

网络出版时间:2025-08-22

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20250822.1044.002

## 基于营养品质性状的青稞核心种质构建

卢露<sup>1,2</sup>, 徐金青<sup>1</sup>, 王蕾<sup>1</sup>, 甘雅文<sup>3</sup>, 王寒冬<sup>1,2</sup>, 陈同睿<sup>1</sup>, 边海燕<sup>1,2</sup>,  
王一航<sup>1,2</sup>, 唐有林<sup>1</sup>, 尤恩<sup>1,2</sup>, 扎西罗布<sup>3</sup>, 沈裕虎<sup>1</sup>

(1. 中国科学院高原生物适应与进化重点实验室/青海省作物分子育种重点实验室/青藏高原作物种质资源研究与利用实验室/  
中国科学院西北高原生物研究所, 青海西宁 810008; 2. 中国科学院大学生命科学学院, 北京 100049;  
3. 西藏自治区农牧科学院农业研究所, 西藏拉萨 850032)

**摘要:**青稞是青藏高原地区极具经济与生态价值的农作物, 构建基于营养品质的核心种质资源库, 对于推动青稞种质遗传改良与资源高效利用具有重要意义。本研究选取 286 份青稞种质资源, 基于总黄酮含量等 15 个品质性状, 结合 2 种遗传距离、3 种取样方法、7 种取样比例、8 种聚类方法的多维组合策略, 构建青稞核心种质子集。通过对比各种质子集的均值差异率、方差差异率、极差符合率和变异系数变化率, 以均值差异率小于 20%, 且方差差异率、极差符合率和变异系数变化率越大越好的原则, 筛选出构建青稞核心种质的最优取样策略为欧式距离、多次聚类偏离度取样法、10% 取样比例、最短距离法, 构建了含有 28 份基于营养品质性状的青稞核心种质库。进一步分析原始种质与所筛选的核心种质在 15 种营养品质性状上的关键统计参数, 包括均值、方差、极差、变异系数和多样性指数, 通过主成分分析和聚类分析验证了采用此方法所构建核心种质的代表性。结果表明, 核心种质的 15 个营养品质性状均值与原始种质均无显著差异, 各性状的方差均不低于原始种质; 核心种质的平均多样性指数符合率达到 93.12%; 通过主成分检验, 核心种质累计贡献率为 82.04%, 原始种质累计贡献率为 64.34%; 通过聚类分析将 28 份核心种质划分为五个类群。本研究构建的核心种质具有较强的异质性, 在较好保留原始种质的大部分遗传信息的同时能有效代表原始种质, 可用于青稞营养品质研究, 促进种质资源高效利用。

**关键词:** 青稞; 营养品质性状; 核心种质; 种质资源

中图分类号: S512.3; S330

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2026)03-0321-10

## Construction of Core Germplasm of Hulless Barley Based on Nutritional Quality Traits

LU Lu<sup>1,2</sup>, XU Jinqing<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>, GAN Yawen<sup>3</sup>, WANG Handong<sup>1,2</sup>, CHEN Tongrui<sup>1</sup>,  
BIAN Haiyan<sup>1,2</sup>, WANG Yihang<sup>1,2</sup>, TANG Youlin<sup>1</sup>, YOU En<sup>1,2</sup>, ZHAXI Luobu<sup>3</sup>, SHEN Yuhu<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Adaptation and Evolution of Plateau Biota/ Qinghai Province Key Laboratory of Crop Molecular Breeding/  
Laboratory for Research and Utilization of Qinghai-Tibetan Plateau Germplasm Resources, Northwest Institute of Plateau Biology,  
Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai 810008, China; 2. College of Life Sciences, University of Chinese Academy of  
Sciences, Beijing 100049, China; 3. Tibet Academy of Agriculture and Animal Husbandry Science, Lhasa, Tibet 850032, China)

**Abstract:** Hulless barley is a crop of significant economic and ecological value in the Qinghai-Tibet Plateau. Establishing a core germplasm resource bank based on its nutritional quality is crucial for promoting genetic improvement and the efficient utilization of hulless barley germplasm resources. In this study, a total of 286 hulless barley germplasm resources were selected, and a core germplasm

收稿日期: 2025-03-24

修回日期: 2025-06-10

**基金项目:** 国家自然科学基金联合基金区域创新发展联合基金项目(U22A20453); 国家自然科学基金面上项目(32171958); 青海省重点研发与转化计划项目—科技成果转化专项项目(2023-NK-101); 青海省重大科技专项(2023-SF-A5); 国家重点研发计划部省联动项目(2022YFD2301301); 中国科学院青海省人民政府三江源国家公园联合专项(LHZX-2022-03)

**第一作者** E-mail: lulu@nwipb.cas.cn(卢露)

**通讯作者** E-mail: shenyuhu@nwipb.cas.cn(沈裕虎)

subset was constructed based on 15 quality traits, including total flavonoid content. A multidimensional combination strategy was employed, incorporating two genetic distances, three sampling methods, seven sampling ratios, and eight clustering methods. By comparing the mean difference percentage, variance difference percentage, range conformity rate, and coefficient of variation change rate for various subsets, the most optimal sampling strategy for constructing the hulless barley core germplasm was identified. This strategy involved Euclidean distance, a multiple clustering deviation sampling method, a 10% sampling ratio, and the shortest distance method. This resulted in the establishment of a core germplasm bank consisting of 28 hulless barley germplasms based on nutritional quality traits. To validate the representativeness of the constructed core germplasm, key statistical parameters, including the mean, variance, range, coefficient of variation, diversity index, principal component analysis, and clustering analysis, were analyzed for both the original germplasm and the selected core germplasm across the 15 nutritional quality traits. The results showed no significant difference in the mean values of the 15 nutritional quality traits between the core and original germplasm. Moreover, the variance of each trait in the core germplasm was not lower than that of the original germplasm. The average diversity index conformity rate for the core germplasm reached 93.12%. Principal component analysis revealed that the cumulative contribution rate of the core germplasm was 82.04%, compared to 64.34% for the original germplasm. Cluster analysis further classified the 28 core germplasms into five distinct groups. The findings indicate that the core germplasm constructed in this study exhibits significant heterogeneity. It effectively retains most of the genetic information of the original germplasm while also representing the original germplasm adequately. This core germplasm can be utilized for further research on the nutritional quality of hulless barley and will contribute to the efficient use of germplasm resources.

