
23_69	嘎夏折通	23_129	群体	23_179	郭青	23_254	马若	23_315	尼

续表 1 Table 1 (continued)

编号 Code	品种 Variety	编号 Code	品种 Variety	编号 Code	品种 Variety	编号 Code	品种 Variety	编号 Code	品种 Variety
23_316	尼多	23_374	阿巴住	23_433	紫青稞	23_487	吉定黄	23y_229	2022Y-45-5-6
23_318	尼玛	23_377	青稞	23_434	紫青稞	23_489	早熟青	23y_230	全株黑
23_320	尼卓玛	23_378	青稞	23_436	紫青稞	23_490	冲堆紫	23y_232_1	KL16
23_321	尼满	23_379	青稞	23_437	紫青稞	23_491	江林黄	23y_234	GY027FB0423
23_322	尼嘎	23_380	青稞	23_438	紫青稞	23_493	农木扎	23y_235	甘青 4 号
23_323	尼嘎	23_381	直筒	23_439	紫青稞	23_494	希洞	23Y_237	15-1141
23_324	尼嘎扎仁	23_382	欧久	23_440	紫青稞	23_496	若作青	23y_238	种质库
23_325	加曲尼	23_383	欧子	23_441	紫青稞	23_497	侠洛兰	23y_239	康青糯 1 号
23_326	加卓玛	23_385	旺多	23_442	紫青稞	23_498	春丕青稞	23y_240	糯青稞
23_327	对芒白青稞	23_387	果洛	23_443	紫青稞	23_499	查青没叉	23y_241	肚里黄
23_328	对芒白青稞	23_388	果洛	23_444	紫青稞	23_500	胜利白	23y_242	21Y-14-1
23_329	对芒白青稞	23_389	果洛	23_445	紫青稞	23_1247	翁嘎短芒	23y_245	C2
23_331	对芒紫青稞	23_390	果洛	23_446	紫钩芒青稞	23_1248	蓝青稞	23y_246	08-1127
23_332	对芒紫青稞	23_391	果洛	23_448	黑青稞	23_1249	萨迦兰	23y_248	XZW-011
23_335	对芒黑青稞	23_393	单珍	23_450	短芒白青稞	23_1250	康沙摸布	23y_249	云南红穗
23_336	对芒蓝青稞	23_394	波乃嘎布	23_452	短芒紫青稞	23_1251	白青稞	23y_250	涅如母扎
23_337	母嘎	23_395	泽仁	23_453	短芒紫青稞	23_1252	白青稞	23y_251	达章紫
23_340	扬孙	23_396	查久	23_454	短芒紫青稞	23_1254	青稞	23y_252	白 91-97-3
23_341	共荣白青稞	23_397	查同玛	23_455	强布白	23_1259	六棱紫青稞	23y_253	KL14
23_342	当地黑青稞	23_398	查诀	23_456	蓝白青稞	23_1260	蓝青稞	23y_254	青稞
23_345	全芒紫青稞	23_399	查居	23_457	蓝青稞	23_1262	二道眉紫青稞	23y_255	甘南 0835
23_346	杀热	23_400	钩芒	23_459	蓝青稞	23_1263	六棱白青稞	23y_256	白青稞
23_347	色布车仁	23_402	钩芒青稞	23_461	蓝青稞	23_1264	长芒白青稞	23y_257	陇青 1 号
23_348	羊孙	23_407	奖扎乌日	23_462	蓝青稞	23_1265	长芒红青稞	23y_259	小新紫宅黑
23_349	羊卓木穷	23_408	活勒	23_463	蓝青稞	23_1266	长芒红青稞	23y_262	ZDM6763 洛扎红青稞
23_350	次玛	23_410	热龙黑青稞	23_464	蓝青稞	23_1267	长芒紫青稞	23y_263	紫青稞
23_351	江塘紫青稞	23_411	格木	23_465	嘎木	23_1268	蓝青稞	23y_264	长芒红青稞
23_352	安布	23_412	格西	23_466	嘎日	23_1269	长钩芒紫青稞	23y_266	玉树囊谦
23_354	那居	23_413	格西	23_467	嘎母	23_1270	白青稞	23y_267	阿坝 17423
23_355	红青稞	23_414	索曲	23_468	嘎母	23_1271	白康青	23y_269	蓝青稞
23_356	红青稞	23_415	称仁嘎摸	23_470	嘎孜	23_1273	钩芒紫青稞	23y_271	M169 陈静
23_357	红青稞	23_416	粉红青稞	23_471	嘎夏	23_1274	短芒红胶泥	23y_272	短穗下节
23_358	红青稞	23_417	浪波紫青稞	23_472	嘎夏	23_1276	蓝青稞	23y_273	21Y-14-1 长穗上节
23_360	红青稞	23_418	勒那	23_473	嘎夏	23_1278	德格青稞	23y_274	甘南 0835
23_361	赤欧豆	23_419	勒那	23_474	嘎雄	23_1279	拉绥青稞	23y_305	青稞
23_362	贡乃	23_420	勒那	23_476	擦旺青稞	23_1281	隆孜青稞	23y_306	KL17 塘格木
23_363	贡嘎单琼	23_421	勒勒黑青稞	23_477	藏嘎达仁	23_1282	乃东青稞	23y_309	白青稞
23_364	折巴	23_422	勒嘎	23_478	乃那	23_1283	白四棱	23y_311	化隆红青稞
23_365	花钩芒青稞	23_425	康青	23_479	下康布青	23y_220	M169	23y_312	红青稞
23_366	苏珠五穷	23_426	混在乃庆中	23_480	日古爬顺	23y_221	M190	23y_315	无皮青稞
23_367	来康	23_427	密穗短芒青稞	23_481	长所蓝	23y_222	M147	23y_317	黑青稞-1
23_368	肖孙	23_428	密穗蓝青稞	23_482	巴达摸布	23y_223	M256	23y_320	13-1047
23_369	余孙	23_429	绿青稞	23_483	龙中黄	23y_224	藏青稞	23y_321	13-1408
23_370	间肖刚木	23_430	绿青稞	23_484	尼日欧豆	23y_225	2022Y-45-5-2		
23_371	间肖嘎母	23_431	绿青稞	23_485	加加黄	23y_226	白青稞		
23_372	穷奶	23_432	紫青稞	23_486	对芒青	23y_228	2022Y-45-5-5		

