

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.03.012

引用格式:吴昌忠, 闫伟红, 赵彦, 等. 194份扁穗冰草种质资源表型多样性分析、综合评价及核心种质构建[J]. 草地学报, 2026, 34(3):865–880

WU Chang-zhong, YAN Wei-hong, ZHAO Yan, et al. Phenotypic Diversity Assessment, Multivariate Evaluation, and Core Germplasm Establishment of 194 *Agropyron cristatum* (L.) Gaertn. Accessions[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(3):865–880

194份扁穗冰草种质资源表型多样性分析、综合评价及核心种质构建

吴昌忠^{1,2}, 闫伟红^{2*}, 赵彦^{1*}, 李志勇², 武自念², 潘文喧², 霍春然³, 闫文昊⁴

(1. 内蒙古农业大学草业学院/草地资源教育部重点实验室, 内蒙古呼和浩特 010010; 2. 中国农业科学院草原研究所/农业农村部牧草资源与利用重点实验室, 内蒙古呼和浩特 010010; 3. 吉林农业大学, 吉林长春 130118; 4. 甘肃农业大学草业学院, 甘肃兰州 730070)

摘要:本研究针对194份不同来源扁穗冰草(*Agropyron cristatum*)种质资源,利用变异系数、遗传多样性指数、聚类分析、主成分分析、相关性分析和灰色关联法等方法,基于28个表型性状进行多样性评估,并筛选出优异种质资源。进而结合QGA软件分析遗传距离、取样比例和聚类方法,探讨核心种质构建最佳策略,并检验其可靠性和代表性。结果表明:194份扁穗冰草种质资源28个表型性状统计分析显示:变异系数为17.02%~87.85%,遗传多样性指数介于0.500~2.103。质量性状的变异系数为24.43%~52.75%,遗传多样性指数平均为0.869;数量性状的变异系数为17.02%~87.85%,遗传多样性指数均大于1.524,平均为1.962;这表明扁穗冰草具有较高遗传多样性。灰色关联法分析获得的穗长、穗宽、小穗数、穗轴第一节间长、小穗颜色、旗叶宽、叶鞘长度、植株颜色等可以作为扁穗冰草种质资源综合评价主要指标。筛选出优异种质资源编号B61,B1,B37,B83,B164,B193,B48,B85,均包含在核心种质中,为核心种质的构建提供了依据。主成分与QGA软件综合统计分析确定“欧式距离+多次聚类优先取样法+最短距离法+25%取样比例”是扁穗冰草核心种质构建的最佳策略,其MD值为0%,CR值达100%、VD值为25%、VR值为113.474%。最终获得的48份核心种质其累计贡献率(75.54%)显著高于原始群体,完整保留了原始种质的遗传多样性,为扁穗冰草种质资源的高效利用与遗传改良提供了理想材料。

关键词:扁穗冰草;表型性状;遗传多样性;核心种质;综合评价

中图分类号:S543.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)03-0865-16

Phenotypic Diversity Assessment, Multivariate Evaluation, and Core Germplasm Establishment of 194 *Agropyron cristatum* (L.) Gaertn. Accessions

WU Chang-zhong^{1,2}, YAN Wei-hong^{2*}, ZHAO Yan^{1*}, LI Zhi-yong², WU Zi-nian², PAN Wen-xuan², HUO Chun-ran³, YAN Wen-hao⁴

(1. College of Grassland Science, Inner Mongolia Agricultural University/Key Laboratory of Grassland Resources, Ministry of Education, Hohhot, Inner Mongolia 010010, China; 2. Grassland Research Institute, CAAS/Key Laboratory of Forage Resources and Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hohhot, Inner Mongolia 010010, China; 3. Jilin Agricultural University, Changchun, Jilin Province 130118, China; 4. College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu Province 730070, China)

Abstract: This study focused on 194 *Agropyron cristatum* (crested wheatgrass) germplasm resources from

收稿日期:2025-10-13;修回日期:2025-11-24

基金项目:内蒙古自治区自然科学基金面上项目“扁穗冰草耐盐性相关分子标记开发及辅助新种质创制(2023MS03033)”;内蒙古自治区科技计划“锡林郭勒盟草地多功能兼用型乡土草高效繁育与加工利用技术集成(2022YFDZ0083)”;内蒙古科技重大专项“优良乡土草种质创新与应用关键技术研究(2021ZD0031)”资助

作者简介:吴昌忠(2002-),男,苗族,贵州望谟人,硕士,主要从事牧草种质资源与育种研究,E-mail:3020741852@qq.com;*通信作者 Author for correspondence,E-mail:yanweihong7037@126.com;zhaoyannmg@imau.edu.cn

diverse geographic origins. To assess phenotypic diversity and screen elite germplasm, we employed a suite of analytical methods including coefficient of variation (CV), genetic diversity index, cluster analysis, principal component analysis (PCA), correlation analysis, and grey relational analysis, based on 28 key phenotypic traits. Additionally, we used QGA software to analyze genetic distance, sampling proportion, and clustering methodologies, aiming to identify the optimal strategy for constructing a core germplasm collection. The reliability and representativeness of the resulting core set were rigorously verified. The results demonstrated that: statistical analysis of 28 phenotypic traits in 194 accessions of *Agropyron cristatum* (crested wheatgrass) revealed substantial phenotypic variation. The coefficient of variation (CV) ranged from 17.02%-87.85%, and the genetic diversity index (Shannon-Wiener index, H') varied from 0.500-2.103. For qualitative traits (e.g., spike shape, glume color), the CV spanned 24.43%-52.75%, with an average H' of 0.869—indicating moderate diversity. For quantitative traits (e.g., plant height, spike length), the CV was broader (17.02%-87.85%), and all H' values exceeded 1.524 (average: 1.962), which reflected high genetic diversity. The results demonstrated that *A. cristatum* possesses rich genetic diversity, providing a solid foundation for elite germplasm selection and breeding programs. The grey relational analysis (GRA) demonstrated that spike length, spike width, spikelet number, length of the first rachis internode, spikelet color, flag leaf width, leaf sheath length, plant color, and other morphological traits served as key indicators for the comprehensive evaluation of *Agropyron cristatum* (L.) Gaertn. germplasm resources. A set of elite germplasm accessions (B61, B1, B37, B83, B164, B193, B48, and B85) were identified through screening. All of the accessions are incorporated into the core collection, thereby providing a scientific basis for the construction of a representative core germplasm set. Multivariate analysis integrating principal component analysis and QGA software optimization demonstrated that the combination of Euclidean distance metrics, multiple clustering priority sampling, single linkage method with a 25% sampling proportion constituted the optimal strategy for core germplasm construction in *Agropyron cristatum* (L.) Gaertn. (MD=0%, CR=100%, VD=25%, VR=113.474%). The resultant core collection comprising 48 accessions exhibited a significantly higher cumulative contribution rate (75.54%) compared to the original population, while maintaining 100% of the original genetic diversity. This scientifically validated core set provides a robust foundation for germplasm utilization and genetic improvement in crested wheatgrass.

Key words: *Agropyron cristatum* (crested wheatgrass); Phenotypic traits; Genetic diversity; Core germplasm; Comprehensive evaluation

扁穗冰草 [*Agropyron cristatum* (L.) Gaertn.] 隶属于禾本科 (Poaceae) 小麦族 (Triticeae) 冰草属 (*Agropyron*), 为多年生草本植物。扁穗冰草广泛分布于我国内蒙古、青海、新疆、甘肃、黑龙江等北方地区, 生态适应性广, 具有较强的抗旱、抗寒及耐盐碱特性, 是改良盐碱地的典型优良牧草, 也是旱区栽培的优质饲草^[1-2]。该物种生物量大、茎叶柔嫩、粗蛋白含量高、适口性佳, 深受家畜喜食^[2], 因其卓越的抗逆性及饲用价值, 近年来备受科研与生产领域关注。然而, 随着扁穗冰草种质资源规模化收集、保存与利用工作的推进, 其管理过程中逐渐暴露出费时费力、科研进度延缓及经费投入增加等问题, 亟需高效的种质资源管理策略。

核心种质 (Core collection) 的概念由 Frankel^[3] 于1984年首次提出, 其核心内涵是通过最少数量的遗传资源样本, 实现整个群体遗传多样性的最大化保存。这一概念的提出与应用^[4-5], 有效解决了种质资源高效管理的关键问题, 目前已广泛应用于玉米 (*Zea mays* L.)^[6]、水稻 (*Oryza sativa* L.)^[7]、谷子 [*Setaria italica* (L.) Beauv.]^[8]、花苜蓿 [*Medicago*

ruthenica (L.) Trautv.]^[9]、番茄 (*Solanum lycopersicum* L.)^[10]、沙芦草 (*Agropyron mongolicum* Keng)^[11] 等作物的种质资源研究中。尽管冰草属植物的遗传多样性已有较多研究^[12-18], 然而, 针对扁穗冰草大样本表型性状的遗传多样性分析及核心种质构建, 目前尚未见系统报道。本研究以国家北方饲草种质资源中期库保存的种质及内蒙古、山西、新疆、宁夏等地区野外采集的194份扁穗冰草种质资源为供试材料, 2022年种植于中国农业科学院草原研究所多年生饲草种质资源圃; 2024年进行表型性状测定, 基于28个表型性状开展表型多样性分析及核心种质构建工作, 从形态学水平综合评价筛选出优异材料, 为扁穗冰草种质资源的保护、研究、利用及新种质的创制提供理论依据与材料支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为194份扁穗冰草种质资源 (表1), 来源于加拿大、蒙古、伊朗、土耳其、苏联、美国等国

家,以及中国内蒙古、宁夏、北京、山西、新疆、黑龙江、吉林、甘肃等地区。所有种质均在中国农业科学院草原研究所沙尔沁试验基地完成扩繁与保存。小区长 3 m,宽 5 m,株行距 50 cm,每个小区至少栽

