

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.04.011

引用格式:王卉,再吐尼古丽·库尔班,胡相伟,等.44份中亚引进高粱种质资源表型多样性分析[J].草地学报,2026,34(4):1252—1261

WANG Hui, Zaituniguli·KUERBAN, HU Xiang-wei, et al. Phenotypic Diversity Analysis of 44 *Sorghum* Germplasm Resources Introduced from Central Asia[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(4):1252—1261

44份中亚引进高粱种质资源表型多样性分析

王 卉¹, 再吐尼古丽·库尔班¹, 胡相伟¹, 赵 云¹, 杨宝谊¹, 马艳明¹,
肖 菁¹, 侯升林², 刘国庆^{3*}, 冯国郡^{1*}

(1. 新疆维吾尔自治区农业科学院作物研究所/国家中亚特色作物种质资源中期库, 新疆 乌鲁木齐 830091;

2. 河北省农林科学院农业资源环境研究所, 河北 石家庄 050035;

3. 河北省农林科学院谷子研究所, 河北 石家庄 050035)

摘要:表型性状鉴定是认识作物种质资源和培育新品种的基础,中亚的高粱种质具有独特的基因型,充分了解这些种质材料对我国的高粱育种具有重要意义。本研究以44份中亚引进高粱种质资源为材料,开展表型性状精准鉴定,结合多元统计方法(包括相关性分析、聚类分析与主成分分析)进行系统性评价。结果表明,参试材料在表型水平上呈现高度异质性,遗传背景复杂,并且性状之间存在复杂的相互关系。通过聚类分析,44份高粱资源被分为5组,通过Fixation值筛选出综合表现最好的10份材料,其中类群II的育种材料有7份,其表型特征显著优于其他类群(如株高均值达286.33 cm,穗重102.50 g),可作为种质创新与杂交组合构建的核心亲本材料。本研究为干旱半干旱条件下高粱种植提供了理论基础,同时为高粱种质资源的高效利用及新品种开发奠定了基础。

关键词:中亚;高粱;种质资源;遗传多样性

中图分类号:S514;S324

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)04-1252-10

Phenotypic Diversity Analysis of 44 *Sorghum* Germplasm Resources Introduced from Central Asia

WANG Hui¹, Zaituniguli·KUERBAN¹, HU Xiang-wei¹, ZHAO Yun¹, YANG Bao-yi¹, MA Yan-ming¹,
XIAO Jing¹, HOU Sheng-lin², LIU Guo-qing^{3*}, FENG Guo-jun^{1*}

(1. Crop Research Institute of Xinjiang Uygur Autonomous Region Academy of Agricultural Sciences/National Central Asian Characteristic Crop Germplasm Resources Medium-term Gene Bank, Urumqi, Xinjiang 830091, China; 2. The Institute of Agricultural Resources and Environment, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Shijiazhuang, Hebei Province 050035, China; 3. Institute of Millet Crops, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Shijiazhuang, Hebei Province 050035, China)

Abstract: The identification and characterization of phenotypic traits are the foundation for understanding crop germplasm resources for breeding new cultivars. The sorghum germplasm from Central Asia demonstrated unique genotypes. It is of great significance to fully understand these materials for sorghum breeding in China. This study focused on 44 sorghum germplasm resources introduced from Central Asia. Precise characterization of phenotypic traits was systematically conducted, combined with multivariate statistical methods (including correlation analysis, cluster analysis, and principal component analysis) for systematic evaluation. Data analysis revealed that the tested accessions exhibited high heterogeneity at the phenotypic level, possessed diverse genetic backgrounds, and demonstrated complex interrelationships among traits. Cluster analysis grouped the

收稿日期:2025-06-13;修回日期:2025-08-04

基金项目:新疆维吾尔自治区农业科学院农业科技创新稳定支持专项(xjnkylwdzc-2024001-04);“天池英才”引进计划;新疆维吾尔自治区区域协同创新专项(上海合作组织科技伙伴计划及国际科技合作计划)项目(2022E01029);国家谷子高粱产业技术体系乌鲁木齐综合试验站(CARS-06-B30)资助

作者简介:王卉(1986-),女,汉族,新疆奎屯人,副研究员, E-mail: 362685578@qq.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: fengguojun@126.com; guoqingliu@hotmail.com

