

甘孜州青稞种质资源遗传多样性及综合品质分析

余波¹, 江谧², 卢晶¹, 倪粤龙¹, 李强¹, 吴琪¹, 彭镰心¹, 任远航¹

(1. 成都大学农业农村部杂粮加工重点实验室/四川杂粮产业化工程技术研究中心, 四川成都 610000;

2. 四川省甘孜藏族自治州农业科学研究所, 四川甘孜州 626700)

摘要:为筛选鉴定四川省甘孜州优异青稞种质资源,以346份采集于甘孜州的青稞资源为材料,基于其15个农艺性状展开遗传多样性分析与综合品质评价。结果表明,346份青稞材料不同农艺性状变异系数介于7.80%(粒长)~58.05%(种皮颜色)之间,平均变异系数为25.52%。遗传多样性指数介于0.30(卷叶)~2.11(旗叶长),旗叶长、茎秆直径、株高等8个性状遗传多样性指数大于2.0。通过主成分分析提取到的6个主成分累计贡献率为64.931%,其中与青稞穗型和产量相关的性状贡献率较大。根据综合得分(*M*值)筛选出排名前10的材料分别为HV-13、HV-12、HV-190、HV-193、HV-335、HV-112、HV-322、HV-184、HV-188和HV-232,这些材料具有较高的产量性状(平均千粒重为47.62 g)、较饱满的粒型(平均粒宽为3.79 mm,平均粒长为8.06 mm)和较高的光合效率(平均旗叶宽2.92 cm),综合表现优异。经聚类分析,346份材料被划分为5个类群,其中类群II包含的78份材料与其他相比兼具高产和矮秆性状,可为后续青稞育种亲本选择提供优异资源。这说明甘孜州青稞具有较丰富遗传多样性,部分材料综合特征值较优,可用于甘孜青稞优异种质资源的挖掘创制。

关键词: 青稞; 甘孜州; 农艺性状; 统计分析; 遗传多样性; 综合品质

中图分类号: S512.3; S330

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2025)09-1190-14

Genetic Diversity and Comprehensive Quality Analysis of Highland Barley Germplasm Resources in Ganzi Prefecture

YU Bo¹, JIANG Mi², LU Jing¹, NI Yuelong¹, LI Qiang¹, WU Qi¹, PENG Lianxin¹, REN Yuanhang¹

(1. Key Laboratory of Coarse Grain Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chengdu University/ Sichuan Engineering Research Center for Coarse Grain Industrialization, Chengdu, Sichuan 610000, China; 2. Institute of Agricultural Sciences, Ganzi Tibetan Autonomous Prefecture, Sichuan Province, Ganzi, Sichuan 626700, China)

Abstract: In order to screen and identify the excellent highland barley germplasm resources in Ganzi Prefecture, Sichuan Province, 15 agronomic traits of 346 highland barley resources, collected in Ganzi Prefecture, were analyzed. The statistical results showed that the coefficients of variation for different agronomic traits of these resources ranged from 7.80% (grain length) to 58.05% (seed coat color), with the average of variation 25.52%. The genetic diversity index ranged from 0.30 (curled leaf) to 2.11 (flag leaf length). The genetic diversity index of 8 traits was greater than 2.0, including flag leaf length, stem diameter and plant height. The results of principal component analysis showed that the cumulative contribution rate of the six extracted principal components was 64.931%, and the contribution rate of the traits related to the spike type and yield of highland barley was larger. According to the comprehensive score (*M* value), the top 10 materials were HV-13, HV-12, HV-190, HV-193, HV-335, HV-112, HV-322, HV-184, HV-188, and HV-232, which had higher yield traits (average 1 000-grain

收稿日期: 2024-11-25 修回日期: 2025-04-01

基金项目: 甘孜州科技计划资助项目(220015)

第一作者 E-mail: yubo1355@163.com (余波)

通讯作者 E-mail: renyuanhang@cdu.edu.cn (任远航)

weight of 47.62 g) and plump grain shape(average grain width of 3.79 mm and average grain length of 8.06 mm). The photosynthetic efficiency was high(average flag leaf width was 2.92 cm), and the overall performance was excellent. Cluster analysis showed that the 346 accessions were divided into 5 groups. Among them, 78 materials in group II had both high yield and dwarf traits compared with others, which could be used as excellent resources for the subsequent selection of highland barley breeding parents. This study clarified that the highland barley in Ganzi Prefecture has rich genetic diversity, and selected some resources with better comprehensive characteristics, which can provide a theoretical basis for the excavation and creation of excellent germplasm resources of Ganzi highland barley.

Keywords: Highland barley; Ganzi Prefecture; Agronomic traits; Statistical analysis; Genetic diversity; Comprehensive quality

青稞(*Hordeum vulgare* var. *nudum* Hook f.)属禾本科大麦属作物,又称裸大麦^[1],是一种营养丰富、保健功能强的特色杂粮,其作为中国藏区少数的原生、适应性粮食作物,是藏区农牧民的主要口粮^[2],同时近年来也被广泛应用在食品加工^[3]、酿造、饲料及保健产品开发等领域,具有良好的产业发展前景。四川是中国青稞主产区之一,面积/产量仅次于西藏、青海,居中国第三位。四川省青稞现有种植面积约 43 266 hm²,总产量 11.7 万吨,主要集中在甘孜、阿坝两州,其中甘孜州种植面积约 34 533 hm²,产量 9.9 万吨,分别占四川省的 79.8%、84.7%。甘孜州作为四川青稞主产区,种植历史悠久,种质资源丰富^[4],深入开展其青稞资源评价及遗传多样性分析,是了解甘孜州青稞资源遗传背景、发掘优异种质、配置杂交组合等服务新品种选育的重要手段,同时对提高甘孜州青稞供给水平有重要意义。

近年来,基于农艺性状的多态性和品质分析,因其可靠性和稳定性被广泛应用于评估作物的遗传多样性和综合品质。李清照等^[5]对中国西南地区 785 份玉米种质资源的表型性状开展分析,系统评价了其遗传多样性,筛选出 15 份优异的种质资源为后续玉米优质品种选育提供理论依据;张鑫芳等^[6]基于 19 个农艺性状,对来源于不同省份的 210 份板栗资源开展研究,通过主成分及相关性分析等,筛选出了一类出仁率高的大粒加工型优良亲本,为中国板栗优异种质的挖掘提供参考;陈燕华等^[7]对 71 份广西豌豆种质资源的表型遗传多样性进行了分析,筛选出了 14 份优质的豌豆种质,这些种质可作为后续创制豌豆优良新种质的亲本。