1.2 试验设计

2023 年 3 月将青稞种质播种于青海西宁试验基地（36.73° N，101.75° E）。试验采用随机区组设计，每区组设 3 次重复。每个区组内包含所有待测种质，每份种质设置 1 个小区。小区采用单行点播种植，行长 1.5 m，行距 0.4 m，所有小区在区组

内随机排列，采用常规田间管理。

1.3 测定项目与方法

于供试青稞收获前，使用量尺测定株高、穗下节间长、穗长和芒长。2023 年 7 月收获籽粒并晾干后，每个品种随机挑取约 300 粒完整的种子，采用万深 SC-G 自动考种分析仪测定籽粒性状（籽

粒面积、粒长、粒宽、粒厚、籽粒直径及籽粒圆度），采集图像并分析。每个品种随机挑取 1000 粒完整的种子，采用知种软件（浙江托普云农科技股份有限公司）结合分析天平（南京伯尼塔科学仪器有限公司）测定千粒重；对于不足 1000 粒的材料，计算公式：千粒重=籽粒总重量/籽粒总粒数×1000。采用硬度计（山东盛泰仪器有限公司）测定籽粒硬度。

1.4 数据处理

利用 Excel 2021 软件进行遗传多样性分析，将 12 个农艺性状按每 0.5σ为 1 级分为 10 级，从第 1 级 $[X_i < (\mu - 2\sigma)]$ 到第 10 级 $[X_i > (\mu + 2\sigma)]$ ，每级相对频率用于计算 Shannon-Wiener 遗传多样性指数 (H'):

$H' = -\sum P_i \times \ln P_i$ ($i=1, 2, 3, \cdots, n$)，式中， P_i 表示某性状第 i 级别内的相对频率^[12]。利用 IBM SPSS Statistics 27 和 Origin 2024 软件进行相关性分析、聚类分析及主成分分析，分析前将数据在 IBM SPSS Statistics 27 中进行标准化处理。

2 结果与分析

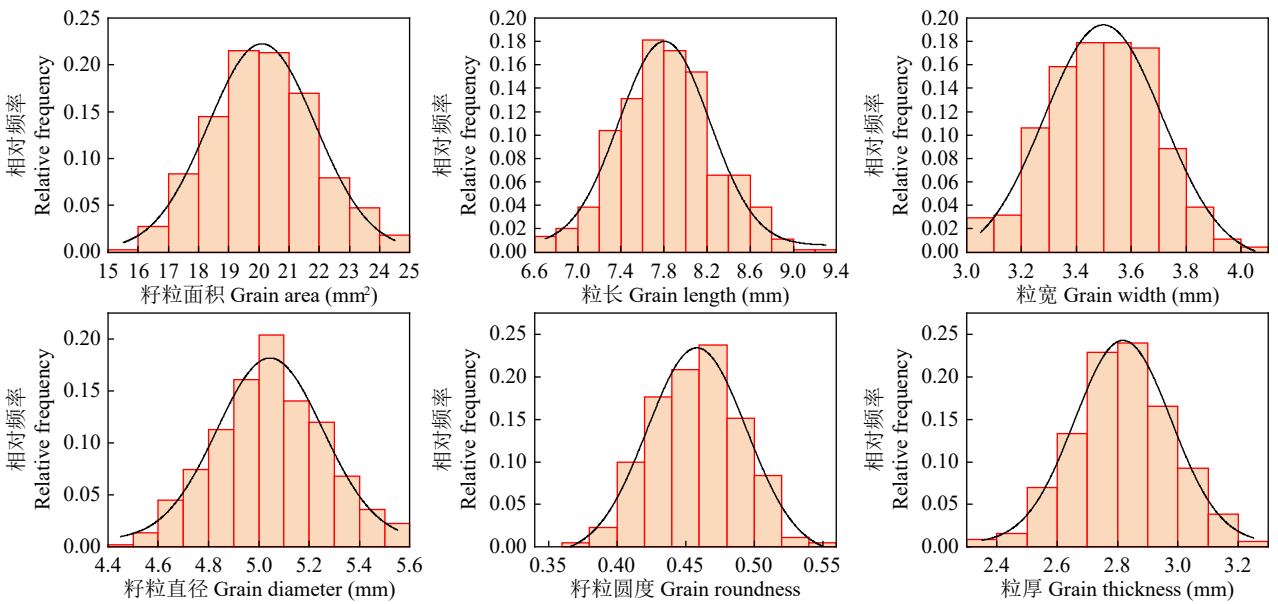
2.1 青稞种质资源的遗传多样性分析和性状分布

由表 2 可知，供试青稞种质 12 个农艺性状的变异系数在 4.31%~32.70%，籽粒直径变异系数最小，芒长变异系数最大，说明芒长更易受遗传和环境因素的影响。各性状的 H' 在 1.84~2.10，粒宽和籽粒直径的 H' 最大，芒长的 H' 最小。

表 2 青稞种质的农艺性状及遗传多样性指数
Table 2 Agronomic traits and genetic diversity index of highland barley germplasm

性状 Trait	最大值 Max.	最小值 Min.	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV (%)	遗传多样性指数 H'
籽粒面积 Grain area (mm ²)	24.58	15.75	20.16	1.73	8.60	2.09
粒长 Grain length (mm)	9.27	6.66	7.82	0.45	5.80	2.06
粒宽 Grain width (mm)	4.03	3.02	3.49	0.19	5.45	2.10
籽粒直径 Grain diameter (mm)	5.57	4.46	5.04	0.22	4.31	2.10
籽粒圆度 Grain roundness	0.55	0.36	0.45	0.03	6.96	2.02
粒厚 Grain thickness (mm)	3.26	2.34	2.81	0.17	5.88	2.07
千粒重 1000-grain weight (g)	60.52	30.04	43.63	5.16	11.84	2.08
籽粒硬度 Grain hardness (N)	273.71	96.75	162.25	28.40	17.51	2.04
株高 Plant height (cm)	133.50	74.16	102.66	9.66	9.41	2.07
穗下节间长 Internode length below ear (cm)	52.20	22.58	35.57	5.25	14.77	2.06
穗长 Spike length (cm)	12.86	5.04	8.04	1.31	16.31	2.03
芒长 Awn length (cm)	14.90	0.00	9.69	3.17	32.70	1.84