44 sorghum accessions into five clusters. Based on different breeding objectives, suitable germplasm resources can be selected. Principal component analysis (PCA) and comprehensive evaluation were performed on the sorghum resources. Based on F-values, the top 10 accessions with the best overall performance were identified. Among them, 7 germplasm materials belonged to Cluster II, and their phenotypic characteristics were significantly superior to that of the other clusters (e. g., with mean plant height reaching 286.33 cm and panicle weight at 102.50 g). They showed particularly outstanding performance in stalk lodging resistance and grain yield potential, making them valuable core parental materials for germplasm innovation and the development of hybrid combinations. This study analyzed the phenotypic diversity of sorghum germplasm resources and classified them based on similar phenotypes. This study provides a theoretical foundation for sorghum cultivation in semi-arid and arid regions, and also lays a foundation for the efficient utilization of sorghum germplasm resources and the development of new varieties.

Key words: Central Asia; *Sorghum*; Germplasm resources; Phenotypic diversity

高粱(*Sorghum bicolor* L.),别称乌禾,为禾本科高粱属一年生草本植物,已有5000多年的栽培历史,是世界上总产量仅次于小麦、玉米、水稻、大麦的第五大谷类作物^[1]。高粱的起源中心位于非洲埃塞俄比亚周边干旱区域,通过印度和中亚的传播路径引入中国,在长期驯化过程中形成了丰富的遗传变异^[2]。受不同地域气候、栽培等条件的影响,原始高粱的形态学性状和生理特性在不同的区域产生了不同的变异,形成了适应当地环境的不同栽培种之间的差异^[2],表现出高光效、高生物产量的特性。高粱具有产量高、抗逆性强(抗旱、抗涝、耐盐碱、耐瘠薄、耐高温和耐寒冷等)及用途广泛的特点^[3]。除食用外,还用作酿造、饲料等。根据本团队多点调研统计,随着酿酒及畜牧业的发展,新疆对高粱原料的需求量逐年增加,但目前主栽品种多依赖外引,生产中存在丰产性及适应性不理想、缺乏适宜机械化栽培的优良株型^[4]以及品种同质化等突出问题^[5]。而中亚与新疆接壤,具有相似的地理环境和气候,因此,引进和评价中亚高粱种质对培育适合新疆种植的高粱新品种具有重要的意义。

在我国高粱育种发展进程中,曾多次系统开展国外种质资源的引进与收集鉴定工作。这些引进资源通过评价后,为我国高粱品种改良作出重要贡献,提升了国内高粱生产水平。如从美国引进的不育系材料‘622A’‘623A’‘624A’和‘625A’已在我国甜高粱培育中广泛应用^[6]。针对当前我国能源高粱育种不育系材料缺乏的问题,许依等^[6]引进并评价了62份甜高粱种质,筛选出能源潜力较高的亲本材料。张一中等^[7]通过对175份高粱种质资源进行鉴定,认为来自印度的几个大粒高粱可以作为江苏高粱新品种选育的重要资源。

高粱是中亚地区重要的粮食和饲草作物^[8],在其独特的气候与地理环境(干旱、半干旱、大陆性气候、高海拔山区)条件下,形成了丰富的多样性。中亚高粱在长期自然选择和人工驯化中,演化出抗

旱、耐盐碱、抗高温等特性,是改良高粱品种的重要基因库,但目前关于中亚高粱种质资源的研究却未见报道。本研究针对新引进的44份中亚高粱种质资源,系统评估其主要农艺性状多样性,旨在筛选优异种质用于高粱遗传改良,为新疆地区高粱种质资源的引种收集与创新利用提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以新疆维吾尔自治区农业科学院作物研究所(国家中亚特色作物种质资源中期库)保存的44份中亚高粱种质资源作为参试材料。

1.2 试验设计

试验地点位于新疆农业科学院奇台麦类试验站(2024年),89°45′23″E,43°59′57″N,海拔827 m。试验地为水浇地,壤土,前茬玉米(2023年),肥力中等。采用人工穴播,1行区,行长5 m,行距50 cm,株距20 cm。大田管理按照常规田间管理方法,灌溉、施肥采用膜下滴灌-施肥技术,在出苗期和拔节期对田间进行人工除草,确保高粱正常生长的营养需要,抽穗开花前给高粱穗套上羊皮纸袋防止串粉。