目前有关青稞,特别是甘孜州青稞资源多样性及综合品质分析的相关研究还鲜有报道,因此

本研究基于农艺性状对来源于甘孜州的 346 份青稞展开系统分析评价,以了解不同青稞资源的农艺性状特点及遗传背景差异,为后续资源评价和高效利用等工作提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

346 份供试青稞资源:一部分由甘孜藏族自治州农业科学研究所提供,于 2003—2023 年间收集的甘孜州不同地区青稞资源,并定期于甘孜州道孚县八美农业试验场(海拔 3 450 m、30°29′36.51″N,101°28′25.91″E)扩繁保种;另一部分由成都大学于 2019—2023 年收集于甘孜州道孚县、炉霍县、德格县、白玉县、丹巴县、康定市等地,并保存于成都大学农业农村部杂粮加工重点实验室种质资源库。这些资源具体信息见表 1。

1.2 试验设计及试验地概况

2023 年 10 月底在四川简阳市新市镇垣坝村成都大学试验基地进行播种。播种方法为条播,每行播种 1 份材料,每行 14 株,行距 25 cm,株距 25 cm,采用随机区组设计,重复 2 次,常规田间管理。试验基地年平均气温 17 °C,无霜期 300 d 左右。

1.3 农艺性状调查方法

随机抽取青稞成熟期 5 株植株进行 15 个农艺性状(表 2)的统计调查,具体方法参考《大麦种质资源描述规范 and 数据处理标准》^[8]。

1.4 数据处理

运用 SPSS 27.0 软件对各农艺性状逐步开展相关性分析(13 个数量性状)、主成分分析(对卷叶和种皮颜色进行赋值,详见表 2)、线性回归分析和聚类分析。使用 Excel 2010 计算变异系数和遗传多样性指数。

(续表 1 Continued table 1)

编号 Code	资源信息 Resource information	采集地 Place of collection	编号 Code	资源信息 Resource information	采集地 Place of collection
HV-275	地方品种 Landrace	石渠县 Shiqu County	HV-312	农家种 Nongjiazhong	甘孜县 Ganzi County
HV-276	地方品种 Landrace	石渠县 Shiqu County	HV-313	农家种 Nongjiazhong	甘孜县 Ganzi County
HV-277	地方品种 Landrace	石渠县 Shiqu County	HV-314	农家种 Nongjiazhong	甘孜县 Ganzi County
HV-278	地方品种 Landrace	石渠县 Shiqu County	HV-315	农家种 Nongjiazhong	甘孜县 Ganzi County
HV-279	地方品种 Landrace	石渠县 Shiqu County	HV-316	农家种 Nongjiazhong	甘孜县 Ganzi County
HV-280	地方品种 Landrace	石渠县 Shiqu County	HV-317	农家种 Nongjiazhong	甘孜县 Ganzi County
HV-281	地方品种 Landrace	石渠县 Shiqu County	HV-318	农家种 Nongjiazhong	甘孜县 Ganzi County
HV-282	地方品种 Landrace	石渠县 Shiqu County	HV-319	农家种 Nongjiazhong	甘孜县 Ganzi County
HV-283	地方品种 Landrace	石渠县 Shiqu County	HV-320	农家种 Nongjiazhong	甘孜县 Ganzi County
HV-284	地方品种 Landrace	石渠县 Shiqu County	HV-321	农家种 Nongjiazhong	甘孜县 Ganzi County
HV-285	地方品种 Landrace	石渠县 Shiqu County	HV-322	柴青 1 号 Chaiqing1a	甘孜县 Ganzi County
HV-286	地方品种 Landrace	石渠县 Shiqu County	HV-323	农家种 Nongjiazhong	甘孜县 Ganzi County
HV-287	地方品种 Landrace	石渠县 Shiqu County	HV-324	农家种 Nongjiazhong	甘孜县 Ganzi County
HV-288	地方品种 Landrace	石渠县 Shiqu County	HV-325	农家种 Nongjiazhong	甘孜县 Ganzi County
HV-289	地方品种 Landrace	石渠县 Shiqu County	HV-326	农家种 Nongjiazhong	甘孜县 Ganzi County
HV-290	地方品种 Landrace	石渠县 Shiqu County	HV-327	农家种 Nongjiazhong	色达县 Seda County
HV-291	地方品种 Landrace	石渠县 Shiqu County	HV-328	西藏隆子青稞(高) Xizanglongzi barley(high)	色达县 Seda County
HV-292	地方品种 Landrace	石渠县 Shiqu County	HV-329	西藏隆子青稞(矮) Xizanglongzi barley(short)	色达县 Seda County
HV-293	地方品种 Landrace	石渠县 Shiqu County	HV-330	地方品种 Landrace	白玉县 Baiyu County
HV-294	康青 6 号 Kangqing 6	炉霍县 Luhuo County	HV-331	地方品种 Landrace	色达县 Seda County
HV-295	康青 7 号-矮 Kangqing 7-short	炉霍县 Luhuo County	HV-332	地方品种 Landrace	色达县 Seda County
HV-296	康青 7 号-高 Kangqing 7-high	炉霍县 Luhuo County	HV-333	地方品种 Landrace	色达县 Seda County
HV-297	康青 9 号 Kangqing 9	炉霍县 Luhuo County	HV-334	地方品种 Landrace	色达县 Seda County
HV-298	道孚黑青稞 Daofuhei barley	道孚县 Daofu County	HV-335	地方品种 Landrace	色达县 Seda County
HV-299	黑六棱 Heiliuleng	道孚县 Daofu County	HV-336	地方品种 Landrace	色达县 Seda County
HV-300	白玉黑青稞 Baiyuhei barley	白玉县 Baiyu County	HV-337	藏青 17(高) Zangqing 17(high)	道孚县 Daofu County
HV-301	农家种 Nongjiazhong	白玉县 Baiyu County	HV-338	藏青 18(矮) Zangqing 18(short)	道孚县 Daofu County
HV-302	藏青 2000 Zangqing 2000	白玉县 Baiyu County	HV-339	藏青 320(高) Zangqing 320(high)	道孚县 Daofu County
HV-303	昆仑 14 号 Kunlun 14	白玉县 Baiyu County	HV-340	藏青 17(矮) Zangqing 17(short)	道孚县 Daofu County
HV-304	昆仑 15 号 Kunlun 15	白玉县 Baiyu County	HV-341	藏青 18(高) Zangqing 18(high)	道孚县 Daofu County
HV-305	昆仑 16 号 Kunlun 16	白玉县 Baiyu County	HV-342	藏青 320(矮) Zangqing 320(short)	道孚县 Daofu County
HV-306	昆仑 17 号 Kunlun 17	白玉县 Baiyu County	HV-343	地方品种 Landrace	道孚县 Daofu County
HV-307	肚里黄 Duli Huang	白玉县 Baiyu County	HV-344	地方品种 Landrace	道孚县 Daofu County
HV-308	农家种 Nongjiazhong	白玉县 Baiyu County	HV-345	地方品种 Landrace	道孚县 Daofu County
HV-309	农家种 Nongjiazhong	白玉县 Baiyu County	HV-346	地方品种 Landrace	道孚县 Daofu County
HV-310	农家种 Nongjiazhong	白玉县 Baiyu County			
HV-311	农家种 Nongjiazhong	甘孜县 Ganzi County			