**Keywords:** Hulless barley; Nutritional quality traits; Core germplasm; Germplasm resources

青稞为禾本科大麦属作物,主要分布于中国高海拔区域,如西藏自治区、青海省以及甘肃、四川、云南等省份<sup>[1]</sup>。作为青藏高原地区独具代表性的农作物,青稞不仅是高原居民的主要粮食作物,也是重要的牲畜饲料和酿酒原料<sup>[2]</sup>。青稞富含蛋白质、维生素和膳食纤维,其脂肪和糖含量较低,营养成分构成与现代健康膳食标准相契合<sup>[3]</sup>。青稞的 $\beta$ -葡聚糖含量较高,在降血糖、降血脂及预防和改善Ⅱ型糖尿病等慢性疾病方面有一定作用<sup>[4-5]</sup>;蛋白质含量在10%左右<sup>[6]</sup>,且包含多种氨基酸,尤其是人体所需的8种必需氨基酸<sup>[7]</sup>。青稞富含铁、锌、镁等微量元素,有助于维持人体正常代谢功能<sup>[8]</sup>。凭借其独特的营养品质与药食兼用的特点,青稞备受功能食品及保健品市场的青睐。因此,开展青稞营养品质的研究具有重要经济价值,这也是青稞种质资源利用与遗传改良的重要研究方向。

青稞种质资源一般包括野生材料、地方品种和育成品种(系)三大类。随着青稞种质资源鉴定与评价体系的不断完善和深入发展,种质资源的

有效采集、妥善保存及合理利用,已成为该领域管理与科研工作的重点议题。1984年, Frankel<sup>[9]</sup>与 Brown<sup>[10]</sup>两位学者首次系统性地提出了核心种质理论,并对其内涵进行了详细阐述。核心种质是通过科学的取样方法,从大规模种质资源库中筛选出的一个具有代表性的集合,该集合涵盖目标物种的大部分遗传多样性,可显著降低资源的冗余性,从而提高种质资源利用效率<sup>[11-12]</sup>。目前,核心种质已被广泛应用于玉米<sup>[13-14]</sup>、马铃薯<sup>[15-16]</sup>、小麦<sup>[17-18]</sup>、大豆<sup>[19-20]</sup>等多种植物的遗传资源研究。近年来,针对青稞核心种质的研究也取得了重要进展。例如, Xu等<sup>[21]</sup>基于青藏高原地区204份青稞种质,利用覆盖大麦7条染色体的1750个SNP标记,构建了包含41份青稞种质资源的核心种质库,该核心种质库对青稞遗传改良提供了有力支持;胥婷婷等<sup>[22]</sup>利用402份青稞种质的6个农艺性状和42对分子标记数据,建立了由50份代表性样本组成的核心种质库;原红军等<sup>[23]</sup>从收集的1220份青稞种质资源中,通过遗传多样性和群体结构评估,构建了1个青稞核

心种质群体,该群体显著提升了群体最小等位基因频率(minor allele frequency, MAF),也为后续基于核心种质的全基因组关联分析研究及分子育种提供了坚实基础。这些研究成果为青稞核心种质的建立及其在基础研究领域的应用奠定了理论基础。然而,目前聚焦青稞营养品质核心种质的研究鲜有报道。本研究以 286 份青稞种质资源为材料,探讨以青稞营养特性为基础的核心种质构建方法,以期种质资源的系统收集、长期保存及合理利用提供科学支撑和实践参考。

1 材料及方法

1.1 试验材料

以 286 份青稞种质为试验材料,其中地方品种 213 份、野生大麦 19 份、育成品种(系)53 份,主要来源于中国青海、西藏、甘肃等青稞主产区,其中来源于青海和甘肃的种质资源各有 81 份,来源于西藏的种质资源有 73 份。286 份青稞种质材料在 2016 年种植于青海省西宁市城北区大堡子镇吧浪村(37°4′N,101°59′E,海拔 2 655 m),2022 年和 2023 年种植于甘肃省武威市中国科学院西北高原生物研究所武威绿洲现代农业科学研究试验站(37°54′N,102°52′E,海拔 1 512 m)。试验田形状规整、地势平坦、地力均匀,每份材料播

种 2 行,行长 1.5 m,行距 20 cm,每行播种 20 粒。田间试验采用标准施肥方案,并按标准田间管理规范进行日常管理。

1.2 试验方法

1.2.1 营养品质性状的测定

3 个年度种植的青稞材料收获后,经过脱粒清洗,每份种质资源选取 80 g 大小均一、颗粒饱满的籽粒。样品粉碎后,根据不同检测项目的需求进行过筛处理:淀粉含量检测使用 40 目筛;β-葡聚糖、直链淀粉和支链淀粉含量检测使用 100 目筛;总黄酮、γ-氨基丁酸、蛋白质、灰分、脂肪、粗纤维及多酚含量检测使用 60 目筛;维生素 E 含量检测则直接使用粉碎后的样品,无需过筛。取上述步骤获得的筛下物测定总黄酮含量、纤维组分及其含量、脂质含量、蛋白含量、淀粉组分及其含量、灰分含量、β-葡聚糖含量、γ-氨基丁酸含量、多酚含量、α-维生素 E 含量、γ-维生素 E 含量、δ-维生素 E 含量和维生素 E 含量等 15 个营养品质参数,测定方法如表 1 所示。所有指标均 3 次重复;取 3 年均值进行数据分析。

1.2.2 核心种质构建方法

采用 QGA1.0 分析平台<sup>[33]</sup>对 286 份青稞材料进行核心种质构建。通过 2 种遗传距离(欧式距离、马氏距离),结合 3 种取样方法(多次聚类优先取样法、多次聚类偏离度取样法、多次聚类随机

表 1 青稞各营养品质性状测定方法

Table 1 Determination methods for various nutritional quality traits of hulless barley

| 性状 Trait                                                       | 方法 Method                                                                                                                            |
|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 总黄酮含量<br>Total flavonoids content/%                            | 分光光度法 <sup>[24]</sup><br>Spectrophotometry                                                                                           |
| 粗纤维含量<br>Crude fiber content/%                                 | GB/T5009.10-2003《植物类食品中粗纤维的测定》 <sup>[25]</sup><br>GB/T5009.10-2003 “Determination of crude fiber in plant-based foods”               |
| 脂肪含量 Fat content/[g·(100 g) <sup>-1</sup> ]                    | 索氏提取法 <sup>[26]</sup> Soxhlet extraction                                                                                             |
| 蛋白质含量 Protein content/%                                        | 凯氏定氮法 <sup>[27]</sup> Kjeldahl method                                                                                                |
| 淀粉含量 Starch content/%                                          | 酸水解法 <sup>[28]</sup> Acid hydrolysis                                                                                                 |
| 直链淀粉含量 Amylose content/%                                       | 双波长分光光度法 Dual-wavelength spectrophotometry                                                                                           |
| 支链淀粉含量 Amylopectin content/%                                   | 双波长分光光度法 Dual-wavelength spectrophotometry                                                                                           |
| 灰分含量<br>Ash content/%                                          | GB 5009.4-2016《食品安全国家标准食品中灰分的测定》 <sup>[29]</sup><br>GB 5009.4-2016 “National food safety standard-Determination of ash in foods”     |
| β-葡聚糖含量<br>β-glucan content/%                                  | NY/T2006-2011《谷物及其制品中 β-葡聚糖含量的测定》 <sup>[30]</sup><br>NY/T2006-2011 “Determination of β-glucan content in cereals and their products” |
| γ-氨基丁酸含量<br>γ-aminobutyric acid content/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 高效液相色谱法<br>High-performance liquid chromatography                                                                                    |
| 多酚含量<br>Polyphenols content/%                                  | 分光光度法 <sup>[31]</sup><br>Spectrophotometry                                                                                           |
| 维生素 E 含量<br>Vitamin E content/[mg·(100 g) <sup>-1</sup> ]      | 反相高效液相色谱法 <sup>[32]</sup><br>Reversed-phase high-performance liquid chromatography                                                   |

检测指标均由中国科学院西北高原生物研究所的分析测试中心完成。

All analytical determinations were performed by the Testing and Analysis Center of Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences.