1.3 性状调查

依据《高粱种质资源描述规范和数据标准》^[9],系统记录各参试材料的生育周期及成熟期等关键物候指标。于形态特征方面,采取随机取样的方法,选择3株完整植株进行调查。共记录23项表型性状,其中包括芽鞘色(Coleoptile color,CC)、幼苗叶色(Seedling leaf color,SLC)、主脉色(Main vein color,MC)等描述性性状,以及株高(Plant height,PH)、茎粗(Stem diameter,SD)、粒宽(Grain width,GW)等数量性状。

表 1 高粱种质资源基本信息

Table 1 General information of the sorghum germplasm resources

编号 No.	种质名称 Germplasm name	来源 Origination	编号 No.	种质名称 Germplasm name	来源 Origination
1	ICSR-93034	塔吉克斯坦 Tajikistan	23	卡哈朗 Karangahape Road	塔吉克斯坦 Tajikistan
2	斯韦特兰娜 5号 Svetlana 5	塔吉克斯坦 Tajikistan	24	地方品种 1 Local variety 1	塔吉克斯坦 Tajikistan
3	苦盏 Khujand	塔吉克斯坦 Tajikistan	25	地方品种 2 Local variety 2	塔吉克斯坦 Tajikistan
4	Tuc-14	塔吉克斯坦 Tajikistan	26	火炬 Torch	塔吉克斯坦 Tajikistan
5	ICSSH-58	塔吉克斯坦 Tajikistan	27	卡拉尔 Carral	塔吉克斯坦 Tajikistan
6	沙尔克号 Schalk	塔吉克斯坦 Tajikistan	28	海鸥 Sea mew	塔吉克斯坦 Tajikistan
7	SPV-1499	塔吉克斯坦 Tajikistan	29	巨人 Giant	塔吉克斯坦 Tajikistan
8	YCSV-25-279	塔吉克斯坦 Tajikistan	30	卡尼巴达白 Kanibada white	塔吉克斯坦 Tajikistan
9	ICSV-93-046	塔吉克斯坦 Tajikistan	31	吉萨尔-45 Gissar-45	塔吉克斯坦 Tajikistan
10	ICSV-25-275	塔吉克斯坦 Tajikistan	32	吉萨尔-25 Gissar-25	塔吉克斯坦 Tajikistan
11	Tuc-13	塔吉克斯坦 Tajikistan	33	霍金斯基 Hozinski	塔吉克斯坦 Tajikistan
12	扫帚高粱 Broomstick sorghum	塔吉克斯坦 Tajikistan	34	地方品种 3 Local variety3	塔吉克斯坦 Tajikistan
13	ICSV-112	塔吉克斯坦 Tajikistan	35	地方品种 4 Local variety4	塔吉克斯坦 Tajikistan
14	ICSV-25-280	塔吉克斯坦 Tajikistan	36	地方品种 5 Local variety5	塔吉克斯坦 Tajikistan
15	Uz Yao	塔吉克斯坦 Tajikistan	37	地方品种 6 Local variety6	塔吉克斯坦 Tajikistan
16	S-35	塔吉克斯坦 Tajikistan	38	地方品种 7 Local variety7	塔吉克斯坦 Tajikistan
17	吉萨尔 Gissar	塔吉克斯坦 Tajikistan	39	地方品种 8 Local variety8	塔吉克斯坦 Tajikistan
18	ICSP-93-036	塔吉克斯坦 Tajikistan	40	地方品种 9 Local variety9	塔吉克斯坦 Tajikistan
19	ICSV-745	塔吉克斯坦 Tajikistan	41	地方品种 10 Local variety10	塔吉克斯坦 Tajikistan
20	WZGL2309-1	乌兹别克斯坦 Uzbekistan	42	地方品种 11 Local variety11	塔吉克斯坦 Tajikistan
21	塞维利亚 Sevilla	塔吉克斯坦 Tajikistan	43	地方品种 12 Local variety12	塔吉克斯坦 Tajikistan
22	巴克拉瓦尔 Bakrawal	塔吉克斯坦 Tajikistan	44	地方品种 13 Local variety13	塔吉克斯坦 Tajikistan