遗传多样性(Shannon-Wiener diversity index, H')指数的计算:将 15 个农艺性状分为 10 级,从第 1 级 [$X_i < (\mu - 2\sigma)$] 到第 10 级 [$X_i > (\mu + 2\sigma)$], 式中 μ 为平均值, σ 为标准差。每 0.5 σ 为 1 级,每级的相对频率用于计算遗传多样性指数: $H' = -\sum P_i \times \ln P_i$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), 式中 P_i 表示某性状第 i 级别内材料份数占总份数

的百分比。隶属函数值计算方式为: $\mu(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), 式中 $\mu(X_i)$ 为各材料第 i 个性状的隶属函数值, X_i 为各材料第 i 个性状值, X_{\max} 、 X_{\min} 分别为所有参试材料中第 i 个性状的最大值和最小值^[9]。使 Origin 2022 绘制箱线图、聚类树和堆积柱状图。

表2 青稞农艺性状统计
Table 2 Statistics on agronomic traits of highland barley

性状 Trait	记载标准 Record standard
株高 Plant height(PH)/cm	成熟植株从主茎分蘖节到穗顶的高度 Height of mature plants from the main stem tiller node to the top of the spike
旗叶长 Flag leaf length(FLL)/cm	茎秆最顶端穗下第一片叶子的长度 Length of the first leaf under the topmost spike
旗叶宽 Flag leaf width(FLW)/cm	茎秆最顶端穗下第一片叶子的宽度 Width of the first leaf under the topmost spike
旗叶角 Flag leaf angle(FLA)/°	茎秆最顶端穗下第一片叶子与茎秆之间的夹角 Angle between the first leaf under the topmost spike and the stalk
茎秆直径 Stem diameter(SD)/mm	主茎地上部第二节间中部的直径 Diameter of the middle of the second internode above ground of the main stem
节间数 Number of internode(NI)	主茎茎秆上的节间数 Number of internodes on main stem stalks
分蘖数 Number of tillers(NT)	植株从主茎上长出的侧枝数 Number of lateral branches of plants growing from the main stem
穗长 Spike length(SL)/cm	穗轴基部至穗顶部的长度(不包括芒) Length from base of rachis to top of spike (excluding awn)
穗宽 Spike width(SW)/cm	主穗中部的宽度 Width of the middle of the main spike
芒长 Awn length(AL)/cm	植株成熟后其穗部顶尖芒的长度 Length of the top awn of the spike as it matures
粒长 Grain length(GL)/mm	种子成熟后其表面的长度 The length of the surface of the seed as it matures
粒宽 Grain width(GW)/mm	种子成熟后其表面的宽度 The width of the surface of the seed as it matures
千粒重 Thousand kernels weight(TKW)/g	1 000粒自然风干的大麦籽粒的重量 Weight of 1 000 kernels of naturally dried barley
卷叶 Curled leaf(CL)	1=否,2=是 1=No, 2=Yes
种皮颜色 Seed coat color(SCC)	1=黄,2=紫,3=黑,4=黄褐,5=褐,6=黑紫,7=绿 1=yellow, 2=purple, 3=black, 4=yellow-brown, 5=brown, 6=black-purple, 7=green

2 结果与分析

2.1 青稞种质资源的遗传多样性

青稞资源的15个农艺性状变异系数(CV)范围在7.80%~58.05%之间,其中种皮颜色变异系数最大(58.05%),旗叶角次之(50.67%),两个性状的变异幅度均超过50%,表明此二性状可能受种植地区环境影响较大,性状类型较为丰富。粒长(7.80%)、粒宽(8.68%)变异系数相对较小,均不超过10%,遗传特性较为稳定(表3)。青稞15个农艺性状的遗传多样性指数(H')分布在0.30(卷叶)~2.11(旗叶长)之间,其中数值大于2.0的性状有8个,从大到小依次为旗叶长、株高、千粒重、穗长、粒长、茎秆直径、粒宽和芒长。遗传多样性指数越大,表明该性状的遗传差异越大,丰富程度越高^[10]。15个性状中除了旗叶宽、旗叶角、分蘖数、穗宽、卷叶和种皮颜色,其余性状在划分的10

个多样性等级上均有分布(表4)。其中,株高的分布主要集中在第3级到第8级(91.88~136.87 cm),占比达到总种质资源数量的89.74%;旗叶长的分布主要集中在第5级到第8级(18.26~24.26 cm),占比达56.69%;旗叶宽的分布主要集中在第4级到第7级(1.92~3.29 cm),占比达85.47%;旗叶角的分布主要集中在第4级到第7级(25.88°~79.05°),占比达71.79%。旗叶光合性能的优异直接影响到青稞产量高低,供试资源中与旗叶相关的性状多态性丰富,具有较大的改良潜力。

2.2 青稞种质资源数量性状的相关性

对346份供试种质资源的13个数量性状进行相关性分析,结果(表5)表明,总体来看,株型性状与产量性状之间存在不同程度的相关性,如旗叶宽与穗宽($r=0.164$)、粒宽($r=0.208$)和千粒重($r=0.157$)之间呈极显著正相关;芒长与穗长