取样法)、7 种取样比例(5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%)、8 种聚类方法(最短距离法、可  
变法、可变类平均法、类平均法、离差平方和法、中  
间距离法、重心法、最长距离法),组合上述方法,  
最终获得 336 个基于青稞营养品质的候选核心种  
质子集。进一步通过比较各子集与原始种质在均  
值差异率(MD)、方差差异率(VD)、极差符合率  
(CR)和变异系数变化率(VR)4 个参考指标上的  
表现,对种质子集进行综合评价。筛选标准以  
MD 值较低,同时 VD、CR 和 VR 值较高为优选  
条件,此类子集能够更好地保持原始群体的遗传  
异质性<sup>[34]</sup>;并以“MD<20%,且 CR>80%”的评  
价标准,筛选出可以代表原始种质的种质子集,以  
此确定构建核心种质的最佳取样方法<sup>[35]</sup>。

1.2.3 核心种质评价方法

运用 QGA1.0 分析工具,得到青稞核心种质  
与原始种质的营养品质性状统计学分析结果,包  
括均值、方差、极值、变异系数等统计参数<sup>[11]</sup>;通  
过 Excel 2021 计算青稞营养品质性状的遗传多  
样性指数以及遗传多样性指数符合度;采用 SPSS  
27.0 开展主成分分析,评估核心种质贡献率;利  
用 OriginPro 2025 进行聚类分析。通过以上多元  
分析方法,对青稞核心种质的有效性和原始种质

的代表性进行评价与验证。

2 结果与分析

2.1 构建核心种质的取样策略

本研究通过整合多维度变量策略(包括遗传  
距离、取样方法、取样比例及聚类方法),构建了  
336 个青稞核心种质候选子集;计算 8 种聚类算  
法的参数均值,进一步比较其 MD、VD、CR 和  
VR 值。横向对比不同取样策略的 4 项参数(表  
2),以 MD 值最小化为优选标准,欧式距离下各  
种质子集 MD 均值小于马氏距离,以此标准判断  
出构建青稞核心种质时,采用欧氏距离的构建结  
果表现较优;在确定遗传距离为欧氏距离的条  
件下,3 种取样方法的 CR 值普遍高于 80%,其中  
优先取样法和偏离度取样法的 CR 值普遍高于  
90%,综合表现优于随机取样法。此外,偏离度取  
样法的 MD 均值较优先取样法更低,表现更优。  
基于此,选择偏离度取样法构建核心种质更为合  
理。综合上述分析结果,确定将欧氏距离与多次  
聚类偏离度取样法作为构建青稞核心种质的最  
佳遗传距离和取样方法。继续对 7 种取样比例  
的统计参数进行横向比较分析,根据上述核心种  
质筛选原则,确定 10%为最优取样比例(表 2)。

表 2 多维度组合策略的参数比较  
Table 2 Comparison of parameters in multidimensional combination strategy %

| 遗传距离<br>Genetic<br>distance   | 取样比例<br>Sample<br>ratio | 多次聚类随机取样法<br>Multiple cluster random<br>sampling method |       |       |        | 多次聚类优先取样法<br>Multiple cluster preferred<br>sampling method |       |        |        | 多次聚类偏离度取样法<br>Multiple cluster deviation<br>sampling method |       |       |        |
|-------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------|-------|-------|--------|------------------------------------------------------------|-------|--------|--------|-------------------------------------------------------------|-------|-------|--------|
|                               |                         | MD                                                      | VD    | CR    | VR     | MD                                                         | VD    | CR     | VR     | MD                                                          | VD    | CR    | VR     |
| 欧式距离<br>Euclidean<br>distance | 5                       | 5.83                                                    | 24.17 | 71.24 | 121.40 | 20.00                                                      | 80.00 | 89.64  | 145.36 | 10.00                                                       | 71.67 | 88.14 | 146.17 |
|                               | 10                      | 7.50                                                    | 28.33 | 80.46 | 116.44 | 12.50                                                      | 79.17 | 100.00 | 136.31 | 0.83                                                        | 68.33 | 92.57 | 135.29 |
|                               | 15                      | 5.00                                                    | 20.83 | 84.62 | 112.84 | 9.17                                                       | 70.00 | 100.00 | 127.57 | 1.67                                                        | 71.67 | 94.85 | 127.81 |
|                               | 20                      | 3.33                                                    | 15.83 | 88.11 | 110.93 | 6.67                                                       | 63.33 | 100.00 | 121.62 | 0.83                                                        | 65.83 | 95.91 | 122.52 |
|                               | 25                      | 2.50                                                    | 12.50 | 89.67 | 108.69 | 4.17                                                       | 51.67 | 100.00 | 117.49 | 1.67                                                        | 59.17 | 96.84 | 119.16 |
|                               | 30                      | 0.00                                                    | 12.50 | 91.37 | 108.18 | 5.83                                                       | 41.67 | 100.00 | 114.52 | 0.83                                                        | 55.83 | 97.60 | 117.21 |
|                               | 35                      | 1.67                                                    | 6.67  | 91.53 | 106.40 | 3.33                                                       | 27.83 | 100.00 | 112.94 | 0.00                                                        | 31.67 | 97.88 | 114.24 |
| 均值 Mean                       |                         | 3.69                                                    | 17.26 | 85.29 | 112.13 | 8.81                                                       | 59.10 | 98.52  | 125.12 | 2.26                                                        | 60.60 | 94.83 | 126.06 |
| 欧式距离<br>Euclidean<br>distance | 5                       | 5.83                                                    | 30.00 | 71.48 | 123.40 | 18.33                                                      | 75.00 | 90.93  | 141.61 | 23.33                                                       | 75.00 | 88.03 | 144.87 |
|                               | 10                      | 11.67                                                   | 24.17 | 80.15 | 115.29 | 12.50                                                      | 75.00 | 100.00 | 134.50 | 15.83                                                       | 89.17 | 93.38 | 135.37 |
|                               | 15                      | 6.67                                                    | 25.00 | 84.52 | 112.41 | 13.33                                                      | 70.83 | 100.00 | 126.92 | 8.33                                                        | 85.00 | 95.43 | 128.27 |
|                               | 20                      | 5.00                                                    | 20.83 | 87.53 | 110.66 | 11.67                                                      | 63.33 | 100.00 | 121.55 | 8.33                                                        | 79.17 | 97.30 | 124.02 |
|                               | 25                      | 0.83                                                    | 15.83 | 89.72 | 108.52 | 8.33                                                       | 50.83 | 100.00 | 117.60 | 3.33                                                        | 66.67 | 97.62 | 119.84 |
|                               | 30                      | 0.00                                                    | 14.17 | 91.62 | 107.99 | 4.17                                                       | 37.50 | 100.00 | 114.66 | 0.00                                                        | 60.00 | 98.61 | 118.11 |
|                               | 35                      | 0.00                                                    | 8.33  | 92.25 | 105.78 | 4.17                                                       | 27.50 | 100.00 | 112.47 | 0.00                                                        | 37.50 | 98.82 | 115.05 |
| 均值 Mean                       |                         | 4.29                                                    | 19.76 | 85.32 | 112.01 | 10.36                                                      | 57.14 | 98.70  | 124.19 | 8.45                                                        | 70.36 | 95.60 | 126.50 |

MD:均值差异百分率;VD:方差差异百分率;CR:极差符合率;VR:变异系数变化率。表 3 同。  
MD: Mean difference percentage; VD: Variance difference percentage; CR: Range compliance rate; VR: Coefficient of variation  
change rate. The same in table 3.