1.4 数据处理与分析

统计分析的性状分为两类:第1类是质量性状,包含芽鞘色(CC)、幼苗叶色(SLC)、主脉色(MC)、穗柄伸出状态(Panicle branch extension, PBE)、穗型(Panicle type,PT)等10个性状,分析各性状的频率分布和多样性指数;第2类是数量性状,包含株高(PH)、茎粗(SD)、主穗长(MPL)、叶片数(Leaf number, LN)、千粒重(1000-Grain weight, TGW)等13个性状。

本研究采用描述性统计与多样性指数相结合的分析策略。

- (1)基础统计量计算:具体包括:
计算各性状的平均值($\bar{x}$)、标准差(δ)、变异系

数(CV)、最大值(Max)与最小值(Min)。

- (2)多样性指数测定:

将质量性状通过赋值法实现数值化转换(详见表2);定量性状按 $\bar{x} \pm k\delta(k=0.5, 1.0, \dots, 2.0)$ 划分为10个等级区间,每0.5 δ 标准差为1级,基于各等级频率分布计算 Shannon-Weaver 多样性指数^[10]。利用 Shannon-Weaver 遗传多样性指数来衡量群体遗传多样性大小。计算公式为: $H' = -\sum p_i \ln p_i$,其中 p_i 为第 i 等级材料占比,ln为自然对数。数据的基础统计由 Excel 和 Origin 2025 联合分析处理;22个表型性状原始数据用 SPSS 进行主成分分析;聚类分析用 Origin 2025 软件进行分析。

表 2 描述性性状赋值

Table 2 Assignment of morphological traits

性状 Traits	赋值 Assignment
芽鞘色 Coleoptile color	白=1;绿=2;紫=3
幼苗叶色 Seedling leaf color	绿=1;红=2;紫=3
主脉色 Main vein color	白=1;浅黄=2;黄=3;绿=4;
穗柄伸出状态 Panicle branch extension	长=1;中=2;短=3;侧裂=4;缩穗=5
穗型 Panicle type	紧=1;中紧=2;中散=3;侧散=4;周散=5
穗形 Panicle shape	纺锤=1;牛心=2;圆筒=3;棒形=4;杯形=5;球形=6;伞形=7;帚形=8
颖壳色 Glume color	白=1;黄=2;灰=3;红=4;褐=5;紫=6;黑=7
颖壳包被度 Hull coated degree	0=1;1/4=2;1/2=3;3/4=4;1=5
粒色 Grain color	白=1;黄=2;灰=3;红=4;褐=5;紫=6;黑=7
粒形 Grain shape	卵形=1;椭圆形=2;圆形=3;长圆形=4

2 结果与分析

2.1 质量性状多样性分析

如表 3 所示,高粱的 10 个质量性状呈现不同程度的变异,其中穗形的变异数量分布高达 7 种,芽鞘色变异类型最少,仅有 1 种。10 个性状的总变异类型为 42 种。芽鞘色全部是绿色,其多样性指数为 0,为高粱种质资源的 10 个质量性状中最低。幼苗叶色有绿色和紫色两种,其中 93.2% 都为绿色,因此其遗传多样性指数较低,为 0.2484。主脉色指开花期植株中部叶片的中脉颜色,分为白色、浅黄色、黄色和绿色,其中浅黄色占比较高,为 40.9%,白色次之,为 34.1%,遗传多样性指数为 1.1559。穗柄伸出状态有长、中、短、侧裂和缩穗五种变异类型,其中缩穗最多,多为帚用高粱,占 34.1%,其遗传多样性指数在测定质量性状中位居第 2,为 1.5163。穗型分为紧、中紧、中散、侧散和周散五种,中散型最多,

占 38.6%,其次是中紧和侧散型都为 27.3%,周散型仅占 6.8%,无紧穗型,其遗传多样性指数为 1.2591。穗形则包括纺锤形、牛心形、圆筒形等,其中伞形和帚形占比最多,为 25%,棒形次之,占 20.5%,该性状的遗传多样性指数最高,为 1.7104。颖壳色包括白色、黄色、红色等,其中红色最多,占 50.0%,黄色占 29.5%,褐色最少,占 2.3%。颖壳包被度为成熟期颖壳包被籽粒的程度,分为籽粒裸露、包被 1/4、包被 1/2、包被 3/4 和全包被,其中颖壳包被 1/2 的最多,占 56.8%,颖壳全包被也占比较高,为 31.8%,遗传多样性指数为 1.0547。粒色包括白色、黄色、橙色、红色、褐色和黑色等,其中红色和白色最多,分布占 52.3% 和 40.9%,其遗传多样性指数相较于其他质量性状低,为 0.9649。粒形主要为卵圆形和椭圆形,分布占 34.1% 和 29.5%,其遗传多样性指数也较高,在全部质量性状中排第 3 位,达 1.3211。