表 3 346 份青稞材料遗传多样性分析

Table 3 Analysis on the genetic diversity of the 346 highland barley materials

性状 Trait	最小值 Minimum	最大值 Maximum	均值 Average	标准差 Standard deviation	方差 Variance	变异系数 Coefficient of variation/%	遗传多样性指数 H' Diversity index
PH/cm	70.60	148.80	114.37	14.99	224.92	18.67	2.07
FLL/cm	0.00	30.00	19.76	3.00	9.00	24.56	2.11
FLW/cm	0.00	6.24	2.60	0.69	0.47	26.38	1.60
FLA/ $^{\circ}$	0.00	156.00	52.47	26.58	706.75	50.67	1.83
SD/mm	1.36	10.01	6.47	1.32	1.74	20.35	2.02
NI	0.00	6.60	4.91	0.79	0.63	16.14	1.98
NT	5.60	61.60	19.19	6.91	47.78	36.02	1.94
SL/cm	3.30	15.70	8.19	1.87	3.51	22.88	2.05
SW/cm	1.02	4.40	1.87	0.53	0.28	28.49	1.83
AL/cm	0.00	11.81	7.05	2.14	4.57	30.35	2.00
GL/mm	5.84	9.52	7.22	0.57	0.32	7.80	2.05
GW/mm	2.59	4.32	3.55	0.31	0.09	8.68	2.01
TKW/g	17.60	57.20	37.93	7.34	53.82	19.34	2.07
CL	1.00	2.00	1.92	0.28	0.08	14.48	0.30
SCC	1.00	5.00	2.18	1.27	1.60	58.05	1.42

表 4 青稞材料各农艺性状在 10 个多样性等级上的分布情况

Table 4 The distribution of agronomic traits among the highland barley materials across ten diversity grades

性状 Trait	分级占比 Proportion of rating/%									
	1 级 Level 1	2 级 Level 2	3 级 Level 3	4 级 Level 4	5 级 Level 5	6 级 Level 6	7 级 Level 7	8 级 Level 8	9 级 Level 9	10 级 Level 10
PH	3.13	3.42	11.11	13.96	17.66	16.52	16.81	13.68	2.28	1.42
FLL	2.09	3.28	8.66	13.13	16.72	16.72	14.93	11.04	7.16	6.27
FLW	0.00	1.50	0.30	13.77	32.63	23.95	19.46	7.19	0.60	0.60
FLA	0.00	0.31	8.26	15.29	27.83	21.10	12.84	6.42	3.98	3.98
SD	3.47	4.91	7.51	11.27	15.90	24.28	19.65	8.96	2.89	1.16
NI	1.74	3.77	8.41	13.62	15.94	26.96	15.07	9.86	4.06	0.58
NT	0.00	4.06	8.99	16.81	24.06	22.32	11.88	3.48	4.64	3.77
SL	1.16	4.34	11.85	15.90	17.63	19.94	10.69	12.14	4.34	2.02
SW	0.00	0.29	8.12	36.23	15.36	8.99	14.20	7.83	4.64	4.35
AL	3.21	4.08	8.16	8.45	25.07	18.95	15.45	11.08	4.96	0.58
GL	1.73	3.18	10.98	17.05	17.63	18.79	15.32	8.38	4.91	2.02
GW	3.18	4.62	7.23	7.51	25.72	22.25	15.32	7.51	4.91	1.73
TKW	2.89	4.34	8.96	14.45	17.92	19.65	16.76	8.67	4.34	2.02
CL	8.38	0.00	0.00	0.00	0.00	91.62	0.00	0.00	0.00	0.00
SCC	0.00	0.00	0.00	40.46	26.88	0.00	12.72	13.87	0.00	6.07

($r=0.503$)、粒长($r=0.273$)、粒宽($r=0.237$)和千粒重($r=0.319$)分别呈极显著正相关。此外,值得注意的是,千粒重除了与株高相关性没有达到显著水平外,与其他株型性状都显著或极显著相关,与节间数($r=-0.160$)呈极显著负相关。千粒重是体现种子大小和饱满程度的关键指标,可反映种子质量和影响作物产量^[11]。如长芒青稞相对于短芒、无芒青稞具有更大的光合作用面积、光合效率,在青稞抗倒伏性强的条件下长芒对提高作物产量有积极作用^[12-14]。结合本研究分析

结果,千粒重、芒长分别与其他多数农艺性状极显著相关,在后续优异种质资源评价筛选中应作为重点关注指标。

2.3 农艺性状主成分分析

由表 6 可知,提取的前 6 个主成分因子(PC1~PC6)累计贡献率可达到 64.931%。其中,PC1 的贡献率为 18.877%,特征值为 2.832,PC1 中包含的主要性状旗叶角(0.528)、穗长(0.811)、芒长(0.513)和粒长(0.699)的特征向量绝对值均大于 0.5,可视为青稞的穗型因子。PC2 的贡献率为

表 5 青稞材料农艺性状相关性
Table 5 Correlation analysis between the agronomic traits of the highland barley materials

性状 Trait	PH	FLL	FLW	FLA	SD	NI	NT	SL	SW	AL	GL	GW	TGW
PH	1												
FLL	0.135*	1											
FLW	-0.018	0.640**	1										
FLA	0.146**	0.244**	0.120*	1									
SD	0.036	-0.039	0.038	0.128*	1								
NI	0.230**	0.185**	0.020	0.049	-0.145**	1							
NT	0.213**	-0.020	-0.147**	0.091	0.099	0.032	1						
SL	0.226**	0.192**	0.082	0.294**	0.084	0.067	0.051	1					
SW	-0.111*	0.067	0.164**	-0.095	0.031	0.055	-0.159**	0.048	1				
AL	0.089	0.113*	0.016	0.301**	0.223**	-0.142**	0.074	0.319**	-0.077	1			
GL	0.129*	0.292**	0.133*	0.245**	0.096	0.090	0.035	0.503**	-0.013	0.273**	1		
GW	-0.184**	0.088	0.208**	0.052	0.197**	-0.062	-0.147**	0.049	0.230**	0.237**	0.148**	1	
TKW	-0.101	0.112*	0.157**	0.130*	0.194**	-0.160**	-0.121*	0.318**	0.203**	0.319**	0.337**	0.662**	1

* 和 ** 分别表示 0.05 水平和 0.01 水平显著相关。表 8 同。

* and ** indicate significant correlations at 0.05 and 0.01 levels, respectively. The same in table 8.