对各性状的分布情况进行分析，12 个农艺性状均符合正态分布（图 1）。籽粒面积主要分布在 17.56~22.76 mm²，粒长主要分布在 7.14~8.50 mm，粒宽主要分布在 3.20~3.77 mm，籽粒直径主要分布



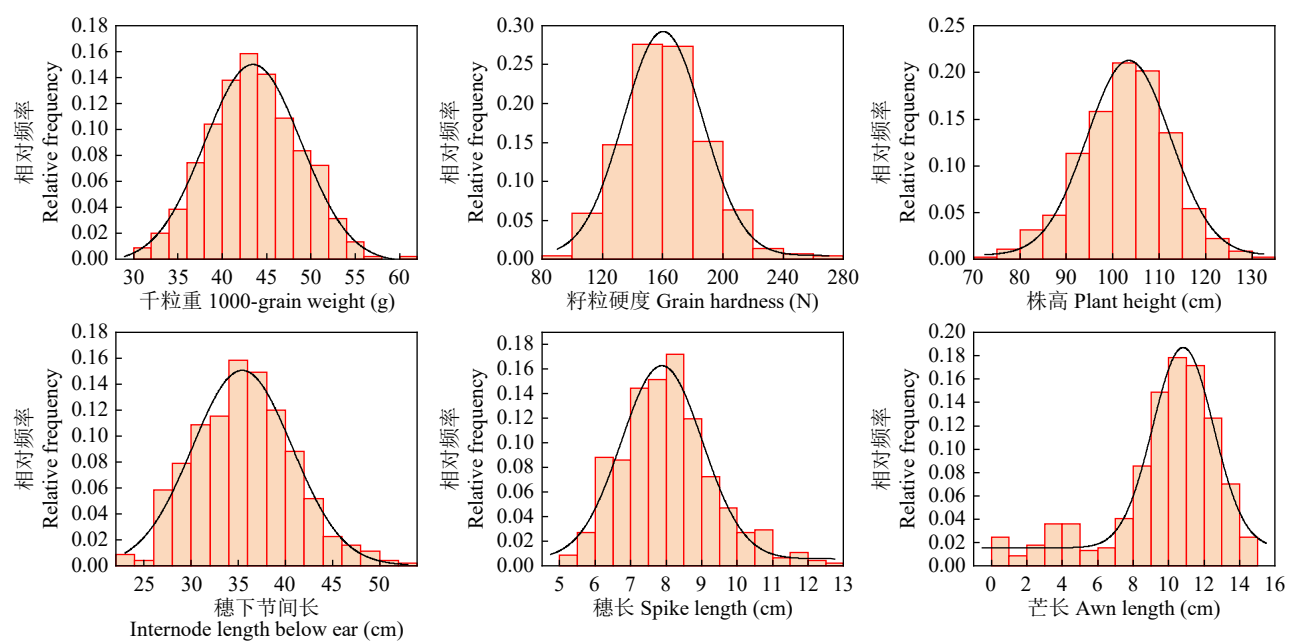


图 1 青稞种质 12 个农艺性状的分布
Fig.1 Distribution of 12 agronomic traits of highland barley germplasm

在 4.72~5.37 mm，籽粒圆度主要分布在 0.41~0.50，粒厚主要分布在 2.57~3.06 mm，千粒重主要分布在 35.88~51.37 g，籽粒硬度主要分布在 119.64~204.86 N，株高主要分布在 88.18~117.15 cm，穗下节间长主要分布在 27.69~43.45 cm，穗长主要分布在 6.07~10.01 cm，芒长主要分布在 8.11~13.66 cm。其中芒长离散程度最大，体现了该群体表型在该性状上的多样性；除千粒重和籽粒硬度外的籽粒性状分布较集中，体现了该群体在这些性状上的稳定性。

2.2 青稞种质各农艺性状间的相关性分析

对 442 份供试青稞种质的 12 个农艺性状进行相关性分析，结果（表 3）表明，籽粒面积与粒长、粒宽、籽粒直径、粒厚、千粒重、籽粒硬度、穗下节间长、穗长和芒长呈极显著正相关；粒长与粒宽、籽粒直径、粒厚、千粒重、穗下节间长、穗长和芒长呈极显著正相关，与籽粒硬度呈显著正相关，而与籽粒圆度呈极显著负相关；粒宽与籽粒直径、籽粒圆度、粒厚、千粒重和芒长呈极显著正相关，与

表 3 青稞种质资源各性状的相关性分析
Table 3 Correlation analysis of different characteristics of highland barley germplasm resources

性状 Trait	籽粒面积 Grain area	粒长 Grain length	粒宽 Grain width	籽粒直径 Grain diameter	籽粒圆度 Grain roundness	粒厚 Grain thickness	千粒重 1000-grain weight	籽粒硬度 Grain hardness	株高 Plant height	穗下节间长 Internode length below ear	穗长 Spike length	芒长 Awn length
籽粒面积 Grain area	1.000											
粒长 Grain length	0.800**	1.000										
粒宽 Grain width	0.770**	0.260**	1.000									
籽粒直径 Grain diameter	0.999**	0.795**	0.776**	1.000								
籽粒圆度 Grain roundness	-0.066	-0.631**	0.573**	-0.057	1.000							
粒厚 Grain thickness	0.550**	0.138**	0.792**	0.557**	0.526**	1.000						
千粒重 1000-grain weight	0.711**	0.408**	0.726**	0.714**	0.242**	0.710**	1.000					
籽粒硬度 Grain hardness	0.136**	0.118*	0.094*	0.136**	-0.005	0.188**	0.281**	1.000				
株高 Plant height	-0.042	0.009	-0.076	-0.042	-0.066	0.058	0.059	0.151**	1.000			
穗下节间长 Internode length below ear	0.140**	0.144**	0.055	0.138**	-0.085	0.117*	0.165**	0.113*	0.522**	1.000		
穗长 Spike length	0.150**	0.286**	-0.062	0.149**	-0.291**	-0.039	0.075	0.116*	0.154**	0.106*	1.000	
芒长 Awn length	0.311**	0.266**	0.213**	0.317**	-0.053	0.140**	0.253**	-0.017	-0.020	-0.023	0.023	1.000

“*”表示在 $P < 0.05$ 水平显著相关；“***”表示在 $P < 0.01$ 水平极显著相关。下同。
“*” indicates significant correlation at $P < 0.05$ level; “***” indicates extremely significant correlation at $P < 0.01$ level. The same below.