综合上述分析,将欧氏距离、10%取样比例及多次聚类偏离度取样法作为构建核心种质的最优组合策略。通过比较不同聚类算法的表现(表 3),发现最短距离法的 MD 值为 0,同时 VD、CR 和 VR 值均保持较高水平。因此,根据核心种质筛选标准,最终确定“欧氏距离+多次聚类偏离度取样法+10%取样比例+最短距离法”为最佳方

案。采用该方法构建的核心种质,其 MD 值为 0, VD 值达 93.33%,CR 值为 95.63%,VR 值为 141.22%。再此方法下构建的青稞核心种质,一共包含 28 份青稞种质资源,其中地方品种 14 份,野生大麦 5 份,育成品种(系)9 份。构建的核心种质来源包括青海、西藏、四川和甘肃等青稞主产区,囊括了大部分原始种质的生态区划范围(表 4)。

表 3 “欧式距离、多次聚类偏离度取样法、10%取样比例”策略下不同聚类方法的差异比较

| Table 3 Comparison of clustering method variations based on the “euclidean distance, multiple clustering deviation sampling, and 10% sampling ratio” strategy |      |       |       | %      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-------|-------|--------|
| 聚类方法 Cluster method                                                                                                                                           | MD   | VD    | CR    | VR     |
| 最短距离法 Single linkage                                                                                                                                          | 0.00 | 93.33 | 95.63 | 141.22 |
| 最长距离法 Complete linkage                                                                                                                                        | 0.00 | 66.67 | 92.21 | 134.84 |
| 中间距离法 Median method                                                                                                                                           | 0.00 | 53.33 | 88.31 | 128.00 |
| 重心法 Centroid method                                                                                                                                           | 6.67 | 46.67 | 92.01 | 132.24 |
| 类平均法 Unweighted pair-group average                                                                                                                            | 0.00 | 60.00 | 90.65 | 133.33 |
| 可变类平均法 Weighted pair-group average                                                                                                                            | 0.00 | 73.33 | 94.81 | 138.52 |
| 可变法 Flexible-beta method                                                                                                                                      | 0.00 | 80.00 | 94.07 | 138.45 |
| 离差平方和法 Ward’s method                                                                                                                                          | 0.00 | 73.33 | 92.90 | 135.75 |

表 4 核心种质的材料类型及建源

| Table 4 Type and sources of core germplasm |                                  |                    |                                                                                                     |
|--------------------------------------------|----------------------------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 编号 Code                                    | 名称 Name                          | 材料类型 Type          | 原产地 Origin                                                                                          |
| G <sub>1</sub>                             | 紫康青 Zikangqing                   | 地方品种 Landrace      | 青海囊谦 Nangqian, Qinghai                                                                              |
| G <sub>2</sub>                             | 6023                             | 育成品种 Bred cultivar | 青海西宁 Xining, Qinghai                                                                                |
| G <sub>3</sub>                             | 3917                             | 育成品种 Bred cultivar | 青海西宁 Xining, Qinghai                                                                                |
| G <sub>4</sub>                             | 洛隆宗 Luolongzong                  | 地方品种 Landrace      | 西藏昌都洛隆县 Luolong, Qamdo, Tibet                                                                       |
| G <sub>5</sub>                             | 白玉青稞 Baiyuqingke                 | 地方品种 Landrace      | 四川白玉 Baiyu, Sichuan                                                                                 |
| G <sub>6</sub>                             | Hip 高蛋白 Hip Gaodanbai            | 育成品种 Bred cultivar | 日本 Japan                                                                                            |
| G <sub>7</sub>                             | 甘青 2 号 Ganqing 2                 | 育成品种 Bred cultivar | 甘肃甘南藏族自治州农业科学研究所<br>Gansu Academy of Agricultural Sciences,<br>Gannan Tibetan Autonomous Prefecture |
| G <sub>8</sub>                             | 9839                             | 育成品种 Bred cultivar | 青海西宁 Xining, Qinghai                                                                                |
| G <sub>9</sub>                             | 9748                             | 育成品种 Bred cultivar | 青海西宁 Xining, Qinghai                                                                                |
| G <sub>10</sub>                            | 互助红长芒 Huzhuhongchangmang         | 地方品种 Landrace      | 青海互助 Huzhu, Qinghai                                                                                 |
| G <sub>11</sub>                            | 循化红青稞 Xunhuahongqingke           | 地方品种 Landrace      | 青海循化 Xunhua, Qinghai                                                                                |
| G <sub>12</sub>                            | 循化红六棱黑青稞 Xunhuahongliulengqingke | 地方品种 Landrace      | 青海循化 Xunhua, Qinghai                                                                                |
| G <sub>13</sub>                            | 大粒 98-714(5) Dali 98-714(5)      | 育成品种 Bred cultivar | 青海西宁 Xining, Qinghai                                                                                |
| G <sub>14</sub>                            | 白浪宗 Bailangzong                  | 地方品种 Landrace      | 西藏日喀则 Shigatse, Tibet                                                                               |
| G <sub>15</sub>                            | 硕般多 Shuobanduo                   | 地方品种 Landrace      | 西藏昌都洛隆县硕督镇<br>Shodu Town, Luolong, Qamdo, Tibet                                                     |
| G <sub>16</sub>                            | 边坝青稞 Bianbaqingke                | 地方品种 Landrace      | 西藏边坝 Bianba, Tibet                                                                                  |
| G <sub>17</sub>                            | Z240                             | 育成品种 Bred line     | 青海西宁 Xining, Qinghai                                                                                |
| G <sub>18</sub>                            | 巴青 1 号 Baqing 1                  | 育成品种 Bred cultivar | 青海牧草良种繁殖场<br>Qinghai Forage Seed Multiplication Farm                                                |
| G <sub>19</sub>                            | 六棱头 Liulengtou                   | 地方品种 Landrace      | 甘肃永登 Yongdeng, Gansu                                                                                |
| G <sub>20</sub>                            | 六棱青稞 Liulengqingke               | 地方品种 Landrace      | 甘肃民勤 Minqin, Gansu                                                                                  |
| G <sub>21</sub>                            | 六棱青稞 Liulengqingke               | 地方品种 Landrace      | 甘肃卓尼 Zhuoni, Gansu                                                                                  |
| G <sub>22</sub>                            | 青稞 Qingke                        | 地方品种 Landrace      | 甘肃永靖 Yongjing, Gansu                                                                                |
| G <sub>23</sub>                            | 861166                           | 野生大麦 Wild barley   | 西藏错那县 Cuona, Tibet                                                                                  |
| G <sub>24</sub>                            | 861723                           | 野生大麦 Wild barley   | 西藏隆子县 Longzi, Tibet                                                                                 |
| G <sub>25</sub>                            | 861800                           | 野生大麦 Wild barley   | 西藏隆子县 Longzi, Tibet                                                                                 |
| G <sub>26</sub>                            | 861822                           | 野生大麦 Wild barley   | 西藏隆子县 Longzi, Tibet                                                                                 |
| G <sub>27</sub>                            | W8-2                             | 野生大麦 Wild barley   | 西藏乃东县 Naidong, Tibet                                                                                |
| G <sub>28</sub>                            | 本地 Bendi                         | 地方品种 Landrace      | 西藏仁布 Renbu, Tibet                                                                                   |