表 6 346 份青稞材料农艺性状主成分分析
Table 6 Principal component analysis on the agronomic traits of the 346 highland barley materials

性状 Trait	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
PH(Y ₁)	0.290	-0.264	0.036	0.504	0.409	0.140
FLL(Y ₂)	0.231	0.011	0.855	0.166	-0.030	-0.108
FLW(Y ₃)	0.021	0.149	0.892	-0.042	-0.079	0.128
FLA(Y ₄)	0.528	-0.095	0.264	-0.108	0.224	-0.187
SD(Y ₅)	0.031	0.320	0.022	-0.208	0.666	0.180
NI(Y ₆)	0.027	-0.024	0.071	0.836	-0.064	-0.061
NT(Y ₇)	0.077	-0.223	-0.146	0.169	0.586	-0.107
SL(Y ₈)	0.811	0.085	0.007	0.139	-0.005	0.059
SW(Y ₉)	-0.062	0.515	0.047	0.245	-0.293	0.323
AL(Y ₁₀)	0.513	0.208	0.027	-0.285	0.361	-0.119
GL(Y ₁₁)	0.699	0.174	0.135	0.143	0.008	-0.054
GW(Y ₁₂)	0.050	0.855	0.099	-0.099	0.053	-0.044
TKW(Y ₁₃)	0.341	0.789	0.038	-0.131	0.036	-0.070
CL(Y ₁₄)	-0.267	-0.034	0.089	0.066	0.163	0.753
SCC(Y ₁₅)	-0.431	-0.020	0.157	0.255	0.258	-0.616
特征值 Eigen value	2.832	1.932	1.666	1.203	1.099	1.008
贡献率 Contribution/%	18.877	12.881	11.106	8.019	7.326	6.722
累计贡献率 Accumulative contribution/%	18.877	31.758	42.864	50.883	58.209	64.931

12.881%，特征值为 1.932，载荷较高的农艺性状分别为穗宽(0.515)、粒宽(0.855)和千粒重(0.789)，三种性状都与产量相关，可视为产量因子。PC3 的贡献率为 11.106%，特征值为 1.666，囊括主要性状为旗叶形貌特征(旗叶长和旗叶宽)，青稞旗叶对籽粒产量有着决定性的作用，因此 PC3 也可视为一个间接产量因子。PC4 的贡献率为 8.019%，特征值为 1.203，载荷较高的性状为株高与节间数，是植株高度的决定因子。同时由于节间数越多，株高越高，植株越不抗倒

伏，PC4 也可视为另一个间接产量因子。PC5 的贡献率为 7.326%，特征值为 1.099，载荷较大的农艺性状为茎秆直径和分蘖数，两性状都决定着青稞株型的大小，可作为株型因子。分蘖数与青稞产量的关系是一个动态平衡过程，适当的分蘖和抑制分蘖都可以使青稞产量达到最优水平。PC6 的贡献率为 6.722%，特征值为 1.008，包含的主要农艺性状为卷叶和种皮颜色，可作为颜色主因子，且两者特征向量一正一负，相互制约。

2.4 供试材料农艺性状的综合评价

首先将 15 个农艺性状值标准化后带入 6 个主成分中,分别得到各青稞资源 6 个主成分得分。以第一主成分 PC1 为例,PC1 得分的线性方程为: $F_1=0.290Y_1+0.231Y_2+0.021Y_3+0.528Y_4+0.031Y_5+0.027Y_6+0.077Y_7+0.811Y_8-0.062Y_9+0.513Y_{10}+0.699Y_{11}+0.05Y_{12}+0.341Y_{13}-0.267Y_{14}-0.431Y_{15}$)。Y₁~Y₁₅ 依次代表每份资源的株高、旗叶长、旗叶宽、旗叶角、茎秆直径、节数、分蘖数、穗长、穗宽、芒长、粒长、粒宽、千粒重、卷叶和种皮颜色。进一步利用 6 个主成分的贡献率权重(0.291,0.198,0.171,0.124,0.113,0.104),建立用于评价种质的综合值(M 值)的计算公式: $M=0.291F_1+0.198F_2+0.171F_3+0.124F_4+0.113F_5+0.104F_6$)。评分越高,代表该青稞资源的综合表现越佳。结果显示,供试青稞种质资源的综合得分值范围为 0.493~1.699,排名前 10 的资源(得分)分别为 HV-13(1.699)、HV-12(1.568)、

HV-190(1.538)、HV-193(1.529)、HV-335(1.475)、HV-112(1.473)、HV-322(1.469)、HV-184(1.469)、HV-188(1.466)和 HV-232(1.463)。10 份材料的相关信息如表 7 所示。该 10 份资源平均粒宽为 3.79 mm、平均粒长为 8.06 mm、平均旗叶宽为 2.92 cm,平均千粒重为 47.62 g,各项得分均处于本研究 346 份样本值的十分之一位,综合表现优异。

将 346 份供试材料的 15 个农艺性状与 M 值建立逐步线性回归分析,构建回归方程: $F=(-4.955 \times 10^{-11}+0.277N_1+0.190N_2+0.222N_3+0.274N_4+0.188N_5-0.106N_6+0.161N_7+0.243N_8+0.172N_9+0.144N_{10}+0.123N_{11}+0.187N_{12}+0.105N_{13}+0.035N_{14}+0.029N_{15})$,R²=1。式中 F 代表综合得分 M 值,N₁~N₁₅ 依次代表的性状为穗长、粒宽、旗叶长、粒长、芒长、种皮颜色、株高、千粒重、旗叶角、茎秆直径、穗宽、旗叶宽、节间数、卷叶和分蘖数。经相关分析,综合得分

表 7 10 份青稞材料的主要农艺性状统计

Table 7 Statistics on key agronomic traits of 10 barley materials

性状 Trait	HV-13	HV-12	HV-190	HV-193	HV-335	HV-112	HV-322	HV-184	HV-188	HV-232	均值 Mean value
PH/cm	127.20	108.60	135.40	125.80	129.60	132.40	112.40	132.40	120.60	118.60	124.30
FLL/cm	29.28	26.60	24.28	19.40	23.38	26.14	28.84	20.24	20.84	25.46	24.45
FLW/cm	3.18	3.83	2.64	2.66	2.50	3.15	2.84	2.44	2.58	3.34	2.92
FLA/°	110.40	64.60	76.00	72.80	56.40	57.40	47.00	104.00	76.00	66.00	73.06
SD/mm	7.67	8.01	8.18	7.53	7.05	7.74	7.66	6.40	6.67	6.00	7.29
NI	3.60	3.60	5.40	5.20	6.00	4.40	6.20	6.00	5.80	5.40	5.16
NT	22.00	23.75	18.60	21.00	24.00	22.00	18.40	11.40	19.40	12.25	19.28
SL/cm	13.06	13.08	11.42	10.50	15.70	9.62	10.80	11.34	12.86	10.60	11.90
SW/cm	1.46	1.54	1.42	2.56	2.26	1.32	2.30	1.36	1.60	2.44	1.83
AL/cm	11.06	9.90	8.38	8.12	7.40	10.68	8.90	9.50	8.78	6.50	8.92
GL/mm	8.50	8.28	8.15	8.15	7.73	8.17	8.17	7.69	8.15	7.57	8.06
GW/mm	3.75	3.81	3.67	3.95	3.44	3.69	3.72	4.01	3.72	4.11	3.79
TKW/g	51.40	53.40	50.40	57.00	39.60	43.40	43.80	42.00	42.80	52.40	47.62
CL	2.00	1.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.90
SCC	1.00	1.00	1.00	2.00	1.00	1.00	2.00	1.00	1.00	2.00	1.30