表 3 高粱种质资源质量性状的分布率及多样性指数表

Table 3 Distribution rates and diversity indices of qualitative traits in the sorghum germplasm resources

性状 Traits	赋值分布率 Assignment distribution ratio/%								遗传多样性指数 Genetic diversity index
	1	2	3	4	5	6	7	8	
芽鞘色 Coleoptile color	/	100.0	/	/	/	/	/	/	0.0000
幼苗叶色 Seedling leaf color	93.2	/	6.8	/	/	/	/	/	0.2484
主脉色 Main vein color	34.1	40.9	2.3	22.7	/	/	/	/	1.1559
穗柄伸出状态 Panicle branch extension	25.0	15.9	15.9	9.1	34.1	/	/	/	1.5163
穗型 Panicle type	/	27.3	38.6	27.3	6.8	/	/	/	1.2591
穗形 Panicle shape	11.4	/	13.6	20.5	2.3	2.3	25	25	1.7104
颖壳色 Glume color	11.4	29.5	6.8	50.0	2.3	/	/	/	1.2238
颖壳包被度 Hull coated degree	2.3	4.5	56.8	4.5	31.8	/	/	/	1.0547
粒色 Grain color	40.9	2.3	2.3	52.3	2.3	/	/	/	0.9649
粒形 Grain shape	34.1	29.5	25.0	11.4	/	/	/	/	1.3211

高粱种质资源的 10 个质量性状的遗传多样性指数平均达到了 1.0455。同时,44 份高粱种质资源质量性状的遗传多样性指数分布并不均匀,具有一定的差异性。穗形的遗传多样性指数在所有性状中最高,为 1.7104,显示出较高的遗传变异度。芽鞘色的遗传多样性指数最低,为 0,表明其在这一性状上的没有遗传变异。44 份高粱中,以芽鞘色和幼苗叶色为绿色、主脉色为浅黄色、穗柄伸出状态为缩穗、中散穗、伞形或帚形、红色颖壳、颖壳 1/2 包被,红色卵圆形籽粒的材料居多。10 个质量性状都各有特点,表现出丰富的遗传多样性。

2.2 数量性状多样性分析

从表 4 中可以看出,不同高粱品种间的各农艺性状存在显著差异。13 个数量性状的变异系数分别为:穗重>千粒重>主穗长>穗柄粗>穗柄长>株高>茎粗>叶片数>籽粒长宽比>籽粒面积

>粒长>粒宽>籽粒周长。各性状均具有较高的遗传多样性,在这些数量性状中籽粒面积、穗柄粗、粒长和株高的遗传多样性指数较高,都在 2.0524 以上;穗重和千粒重的变异系数最大,分别为 56.40% 和 55.29%。株高变化范围介于 113.10 cm 至 378.70 cm 之间,其平均株高为 212.21 cm,变异系数为 28.85%,其遗传多样性指数也较高,为 2.052 4,株高在 212.21~273.43 cm 之间分布最多,占比 37.88%。茎粗变化范围介于 2.76 mm 至 27.76 mm 之间,其平均茎粗为 17.21 mm,变异系数为 25.15%,其遗传多样性指数为 2.0103,茎粗在 17.21~21.54 mm 之间分布最多,占比 39.39%。叶片数最小值为 4.00,最大值为 13.00,变异系数为 21.00%,属于中等变异,遗传多样性指数为 1.8336,相较其他数量性状来说为最低。穗长的变异系数较高,达 42.21%,变异范围在 12.00 cm 至 75.00 cm 之间,穗长主要集中在 17.84~24.36 cm,

占比达到31.06%。穗柄长与穗柄粗变异系数相近,分别为34.67%和36.20%,在13个数量指标中属于较高变异。籽粒相关的几个指标变异系数都

较低,除去籽粒长宽比(14.81%)、籽粒面积(13.11%)和粒长(10.19%)外,籽粒周长和籽宽的变异系数都低于10.00%。

表4 高粱种质资源数量性状多样性分析

Table 4 Diversity analysis of quantitative traits in the sorghum germplasm resources