种 40 株。试验期间严格遵循常规农艺规程开展田间管理,包括杂草定向防除、病虫害综合防治及精准水分调控,确保试验材料生长环境的一致性,保障其正常生长发育。

表 1 供试材料信息

Table 1 Information of the tested materials

种质编号 Germplasm number	名称 Name	来源 Source	种质编号 Germplasm number	名称 Name	来源 Source
B1	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	土耳其	B98	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古锡林郭勒锡林浩特 G207
B2	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	山西省右玉县沿山吾村	B99	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古锡林郭勒锡林浩特市
B3	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	山西省右玉县路边	B100	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙锡林郭勒锡林浩特毛登牧场南 15 km
B4	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	山西省右玉县路边	B101	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙锡林郭勒盟正蓝旗 G207
B5	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	山西省原平市路边	B102	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙锡林郭勒盟多伦县 X314
B6	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	山西省原平市路边	B103	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古锡林郭勒盟白旗给日苏
B7	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	中国	B104	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙锡林郭勒盟白旗陶海胡德格
B8	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	中国	B105	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古锡林郭勒盟多伦县
B9	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	中国	B106	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古锡林郭勒盟浑善达克沙地边缘
B10	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	中国	B107	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	甘肃平凉市静宁县界石镇
B11	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古	B108	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	甘肃张掖市肃南县喇嘛湾
B12	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古	B109	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	甘肃武威市郭家山
B13	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古呼和浩特市默特左旗西九峰山林场	B110	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	北京
B14	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古呼和浩特市大青山九峰山林场	B111	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	北京
B15	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古乌兰察布化德县德色图	B112	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	宁夏固原市云雾山
B16	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古乌兰察布化德县小井沟	B113	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	宁夏固原市原州区
B17	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古乌兰察布化德县小井沟	B114	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	宁夏盐池县大水坑
B18	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古乌兰察布市兴和县大淖尔	B115	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	宁夏固原市原州区
B19	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古乌兰察布市兴和县大淖尔	B116	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	加拿大
B20	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古乌兰察布市兴和县乌木山	B117	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	加拿大
B21	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古乌兰察布市凉城县 G512	B118	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	加拿大
B22	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古乌兰察布市凉城县 G004	B119	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	加拿大
B23	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古乌兰察布商都县	B120	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	加拿大
B24	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古赤峰市巴林左旗台胡图格	B121	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	加拿大
B25	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古克什克腾旗巴彦查干	B122	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	加拿大
B26	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古巴彦淖尔乌拉特中旗	B123	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	加拿大
B27	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古锡林郭勒盟正蓝旗	B124	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	加拿大
B28	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古锡林郭勒盟正蓝旗贺日木音塔拉	B125	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	加拿大
B29	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古锡林郭勒盟正蓝旗桑根达来	B126	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	吉林白城市通榆县
B30	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古锡林郭勒盟正蓝旗桑根达来	B127	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	伊朗
B31	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古锡林郭勒盟东乌旗乌拉盖	B128	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	苏联
B32	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古锡林郭勒盟东乌旗	B129	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	苏联
B33	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古锡林郭勒盟东乌旗	B130	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	苏联
B34	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古乌兰察布四子王旗境内	B131	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	苏联
B35	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古锡林郭勒盟白音花	B132	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	苏联
B36	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古锡林郭勒盟白音锡勒牧场	B133	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	青海海北州西海镇
B37	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古锡林郭勒盟白音锡勒牧场 6 连 3 排	B134	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	河北与内蒙古锡林郭勒盟多伦县交界处
B38	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古锡林郭勒盟白音锡勒吐儒种植基地	B135	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	河北柴沟堡
B39	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古锡林郭勒盟白旗距化德 54 km	B136	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	俄罗斯
B40	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古锡林郭勒盟白旗那日图	B137	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	俄罗斯
B41	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古锡林郭勒盟白旗沙拉牧场	B138	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	俄罗斯
B42	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古锡林郭勒盟白旗沙拉牧场	B139	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	俄罗斯克拉斯诺达尔河
B43	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古锡林郭勒盟白旗阿拉腾嘎达苏	B140	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	俄罗斯克拉斯诺达尔河
B44	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古包头固阳县大青山隧道旁	B141	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	俄罗斯阿尔泰边疆区

续表 1

种质编号 Germplasm number	名称 Name	来源 Source	种质编号 Germplasm number	名称 Name	来源 Source
B45	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古锡林郭勒盟西乌株穆沁旗	B142	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	俄罗斯雅库斯克
B46	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古锡林郭勒盟西乌株穆沁旗	B143	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B47	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古锡林郭勒盟多伦县蔡木山	B144	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B48	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古锡林郭勒盟多伦县蔡木山	B145	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B49	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	锡林郭勒盟	B146	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B50	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古锡林郭勒盟多伦县蔡木山乡西 5 km	B147	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B51	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古兴安盟伊尔施	B148	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B52	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古兴安盟阿尔山市东郊	B149	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B53	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古农业大学	B150	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B54	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古农业大学	B151	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B55	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古农业大学	B152	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B56	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古农业大学	B153	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B57	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古农业大学	B154	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B58	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古农牧科学院	B155	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B59	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古赤峰市 G303 克旗	B156	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B60	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古赤峰市克什克腾旗	B157	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B61	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古赤峰市克什克腾旗	B158	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B62	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古赤峰市克什克腾旗 G233 路	B159	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B63	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古赤峰市克什克腾旗 G233 路	B160	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B64	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙克什克腾旗 G16 高速	B161	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B65	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古赤峰市敖汉旗高速	B162	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B66	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙克什克腾旗 G16 高速	B163	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B67	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古赤峰市经棚	B164	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B68	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古赤峰市经棚	B165	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B69	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古赤峰市翁牛特旗 S304	B166	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B70	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古赤峰市阿斯哈图地质公园	B167	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B71	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古阿拉善左旗贺兰山	B168	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B72	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古阿拉善左旗贺兰山	B169	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B73	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古乌兰察布卓资县卧佛山	B170	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B74	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙乌兰察布尚义县盖脑包村	B171	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B75	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古呼伦贝尔伊敏河宾馆	B172	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B76	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古呼伦贝尔海拉尔森林	B173	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B77	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古呼和浩特市	B174	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B78	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古呼和浩特市	B175	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B79	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古呼和浩特市	B176	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B80	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古呼和浩特市	B177	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B81	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古呼和浩特市	B178	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B82	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古呼和浩特市	B179	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B83	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古呼和浩特市	B180	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B84	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古呼伦贝尔	B181	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B85	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古科尔沁沙地	B182	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B86	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古乌兰察布凉城县	B183	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	美国
B87	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古通辽霍林河市滨河路 35 号	B184	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	黑龙江明水县
B88	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古乌兰察布商都县	B185	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	黑龙江黑河上马场
B89	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古锡林郭勒辉腾锡勒北	B186	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	蒙古
B90	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古锡林郭勒蓝旗至白旗	B187	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	蒙古
B91	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古锡林郭勒蓝旗至白旗	B188	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	新疆
B92	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古锡林郭勒盟	B189	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	新疆伊犁尼勒克县苏布台
B93	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古锡林郭勒盟	B190	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	新疆伊犁巩留县
B94	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古锡林郭勒盟	B191	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	新疆伊犁地区那拉提镇
B95	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古锡林郭勒盟	B192	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	新疆伊犁州察布查尔县
B96	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古锡林郭勒盟正蓝旗 G207	B193	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	新疆伊犁新源县林场
B97	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	内蒙古锡林郭勒盟正蓝旗 G207	B194	扁穗冰草 <i>A.cristatum</i>	新疆和丰县

1.2 表型性状测定

依据《冰草种质资源描述规范和数据标准》^[19]对194份扁穗冰草种质资源的表型性状进行测定,每份材料12次重复,包括株高、穗长、穗宽、小穗长、小穗宽、小穗数、每穗小花数、旗叶长、旗叶宽、倒二叶长、倒二叶宽、第二节茎粗、穗轴第一节间长、叶鞘长度、第一颖长、第一颖宽、第一颖脉数、第二颖长、第二颖宽、第二颖脉数、外稃芒长、叶色、穗色、根长、穗子被毛、穗型、植株颜色、叶片被毛等。

1.3 数据处理

采用Excel进行数据处理、灰色关联分析^[20];Past4软件进行遗传多样性分析;SPSS 27.0进行主成分分析;Origin 2024软件进行相关性分析与聚类分析;QGAstation 2.0软件进行核心种质构建。

2 结果与分析

2.1 表型多样性分析

2.1.1 表型性状变异系数与多样性指数统计分析 194份扁穗冰草种质资源表型性状(表2)变异系数存在较大差异。变异系数在17.02%~87.85%之间,平均为33.10%,其中穗轴第一节间长的变异系数最高(87.85%)、变幅为1.57~36.95 mm、均值为9.58 mm,表明穗轴第一节间长等性状变异度丰富;数量性状中小穗数的变异系数最低(17.02%)、变幅为19.33~52.67 mm、均值为34.41 mm;质量性状中穗子被毛,变异系数最高(52.75%)、变幅为0.00~1.00 mm、均值为0.76 mm,穗型的变异系数最低(24.43%)、变幅为1.00~2.00 mm、均值为1.16 mm。一般变异系数大于10%表示样本间差异较大^[21],本研究28个表型性状的变异系数均大于10%,表明194份扁穗冰草间存在着较大差异,表型遗传多样性丰富,有利于优异材料的获取。遗传多样性指数(Genetic diversity index, H') 在0.500~2.103、平均值为1.733;株高遗传多样性指数最高(2.103),表明该性状遗传多样性最丰富^[22];质量性状中遗传多样性指数在0.500~1.480、平均值为0.869,小穗颜色的遗传多样性指数最低(0.500),表明其分布相对集中;数量性状中遗传多样性指数均大于1.524且平均值为1.962,表明数量性状遗传多样性指数较大,遗传多样性更为丰富,更有利于特异材料的选取和核心种质的抽提。