2.2 原始种质与核心种质的统计参数比较

经过比较分析,核心种质与原始种质的 15 个营养品质性状均值差异均不显著( $P>0.05$ )(表 5),表明核心种质资源的整体水平能很好地代表原始种质,具有较高的可靠性。进一步分析得出,核心种质各性状上的方差均不低于原始群体、各性状方差差异均显著( $P<0.05$ )或极显著( $P<0.01$ ),说明核心种质包含的种质资源之间差异大,核心种质异质性强于原始种质。此外,核心种质保留了 15 个营养性状极值中的 6 个,在一定水平上较好地保留了原始种质资源的多样性,且在上述结果中已知核心种质的极差符合度达到 95.63%,说明在性状极值方面,核心种质

仍具有较高的代表性。核心种质间材料的变异系数也均高于原始种质,进一步证明了核心种质材料间的异质性强。上述结果较好地验证了核心种质构建的代表性与合理性。

2.3 原始种质与核心种质多样性指数分析

与原始种质相比,核心种质的香农多样性指数在大部分性状上与原始种质非常接近(表 6)。两类种质多样性符合率平均 93.12%,且除直链淀粉含量外,其他性状的多样性符合率均高于 90%,尤其是脂肪(98.53%)、 $\beta$ -葡聚糖(97.10%)、粗纤维(96.12%)等性状多样性符合率较高,说明核心种质对原始种质多样性的代表性较强,能够较好地反映原始种质的多样性。

表 5 原始种质与核心种质的统计指标比较

Table 5 Comparison of statistical indicators between original germplasm and core germplasm

| 性状<br>Trait                                                                            | 种质<br>Germplasm | 均值<br>Mean | P 值(均值)<br>P value(mean) | 方差<br>Variance | P 值(方差)<br>P value(variance) | 极差<br>Range | 变异系数<br>CV/% |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------|--------------------------|----------------|------------------------------|-------------|--------------|
| 总黄酮<br>Total flavonoids/%                                                              | 原始种质 OG         | 0.24       | 0.08                     | 0.00           | 0.01                         | 0.29        | 20.00        |
|                                                                                        | 核心种质 CG         | 0.26       |                          | 0.00           |                              | 0.28        | 25.00        |
| 粗纤维<br>Crude fiber/%                                                                   | 原始种质 OG         | 2.19       | 0.80                     | 0.04           | 0.00                         | 1.06        | 9.00         |
|                                                                                        | 核心种质 CG         | 2.18       |                          | 0.09           |                              | 1.01        | 14.00        |
| 脂肪<br>Fat/%                                                                            | 原始种质 OG         | 1.64       | 0.14                     | 0.02           | 0.03                         | 0.85        | 8.00         |
|                                                                                        | 核心种质 CG         | 1.69       |                          | 0.03           |                              | 0.75        | 10.00        |
| 蛋白质<br>Protein/%                                                                       | 原始种质 OG         | 12.50      | 0.50                     | 1.01           | 0.00                         | 7.40        | 8.00         |
|                                                                                        | 核心种质 CG         | 12.75      |                          | 3.60           |                              | 7.40        | 15.00        |
| 淀粉<br>Starch/%                                                                         | 原始种质 OG         | 62.83      | 0.66                     | 2.09           | 0.00                         | 8.12        | 2.00         |
|                                                                                        | 核心种质 CG         | 62.64      |                          | 4.54           |                              | 7.87        | 3.00         |
| 直链淀粉<br>Amylose/%                                                                      | 原始种质 OG         | 15.01      | 0.61                     | 1.34           | 0.00                         | 8.55        | 8.00         |
|                                                                                        | 核心种质 CG         | 14.84      |                          | 2.90           |                              | 8.55        | 12.00        |
| 支链淀粉<br>Amylopectin/%                                                                  | 原始种质 OG         | 46.47      | 0.68                     | 3.93           | 0.00                         | 12.47       | 4.00         |
|                                                                                        | 核心种质 CG         | 46.23      |                          | 8.81           |                              | 12.47       | 6.00         |
| 灰分<br>Ash/%                                                                            | 原始种质 OG         | 2.10       | 0.95                     | 0.01           | 0.00                         | 0.78        | 6.00         |
|                                                                                        | 核心种质 CG         | 2.10       |                          | 0.03           |                              | 0.78        | 8.00         |
| $\beta$ -葡聚糖<br>$\beta$ -glucan/%                                                      | 原始种质 OG         | 3.42       | 0.97                     | 0.10           | 0.00                         | 1.96        | 9.00         |
|                                                                                        | 核心种质 CG         | 3.42       |                          | 0.21           |                              | 1.96        | 13.00        |
| $\gamma$ -氨基丁酸<br>$\gamma$ -aminobutyric acid/<br>( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | 原始种质 OG         | 185.84     | 0.50                     | 6 265.57       | 0.00                         | 498.45      | 43.00        |
|                                                                                        | 核心种质 CG         | 201.33     |                          | 13 769.66      |                              | 432.90      | 58.00        |
| 多酚<br>Polyphenols/%                                                                    | 原始种质 OG         | 0.32       | 0.08                     | 0.00           | 0.01                         | 0.23        | 12.00        |
|                                                                                        | 核心种质 CG         | 0.34       |                          | 0.00           |                              | 0.22        | 15.00        |
| $\alpha$ -维生素 E<br>$\alpha$ -vitamin E/<br>[ $\text{mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$ ]  | 原始种质 OG         | 0.72       | 0.88                     | 0.02           | 0.00                         | 0.81        | 19.00        |
|                                                                                        | 核心种质 CG         | 0.72       |                          | 0.04           |                              | 0.76        | 27.00        |
| $\gamma$ -维生素 E<br>$\gamma$ -vitamin E/<br>[ $\text{mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$ ]  | 原始种质 OG         | 0.21       | 0.09                     | 0.01           | 0.04                         | 0.39        | 34.00        |
|                                                                                        | 核心种质 CG         | 0.24       |                          | 0.01           |                              | 0.34        | 38.00        |
| $\delta$ -维生素 E<br>$\delta$ -vitamin E/<br>[ $\text{mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$ ]  | 原始种质 OG         | 0.18       | 0.21                     | 0.00           | 0.00                         | 0.42        | 35.00        |
|                                                                                        | 核心种质 CG         | 0.20       |                          | 0.01           |                              | 0.42        | 51.00        |
| 维生素 E 含量<br>Vitamin E/<br>[ $\text{mg} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$ ]                   | 原始种质 OG         | 0.75       | 0.94                     | 0.02           | 0.00                         | 0.82        | 19.00        |
|                                                                                        | 核心种质 CG         | 0.74       |                          | 0.04           |                              | 0.77        | 26.00        |

OG:Original germplasm; CG:Core germplasm.