籽粒硬度呈显著正相关；籽粒直径与粒厚、千粒重、籽粒硬度、穗下节间长、穗长和芒长呈极显著正相关；籽粒圆度与粒厚、千粒重呈极显著正相关，与穗长呈极显著负相关；粒厚与千粒重、籽粒硬度和芒长呈极显著正相关，与穗下节间长呈显著正相关。通过上述分析发现，千粒重与籽粒硬度、穗下节间长、芒长、籽粒面积、粒长、粒宽、籽粒直径、籽粒圆度和粒厚均呈极显著正相关，因此在青稞种质资源改良过程中应综合考虑不同性状对产量的影响。

2.3 青稞种质资源的聚类分析

对供试青稞种质资源进行聚类分析，442 份材

料分为 5 大类群（图 2），对比各类群农艺性状的平均值（表 4）及其分布（图 3）。类群 1 包含 415 份种质，占供试材料的 93.89%，可代表 442 份青稞种质资源的基准水平，其株高最矮（102.36 cm）且千粒重较大（43.72 g），可从中挑选高产抗倒伏的核心材料；类群 2 包含 12 份种质，其籽粒面积（20.62 mm²）、籽粒直径（5.10 mm）、籽粒硬度（175.34 N）、株高（108.32 cm）和芒长（10.18 cm）均最大，为大粒长芒类群，可作为高产抗虫亲本用于育种研究；类群 3 包含 3 份种质，其粒长最长（8.14 mm），为长粒类群；类群 4 包含 11 份种质，其穗长最长（8.48 cm），为大穗类群，可用于

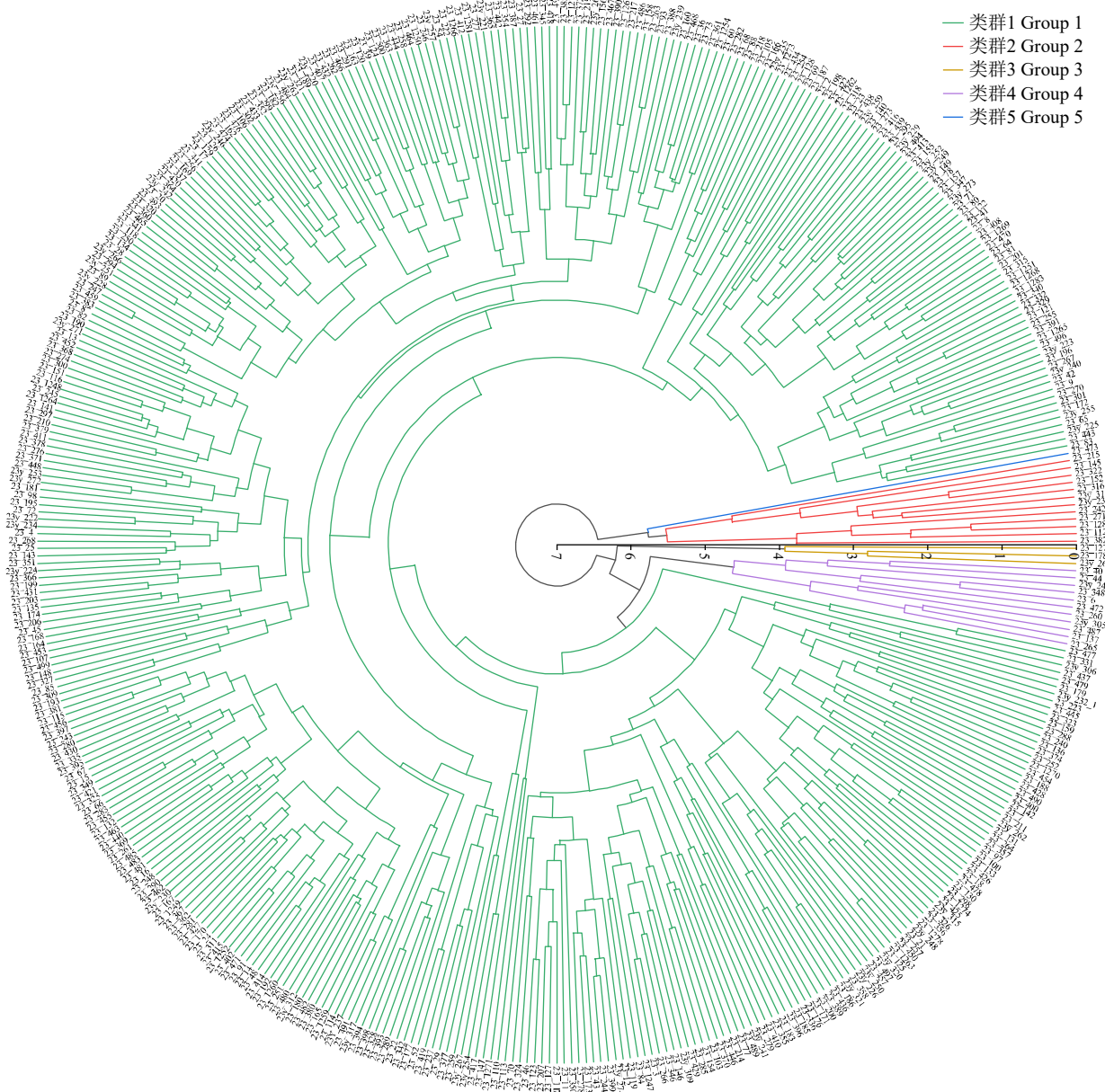


图 2 青稞种质资源聚类图
Fig.2 Clustering diagram of highland barley germplasm resources

表 4 青稞种质资源 5 个类群的农艺性状
Table 4 Agronomic traits of five groups of highland barley germplasm resources