2.1.2 表型性状相关性分析 扁穗冰草表型性状

间存在不同程度相关性(图1),株高与穗长、小穗数、叶鞘长度;穗长与小穗长、倒二叶长、第二颖宽;穗宽与小穗数、倒二叶长、倒二叶宽、叶鞘长度;小穗宽与每穗小花数;小穗数与旗叶长、旗叶宽、叶鞘长度、外稃芒长;每穗小花数与叶片颜色;旗叶长与根长;旗叶宽与第二茎节粗;倒二叶长与根长;穗轴第一节间长与第一颖宽、第二颖宽、叶片颜色;叶鞘长度与第二颖脉数、根长;第一颖长与第一颖宽;第一颖宽与外稃芒长、叶片颜色;第一颖脉数与叶片被毛;第二颖宽与外稃芒长;外稃芒长与小穗颜色;小穗颜色与叶片被毛;穗子是否带绒毛与叶片被毛呈显著正相关($P<0.05$)。产量相关性状(株高、穗长、小穗数、叶鞘长度)之间存在显著正相关($P<0.05$)。其中,穗子带绒毛与叶片被毛的显著正相关提示两者可能受同一组基因调控,可作为辅助育种的形态标记。

株高与旗叶长、旗叶宽、倒二叶长、倒二叶宽、根长;穗长与小穗长、旗叶长、第一颖宽、第二颖长;小穗长与小穗宽、每穗小花数、穗轴第一节间长、第一颖长、第二颖长;小穗宽与第二颖长;每穗小花数与穗轴第一节间长、第一颖长、第一颖宽、第二颖长、第二颖宽;旗叶长与旗叶宽、倒二叶长、倒二叶宽、叶鞘长度;旗叶宽与倒二叶长、倒二叶宽;倒二叶长与倒二叶宽、第二茎节粗;倒二叶宽与第二茎节粗;第二茎节粗与根长;第一颖长与第二颖长;第一颖宽与第二颖宽;叶片颜色与植株颜色呈极显著正相关($P<0.01$)。

小穗长与第一颖脉数呈极显著负相关($P<0.01$);小穗宽与第二茎节粗;每穗小花数与第一颖脉数;倒二叶长与第一颖长;穗轴第一节间长与第一颖脉数、第二颖脉数;叶鞘长度与第二颖脉数、叶片被毛;第二颖脉数与植株颜色;穗是否带绒毛与植株颜色;植株颜色与叶片被毛呈显著负相关($P<0.05$)。颖脉数是连接穗部形态(小穗长、小花数)、穗轴发育和防御性状(叶鞘长度)的核心性状,其与小穗长的极显著负相关(颖脉数越多,小穗越短)是穗部形态调控的关键规律;同时,植株颜色与叶片被毛的显著负相关($P<0.05$)(颜色越深,被毛越少)揭示了色素代谢与物理防御之间的权衡关系(叶绿素充足的植株无需过多被毛来抗逆)。以上结果表明,扁穗冰草的各指标间相互影响、相互制约,有利于种质资源综合分析^[18]。

高变异、高多样性的指标(如穗轴第一节间长、株高)多为数量性状中的“形态支撑性状”,其变异与产量相关性状(小穗数、穗长)、形态性状(颖片宽、叶鞘长度)关联,有利于筛选综合表现优异的材料;

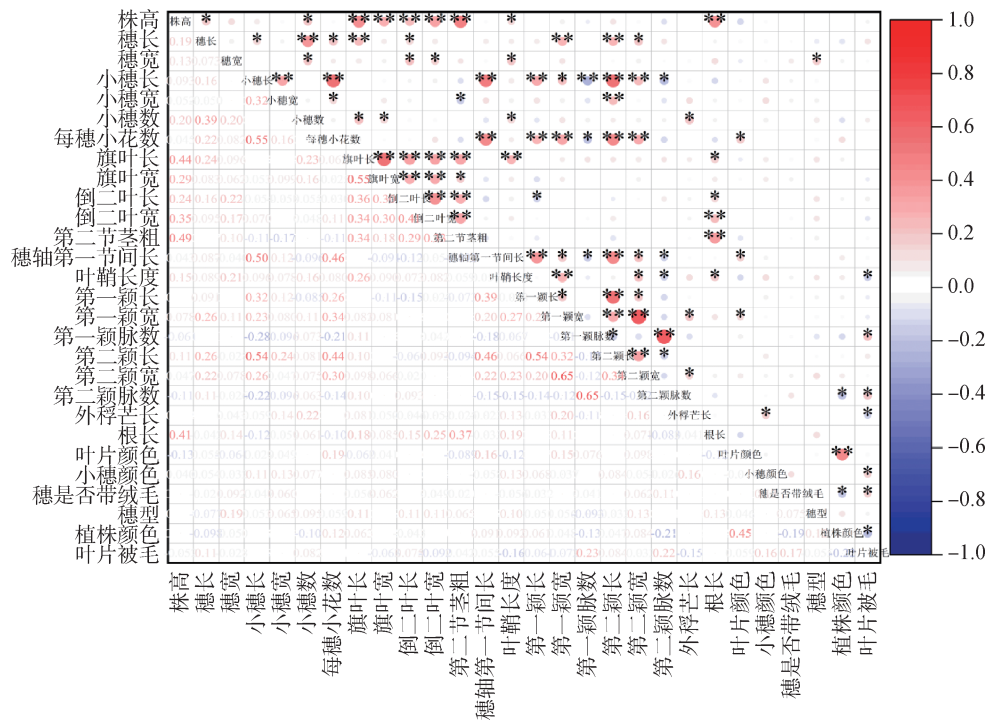


图1 28个表型性状相关性分析

Fig. 1 Correlation analysis of 28 phenotypic traits

注: * 和 ** 分别表示 0.05 和 0.01 水平显著相关

Note: * and ** indicates a significant correlation at 0.05 and 0.01 level, respectively

表2 194份扁穗冰草种质资源的表型性状统计分析

Table 2 Statistical analysis of phenotypic traits of 194 accessions of *Agropyron cristatum*

性状 Characters	极小值 Minimum	极大值 Maximum	均值 Mean	变异系数 Coefficient of variation	标准差 Standard deviation	遗传多样性指数 Genetic diversity index
株高 Plant height/cm	43.17	125.03	83.33	20.29	16.91	2.103
穗长 Spike length/cm	3.73	14.27	7.12	22.18	1.58	2.055
穗宽 Spike width/cm	0.82	3.96	1.71	30.76	0.53	1.956
小穗长 Spikelet length/mm	5.35	16.85	10.39	21.89	2.27	2.102
小穗宽 Spikelet width/mm	3.99	12.69	6.14	20.57	1.26	1.990
小穗数 Number of spikelets	19.33	52.67	34.41	17.02	5.86	2.100
每穗小花数 Number of florets per spike	0.00	15.93	4.84	40.33	1.95	1.905
旗叶长 Flag leaf length/cm	2.50	23.64	11.04	34.43	3.80	2.036
旗叶宽 Flag leaf width/mm	2.15	16.92	5.19	34.47	1.79	1.829
倒二叶长 Length of the second last leaf/cm	8.92	31.08	19.15	24.60	4.71	2.054
倒二叶宽 Width of the second last leaf/mm	3.98	13.50	7.44	27.82	2.07	2.055
第二节茎粗 Diameter of the second internode/mm	3.10	19.10	9.26	34.96	3.24	1.983
穗轴第一节间长 The length of the first internode of the rachis/mm	1.57	36.95	9.58	87.85	8.42	1.507
叶鞘长度 Leaf sheath length/mm	0.91	5.01	1.95	32.53	0.63	1.883
第一颖长 First glume length/mm	3.55	9.83	5.74	18.68	1.07	2.062
第一颖宽 First glume width/mm	0.51	2.73	1.44	27.97	0.40	2.057
第一颖脉数 Number of nerves on first glume	1.00	8.33	3.70	33.36	1.23	1.822
第二颖长 Second glume length	3.49	8.65	5.94	19.86	1.18	2.087
第二颖宽 Second glume width/mm	0.53	3.50	1.47	30.53	0.45	1.988
第二颖脉数 Number of nerves on second glume	1.00	6.30	3.74	22.67	0.85	1.953
外稃芒长 Lemma awn length/mm	0.00	6.60	2.47	50.14	1.24	1.761
根长 Root length/cm	3.56	26.09	10.81	44.12	4.77	1.870
叶片颜色 Leaf color	1.00	5.00	1.90	46.54	0.88	1.480
小穗颜色 Spikelet color	1.00	2.00	1.11	26.66	0.30	0.500
穗是否带绒毛 Spikelet hairy	0.00	1.00	0.76	52.75	0.40	0.811
穗型 Spike shape	1.00	2.00	1.16	24.43	0.28	0.751
植株颜色 Plant color	1.00	2.00	1.29	32.68	0.42	0.925
叶片被毛 The leaves are hairy	0.00	2.00	0.75	46.81	0.35	0.911

低变异、低多样性的指标多为产量核心性状(小穗数)或质量标记性状(小穗颜色),其变异小但仍有价值(如小穗数的稳定变异可保证产量一致性),而质量性状的低多样性可作为辅助验证工具。

2.1.3 194 份扁穗冰草聚类分析 基于 28 个表型性状对扁穗冰草种质资源进行系统聚类分析,结果表明,194 份扁穗冰草种质资源分为 3 大类。由图 2 和表 3 可知,第 I 类包含 19 份资源,该类群的主要特征为株高(112.75 cm)、穗长(8.04 cm)、穗宽(1.88 cm)、小穗数(38.37)、旗叶长(16.24 cm)、旗叶宽(6.84 mm)、倒二叶长(23.82 cm)、倒二叶宽(8.75 mm)、第二节