表 6 原始种质与核心种质香农多样性指数的比较

Table 6 Comparison of Shannon diversity index between original germplasm and core germplasm

| 性状<br>Traits                  | 多样性指数 Diversity index      |                         | 符合率<br>Consistency rate/% |
|-------------------------------|----------------------------|-------------------------|---------------------------|
|                               | 原始种质<br>Original germplasm | 核心种质<br>Core collection |                           |
| 总黄酮 Total flavonoids          | 1.98                       | 1.86                    | 93.94                     |
| 粗纤维 Crude fiber               | 2.06                       | 1.98                    | 96.12                     |
| 脂肪 Fat                        | 2.04                       | 2.01                    | 98.53                     |
| 蛋白质 Protein                   | 1.98                       | 1.84                    | 92.93                     |
| 淀粉 Starch                     | 2.05                       | 1.96                    | 95.61                     |
| 直链淀粉 Amylose                  | 2.05                       | 1.67                    | 81.46                     |
| 支链淀粉 Amylopectin              | 2.06                       | 1.91                    | 92.72                     |
| 灰分 Ash content                | 2.08                       | 1.99                    | 95.67                     |
| β-葡聚糖 β-glucan                | 2.07                       | 2.01                    | 97.10                     |
| γ-氨基丁酸<br>γ-aminobutyric acid | 1.93                       | 1.81                    | 93.78                     |
| 多酚 Polyphenols                | 1.99                       | 1.82                    | 91.46                     |
| α-维生素 E α-vitamin E           | 2.05                       | 1.85                    | 90.24                     |
| γ-维生素 E γ-vitamin E           | 1.97                       | 1.86                    | 94.42                     |
| δ-维生素 E δ-vitamin E           | 1.90                       | 1.75                    | 92.11                     |
| 维生素 E Vitamin E               | 2.05                       | 1.86                    | 90.73                     |

2.4 原始种质与核心种质主成分分析

通过主成分分析,核心种质的主成分累计贡献率(82.04%)明显高于原始群体的累计贡献率(64.34%)(表 7),说明核心种质能够更大程度地体现样本的遗传多样性。此外,核心种质各主成分间的特征值以及贡献率均明显高于原始种质,说明核心种质更能代表原始种质的变异信息。综上可知,核心种质的构建是合理且有效的。

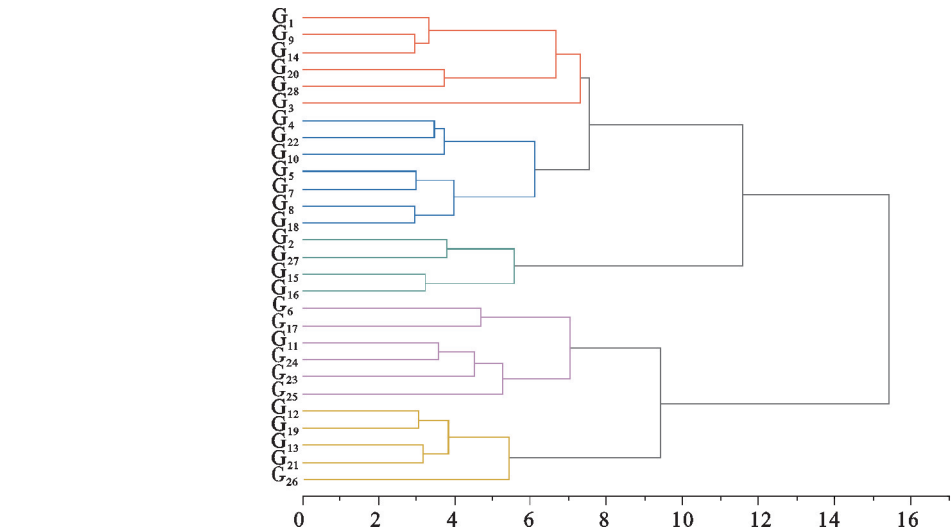
2.5 核心种质聚类分析

对核心种质进行聚类分析,结果(图 1)表明,在遗传距离为 7.4 时,将 28 份核心种质划分为 5 个类群。第一类群包含 6 份种质,以淀粉含量高、蛋白质含量低为特征;第二类群包含 5 份种质,该类群 γ-氨基丁酸含量高;第三类群包含 6 份种质,该类群以蛋白质和脂肪含量高为特征;第四类群包含 4 份种质,该类群维生素 E 含量高;第五类群包含 7 份种质,该类群 β-葡聚糖含量高。

表 7 原始种质与核心种质的主成分分析

Table 7 Principal component analysis of original germplasm and core germplasm

| 主成分<br>Component | 原始种质 Original germplasm |                            |                                    | 核心种质 Core germplasm |                            |                                    |
|------------------|-------------------------|----------------------------|------------------------------------|---------------------|----------------------------|------------------------------------|
|                  | 特征值<br>Eigen value      | 贡献率<br>Contribution rate/% | 累计贡献率<br>Cumulative contribution/% | 特征值<br>Eigen value  | 贡献率<br>contribution rate/% | 累计贡献率<br>Cumulative contribution/% |
| 1                | 3.50                    | 23.31                      | 23.31                              | 3.90                | 26.01                      | 26.01                              |
| 2                | 2.04                    | 13.60                      | 36.91                              | 2.96                | 19.72                      | 45.74                              |
| 3                | 1.71                    | 11.40                      | 48.31                              | 2.00                | 13.35                      | 59.08                              |
| 4                | 1.36                    | 9.08                       | 57.38                              | 1.35                | 8.99                       | 68.07                              |
| 5                | 1.04                    | 6.96                       | 64.34                              | 1.09                | 7.28                       | 75.35                              |
| 6                |                         |                            |                                    | 1.00                | 6.69                       | 82.04                              |



G<sub>1</sub>~G<sub>28</sub> 为表 4 中核心种质编号。  
G<sub>1</sub>—G<sub>28</sub> refer to the codes of the core germplasm in table 4.

图 1 青稞核心种质聚类分析

Fig.1 Cluster analysis of the core germplasm of hulless barley

### 3 讨论

核心种质的构建旨在通过科学的取样策略和遗传距离的计算方法,确保核心种质在保留原始种质遗传多样性和代表性方面达到最佳效果。本研究在此基础上,以青稞的营养品质性状为核心指标,结合欧式距离计算方法和多次聚类优先取样法,探索了一种适用于构建青稞营养品质性状核心种质的高效方法。在构建基于重要性状的核心种质过程中,取样策略的选择是决定核心种质构建是否科学合理的重要步骤,目前大部分作物普遍通过遗传距离、取样方法、聚类方法和取样比例之间的多维度组合,确定构建核心种质库的最佳取样策略。构建核心种质最佳取样策略的评定标准结合了 MD、VD、CR、VR 这四维指标。若满足  $MD < 20\%$ ,同时  $CR > 80\%$ ,VR 和 CR 越大,则核心种质越能代表原始种质群体的遗传多样性<sup>[37-38]</sup>。通过不断优化取样策略和评定标准,构建的核心种质在能够保留原始种质遗传多样性的同时,还能最大限度地提高在实际育种和改良中的应用效果。