类群 Group	数量 Number	籽粒面积 Grain area (mm ²)	粒长 Grain length (mm)	粒宽 Grain width (mm)	籽粒直径 Grain diameter (mm)	籽粒圆度 Grain roundness	粒厚 Grain thickness (mm)	千粒重 1000-grain weight (g)	籽粒硬度 Grain hardness (N)	株高 Plant height (cm)	穗下节间长 Internode length below ear (cm)	穗长 Spike length (cm)	芒长 Awn length (cm)
1	415	20.17	7.81	3.49	5.04	0.45	2.82	43.72	162.32	102.36	35.52	8.02	9.69
2	12	20.62	8.00	3.48	5.10	0.44	2.79	44.91	175.34	108.32	38.29	8.36	10.18
3	3	20.24	8.14	3.30	5.05	0.41	2.51	39.59	173.63	108.11	39.39	7.88	8.34
4	11	19.19	7.77	3.35	4.92	0.44	2.75	39.84	143.82	106.41	34.11	8.48	9.70
5	1	20.26	7.57	3.65	5.06	0.49	3.00	45.16	144.92	103.60	30.72	7.99	9.86

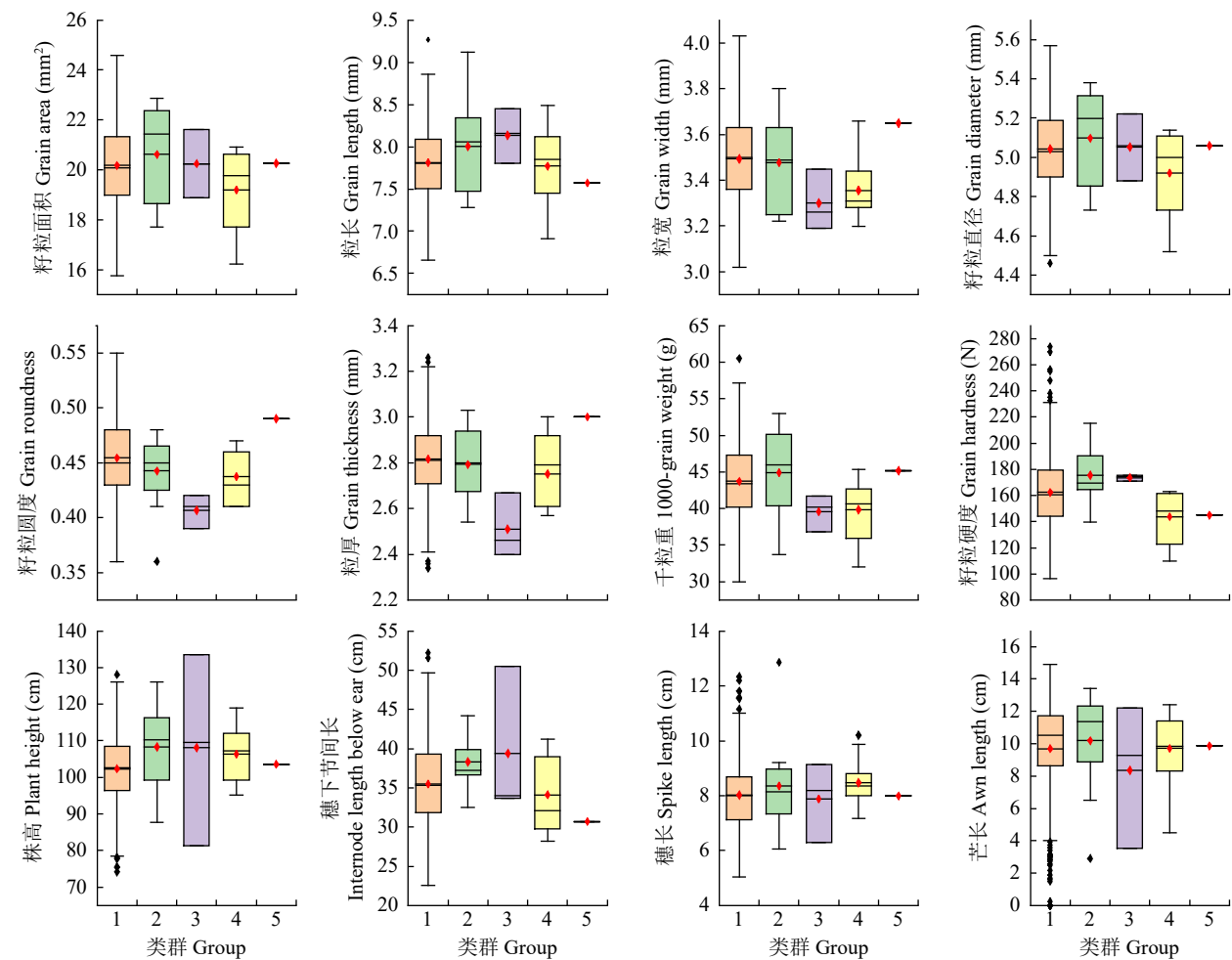


图 3 青稞种质资源 5 个类群各农艺性状分布
Fig.3 Distribution of agronomic traits in five groups of highland barley germplasm resources

穗长遗传机理的研究；类群 5 包含 1 份种质，其粒宽（3.65 mm）、籽粒圆度（0.49）和粒厚（3.00 mm）均最大，籽粒直径较大（5.06 mm）且粒长最小（7.57 mm），为圆粒类群，可用于籽粒形状的相关研究。

2.4 青稞种质资源的主成分分析

计算 442 份供试种质资源 12 个农艺性状的隶属函数值，并进行主成分分析（表 5），以每个成分的特征值是否大于 1 作为判断主成分的标准，最

终筛选出 3 个主成分，特征值分别为 4.515、2.258 和 1.607。3 个主成分累计贡献率达 69.827%，可代表供试种质的大部分信息。PC1 的贡献率为 37.621%，特征值为 4.515，主要性状包括籽粒直径、籽粒面积、粒宽、粒厚和千粒重，与籽粒大小有关，性状间关系表明千粒重越大的品种，其籽粒直径、籽粒面积、粒宽和粒厚越大。PC2 的贡献率为 18.813%，特征值为 2.258，主要性状为籽粒圆度和粒长，与籽粒形状有关，性状间关系表明粒长越长