茎粗(13.95 mm)、叶鞘长度(2.25 mm)、第一颖宽(1.47 mm)、根长(16.39 cm)、小穗颜色(1.13)、穗是否带绒毛(0.82)、穗型(1.21);第 II 类包括 31 份资源,该类群的主要特征为第一颖脉数(3.87)、第二颖脉数(3.92)、外稃芒长(2.59 mm)、叶片颜色(1.99)、植株颜色(1.34)、叶片被毛(0.77);第 III 类包含 144 份资源,该类群的主要特征为小穗长(10.62 mm)、小穗宽(6.19 mm)、每穗小花数(5.07)、穗轴第一节间长(10.87 mm)、第一颖长(5.75 mm)、第二颖长(6.04 mm)、第二颖宽(1.47 mm)。整体聚类结果与地域来源无明显相关性。

表 3 不同类群 28 个表型性状统计结果

Table 3 Statistical analysis on 28 agronomic traits of different groups

性状 Characters	第 I 类 Class I	第 II 类 Class II	第 III 类 Class III	性状 Characters	第 I 类 Class I	第 II 类 Class II	第 III 类 Class III
个数 Amount	19	31	144	个数 Amount	19	31	144
株高 Plant height/cm	112.75	58.11	84.88	第一颖长 First glume length/mm	5.64	5.73	5.75
穗长 Spike length/cm	8.04	6.70	7.09	第一颖宽 First glume width/mm	1.47	1.34	1.45
穗宽 Spike width/cm	1.88	1.60	1.71	第一颖脉数	3.81	3.87	3.65
				Number of nerves on first glume			
小穗长 Spikelet length/mm	9.75	9.69	10.62	第二颖长 Second glume length/mm	5.63	5.68	6.04
小穗宽 Spikelet width/mm	5.98	6.00	6.19	第二颖宽 Second glume width/mm	1.46	1.46	1.47
小穗数 Number of spikelets	38.37	33.14	34.16	第二颖脉数	3.69	3.92	3.71
				Number of nerves on second glume			
每穗小花数 Number of florets per spike	4.00	4.25	5.07	外稃芒长 Lemma awn length/mm	2.40	2.59	2.46
旗叶长 Flag leaf length/cm	16.24	8.09	10.99	根长 Root length/cm	16.39	8.19	10.64
旗叶宽 Flag leaf width	6.84	4.22	5.19	叶片颜色 Leaf color	1.51	1.99	1.93
倒二叶长 Length of the second last leaf/cm	23.82	17.24	18.95	小穗颜色 Spikelet color	1.13	1.10	1.11
倒二叶宽 Width of the second last leaf/mm	8.75	6.30	7.51	穗是否带绒毛 Is the spikelet hairy	0.82	0.76	0.75
第二节茎粗	13.95	6.86	9.17	穗型 Spike shape	1.21	1.15	1.16
Diameter of the second internode/mm							
穗轴第一节间长	4.92	6.46	10.87	植株颜色 Plant color	1.26	1.34	1.28
The length of the first internode of the rachis/mm							
叶鞘长度 Leaf sheath length/mm	2.25	1.79	1.94	叶片被毛 The leaves are hairy	0.74	0.77	0.74

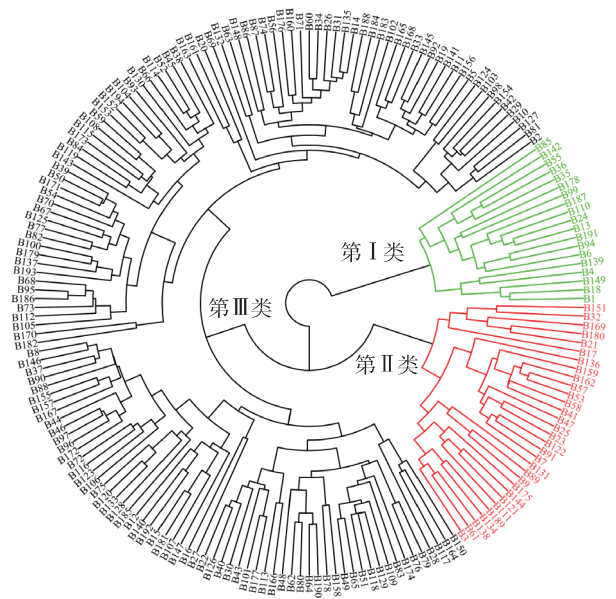


图 2 194 扁穗冰草种质资源聚类分析

Fig. 2 Cluster analysis of germplasm resources of 194 species of *Agropyron cristatum*

2.1.4 扁穗冰草种质资源表型性状综合评价 基于 28 个表型性状,采用灰色关联度对 194 份扁穗冰草种质资源进行综合评价(表 4-5),研究结果表明 194 份扁穗冰草资源关联度排位前 20 的分别为 B61, B1, B37, B83, B164, B193, B48, B85, B123, B156, B66, B132, B8, B15, B56, B90, B17, B19, B137, B175。关联度的大小反映综合表现的优劣,关联度越大则表明综合表现越优^[20]。本研究来自内蒙古锡林郭勒盟正蓝旗桑根达来(B61)、内蒙古乌兰察布凉城县曹碾乡(B1)、山西省原平市(B37)、美国(B83)、美国(B164)、新疆伊犁新源县林场(B193)、内蒙古锡林郭勒盟多伦县蔡木山(B48)、内蒙古科尔沁沙地(B85)等材料综合表现较好;来自中国(B10)、北京(B110)、内蒙古乌兰察布四子王旗(B34)、内蒙古乌兰察布商都县(B88)、伊朗(B129)等材料综合表现相对较差。从表 5 可得出:穗长、穗宽、小穗数、穗轴第一节间长、小穗颜色、旗叶宽、叶鞘长度、植株颜色等可以作为扁穗冰草种质资源综合评价指标。

表 4 194 份扁穗种质资源加权关联度与排序

Table 4 Weighted correlation degree and sort of 194 *Agropyron cristatum* germplasm resources

种质编号 Germplasm number	加权关联度 Weighted correlation degree	排序 Ranking	种质编号 Germplasm number	加权关联度 Weighted correlation degree	排序 Ranking	种质编号 Germplasm number	加权关联度 Weighted correlation degree	排序 Ranking	种质编号 Germplasm number	加权关联度 Weighted corre- lation degree	排序 Ranking
B61	0.6127	1	B106	0.5155	50	B145	0.4758	99	B52	0.4397	148
B1	0.6125	2	B194	0.5151	51	B181	0.4757	100	B98	0.4393	149
B37	0.6119	2	B3	0.5150	52	B94	0.4754	101	B177	0.4389	150
B83	0.6033	4	B153	0.5147	53	B89	0.4751	102	B35	0.4389	151
B164	0.6023	5	B122	0.5137	54	B118	0.4744	103	B105	0.4380	152
B193	0.6023	6	B108	0.5135	55	B71	0.4724	104	B87	0.4378	153
B48	0.6011	7	B161	0.5125	56	B170	0.4723	105	B69	0.4350	154
B85	0.6000	8	B6	0.5111	57	B13	0.4723	106	B119	0.4343	155
B123	0.5982	9	B130	0.5077	58	B140	0.4721	107	B138	0.4331	156
B156	0.5977	10	B53	0.5071	59	B44	0.4720	108	B84	0.4315	157
B66	0.5971	11	B112	0.5066	60	B26	0.4718	109	B22	0.4309	158
B132	0.5971	12	B30	0.5063	61	B186	0.4714	110	B74	0.4302	159
B8	0.5934	13	B49	0.5053	62	B45	0.4708	111	B115	0.4300	160
B15	0.5917	14	B109	0.5035	63	B188	0.4706	112	B75	0.4293	161
B56	0.5863	15	B73	0.5032	64	B167	0.4703	113	B159	0.4290	162
B90	0.5861	16	B39	0.5014	65	B18	0.4694	114	B4	0.4283	163
B17	0.5857	17	B113	0.5008	66	B103	0.4692	115	B33	0.4248	164
B19	0.5834	18	B70	0.5005	67	B23	0.4684	116	B180	0.4235	165
B137	0.5825	19	B162	0.4994	68	B72	0.4682	117	B114	0.4233	166
B175	0.5812	20	B38	0.4993	69	B92	0.4682	118	B148	0.4229	167
B179	0.5789	21	B62	0.4993	70	B102	0.4678	119	B192	0.4223	168
B78	0.5803	22	B82	0.4976	71	B29	0.4659	120	B146	0.4222	169
B99	0.5775	23	B50	0.4965	72	B169	0.4656	121	B121	0.4221	170
B116	0.5751	24	B65	0.4951	73	B107	0.4655	122	B14	0.4221	171
B184	0.5670	25	B91	0.4937	74	B42	0.4651	123	B57	0.4216	172
B54	0.5655	26	B101	0.4926	75	B100	0.4648	124	B80	0.4214	173
B28	0.5652	27	B51	0.4923	76	B95	0.4643	125	B165	0.4204	174
B21	0.5647	28	B32	0.4917	77	B36	0.4628	126	B163	0.4190	175
B79	0.5638	29	B2	0.4908	78	B152	0.4627	127	B55	0.4190	176
B67	0.5619	30	B143	0.4905	79	B134	0.4617	128	B46	0.4186	177
B40	0.5609	31	B189	0.4895	80	B27	0.4595	129	B63	0.4184	178
B150	0.5598	32	B158	0.4889	81	B120	0.4585	130	B157	0.4181	179
B127	0.5500	33	B97	0.4883	82	B12	0.4582	131	B93	0.4177	180
B47	0.5461	34	B81	0.4878	83	B141	0.4564	132	B76	0.4174	181
B142	0.5407	35	B58	0.4867	84	B187	0.4549	133	B31	0.4172	182
B133	0.5402	36	B139	0.4865	85	B16	0.4541	134	B124	0.4169	183
B190	0.5396	37	B96	0.4860	86	B172	0.4538	135	B24	0.4160	184
B154	0.5357	38	B191	0.4832	87	B86	0.4517	136	B5	0.4144	185
B176	0.5337	39	B7	0.4827	88	B9	0.4499	137	B155	0.4143	186
B128	0.5311	40	B117	0.4816	89	B135	0.4494	138	B25	0.4137	187
B125	0.5310	41	B126	0.4810	90	B41	0.4469	139	B178	0.4123	188
B11	0.5287	42	B182	0.4806	91	B151	0.4438	140	B160	0.4114	189
B68	0.5275	43	B144	0.4805	92	B131	0.4437	141	B10	0.4111	190
B174	0.5265	44	B59	0.4800	93	B64	0.4432	142	B110	0.4111	191
B43	0.5259	45	B20	0.4792	94	B185	0.4426	143	B34	0.4109	192
B173	0.5259	45	B111	0.4791	95	B168	0.4425	144	B88	0.3969	193
B136	0.5251	47	B60	0.4781	96	B166	0.4418	145	B129	0.3942	194
B149	0.5242	48	B171	0.4760	97	B77	0.4405	146			
B147	0.5199	49	B104	0.4759	98	B183	0.4402	147			