表 8 青稞 15 个农艺性状与表型综合(M 值)间的相关性

Table 8 Correlation between 15 agronomic traits and phenotype synthesis(M value) of highland barley

性状 Trait	相关系数 Correlation coefficient	性状 Trait	相关系数 Correlation coefficient	性状 Trait	相关系数 Correlation coefficient
PH	0.256**	NI	0.079	GL	0.652**
FLL	0.487**	NT	0.008	GW	0.498**
FLW	0.397**	SL	0.654**	TKW	0.650**
FLA	0.465**	SW	0.218**	CL	-0.049
SD	0.306**	AL	0.536**	SCC	-0.317**

M 值与株高 (N_7)、旗叶长 (N_3)、旗叶宽 (N_{12})、旗叶角 (N_9)、茎秆直径 (N_{10})、穗长 (N_1)、穗宽 (N_{11})、芒长 (N_5)、粒长 (N_4)、粒宽 (N_2) 和千粒重 (N_8) 均呈极显著正相关 (表 8), 表明以上农艺性状可作为青稞综合品质评价的关键指标, 在生产中应该重点关注。

2.5 供试材料表型性状的聚类分析

采用系统聚类法绘制聚类树 (图 1), 结果显示, 供试材料被分为 5 个类群。综合表 9 及图 2 可知, 第 I 类群包含 87 份种质, 这类资源的主要特征为茎秆直径较粗 (均值为 6.76 mm), 穗长较大 (均值为 9.23 cm), 芒长较长 (均值为 8.68 cm), 粒长较长 (均值为 7.46 mm)。此类群的特征性状主要与长度相关, 为长穗长粒型类群。第

II 类群包含 78 份资源, 这类资源的主要特征为旗叶宽较宽 (均值为 2.79 cm)、穗宽 (均值为 2.44 cm)、粒宽 (均值为 3.74 mm)、千粒重较大 (均值为 41.67 g), 且株高较矮 (均值为 108.76 cm), 此类群特征性状主要与高产相关, 为高产型群体。第 III 类群包含 68 份资源, 这类资源的主要特征为株高较高 (均值为 118.59 cm), 分蘖数 (均值为 22.22 个) 较多, 株型较为高大, 可能导致抗倒伏能力弱, 且分蘖数过多, 也可能是高产的负调控因素。第 IV 类群包含 84 份资源, 这类资源的主要特征为节间数 (均值为 5.06 个) 最多, 种皮颜色最丰富 (均值为 3.92)。第 V 类群包含 29 份资源, 这类种质的主要特征为旗叶 (均值为 21.16 cm) 较长, 旗叶角 (均值为 66.97°) 较大。

表 9 青稞资源不同类群性状特征
Table 9 Characteristics of different groups of highland barley resources

性状 Trait	平均值 Mean				
	I 类群 Group I	II 类群 Group II	III 类群 Group III	IV 类群 Group IV	V 类群 Group V
PH/cm	115.49	108.76	118.59	115.69	112.40
FLL/cm	20.66	20.18	16.56	20.55	21.16
FLW/cm	2.68	2.79	2.24	2.71	2.44
FLA/°	59.29	49.17	43.32	50.85	66.97
SD/mm	6.76	6.49	6.47	6.22	6.33
NI	4.62	5.03	4.99	5.06	4.85
NT	19.43	16.28	22.22	18.47	20.57
SL/cm	9.23	8.41	7.10	7.52	9.00
SW/cm	1.58	2.44	1.82	1.72	1.77
AL/cm	8.68	6.76	5.30	6.77	7.85
GL/mm	7.46	7.28	6.88	7.10	7.42
GW/mm	3.54	3.74	3.35	3.51	3.57
TKW/g	39.06	41.67	32.60	36.87	40.09
CL	2.00	2.00	2.00	2.00	1.00
SCC	1.43	1.40	1.74	3.92	2.59