的品种，其籽粒圆度一般越小。PC3 的贡献率为 13.393%，特征值为 1.607，主要性状为株高和穗下节间长，与植株株型有关，性状间关系表明株高越高的品种，其穗下节间长越长。

表 5 青稞种质资源农艺性状的主成分分析
Table 5 Principal component analysis of agronomic traits in highland barley germplasm resources

性状 Trait	PC1	PC2	PC3
籽粒面积 Grain area	0.948	0.195	-0.149
粒长 Grain length	0.652	0.697	-0.199
粒宽 Grain width	0.861	-0.44	-0.035
籽粒直径 Grain diameter	0.951	0.186	-0.149
籽粒圆度 Grain roundness	0.138	-0.944	0.145
粒厚 Grain thickness	0.745	-0.475	0.176
千粒重 1000-grain weight	0.855	-0.152	0.119
籽粒硬度 Grain hardness	0.236	0.062	0.379
株高 Plant height	0.026	0.203	0.821
穗下节间长 Internode length below ear	0.190	0.232	0.743
穗长 Spike length	0.134	0.502	0.172
芒长 Awn length	0.359	0.125	-0.236
特征值 Eigenvalue	4.515	2.258	1.607
贡献率 Contribution rate (%)	37.621	18.813	13.393
累计贡献率 Cumulative contribution rate (%)	37.621	56.434	69.827

2.5 青稞种质资源各农艺性状的综合评价

计算青稞种质资源的 3 个主成分得分（分别用 $F_1\sim F_3$ 表示），公式为： $F_1=0.446X_1+0.307X_2+0.405X_3+0.448X_4+0.065X_5+0.351X_6+0.402X_7+0.111X_8+0.012X_9+0.089X_{10}+0.063X_{11}+0.169X_{12}$ ； $F_2=0.130X_1+0.464X_2-0.293X_3+0.124X_4-0.628X_5-0.316X_6-0.101X_7+0.041X_8+0.135X_9+0.154X_{10}+0.334X_{11}+0.083X_{12}$ ； $F_3=-0.118X_1-0.157X_2-0.028X_3-0.118X_4+0.114X_5+0.139X_6+0.094X_7+0.299X_8+0.647X_9+0.586X_{10}+0.136X_{11}-0.186X_{12}$ ，式中， $X_1\sim X_{12}$ 分别表示籽粒面积、粒长、粒宽、籽粒直径、籽粒圆度、粒厚、千粒重、籽粒硬度、株高、穗下节间长、穗长和芒长。将贡献率权重作为系数计算出每份材料的综合得分（ F 值），442 份青稞种质得分在 -3.407~3.645，排名前 10 位的种质综合得分在 2.577~3.645，综合得分前 3 位的种质分别为虎达紫、嘎不和胜利白（表 6），未来可以以这 3 份材料为核心亲本进行优异种质的培育。

通过逐步回归分析，构建方程预测综合得分 F ： $F=0.000002029+0.253\mu_1+0.260\mu_2+0.134\mu_3+0.252\mu_4-0.112\mu_5+0.130\mu_6+0.208\mu_7+0.128\mu_8+0.167\mu_9+0.202\mu_{10}+0.150\mu_{11}+0.078\mu_{12}$ ， $R^2=1$ ，式中， $\mu_1\sim\mu_{12}$ 分别代表籽粒面积、粒长、粒宽、籽粒直径、

表 6 排名前 10 位的青稞种质资源得分及排序
Table 6 Scores and rankings of the top 10 germplasm resources of highland barley

品种 Variety	F_1	F_2	F_3	F 值 F -value	排名 Ranking
虎达紫 Hudazi	4.966	1.959	2.302	3.645	1
嘎不 Gabu	4.354	1.895	2.842	3.402	2
胜利白 Shenglibai	4.458	3.179	-0.496	3.163	3
嘎夏 Gaxia	4.064	2.298	1.675	3.130	4
乃拿扎仁 Nainazharen	5.382	0.106	0.883	3.098	5
拉木兰青稞 Lamulanqingke	4.642	-0.068	2.937	3.046	6
班那岗兰 Bannaganglan	4.758	0.705	0.857	2.918	7
六十天 Liushitian	4.511	1.059	0.487	2.809	8
紫青稞 Ziqingke	4.063	1.506	1.086	2.803	9
白青稞 Baiqingke	3.040	2.188	1.825	2.577	10

籽粒圆度、粒厚、千粒重、籽粒硬度、株高、穗下节间长、穗长、芒长的隶属函数值，各性状均与综合得分值存在极显著相关性。建立的回归方程未来可用于简化表型性状的筛选标准，为后续青稞种质综合得分的预测提供更加简便的方法。

3 讨论

3.1 青稞种质资源的遗传多样性

性状是基因型与环境因素相互作用的结果，在不同品种和个体中一般会表现出不同程度的差异^[13]。本研究对 442 份青稞种质资源 12 个农艺性状的遗传多样性进行分析，可以了解不同种质资源在同一性状上的差异，有助于挖掘青稞种质特异材料，充分利用其优良基因进行遗传改良，为青稞种质资源鉴定及育种改良提供依据，从而筛选、评价及开发利用青稞新品种^[14]。

表型性状的变异系数可以代表种质资源的离散程度^[15]，本研究中，12 个农艺性状变异系数在 4.31%~32.70%，平均变异系数为 11.63%，表明供试样本间存在明显差异。其中，籽粒直径变异系数最小，芒长变异系数最大，说明芒长存在较多的变异类型，结合前人^[16]有关芒长与抗虫性关系的研究，可将其作为植株抗虫性的指标。 H' 是反映样本遗传多样性的重要指数^[17]，442 份青稞种质的 H' 在 1.84~2.10，其中粒宽和籽粒直径的 H' 最大，芒长的 H' 最小。变异系数也能反映群体遗传多样性，但其与 H' 并无绝对关系，如孔子雯等^[18]在试验中发现变异系数大的性状并不一定伴随高 H' ，在本研究中也出现了这种现象，如粒长的 H' （2.06）小于籽粒直径的 H' （2.10），但粒长的变异系数（5.80%）大于籽粒直径的变异系数（4.31%）。这是由于二者