表 5 28 个表型性状指标关联度及其排序
Table 5 Correlation degree and ranking of 28 phenotypic trait indicators

性状 Characters	加权关联度 Weighted correlation degree	排序 Ranking	性状 Characters	加权关联度 Weighted correlation degree	排序 Ranking
株高 Plant height/cm	0.0429	25	第一颖长 First glume length/mm	0.0616	15
穗长 Spike length/cm	0.0787	3	第一颖宽 First glume width/mm	0.0528	20
穗宽 Spike width/cm	0.0692	7	第一颖脉数 Number of nerves on first glume	0.0594	17
小穗长 Spikelet length/mm	0.0509	21	第一颖长 First glume length/mm	0.0446	23
小穗宽 Spikelet width/mm	0.0665	9	第一颖宽 First glume width/mm	0.0634	12
小穗数 Number of spikelets	0.0916	1	第一颖脉数 Number of nerves on first glume	0.0404	26
每穗小花数 Number of florets per spike	0.0635	11	外稃芒长 Lemma awn length/mm	0.0404	26
旗叶长 Flag leaf length/cm	0.0555	19	根长 Root length/cm	0.0594	16
旗叶宽 Flag leaf width/mm	0.0725	6	叶片颜色 Leaf color	0.0643	10
倒二叶长 Length of the second last leaf/cm	0.0447	22	小穗颜色 Spikelet color	0.0740	5
倒二叶宽 Width of the second last leaf/mm	0.0616	14	穗是否带绒毛 Is the spikelet hairy	0.0444	24
第二节茎粗 Diameter of the second internode/mm	0.0563	18	穗型 Spike shape	0.0379	28
穗轴第一节间长 The length of the first internode of the rachis/mm	0.0753	4	植株颜色 Plant color	0.0856	2
叶鞘长度 Leaf sheath length/mm	0.0687	8	叶片被毛 The leaves are hairy	0.0629	13

2.2 扁穗冰草核心种质构建

2.2.1 遗传距离筛选 通过 QGAstation 2.0 软件,采取抽样比例为 25%,在 2 种遗传距离、3 种取样方法、8 种系统聚类方法组合下构建了 48 组扁穗冰草核心种质策略。如表 6 所示,48 种组合下的核心种质均满足 MD<20%,CR>80%,表明 48 种构建策略下的核心种质足以代表原种质资源遗传多样性。通过比较分析发现,虽然在优先取样法下,采用马氏距离构建的部分核心种质的 MD 为 0,CR 为 100%,VD 与 VR 大于欧式距离,但整体而言,采用欧氏距离构建的核心种质普遍优于马氏距离构建的核心种质^[23]。由此,对于扁穗冰草核心种质的构建分析后续选用欧式距离。

2.2.2 取样方法筛选 基于 25% 取样比例,采用欧氏距离进行多次聚类随机取样法、多次聚类优先取样法、多次聚类偏离度取样法比较研究(如表 6),以 MD<20%,CR>80% 为标准,发现优先取样法优于另外两种取样方法,尽管有部分核心种质 VD 或 VR(或 VD 和 VR)高于优先取样法构建的核心种质,根据 MD<20%,CR>80%,且 VD,CR 和 VR 越大其代表性越强为优先原则,结果表明,优先取样的 MD 均值最小(0)、CR 均值最大(100%);VD 均值(11.1607%);VR 均值最大(113.5326%),表明基于 25% 取样比例下采用欧氏距离优先取样法是构建扁穗冰草核心种质最佳策略。这与花苜蓿

等核心种质构建研究结果相吻合^[9]。

2.2.3 聚类方法筛选 基于 25% 取样比例,采用欧氏距离的优先取样,CR 均为 100%,MD 皆为 0,其中最短距离法的 VD(25%)和 VR(116.5229%)最大,因此重心法构建策略最佳(表 6)。这与沙芦草^[11]等核心种质构建研究结果相吻合。

2.2.4 总体取样比例确定 采用“欧式距离+多次聚类优先取样法+最短距离法”选取 6 种不同的取样比例,分别为 35%,30%,25%,20%,15%,10%,进行 6 组核心种质构建(表 7)。在 MD<20%,CR>80%,6 组策略均符合,其中在取样比例 25%,30%,35% 的 MD 均值最小(0)、MD 均值最大(100%),且抽样比例为 25% 的 VD(25%),VR(116.5229%)最大。因此,“欧式距离+多次聚类优先取样法+最短距离法+25% 的取样比例”策略是扁穗冰草核心种质构建的最佳策略,并获得 48 份核心材料(表 10)。

2.2.5 核心种质评价与验证 通过对表 6-8 进行分析,结果表明,在“欧式距离+多次聚类优先取样法+最短距离法+25%”的构建策略下,MD 为 0、CR 为 100%,原始与核心种质的各个表型性状无显著差异;核心种质库中 VR 为 113.474%,除了小穗宽外,其他性状的变异系数均高于原始种群,说明核心种质的遗传变异幅度(变异系数)显著优于原始种群,核心种质库中 VD 为 25%,穗轴第一节

表 6 基于 25% 取样比例下的扁穗冰草核心种质构建策略

Table 6 Construction strategy for core germplasm of *Agropyron cristatum* based on a 25% sampling ratio

构建方式 Construction strategy	均值差异 百分率 MD/%	方差差异 百分率 VD/%	极差符合率 CR/%	变异系数 变化率 VR/%	构建方式 Construction strategy	均值差异 百分率 MD/%	方差差异 百分率 VD/%	极差符合率 CR/%	变异系数 变化率 VR/%
O-S-F1	14.2857	21.4286	96.9742	111.9391	M-S-F1	0	21.4286	96.7262	113.5451
O-S-F2	0	0	95.8333	105.1233	M-S-F2	0	3.5714	93.9484	114.9573
O-S-F3	0	0	94.7421	100.9927	M-S-F3	7.1429	17.8571	97.5198	111.5682
O-S-F4	7.1429	10.7143	97.5694	110.3859	M-S-F4	7.1429	14.2857	97.5694	109.0552
O-S-F5	0	0	96.2798	104.6195	M-S-F5	0	0	96.2798	104.6195
O-S-F6	0	0	94.2460	106.5399	M-S-F6	0	0	93.3036	102.8037
O-S-F7	0	0	96.3294	107.0397	M-S-F7	0	0	96.7262	103.1115
O-S-F8	0	7.1429	95.8829	109.9785	M-S-F8	0	0	97.5198	107.7462
O-Y-F1	0	25	100	116.5229	M-Y-F1	7.1429	3.5714	100	112.2112
O-Y-F2	0	10.7143	100	112.5020	M-Y-F2	3.5714	0	100	112.8172
O-Y-F3	0	7.1429	100	109.2181	M-Y-F3	0	17.8571	100	112.7192
O-Y-F4	0	17.8571	100	115.7787	M-Y-F4	0	14.2857	100	114.2226
O-Y-F5	0	3.5714	100	113.7689	M-Y-F5	3.5714	7.1429	100	110.9379
O-Y-F6	0	3.5714	100	114.7396	M-Y-F6	0	7.1429	100	109.0048
O-Y-F7	0	10.7143	100	113.1709	M-Y-F7	0	7.1429	100	114.0429
O-Y-F8	0	10.7143	100	112.5597	M-Y-F8	0	7.1429	100	112.0699
O-P-F1	0	32.1429	98.4127	110.0347	M-P-F1	7.1429	25	98.3631	107.9223
O-P-F2	0	3.5714	97.5694	113.5827	M-P-F2	0	10.7143	98.0159	113.5847
O-P-F3	3.5714	3.5714	97.1726	112.0699	M-P-F3	0	35.7143	98.0159	112.5705
O-P-F4	0	28.5714	97.2222	114.0336	M-P-F4	3.5714	35.7143	98.4127	110.1857
O-P-F5	0	7.1429	97.1726	111.4950	M-P-F5	0	21.4286	98.4127	111.7727
O-P-F6	0	3.5714	95.9325	112.4140	M-P-F6	3.5714	17.8571	98.0159	111.5203
O-P-F7	3.5714	14.2857	97.2222	112.4140	M-P-F7	0	21.4286	97.2222	111.4189
O-P-F8	3.5714	3.5714	97.9663	113.4950	M-P-F8	0	3.5714	97.9663	104.5768

注: O 表示欧式距离; M 表示马氏距离; S 表示多次聚类随机取样法; Y 表示多次聚类优先取样法; P 表示多次聚类偏离度取样法; F1 表示最短距离法; F2 表示最长距离法; F3 表示中间距离法; F4 表示重心法; F5 表示类平均法; F6 表示可变类平均法; F7 表示可变量; F8 表示离差平法和法。下同