性状 Traits	平均值 Mean	标准差 SD	最小值 Min	最大值 Max	变异系数 CV/%	遗传多样性指数 Genetic diversity index
株高 Plant height/cm	212.21	61.22	113.10	378.70	28.85	2.0524
茎粗 Stem diameter/mm	17.21	4.33	2.76	27.76	25.15	2.0103
叶片数 Leaf number/个	9.58	2.01	4.00	13.00	21.00	1.8336
主穗长 Main panicle length/cm	30.88	13.03	12.00	75.00	42.21	1.9059
穗柄长 Peduncle length/cm	36.75	12.74	16.00	82.00	34.67	2.0293
穗柄粗 Peduncle diameter/mm	7.75	2.81	2.16	14.96	36.20	2.0567
穗重 Panicle weight/g	70.47	39.75	10.00	250.00	56.40	1.8468
千粒重 1000-Grain weight/g	20.34	11.25	3.73	79.29	55.29	1.8683
粒长 Grain length/mm	4.87	0.50	3.59	6.05	10.19	2.0534
粒宽 Grain width/mm	3.42	0.33	2.61	4.10	9.76	2.0452
籽粒长宽比 Grain length-to-width ratio	1.48	0.22	1.14	2.08	14.81	1.9742
籽粒面积 Grain area/mm ²	11.57	1.52	7.59	15.32	13.11	2.0629
籽粒周长 Grain perimeter/mm	13.58	0.93	10.16	15.95	6.82	1.9853