在数据表现的维度不同所引起的, 变异系数一般表示数量的波动, 而 H' 则是用于表示种类的分布^[19], 因此本研究综合 2 种指标对供试群体的遗传多样性进行综合分析。

3.2 青稞种质资源的相关性和聚类分析

本研究对 442 份青稞种质的 12 个数量性状进行相关性分析, 结果表明, 株高、穗下节间长、穗长均与千粒重呈正相关, 与牛小霞等^[20]的研究结果一致, 由此可将株高、穗下节间长和穗长作为预测千粒重的指标。千粒重与粒宽、粒长呈极显著正相关, 与李赢等^[21]的研究结果一致, 由此可推测改良粒型可同步改良种质的产量性状。此外, 株高与穗下节间长之间存在显著相关性, 由此可推测株高的增加可能会使穗下节间长增大从而减少茎秆基部的弯曲应力, 进而影响抗倒伏能力^[22]。通过相关性分析发现, 青稞不同农艺性状的表型、遗传和变异之间并不是相互独立的, 而是多方面综合作用的结果, 因此在未来的育种工作中应重视多个性状间的互作作用。

聚类分析作为评价育种群体的有效方法, 被广泛应用于作物种质资源多样性研究中^[23]。本研究采用聚类分析将 442 份供试材料分为 5 大类群。类群 1 株高最矮 (102.36 cm), 相较于其他类群拥有更强的抗倒伏能力^[24]; 此外, 类群 1 种质的芒长 (9.69 cm) 和千粒重 (43.72 g) 也处于较高水平, 可有效抵抗虫害^[16]。由此可判断类群 1 为大籽粒、抗倒伏、抗虫害的优良类群, 适合在高海拔多风地区推广种植^[25], 未来可结合分子标记辅助选择等技术, 加速优良性状改良进程或深入研究其生理机制。此外, 类群 1 占总类群的 93.89%, 既体现了青稞种质在一些性状上变异的保守性, 也反映了该群体可能在本研究未涉及的其他性状上存在变异。

3.3 青稞种质资源的主成分分析及性状综合评价

主成分分析是综合考虑多个变量、避免单一变量间相互作用的分析方法, 可用来简化评价体系, 提高评价结果的客观性^[26]。李健^[27]和王晓鸣等^[28]在进行作物农艺性状的综合评价时, 为提高评价结果的准确性, 将主成分分析与隶属函数相结合。本研究通过对 442 份青稞种质资源的 12 个农艺性状进行主成分分析, 量化各性状的贡献率, 发现 4 个主成分的累计贡献率达 69.827%, 其中, PC1 的主要性状为籽粒面积、粒宽、粒厚和千粒重, 且均为正相关, 说明 PC1 与青稞产量密切相关; PC3 的主要性状为株高和穗下节间长, 与植株的株型及抗倒

伏能力密切相关^[24]。为筛选出优异种质, 本试验在此基础上, 结合主成分分析结果, 计算综合得分 F 值, 并对参试种质进行排序, 最终筛选出综合得分排名前 3 位的种质虎达紫、嘎不和胜利白, 其中虎达紫和嘎不为中熟, 胜利白为早熟。对于生长在青藏高原的青稞而言, 较短的生育期可以帮助其规避霜冻等自然灾害, 避免籽粒灌浆受损导致产量下降, 是关键的适应性性状^[29]。这 3 份材料综合得分高且生育期较短, 可作为后续育种工作的核心亲本材料。此外, 本研究利用标准化处理后的表型数据建立线性回归方程, 可用于简化表型性状的筛选标准^[30], 为后续种质综合得分的预测提供了更加简便的方法。本研究不仅构建了青稞种质资源农艺性状综合评价的技术体系, 也为青稞优异种质资源的筛选与高效利用提供了重要的理论依据。

4 结论

系统评价 442 份青稞种质资源的 12 个农艺性状, 解析其表型变异特征。结果表明, 供试青稞种质资源遗传多样性丰富; 基于主成分分析和性状综合评价体系, 筛选出虎达紫、嘎不和胜利白等综合性状优异的种质资源, 未来可在此基础上结合分子标记辅助选择, 从基因层面推动青稞品种改良进程, 也可将类群 1 中的雄马和六棱青稞等品种作为抗逆亲本, 培育适应高原环境的新品种。

参考文献

- [1] 崔永梅, 李洁, 张丽, 等. 青稞种质资源抗旱性鉴定评价. 植物遗传资源学报, 2025, 26(3): 519-542.
- [2] 张赛, 谭泽敏, 侯璐. 2 个青稞种质资源抗条纹病基因遗传分析. 青海科技, 2025, 32(2): 187-193.
- [3] Li Y, You M, Liu H B, et al. Comparison of distribution and physicochemical properties of β -glucan extracted from different fractions of highland barley grains. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 189: 91-99.
- [4] 邓鹏, 张婷婷, 王勇, 等. 青稞的营养功能及加工应用的研究进展. 中国食物与营养, 2020, 26(2): 46-51.
- [5] 曾兴权, 王玉林, 原红军, 等. 青稞高原适应性的多组学研究进展与展望. 西藏农业科技, 2025, 47(1): 2-9.
- [6] 牛小霞, 陈娟, 柳小宁, 等. 40 份青稞种质资源农艺和品质性状的综合评价及评价指标筛选. 江苏农业科学, 2023, 51(3): 88-93.
- [7] 卓嘎, 伦珠朗杰, 张旭辉, 等. 西藏青稞地方品种主要农艺性状的遗传多样性. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 48-57, 65.
- [8] 夏腾飞, 王蕾, 徐金青, 等. 267 份青藏高原青稞种质材料的表型多样性分析. 西北农业学报, 2018, 27(2): 182-193.
- [9] 刘雅洁, 李茂, 李超, 等. 75 份青稞种质的品质性状综合评价. 麦类作物学报, 2024, 44(7): 855-864.
- [10] 旺姆, 卓嘎, 扎桑, 等. 基于 6 个表型性状的青稞种质遗传多样性分析及综合评价. 作物学报, 2025, 51(6): 1526-1537.
- [11] Holme I, Dionisio G, Madsen C K, et al. The biotechnology potentials of barley *HvPAPhy a* as transgenes providing high phytase activities in grains and straw of mature barley plants.