Note: O represents the Euclidean distance; M represents the Mahalanobis distance; S represents the multiple clustering random sampling method; Y represents the multiple clustering priority sampling method; P represents the multiple clustering deviation sampling method; F1 represents the single linkage method; F2 represents the complete linkage method; F3 represents the median linkage method; F4 represents the centroid method; F5 represents the group average method; F6 represents the flexible group average method; F7 represents the flexible method; F8 represents the Ward's method. The same as below

表 7 6 种抽样比例的比较

Table 7 Comparison of six sampling ratios

构建方式 Construction strategy	均值差异 百分率 MD/%	方差差异 百分率 VD/%	极差 符合率 CR/%	变异系数 变化率 VR/%
O-Y-F1(10%)	3.5714	7.1429	92.8571	115.8149
O-Y-F1(15%)	3.5714	7.1429	99.6032	115.1340
O-Y-F1(20%)	3.5714	17.8571	100	114.9471
O-Y-F1(25%)	0	25	100	116.5229
O-Y-F1(30%)	0	14.2857	100	113.1556
O-Y-F1(35%)	0	7.1429	100	111.1845

间长、小穗数、旗叶长、倒二叶宽、第一颖长的方差等表型显著高于原始种质;穗宽、叶鞘长度、第二颖

脉数的方差极显著高于原始种质,表明核心种质能更高效地保留原始种群中的特异遗传资源。

表 8 扁穗冰草核心种质与原始种质的检验
Table 8 Testing of *Agropyron cristatum* core germplasm and original germplasm

性状 Characters	类别 Category	均值 Mean value	<i>P</i> -value	显著性 Significance	方差 Variance	<i>P</i> -value	显著性 Significance	极差 Range	变异系数 Coefficient of variation
株高 Plant height/cm	原群体	5.51546	0.864 89	NS	4.0438	0.13998	NS	9	0.36460
	核心库	5.45833			5.10461			9	0.41392
穗长 Spike length/cm	原群体	5.45361	0.855 22	NS	3.66882	0.24583	NS	9	0.35122
	核心库	5.39583			4.24424			9	0.38180
穗宽 Spike width/cm	原群体	5.46907	0.313 75	NS	3.22443	0.00878	S**	8	0.32833
	核心库	5.83333			5.37589			8	0.39747
小穗长 Spikelet length/mm	原群体	5.47938	0.115 76	NS	3.91927	0.14266	NS	9	0.36130
	核心库	4.95833			4.9344			9	0.44800
小穗宽 Spikelet width/mm	原群体	5.52577	0.076 33	NS	3.73249	0.14471	NS	6	0.34963
	核心库	4.97917			2.8719			6	0.34035
小穗数 Number of spikelets	原群体	5.47423	0.817 09	NS	3.92938	0.02556	S*	9	0.36211
	核心库	5.39583			5.98892			9	0.45354
每穗小花数 Number of florets per spike	原群体	5.46907	0.229 38	NS	2.93427	0.14491	NS	9	0.31321
	核心库	5.12500			3.68617			9	0.37462
旗叶长 Flag leaf length/cm	原群体	5.43299	0.879 18	NS	3.82191	0.0189	S*	9	0.35983
	核心库	5.37500			5.98404			9	0.45511
旗叶宽 Flag leaf width/mm	原群体	5.43299	0.770 13	NS	2.5473	0.06213	NS	8	0.29377
	核心库	5.35417			3.55275			8	0.35204
倒二叶长 Length of the second last leaf/cm	原群体	5.48454	0.766 54	NS	3.99199	0.16346	NS	9	0.36430
	核心库	5.58333			4.92908			9	0.39764
倒二叶宽 Width of the second last leaf/mm	原群体	5.48969	0.188 27	NS	3.96103	0.02343	S*	8	0.36254
	核心库	6.00000			6.08511			8	0.41113
第二节茎粗 Diameter of the second internode/mm	原群体	5.47938	0.896 78	NS	3.64983	0.12467	NS	8	0.34866
	核心库	5.52083			4.68041			8	0.39187
穗轴第一节间长 The length of the first internode of the rachis/mm	原群体	5.45876	0.907 12	NS	3.41021	0.01829	S*	8	0.33830
	核心库	5.41667			5.35461			8	0.42720
叶鞘长度 Leaf sheath length/mm	原群体	5.42268	0.917 01	NS	2.92922	0.00961	S**	8	0.31562
	核心库	5.45833			4.84929			8	0.40344
第一颖长 First glume length/mm	原群体	5.47423	0.222 42	NS	3.73249	0.04486	S*	9	0.35292
	核心库	5.87500			5.38830			9	0.39511
第一颖宽 First glume width/mm	原群体	5.50000	0.849 68	NS	3.86788	0.10697	NS	9	0.35758
	核心库	5.56250			5.05984			9	0.40439
第一颖脉数 Number of nerves on first glume	原群体	5.43299	0.255 25	NS	3.16906	0.16003	NS	9	0.32766
	核心库	5.77083			3.92509			9	0.34331
第一颖长 First glume length/mm	原群体	5.48454	0.358 54	NS	3.94018	0.48021	NS	9	0.36192
	核心库	5.18750			3.94282			9	0.38278
第一颖宽 First glume width/mm	原群体	5.49485	0.265 89	NS	3.58806	0.23946	NS	9	0.34473
	核心库	5.14583			4.16977			9	0.39683
第一颖脉数 Number of nerves on first glume	原群体	5.52577	0.705 45	NS	3.43197	0.00807	S**	9	0.33526
	核心库	5.66667			5.75886			9	0.42349
外稃芒长 Lemma awn length/mm	原群体	5.42783	0.764 69	NS	3.66575	0.28006	NS	9	0.35274
	核心库	5.33333			4.14184			9	0.38159
根长 Root length/cm	原群体	5.46392	0.810 94	NS	3.8562	0.23106	NS	8	0.35940
	核心库	5.54167			4.50886			8	0.38317
叶片颜色 Leaf color	原群体	5.53608	0.181 15	NS	2.69667	0.39592	NS	6	0.27827
	核心库	5.89583			2.72105			6	0.29824
小穗颜色 Spikelet color	原群体	5.59278	0.832 56	NS	2.31518	0.27965	NS	5	0.27206
	核心库	5.64583			2.61658			5	0.28651
穗是否带绒毛 Is the spikelet hairy	原群体	5.72165	0.783 57	NS	4.02937	0.43178	NS	5	0.34516
	核心库	5.8125			4.11303			5	0.35891
穗型 Spike shape	原群体	5.18557	0.844 46	NS	3.95503	0.25941	NS	6	0.38351
	核心库	5.25000			4.53191			6	0.40549
植株颜色 Plant color	原群体	5.50000	0.512 25	NS	4.52254	0.41413	NS	5	0.38079
	核心库	5.72917			4.75488			5	0.38861
叶片被毛 The leaves are hairy	原群体	5.48454	0.102 26	NS	4.40650	0.02251	S*	6	0.38274
	核心库	4.81250			6.79388			6	0.54161

注: NS 表示无显著差异; S* 表示显著差异; S** 表示极显著差异
Note: NS indicates no significant difference; S* indicates significant difference; S** indicates extremely significant difference

2.2.6 核心种质与原始种质主成分分析 以特征值大于1为标准,原始种质(表1)和核心种质(表10)均提取10个主成分(表9)。研究结果显示,原始群体主成分累积贡献率为65.907%,而核心种质达75.540%,表明核心种质作为原始群体的代表性子集,

其主成分结构更集中且解释能力更优;同时,核心种质各主成分的贡献率均高于原始种群。这说明核心种质更集中且遗传多样性保留效果更优,其构建有效减少了冗余、提高了研究效率,为扁穗冰草的遗传研究、品种改良及新种质创制提供了关键材料基础。

表 9 扁穗冰草核心种质与原始种质的主成分分析

Table 9 Principal component analysis of core germplasm and original germplasm of *Agropyron cristatum*

因子 factor	特征值 Eigenvalue		贡献率 Contribution rate/%		累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	
	原始种质	核心种质	原始种质	核心种质	原始种质	核心种质
	Original germplasm	Core germplasm	Original germplasm	Core germplasm	Original germplasm	Core germplasm
1	3.741	4.556	13.857	16.284	13.857	16.284
2	2.917	3.830	10.805	13.692	24.662	29.976
3	2.008	2.470	7.437	8.820	32.099	38.796
4	1.620	1.949	5.999	6.959	38.099	45.756
5	1.532	1.842	5.676	6.579	43.774	52.332
6	1.411	1.645	5.226	5.876	49.001	58.208
7	1.264	1.345	4.682	4.802	53.682	63.010
8	1.198	1.287	4.437	4.597	58.119	67.607
9	1.063	1.177	3.937	4.204	62.056	71.811
10	1.040	1.044	3.851	3.729	65.907	75.540

表 10 48份核心扁穗冰草种质资源编号

Table 10 Numbers of 48 core germplasm resources of *Agropyron cristatum*

序号 No.	种质编号 Germplasm number	序号 No.	种质编号 Germplasm number	序号 No.	种质编号 Germplasm number	序号 No.	种质编号 Germplasm number	序号 No.	种质编号 Germplasm number	序号 No.	种质编号 Germplasm number
1	B2	9	B164	17	B102	25	B181	33	B172	41	B89
2	B136	10	B170	18	B39	26	B99	34	B139	42	B8
3	B171	11	B15	19	B17	27	B18	35	B56	43	B37
4	B138	12	B68	20	B132	28	B61	36	B159	44	B85
5	B149	13	B156	21	B147	29	B66	37	B24	45	B130
6	B193	14	B135	22	B86	30	B35	38	B83	46	B71
7	B28	15	B141	23	B5	31	B182	39	B48	47	B158
8	B83	16	B6	24	B103	32	B123	40	B148	48	B1

灰色关联度分析筛选出的优异种质资源(B61, B1, B37, B83, B164, B193, B48, B85)均在48份核心种质(表10)中,这进一步说明了核心种质构建的合理性和有效性。