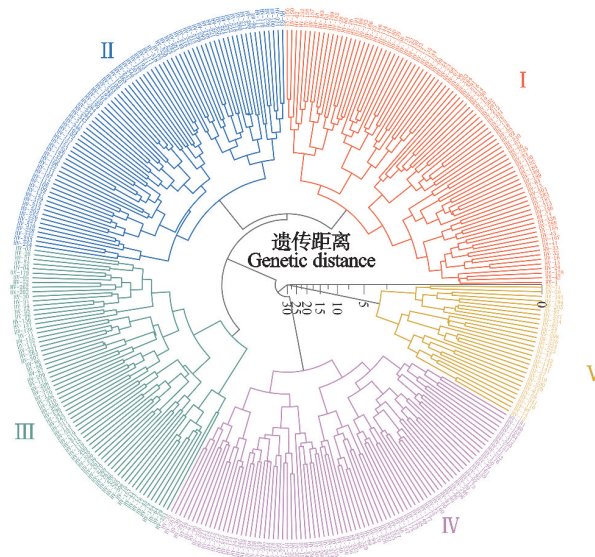
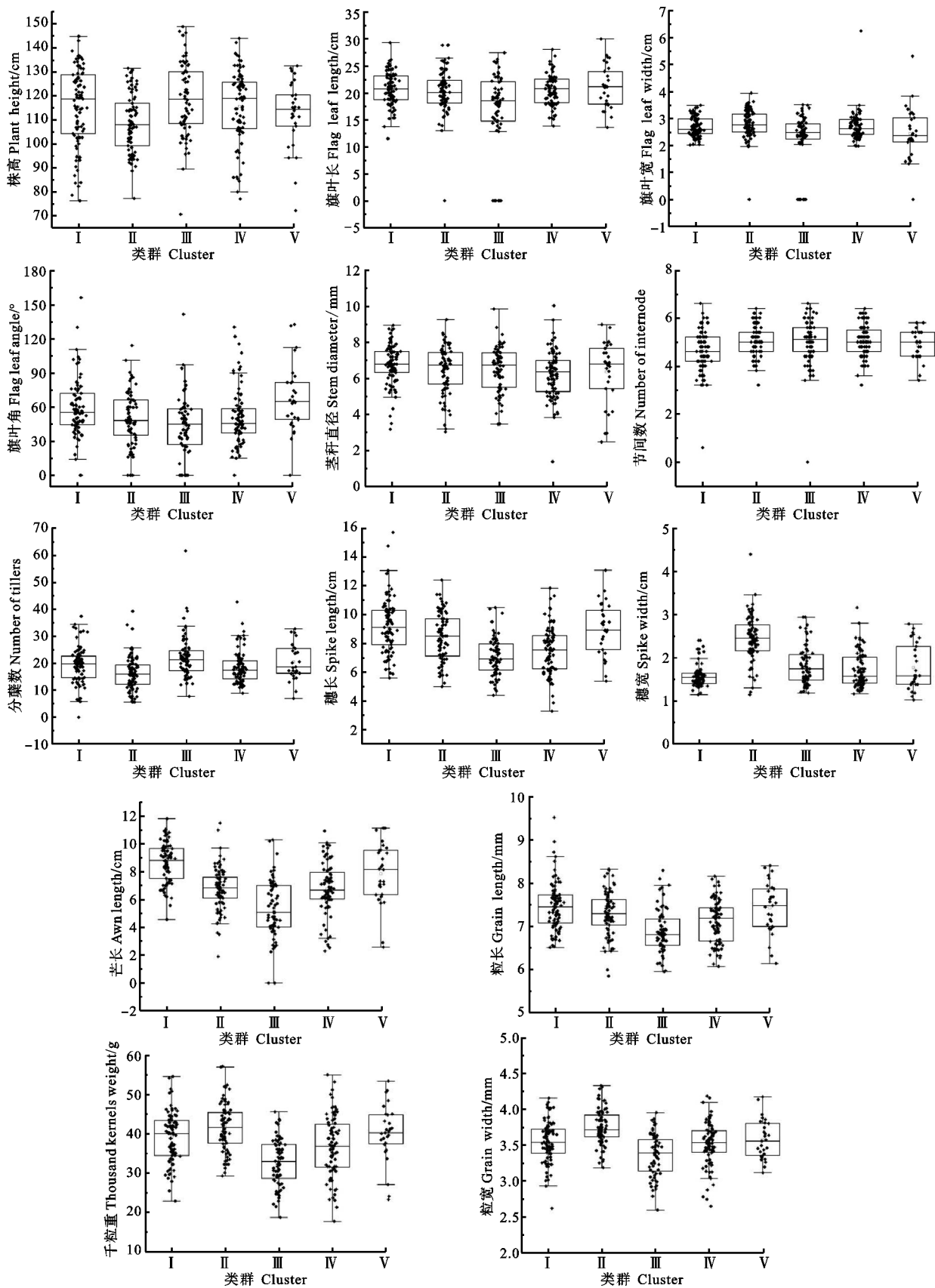


图 1 346 份青稞资源聚类分析
Fig. 1 Cluster analysis of the 346 highland barley resources



箱图两端表示性状的极值范围;◆表示个别极值;□表示均值;—表示中位线。

The ends of the box represent the extreme values of the trait; ◆: Individual extremum; □: Mean value; —: Median line.

图 2 5 个类群 346 份青稞材料 13 个农艺性状的箱线图

Fig. 2 Box plots of 13 quantitative traits of the 346 highland barley materials in five groups

3 讨论

3.1 青稞种质资源的遗传多样性

探究种质资源的遗传多样性一直是品种选育工作的基础和重点,作物农艺性状的多态性分析揭示出不同作物种源的遗传差异,有助于识别出其中较为卓越品种,对于推动品种改良,优良种质资源利用有着重要的意义^[15]。本研究基于甘孜州 346 份青稞资源的 15 个农艺性状展开研究,发现旗叶角、种皮颜色等部分性状变异幅度较大,说明这些性状的种植环境响应性较强。15 个农艺性状中 8 个性状的遗传多样性指数(H')均大于 2.0,表明供试资源种类丰富、多样性较高,有助于育种研究优异种质的筛选。

3.2 青稞种质资源农艺性状的相关性

农艺性状间的相关性分析有评估次要性状对主要性状遗传增益影响的作用,可为育种工作中关键性状的选择提供依据^[16]。杜欢等^[17]通过农艺性状之间相关性分析得出大麦千粒重、穗长等性状是与其他性状普遍关联性强的性状,可作为代表性特征。本研究对甘孜州 346 份青稞种质的 13 个农艺性状的相关性分析发现,株型性状中芒长、旗叶宽和茎秆直径等与产量性状中千粒重都呈极显著正相关,节间数与千粒重呈极显著负相关。因此,在后续青稞品种选育和改良工作中,旗叶宽等表型特征可作为与产量相关性较高的代表性指标重点关注。

3.3 青稞种质资源性状综合评价

将主成分分析和隶属函数法相结合是作物表型性状综合评价的常用手段,该方法通过 PCA 的降维能力提取数据的主要特征,进一步经过隶属函数法赋值实现对综合特征的可视化、可量化表征^[18-19]。本研究在前人研究基础上,建立了甘孜州青稞综合得分的计算方法,并筛选出综合得分排名前 10 的种质资源,其具有较大的千粒重,较大的穗型,较饱满的籽粒,较宽大的旗叶,综合表现优异。进一步为明确种质材料综合得分与具体农艺性状的关联,本研究利用逐步回归分析,得到回归方程: $F = (-4.955 \times 10^{-11} + 0.277N_1 + 0.190N_2 + 0.222N_3 + 0.274N_4 + 0.188N_5 - 0.106N_6 + 0.161N_7 + 0.243N_8 + 0.172N_9 + 0.144N_{10} + 0.123N_{11} + 0.187N_{12} + 0.105N_{13} + 0.035N_{14} + 0.029N_{15})$, 方程 $R^2 = 1$, 拟合度较好,对于青稞种质资源的综合评价具有一定的参

考价值。其中,穗长、粒宽等产量性状对于综合得分有着极显著的影响,在生产中应重点关注。聚类分析可直观表现种质类群间的遗传特性和相互关系^[20],研究结果显示甘孜州 346 份供试材料可划分为 5 类。其中第 II 类群旗叶、穗及粒均较宽,千粒重较大,株高在 5 个类群中最低,且矮秆,显示该类群与其他相比可能具备一定的产量优势,是未来杂交育种骨干亲本材料发掘的优势群体。