构建核心种质时,遗传距离计算方法的选择是影响核心种质代表性与多样性的关键因素之一。常用的距离计算方法包括欧式距离和马氏距离。从现有的研究中发现,大部分作物,如山西大豆<sup>[19]</sup>、酸枣<sup>[39]</sup>等种质资源在构建核心种质时,采用欧式距离的结果表现较好,这与本研究构建青稞核心种质的研究结果类似。就取样方法来看,多次聚类优先取样法通过设定优先级标准,能够有针对性地选择具有重要特征的种质资源,提高核心种质的实用价值。本研究采用多次聚类优先取样法构建核心种质时,发现此取样策略下的 MD 值较高,且随着取样比例的增加,VD 值显著下降;而多次聚类偏离度取样法的 MD 值最低,同时保持了较高的 VD、CR 和 VR 值,这一结果符合构建核心种质的评价标准,进一步通过各项验证分析也证明了筛选出的核心种质具有更高的多样性与代表性。这一结果与苦荞<sup>[11]</sup>、山西高粱<sup>[40]</sup>的核心种质构建相关研究结果相似。此外,取样比例直接影响核心种质的规模,多数作物的取样比例范围为  $10\% \sim 30\%$ <sup>[12,34,39,41]</sup>,本研究的最佳取样比例为  $10\%$ ,符合前人研究结果,所构建的青稞核心种质 MD 值为 0,VD 值为  $93.33\%$ ,CR

值为  $95.63\%$ ,VR 值为  $141.22\%$ ,较好地保留了原始种质的遗传多样性,且具有较强的代表性。

本研究基于青稞的营养品质性状成功构建了核心种质库,较好地证明了其在遗传多样性和材料类型方面的代表性。然而,由于营养品质性状易受环境因素的干扰,难以全面揭示种质间的遗传差异,仍存在一定的局限性。与本研究形成互补的是,Xu 等<sup>[21]</sup>通过整合覆盖大麦染色体的分子标记,成功构建了遗传结构清晰的青稞核心种质;胥婷婷等<sup>[22]</sup>结合农艺性状和分子标记,探索了一种表型与分子标记结合的核心种质构建策略;原红军等<sup>[23]</sup>通过优化群体的等位基因频率,显著提升了青稞核心种质的遗传多样性。这些研究为未来结合分子标记、基因型数据及全基因组关联分析,进一步完善核心种质构建提供了重要思路,也为青稞核心种质资源的高效利用与精准育种提供更为科学的依据。

#### 参考文献:

- [1]李婷婷,姚有华,安立昆,等.青稞 *HvnWAK* 基因的克隆及其在条纹病胁迫下的表达[J].麦类作物学报,2024,44(1):26.  
LI T T, YAO Y H, AN L K, et al. Isolation of *HvnWAK* gene and its expression pattern under leaf stripe disease in hullless barley [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(1): 26.
- [2]孟亚雄,马增科,任盼荣,等.青稞主要性状的差异性与遗传分析[J].麦类作物学报,2017,37(1):48.  
MENG Y X, MA Z K, REN P R, et al. Diversity and genetic analysis of major traits in hullless barley [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(1): 48.
- [3]申瑞玲,绍舒,董吉林.萌动青稞的研究进展[J].粮油食品科技,2015,23(3):21.  
SHEN R L, SHAO S, DONG J L. Research progresses in germinating hull-less barley [J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2015, 23(3): 21.
- [4]戎银秀.青稞  $\beta$ -葡聚糖的制备、结构解析及其降血脂活性的研究[D].苏州:苏州大学,2018.  
RONG Y X. Preparation, structure analysis and hypolipidemic activity of  $\beta$ -glucan from highland barley [D]. Suzhou: Soochow University, 2018.
- [5]陈同睿,王蕾,王寒冬,等.利用 SNP 标记鉴定青稞种质资源[J].麦类作物学报,2024,44(1):65.  
CHEN T R, WANG L, WANG H D, et al. Identification of barley germplasm resources using SNP markers [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(1): 65.
- [6]西洛卓玛.青稞丰产栽培技术要点[J].农村新技术,2023(11):8.  
XILUO ZHUOMA. Key points of high-yield cultivation techniques of highland barley [J]. *New Technology in Rural Areas*

- as, 2023(11):8.
- [7] LI A J, GUO Z H, WANG Z R, *et al.* Effect of multiple-frequency ultrasound-assisted transglutaminase dual modification on the structural, functional characteristics and application of Qingke protein [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2023, 94: 106317.
- [8] 向卓亚, 夏陈, 杨开俊, 等. 青稞麸皮营养成分及提取物抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(12): 163.
- XIANG Z Y, XIA C, YANG K J, *et al.* Study on the nutrient composition and antioxidant activity of highland barley bran [J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(12): 163.
- [9] FRANKEL O H. Genetic perspective of germplasm conservation [M]// ARBER W, LLIMENSEE K, PEACOCK W J, *et al.* Genetic manipulations: Impact on man and society. Cambridge University Press, 1984: 161-170.
- [10] BROWN A H D. Core collections: A practical approach to genetic resources management [J]. *Genome*, 1989, 31(2): 818.
- [11] 马名川, 赵少迪, 胡传伟, 等. 基于表型性状和品质性状的苦荞核心种质构建[J]. 植物遗传资源学报, 2024, 25(10): 1637.
- MA M C, ZHAO S D, HU C W, *et al.* Construction of Tartary buckwheat core germplasm based on phenotypic traits and quality traits [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2024, 25(10): 1637.
- [12] 王郅琪, 颜廷献, 颜小文, 等. 江西省芝麻种质资源的多样性分析及核心种质构建[J]. 植物遗传资源学报, 2024, 26(3): 1.
- WANG Z Q, YAN T X, YAN X W, *et al.* Diversity analysis and core germplasm construction of sesame germplasm resources in Jiangxi Province [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2024, 26(3): 1.
- [13] 齐欣, 姜敏, 马骏, 等. 东欧玉米核心种质资源鉴定及聚类分析[J]. 辽宁农业科学, 2022(2): 15.
- QI X, JIANG M, MA J, *et al.* Identification and cluster analysis of eastern European maize core germplasm resources. *Liaoning Agricultural Sciences*, 2022(2): 15.
- [14] 李永祥, 李会勇, 扈光辉, 等. 玉米应用核心种质的构建与应用[J]. 植物遗传资源学报, 2023, 24(4): 911.
- LI Y X, LI H Y, HU G H, *et al.* Construction and application of core germplasm for maize [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2023, 24(4): 911.
- [15] 孙邦升, 宋继玲, 杨梦平, 等. 高淀粉马铃薯初级核心种质资源的遗传多样性分析[J]. 作物杂志, 2024(3): 1.
- SUN B S, SONG J L, YANG M P, *et al.* Genetic diversity analysis of high-starch potato primary core germplasm resources [J]. *Crops*, 2024(3): 1.
- [16] 赵欣蕊, 陈啸天, 薛薇, 等. 基于表型性状分析构建冀北地区马铃薯核心种质[J]. 核农学报, 2024, 38(5): 805.
- ZHAO X R, CHEN X T, XUE W, *et al.* Construction of core potato germplasm resources in north Hebei based on phenotypic traits [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2024, 38(5): 805.
- [17] 乔治军, 曹晓宁, 王海岗, 等. 基于表型性状的山西小麦核心种质构建[R]. 太谷: 山西农业大学, 2020.
- QIAO Z J, CAO X N, WANG H G, *et al.* Construction of Shanxi wheat core germplasm based on phenotypic traits [R]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2020.
- [18] 董玉琛, 曹永生, 张学勇, 等. 中国普通小麦初选核心种质的产生[J]. 植物遗传资源学报, 2003, 4(1): 1.
- DONG Y C, CAO Y S, ZHANG X Y, *et al.* Generation of core germplasm for Chinese common wheat [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2003, 4(1): 1.
- [19] 陈妍, 杨午, 万坤, 等. 基于表型多样性构建山西大豆地方品种核心种质[J]. 中国油料作物学报, 2024, 47(1): 1.
- CHEN Y, YANG W, WAN K, *et al.* Construction of core germplasm of shanxi soybean local varieties based on phenotypic diversity [J]. *Chinese Journal of Oil Crops Science*, 2024, 47(1): 1.
- [20] 何有学. 山西大豆地方品种核心种质资源遗传多样性分析与主要农艺性状的优异等位变异挖掘 [D]. 太谷: 山西农业大学, 2022.
- HE Y X. Genetic diversity analysis of core germplasm resources of local soybean varieties in Shanxi Province and mining of excellent allelic variation of main agronomic characters [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2022.
- [21] XU J Q, WANG L, WANG H D, *et al.* Development of a core collection of six-rowed hulless barley from the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Plant Molecular Biology Reporter*, 2020, 38(2): 305.
- [22] 胥婷婷. 青稞种质资源遗传多样性分析和核心种质的构建 [D]. 金华: 浙江师范大学, 2012.
- XU T T. Genetic diversity analysis and core collection construction of highland barley germplasm resources [D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2012.
- [23] 原红军, 曾兴权, 徐其君, 等. 青稞种质资源遗传多样性分析与核心种质群体的构建[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(8): 922.
- YUAN H J, ZENG X Q, XU Q J, *et al.* Genetic diversity of germplasm resource and core collection development in hulless barley [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(8): 922.
- [24] 李婷玉. 萌发青稞降糖、降脂、降压活性研究及其理化性质研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2021.
- LI T Y. Study on hypoglycemic, lipid-lowering and antihypertensive activities of germinated highland barley and its physical and chemical properties [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [25] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. 植物类食品中粗纤维的测定: GB/T 5009.10—2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- Ministry of Health of the People's Republic of China, National Standardization Administration of China. Determination of