3 讨论

3.1 表型多样性分析与综合评价

表型多样化是基因型和环境共同作用的结果,同时也是研究其遗传多样性的重要手段。通过多种方法对194份扁穗冰草种质资源表型性状进行了鉴定与评价。结果显示,28个表型性状的变异系数介于17.02%~87.85%之间,平均为33.10%。其中,穗轴第一节间长变异系数最高(87.85%),小穗

长变异系数为61.89%,外稃芒长变异系数为50.14%,表明这些性状的变异程度较为丰富。这一结果与李景欣^[12]研究环境条件对扁穗冰草穗部性状的影响,以及闫伟红^[13]对冰草属种质资源遗传分析的结果基本一致,这种丰富的遗传变异为优异种质资源的筛选和核心种质的构建提供了基础。

遗传多样性指数(H')介于0.500~2.103之间。在数量性状中,遗传多样性指数均大于1.50,平均值为1.962。其中,株高和小穗宽的遗传多样性指数最高(2.103),其次,穗长、旗叶长、倒二叶长、倒二叶宽、第一颖长和第二颖长遗传多样性指数也较高,表明这些性状的遗传多样性较为丰富。这一结果与王紫隆^[14]、王通锐等^[15]、德英等人^[24]的研究结果基本一致。在质量性状中,遗传多样性指数介于

0.500~1.480之间,平均值为0.869。其中,小穗颜色遗传多样性指数最低(0.500),表明其分布相对集中。在数量性状中,遗传多样性指数均大于1.524,平均值为1.962,表明数量性状遗传多样性较为丰富,这有利于特异材料选取及核心种质抽提。

表型性状相关性分析能够揭示不同性状间的内在联系,通过这种分析,我们可以了解次要性状对主要性状遗传改良的潜在贡献,从而为多性状综合育种策略的制定提供科学依据^[25]。研究表明,扁穗冰草多数表型性状间存在不同程度的显著相关性,其中株高与旗叶长、旗叶宽、倒二叶长、倒二叶宽、根长呈极显著正相关。与梁永波^[25]对不同小麦品种(系)产量与株型性状的相关性研究,以及郭嘉等^[26]对27份谷子高代品系农艺性状变异的研究结果基本一致。穗长、穗宽等性状与小穗长、倒二叶长等性状显著正相关;小穗长、小穗宽、每穗小花数等性状间存在极显著正相关,每穗小花数还与颖长、颖宽等性状极显著正相关。这与李景欣^[12]研究环境对扁穗冰草穗部性状的影响,以及孙娜^[27]对蒙农杂种冰草退化群体相关性状变异分析的研究结果相同,经过对表型性状多样性的深入分析,结合变异系数以及多样性指数的计算结果,可以明确株高和小穗相关特征是影响产量的关键因素^[28],小穗宽、每穗小花数等性状与第二茎节粗、颖脉数等性状显著负相关。这与刘昆^[29]对不同穗型水稻品种颖花分化研究以及Roy等^[30]基于农业形态性状和锌铁含量的水稻种质遗传多样性评价的研究相似。正相关系数最大的性状可作为核心种质构建的关键指标,用于筛选优良遗传特性种质资源。合理利用负相关性状,能平衡不同性状关系,避免育种中过度优化单一性状而忽视其他重要性状,对提升种质资源综合性能和适应性意义重大。

主成分分析凭借降维手段,能直观呈现导致群体差异的关键因素。本研究结果显示,前10个主成分累积贡献率达65.907%,表明这10个综合指标能涵盖大部分原始数据信息。这与杨靖等^[16]和李鸿雁等^[18]对冰草属种质资源表型性状遗传多样性的分析研究结果相似。

聚类分析作为种质资源研究的关键工具,可用于揭示作物种质资源的亲缘关系与起源,并精准呈现种质个体间的相关性分类^[25]。194份扁穗冰草种质资源分为3个差异显著的类群,可初步确定资源

类型。第Ⅰ类包含19份资源,其主要特征集中在植株整体形态和部分穗部性状上;第Ⅱ类包含31份资源,其主要特征集中于穗部微观结构和植株外观性状;第Ⅲ类包含144份资源,是样本量最大的一类,其主要特征聚焦于小穗及其相关结构的详细测量数据,尽管整体聚类结果与地域来源无明显相关性,但分类结果仍为后续育种选择和资源利用提供了重要参考依据。

灰色关联度通过计算数据序列关联度来衡量因素间关系,可用于评估种质资源表型性状,为筛选和利用提供依据^[20]。本研究对194份扁穗冰草种质资源表型性状进行综合评价。研究结果表明,小穗数、植株颜色、穗长、穗轴第一节间长、小穗颜色、旗叶宽、叶鞘长度、穗宽等可作为扁穗冰草种质的评价指标;确定8份材料(B61,B1,B37,B83,B164,B193,B48,B85)综合表现好,可作育种备选材料。

3.2 核心种质构建

种质资源是品种选育的基石,优质核心种质堪称品种培育的关键“芯片”^[31],核心种质以最少资源涵盖最大多样性。构建核心种质库,需比较不同策略的MD,VD,CR和VR值,并以 $MD < 20\%$ 且 $CR > 80\%$ 为标准,VR和CR越大,核心种质越具代表性,本研究综合多种策略分析后,确定扁穗冰草核心种质最佳构建方案:欧式距离+多次聚类优先取样法+最短距离法+25%的取样比例。该核心种质MD值为0%,CR值达到100%,VD值为25%,VR值为113.474%。

遗传距离直接影响植物核心种质构建,常用欧式距离和马氏距离^[32],已有研究质疑马氏距离在小规模核心种质构建中的适用性^[33]。本研究发现,欧式距离优于马氏距离。这与内蒙古花苜蓿^[9]、沙芦草^[11]、西伯利亚杏^[34]等研究结果一致。

取样方法是核心种质研究的关键,基于表型取样常用的三种方法为多次聚类随机取样、偏离度取样和优先取样法。不同种质资源的取样方法也不尽相同,张婷等^[11]对沙芦草核心种质构建研究表明多次聚类偏离度取样法是最佳策略,张曦等^[35]对陆地棉核心种质构建研究表明多次聚类随机取样是最佳策略;黄伟业等^[9]对内蒙古花苜蓿核心种质构建研究表明多次聚类优先取样法是最佳策略,张莹等^[36]对茶梅核心种质构建发现多次聚类优先取样法是最佳策略,与本研究一致。

聚类方法通过将植物分组比较来确定核心种质,其选择影响核心种质的代表性。本研究对比8种常见聚类方法,研究发现,基于欧式距离和优先取样法,进一步确认最短距离聚类法优于其他方法。这与沈志军等^[37]、陈焕杰^[38]研究结果相同。

初步确定欧式距离+多次聚类优先取样法+最短距离法是构建194份扁穗冰草核心种质的有效策略。然而,取样比例同样关键。经过对6种取样比例(35%,30%,25%,20%,15%,10%)的对比分析,发现25%取样比例的VD和VR最大,且MD均值最小。此结果与沙芦草^[11]、花苜蓿^[9]研究结果相同。因此,最终确定“欧式距离+多次聚类优先取样法+最短距离法+25%取样比例”是194份扁穗冰草核心种质构建的最佳策略。

评估核心种质的代表性与实用性至关重要,通常借助均值差异百分率、方差差异百分率、极差符合率、变异系数变化率等指标。核心种质的均值差异百分率越低,而方差差异百分率、极差符合率和变异系数变化率越高,其对原始种质的代表性就越显著。核心种质与原始种质主成分对比显示,二者均有10个主成分,核心种质的主成分累积贡献率(75.540%)显著高于原始种群(65.907%),表明核心种质有效去除了遗传冗余^[31-38]。

本研究基于28个表型性状对194份扁穗冰草种质资源进行综合评价,选出的8份优质种质资源均在构建的48份核心种质中,这既是核心种质构建成功的标志,也是灰色关联度分析针对性的体现。这一结果将扁穗冰草种质资源的“遗传多样性”与“优异性状”有机结合,为后续的种质利用、育种研究提供了精准、高效的材料库,是种质资源研究中“从保存到利用”的关键一步。

4 结论

本研究系统评价了194份扁穗冰草种质资源的遗传多样性,发现其表型性状具有丰富的变异(变异系数17.02%~87.85%,遗传多样性指数0.500~2.103)。通过灰色关联分析筛选出8个关键评价指标,并鉴定出8份优异种质。基于主成分与QGA软件优化,确立了欧式距离+多次聚类优先取样法+最短距离法+25%取样比例的核心种质构建策略(MD=0%,CR=100%,VD=25%,VR=113.474%),最终获得48份核心种质,其累计

贡献率达75.54%且完整保留原始遗传多样性,为扁穗冰草遗传改良提供了优质材料基础。

参考文献

- [1] 赵彦. 蒙古冰草抗旱相关基因克隆、表达及RNAi载体构建[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2009:26-29
ZHAO Y. Isolation, expression and construction rna vector of drought-resistant related genes in mongolian wheatgrass [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2009: 26-29
- [2] 富海江. 杂种冰草与扁穗冰草耐盐性、抗旱性及综合性状的比较评价[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2019:5-34
FU H J. Evaluation of salt tolerance, drought resistance and comprehensive trait of two kinds of Wheatgrass [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019: 5-34
- [3] FRANKEL O H. Genetic perspectives of germplasm conservation [J]. Genetic Manipulation Impact on Man & Society, 1984, 11(3): 161-170
- [4] CHARMET G, BALFOURIER F, RAVEL C, et al. Genotype x environment interactions in a core collection of French perennial ryegrass populations [J]. Theoretical and Applied Genetics, 1993, 86(6): 731-736
- [5] HINTUM T J L. The general methodology for creating a core collection [M]// JOHNSON R C, HODGKIN T, eds. Core Collections for Today & Tomorrow. Rome, Italy: International Plant Genetic Resources Institute, 1999: 10-17
- [6] 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): 911-916
LI Y X, LI H Y, HU G H, et al. Construction and utilization of applied core collection in maize [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2023, 24(4): 911-916
- [7] 王世壮, 聂亚敏, 黄婧芬, 等. 水稻核心种质耐盐鉴定与分子标记开发应用[J]. 植物遗传资源学报, 2025, 26(3): 470-492
WANG S Z, NIE Y M, HUANG J F, et al. Identification of salt tolerance in rice core germplasm and development and application of molecular markers [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2025, 26(3): 470-492
- [8] 李振蛟, 井苗, 李海录, 等. 榆林市谷子资源核心种质构建[J]. 大麦与谷类科学, 2024, 41(5): 37-42
LI Z J, JING M, LI H L, et al. Core collection construction of millet germplasm resources in Yulin City [J]. Barley and Cereal Sciences, 2024, 41(5): 37-42
- [9] 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): 41-52
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): 41-52
- [10] 郑福顺, 王晓敏, 李国花, 等. 宁夏地区番茄种质资源核心种质构建策略[J]. 浙江农业学报, 2022, 34(9): 1877-1888
ZHENG F S, WANG X M, LI G H, et al. Construction strategy of core collections of tomato germplasm resources in Ningxia, China [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2022, 34