本研究基于甘孜州 346 份青稞种质资源的农艺性状,系统开展了其遗传多样性和综合品质评价研究,发现供试材料之间农艺性状变异幅度大、多态性丰富,未来具有较高的资源挖掘利用价值。进一步通过数学统计分析方法建立了甘孜青稞品质综合评价模型,并筛选出 HV-13 等优异材料和优势类群,为后续新品种创制提供理论参考。

参考文献:

- [1] 杨春葆,原红军. 基于转录组与染色质开放性分析青稞对白粉病胁迫的响应[J]. 西南农业学报, 2024, 37(6): 1288.
YANG C B, YUAN H J. Based on transcriptional and chromatin accessibility analysis revealing hulless barley response to powdery mildew stress [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2024, 37(6): 1288.
- [2] 刘雅洁,李茂,李超,等. 75 份青稞种质的品质性状综合评价[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(7): 855.
LIU Y J, LI M, LI C, et al. Comprehensive evaluation on quality traits of 75 highland barley germplasm [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(7): 855.
- [3] 白羿雄,郑雪晴,姚有华,等. 青稞种质资源表型性状的遗传多样性分析及综合评价[J]. 中国农业科学, 2019, 52(23): 4201.
BAI Y X, ZHENG X Q, YAO Y H, et al. Genetic diversity analysis and comprehensive evaluation of phenotypic traits in hulless barley germplasm resources [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(23): 4201.
- [4] 刘廷辉,涂洋,李氏昭,等. 四川省青稞育种研究进展与展望[J]. 大麦与谷类科学, 2023, 40(4): 1.
LIU T H, TU Y, LI S Z, et al. Research progress and prospect of highland barley breeding in Sichuan Province [J]. *Barley and Cereal Sciences*, 2023, 40(4): 1.
- [5] 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[J]. 作物杂志, 2024(4): 24.
LI Q C, ZHANG D F, LI C H, et al. Genetic diversity analysis and comprehensive evaluation of maize landraces in Southwest China [J]. *Crops*, 2024(4): 24.
- [6] 张馨方,郭燕,张树航,等. 210 份板栗种质资源坚果表型性状多样性分析[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(1): 90.
ZHANG X F, GUO Y, ZHANG S H, et al. Diversity analysis of nut phenotypic traits of 210 Chinese chestnut germplasm resources [J]. *Journal of China Agricultural University*,

- 2025,30(1):90.
- [7]陈燕华,唐建淮,罗高玲,等. 71份广西豌豆地方种质资源农艺性状遗传多样性分析[J]. 西南农业学报, 2024, 37(9): 1989.
- CHEN Y H, TANG J H, LUO G L, *et al.* Genetic diversity analysis of agronomic traits in 71 local pea germplasms in Guangxi [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2024, 37(9): 1989.
- [8]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.
- ZHANG J, LIU X. Descriptors and data standard for barley (*Hordeum vulgare* L.) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006.
- [9]董昕,李淑君,杨华,等. 重庆玉米地方品种表型多样性分析[J]. 植物遗传资源学报, 2019, 20(4): 861.
- DONG X, LI S J, YANG H, *et al.* Phenotypic diversity of maize landraces collected from Chongqing [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2019, 20(4): 861.
- [10]孟帅,范光宇,赵治海,等. 181份谷子资源农艺性状分析[J]. 草地学报, 2024, 23(9): 2943.
- MENG S, FAN G Y, ZHAO Z H, *et al.* Agronomic trait analysis of 181 foxtail millet resources [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 23(9): 2943.
- [11]王君,黄杰,葛昌斌,等. 氮素水平对冬小麦旗叶光合特性和子粒灌浆特性以及产量的影响[J]. 河北农业科学, 2024, 28(5): 48.
- WANG J, HAUNG J, GE C B, *et al.* Effect of nitrogen level on the photosynthetic characteristics of flag leaves, grain filling characteristics and yield of winter wheat [J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2024, 28(5): 48.
- [12]杨晓雨,马指挥,魏青,等. 普通小麦的芒研究进展[J]. 耕作与栽培, 2024, 44(5): 73.
- YANG X Y, MA Z H, WEI Q, *et al.* Research progress on awns of common wheat [J]. *Tillage and Cultivation*, 2024, 44(5): 73.
- [13]SOURDILLE P, CADALEN T, GAY G, *et al.* Molecular and physical mapping of genes affecting awning in wheat [J]. *Plant Breeding*, 2002, 121(4): 320.
- [14]ZIFENG G, THORSTEN S. Costs and benefits of awns. [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2016, 67(9): 2533.
- [15]陈燕华,唐建淮,罗高玲,等. 71份广西豌豆地方种质资源农艺性状遗传多样性分析[J]. 西南农业学报, 2024, 37(9): 1989.
- CHEN Y H, TANG J H, LUO G L, *et al.* Genetic diversity analysis of agronomic traits in 71 local pea germplasms in Guangxi [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2024, 37(9): 1989.
- [16]周瑜,李泽碧,黄娟,等. 高粱种质资源表型性状的遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报, 2021, 22(3): 654.
- ZHOU Y, LI Z B, HUANG J, *et al.* Genetic diversity of sorghum germplasms based on phenotypic traits [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2021, 22(3): 654.
- [17]杜欢,马彤彤,侯晓梦,等. 20对大麦株高近等基因系农艺与产量性状差异及相关性分析[J]. 华北农学报, 2016, 31(5): 114.
- DU H, MA T T, HOU X M, *et al.* Difference and correlation analysis of agronomic and yield characters in twenty pairs near-isogenic line of plant height of barley [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2016, 31(5): 114.
- [18]李健. 青稞种质资源遗传多样性研究现状[J]. 南方农业, 2021, 15(2): 231.
- LI J. Research status of genetic diversity of highland barley germplasm resources [J]. *South China Agriculture*, 2021, 15(2): 231.
- [19]曹雪莲,陈影,王迪,等. 毛木耳种质资源表型性状遗传多样性分析及综合评价[J]. 核农学报, 2025, 39(2): 228.
- CHAO X L, CHEN Y, WANG D, *et al.* Genetic diversity and comprehensive evaluation of the phenotypic characteristics of auricularia cornea germplasm resources [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2025, 39(2): 228.
- [20]李颖,张树航,郭燕,等. 211份板栗种质资源花序表型多样性和聚类分析[J]. 中国农业科学, 2020, 53(22): 4667.
- LI Y, ZHANG S H, GUO Y, *et al.* Catkin phenotypic diversity and cluster analysis of 211 Chinese chestnut germplasms [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(22): 4667.