- Copenhagen: Plant Biotech Denmark Annual Meeting, 2016.
- [12] 谭琳元, 李先德. 基于主成分分析法的中国大麦产业发展影响因素实证分析. 东北农业科学, 2024, 49(3): 80-86.
- [13] 李清超, 张登峰, 李春辉, 等. 西南地区玉米地方种质资源遗传多样性分析及综合评价. 作物杂志, 2024(4): 24-32.
- [14] 姚祝芳, 张雄坚, 杨义伶, 等. 177 份甘薯地方资源表型性状的遗传多样性分析. 作物学报, 2022, 48(9): 2228-2241.
- [15] 赵孟良, 王丽慧, 任延靖, 等. 257 份菊芋种质资源表型性状的遗传多样性. 作物学报, 2020, 46(5): 712-725.
- [16] 杨晓雨, 马指挥, 魏青, 等. 普通小麦的芒研究进展. 耕作与栽培, 2024, 44(5): 73-76, 81.
- [17] Banks-Leite C, Pardini R, Tambosi L R, et al. Using ecological thresholds to evaluate the costs and benefits of set-asides in a biodiversity hotspot. Science, 2014, 345(6200): 1041-1045.
- [18] 孔子雯, 田如霞, 苗如意, 等. 60 份螺丝椒种质资源农艺性状的遗传多样性分析. 中国农业科技导报, 2024, 26(3): 40-47.
- [19] Lozupone C A, Hamady M, Kelley S T, et al. Quantitative and qualitative β diversity measures lead to different insights into factors that structure microbial communities. Applied and Environmental Microbiology, 2007, 73(5): 1576-1585.
- [20] 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. 种子, 2021, 40(8): 68-72, 77.
- [21] 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. 植物遗传资源学报, 2023, 24(5): 1311-1320.
- [22] Tumino G, Voorrips R E, Morcia C, et al. Genome-wide association analysis for lodging tolerance and plant height in a diverse European hexaploid oat collection. Euphytica, 2017, 213: 1-12.
- [23] 王亚飞, 李世景, 徐萍, 等. 黄淮和长江中下游冬麦区小麦品种(系)农艺性状及其聚类分析. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(3): 395-404.
- [24] 张英, 李健, 谢世刚, 等. 青稞抗倒伏因素及研究现状. 耕作与栽培, 2022, 42(6): 138-139, 150.
- [25] 贾巧君. 大麦半矮秆基因 *sdw1/denso* 的克隆与功能分析. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [26] Yang T, Wang X R. Evaluation of the plant landscape suitability in mountain parks based on principal component analysis: a case study of Guiyang City. Agronomy Journal, 2021, 113(2): 760-773.
- [27] 李健. 青稞种质资源遗传多样性研究现状. 南方农业, 2021, 15(2): 231-232.
- [28] 王晓鸣, 邱丽娟, 景蕊莲, 等. 作物种质资源表型性状鉴定评价: 现状与趋势. 植物遗传资源学报, 2022, 23(1): 12-20.
- [29] 李璠, 校瑞香, 严应存, 等. 气候变化对青海省青稞物候期的影响. 麦类作物学报, 2022, 42(6): 755-763.
- [30] Tian W, Li Z C, Wang L, et al. Comprehensive evaluation of apple germplasm genetic diversity on the basis of 26 phenotypic traits. Agronomy, 2024, 14(6): 1264.

Genetic Diversity Analysis of Agronomic Traits and Screening of Elite Germplasm in 442 Highland Barley Germplasm Resources

Zhou Jiahao^{1,2}, Wang Yan^{1,3}, Yang Mingqi^{1,2}, Xie Rundong^{1,3},
Yao Youhua^{1,3}, Wu Kunlun^{1,2,3}, Yao Xiaohua^{1,3}

¹Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining 810016, Qinghai, China;

²College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, Qinghai, China;

³Qinghai Provincial Key Laboratory of Highland Barley Genetics and Breeding / Qinghai Highland Barley Sub-Center of National Wheat Improvement Center / Laboratory of Germplasm Resources Research and Utilization of Qinghai-Tibet Plateau, Xining 810016, Qinghai, China)

Abstract To investigate the genetic diversity of key agronomic traits of highland barley germplasm resources on the Qinghai-Tibet Plateau, the phenotypic genetic diversity of eight grain traits (grain area, grain length, grain width, grain thickness, grain diameter, grain roundness, 1000-grain weight, and grain hardness) and four plant-architecture traits (plant height, internode length below the spike, spike length, and awn length) was analyzed based on 442 highland barley germplasm resources from Qinghai, Tibet, Sichuan, Gansu, Yunnan, and abroad, and elite germplasm were screened. The results showed that all traits followed a normal distribution, with coefficients of variation ranging from 4.31% to 32.70%; among them, the variation of awn length was the most significant, and the degree of variation in grain diameter was the smallest. The genetic diversity indices ranged from 1.84 to 2.10, with grain width and grain diameter being the largest and awn length being the smallest. Correlation analysis indicated that correlations were prevalent among various agronomic traits, with 1000-grain weight significantly correlated with the most traits (9) and plant height significantly correlated with the fewest traits (3). Principal component analysis showed that the contribution rate of PC1 was 37.621%, with grain diameter, grain area, grain width, grain thickness, and 1000-grain weight as the primary traits. The germplasms with the highest scores in the comprehensive trait analysis were Hudazi, Gabu, and Shenglibai. Cluster analysis divided the tested germplasm resources into five groups, with Group 1 having the largest number (415), high 1000-grain weight (43.72 g) and the lowest plant height (102.36 cm), exhibiting elite characteristics of high yield and lodging resistance.

Key words Highland barley; Germplasm resources; Agronomic traits; Genetic diversity; Cluster analysis