- (9):1877-1888
- [11] 张婷,闫伟红,李志勇,等. 基于表型探讨76份沙芦草核心种质构建策略[J]. 中国种业,2024(2):93-102
ZHANG T, YAN W H, LI Z Y, et al. Exploring the construction strategies of core collection in 76 *Agropyron mongolicum* based on phenotype[J]. China Seed Industry, 2024(2):93-102
- [12] 李景欣. 内蒙古冰草种质资源遗传多样性研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2005:11-38
LI J X. Genetic diversity of germplasm resources of *Agropyron cristatum* in Inner Mongolia[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2005:11-38
- [13] 闫伟红. 冰草属和鹅观草属部分植物种质资源遗传分析[D]. 北京:中国农业科学院,2010:26-43
YAN W H. Genetic Analysis of some germplasm resources of *Agropyron* Gaertn. and *Roegneria* C. Koch[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010:26-43
- [14] 王紫隆. 内蒙古中部区冰草种质资源遗传多样性评价[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2023:15-33
WANG Z L. Evaluation of genetic diversity of *Agropyron cristatum* germplasm resources in Central Inner Mongolia [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023:15-33
- [15] 王通锐,王星,胡鹏飞,等. 64份冰草属牧草种质资源表型性状的遗传多样性[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2025,53(6):71-81
WANG T R, WANG X, HU P F, et al. Genetic diversity of phenotypic traits of 64 *Agropyron* germplasm resources [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2025,53(6):71-81
- [16] 杨靖,张晓明,陈越,等. 内蒙古30份冰草属种质资源表型性状遗传多样性分析[J]. 中国草地学报,2023,45(9):1-11
YANG J, ZHANG X M, CHEN Y, et al. Genetic diversity analysis of phenotypic traits of 30 *Agropyron* genus germplasm resources in Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Grassland, 2023,45(9):1-11
- [17] 王毓清. 新疆冰草属两种牧草资源表型多样性及幼苗耐旱性研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2025:15-24
WANG Y Q. Phenotypic diversity and seedling drought tolerance of two forage resources of *Agropyron* in Xinjiang [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2025:15-24
- [18] 李鸿雁,李悦煊,李俊,等. 内蒙古143份冰草属种质资源表型多样性分析与综合评价[J]. 植物遗传资源学报,2024,25(8):1254-1267
LI H Y, LI Y X, LI J, et al. Phenotypic diversity analysis and comprehensive evaluation of 143 *Agropyron* germplasm resources in Inner Mongolia, China [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2024,25(8):1254-1267
- [19] 袁庆华,赵来喜,高洪文,等. 冰草种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京:中国农业出版社,2007:13-21
YUAN Q H, ZHAO L X, GAO H W, et al. Descriptors and data standard for wheatgrass [M]. Beijing: China Agriculture-Press, 2007:13-21
- [20] 耿慧,王志锋,刘卓,等. 国内外苜蓿品种主要性状间的灰色关联度分析[J]. 草业科学,2009,26(10):85-88
GENG H, WANG Z F, LIU Z, et al. Grey association degree analysis on the main characters of domestic and overseas alfalfa [J]. Pratacultural Science, 2009,26(10):85-88
- [21] 孙铭,符开欣,范彦,等. 15份多花黑麦草优良引进种质的表型变异分析[J]. 植物遗传资源学报,2016,17(4):655-662
SUN M, FU K X, FAN Y, et al. Analysis of phenotypic variations in 15 introduced elite germplasm of *Lolium multiflorum* Lam. [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2016, 17(4): 655-662
- [22] 董承光,王娟,周小凤,等. 基于表型性状的陆地棉种质资源遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报,2016(3):438-446
DONG C G, WANG J, ZHOU X F, et al. Evaluation on genetic diversity of cotton germplasm resources (*Gossypium hirsutum* L.) on morphological characters [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2016(3):438-446
- [23] 于晓池,李凤,欧阳,等. 基于表型的灰楸核心种质构建[J]. 林业科学研究,2021,34(6):38-45
YU X C, LI F, OU Y, et al. Construction of core collection of *Catalpa fargesii* Bur. based on phenotype[J]. Forest Research, 2021,34(6):38-45
- [24] 德英,刘新亮,赵来喜. 垂穗披碱草表型多样性研究[J]. 中国草地学报,2013,35(5):62-68
DE Y, LIU X L, ZHAO L X. Phenotypic diversity of native populations of *Elymus nutans* [J]. Chinese Journal of Grassland, 2013,35(5):62-68
- [25] 梁永波. 黄淮北部不同小麦品种(系)产量与株型性状的相关性研究[D]. 保定:河北农业大学,2022:13-36
LIANG Y B. Study on correlation between yield and plant type trait of different wheat varieties (lines) in the North of Huang-Huai Region [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2022:13-36
- [26] 郭嘉,晁跃辉. 27份谷子高代品系农艺性状的变异和方差分析 [J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20230918.1558.012,2023-09-19/2025-12-02>
GUO J, CHAO Y H. Variation and variance analysis of agronomic characters of 27 high generation millet lines [J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20230918.1558.012,2023-09-19/2025-12-02>
- [27] 孙娜. 蒙农杂种冰草退化群体相关性状变异分析[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2020:26-35
SUN N. Variation Analysis of Related Characters on Degraded Population of *A. cristatum* XA. desertorum cv. Hycrest-Mengnong [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020:26-35
- [28] SHABIR G, NAVEED S A, ARIF M. Estimation of phenotypic variability and mutual association of yield and its components in rice (*Oryza sativa* L.) germplasm using multivariate analysis[J]. Journal of Agricultural Research (JAR), 2013, 51(4): 361-378
- [29] 刘昆. 不同穗型水稻品种颖花分化与退化机制及其调控[D]. 扬州:扬州大学,2023:16-31

- LIU K. Evaluation of salt tolerance, drought resistance and comprehensive trait of two kinds of Wheatgrass [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023: 16-31
- [30] ROY S C, SHARMA B D. Assessment of genetic diversity in rice (*Oryza sativa* L.) germplasm based on agro-morphology traits and zinc-iron content for crop improvement [J]. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 2014, 20(2): 209-224
- [31] 杨世丽, 杨胜海, 李涛, 等. 基于 SNP 芯片的贵州香禾糯遗传多样性分析及核心种质构建 [J]. *种子*, 2024, 43(7): 9-16
- YANG S L, YANG S H, LI T, et al. Genetic diversity analysis and core germplasm construction of Gui zhou Kam Sweet Rice based on SNP chip [J]. *Seed*, 2024, 43(7): 9-16
- [32] 王建成. 构建植物遗传资源核心种质新方法的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006: 17-28
- WANG J C. Studies on new methods for constructing core collection of plant germplasm resources [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006: 17-28
- [33] 刘宁宁. 植物资源核心种质构建与评价新方法的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2007: 23-36
- LIU N N. Studies on new methods for constructing and evaluating core collection of plant germplasm resources [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007: 23-36
- [34] 孙永强, 陈建华, 张剑, 等. 基于表型性状的西伯利亚杏核心种质构建 [J]. *沈阳农业大学学报*, 2022, 53(1): 43-54
- SUN Y Q, CHEN J H, ZHANG J, et al. Construction a core collection of *Armeniaca sibirica* based on phenotypic traits [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2022, 53(1): 43-54
- [35] 张曦, 刘伟, 钱玉源, 等. 陆地棉种质资源遗传多样性分析及初级核心种质构建 [J]. *华北农学报*, 2023(Sup1): 26-33
- ZHANG X, LIU Y, QIAN Y Y, et al. Genetic diversity analysis and primary core germplasm development of upland cotton germplasm resources [J]. *Journal of North China Agricultural Sciences*, 2023(Sup1): 26-33
- [36] 张莹, 解丰羽, 孙迎坤, 等. 基于表型性状的茶梅初级核心种质构建 [J]. *植物资源与环境学报*, 2025, 34(2): 82-88
- ZHANG Y, XIE F Y, SUN Y K, et al. Construction of primary core collection of *Camellia sasanqua* based on phenotypic traits [J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2025, 34(2): 82-88
- [37] 沈志军, 马瑞娟, 俞明亮, 等. 国家果树种质南京桃资源圃初级核心种质构建 [J]. *园艺学报*, 2013, 40(1): 125-134
- SHEN Z J, MA R J, YU M L, et al. Establishment of peach primary core collection based on accessions conserved in National Fruit Germplasm Repository of Nanjing [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2013, 40(1): 125-134
- [38] 陈焕杰. 山茶种质资源核心库构建 [D]. 杭州: 浙江农林大学, 2013: 18-20
- CHEN H J. Construction of core germplasm of *Camellia* [D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2013: 18-20

(责任编辑 付 宸)