- crude in plantfood:GB/T 5009.10—2003 [S]. Beijing:China Standards Press,2004.
- [26]国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定:GB 5009.6—2016 [S]. 北京:中国标准出版社,2017.
- National Health and Family Planning Commission, State Food and Drug Administration. National food safety standard determination of fat in food:GB 5009.6—2016 [S]. Beijing: China Standards Press,2017.
- [27]国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定:GB 5009.5—2016 [S]. 北京:中国标准出版社,2017.
- National Health and Family Planning Commission, State Food and Drug Administration. National food safety standard determination of protein in food:GB 5009.5—2016 [S]. Beijing: China Standards Press,2017.
- [28]国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中淀粉的测定:GB 5009.9—2016 [S]. 北京:中国标准出版社,2017.
- National Health and Family Planning Commission, State Food and Drug Administration. National food safety standard determination of starch in food:GB 009.9—2016 [S]. Beijing:China Standards Press,2017.
- [29]中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中灰分的测定:GB 5009.4—2016 [S]. 北京:中国标准出版社,2017.
- National Health and Family Planning Commission the People's Republic of China. National food safety standard determination of ash in food:GB 5009.4—2016 [S]. :China Standards Press,2017.
- [30]中华人民共和国农业部. 谷物及其制品中 $\beta$ -葡聚糖含量的测定:NY/T 2006—2011 [S]. 北京:中国农业出版社,2011.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Determination of  $\beta$ -glucan in cereals and their products:NY/T 2006—2011 [S]. Beijing:China Agriculture Press,2011.
- [31]国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法:GB/T 8313—2008 [S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration of China. Determination of content of tea polyphenols and catechins in tea:GB/T 8313—2008 [S]. Beijing:China Standards Press,2008.
- [32]国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中维生素A、D、E的测定:GB 5009.82—2016 [S]. 北京:中国标准出版社,2017.
- National Health and Family Planning Commission, State Food and Drug Administration. national food safety standard determination of vitamin A,D,E in:GB 5009.82—2016 [S]. Beijing:China Standards Press,2017.
- [33]朱志翔. 遗传分析软件 QGA Station2.0 和 GMDR-GPU 的开发 [D]. 杭州:浙江大学,2012.
- ZHU Z X. Development of genetic analysis software QGA Station2.0 and GMDR-GPU [D]. Hangzhou: Zhejiang University,2012.
- [34]胡晋,徐海明,朱军. 保留特殊种质材料的核心库构建方法 [J]. 生物数学学报,2001,16(3):348.
- HU J,XU H M,ZHU J. A method of constructing core collection reserving special germplasm materials [J]. *Journal of Biomathematics*,2001,16(3):348.
- [35]李洪果,段润梅,覃坚,等. 基于表型及经济性状构建蒜头果初选核心种质 [J]. 西北植物学报,2023,43(8):1396.
- LI H G,DUAN R M,QIN J,*et al.* Construction of preliminary core germplasm of garlic based on phenotypic and economic traits [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*,2023,43(8):1396.
- [36]黄伟业,李润泽,唐芳,等. 基于表型性状的花苜蓿核心种质构建 [J]. 草地学报,2025,33(1):41.
- HUANG W Y,LI R Z,TANG F,*et al.* Construction of *Medicago ruthenica* L. core germplasm based on phenotypic traits [J]. *Acta Agrestia Sinica*,2025,33(1):41.
- [37]赵立民,李嘉伟,张飞,等. 基于表型数据构建切花小菊核心种质 [J]. 园艺学报,2022,49(10):2273.
- ZHAO L M,LI J W,ZHANG F,*et al.* Construction of a core collection of spray cut *Chrysanthemum* based on phenotypic data [J]. *Acta Horticulturae Sinica*,2022,49(10):2273.
- [38]于秀明,杜雨,汪鹏,等. 基于表型性状的新疆野生黄花苜蓿核心种质构建 [J]. 草地学报,2023,31(10):3032.
- YU X M,DU Y,WANG P,*et al.* Construction of core germplasm of wild alfalfa in Xinjiang based on phenotypic traits [J]. *Acta Prataculturae Sinica*,2023,31(10):3032.
- [39]陈建华,曲凯伦,张云程,等. 基于表型性状的酸枣核心种质构建 [J]. 沈阳农业大学学报,2024,55(2):176.
- CHEN J H,QU K L,ZHANG Y C,*et al.* Construction of *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* core collection based on phenotypic traits [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*,2024,55(2):176.
- [40]李萌,秦慧彬,王宇楠,等. 基于农艺性状指标的山西高粱地方品种核心种质构建 [J]. 植物遗传资源学报,2021,22(1):174.
- LI M,QIN H B,WANG Y N,*et al.* Construction of core germplasm of Shanxi sorghum local varieties based on agro-nomic traits indicators [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*,2021,22(1):174.
- [41]魏志刚,高玉池,刘桂丰,等. 白桦核心种质初步构建 [J]. 林业科学,2009,45(10):74.
- WEI Z G,GAO Y C,LIU G F,*et al.* Preliminary construction of core collection of *Betula platyphylla* germplasm [J]. *Scientia Silvae Sinicae*,2009,45(10):74.