2.3 表型性状的相关性分析

通过对44份高粱的23个表型性状进行相关性

分析发现,不同性状之间存在不同程度的相关性(图1)。

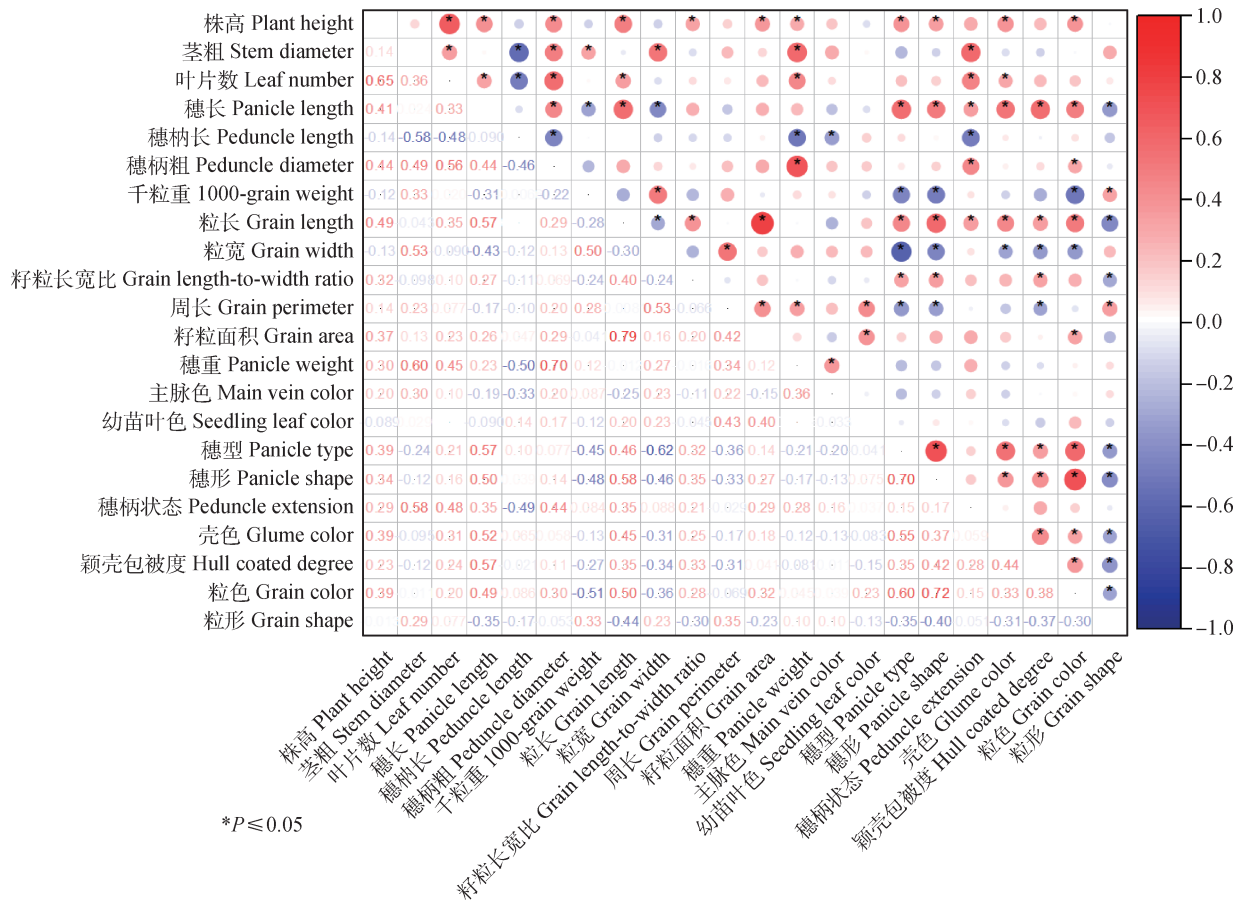


图1 高粱种质资源表型相关性分析

Fig. 1 Phenotypic correlation analysis of the sorghum germplasm resources

注:*表示 $P \leq 0.05$ 存在显著性差异。深蓝色和深红色都表示两个变量之间的关系非常密切(接近-1或+1),而浅蓝色或浅红色则表示较弱的相关性(接近0)

Note: * indicates significant difference at $P \leq 0.05$. Deep blue and deep red both indicate a very strong relation ship between the two variables (close to -1 or +1), while light blue or light red indicate a weaker correlation (close to 0)

其中株高与叶片数($r=0.65$)之间存在显著正相关关系,说明株高越高,叶片数越多;产量相关性状中,穗柄粗与穗重($r=0.70$)、茎粗与穗重($r=0.60$)、茎粗与穗柄状态($r=0.58$)之间均呈显著正相关,说明粗壮的茎秆和穗柄有利于提高穗重,但穗柄伸出状态越趋向于侧裂或缩穗;穗柄长与穗重($r=-0.50$)呈负相关,表明短穗柄型高粱可能更有利于提高穗产量。穗部相关性状存在高度相关,穗形与粒色($r=0.72$)、穗型与穗形($r=0.70$)、穗型与粒色($r=0.60$)都呈高度正相关,与穗长呈显著正相关关系的性状也较多,如穗型($r=0.57$)、颖壳包被度($r=0.57$)、粒长($r=0.57$)等,其中穗型与穗长的关系最为密切,确实散穗型高粱的穗长一般都较长,这些相关性表明穗部相关性状可能受到共同的遗传控制;与穗柄长相关的表型性状一般都存在显著负相关关系,例如穗柄粗($r=-0.46$)、穗重($r=-0.50$)和穗柄状态($r=-0.49$),穗柄长的高粱一般穗柄部位会较细,也承受不了太大穗重的高粱穗,穗柄伸出叶鞘的程度也越多;穗型与粒宽($r=-0.62$)呈负相关,表明中散和侧散穗型通常具有较窄的籽粒。千粒重与粒宽($r=0.50$)呈显著正相关,与穗形($r=-0.48$)、穗型($r=-0.45$)和粒色($r=-0.51$)存在显著负相关,表明紧穗型的高粱与较高的千粒重相关联;由此可见,44 份中亚引进高粱种质资源的各性状间是相互协调、相互制约,在种质资源利用时应综合考虑,可以通过选择粗茎秆、短穗柄的高粱材料,提高穗重和产量。

2.4 表型性状的聚类分析

对 44 份高粱种质资源进行聚类分析。结果表明(图 2、表 5),在欧式距离为 5 时,44 份高粱资源划分为五大类群。其中第 I 类群共 19 份,占比 43.18%,该群体以紧穗、棒形、红壳白粒为主,颖壳包被度以 1/2 为主,

平均株高为 220.83 cm,最大值为 285.10 cm;第 II 类群共 8 份,占比 18.18%,该群体以侧散穗、帚形、缩穗、红壳红粒为主,颖壳包被以全包被为主,平均株高较高,为 286.33 cm,最大值为 351.20 cm,总体表现为高秆大穗型高粱,主要代表资源为 28、20、30 等;第 III 类群共 12 份,占比为 27.27%,该群体以中散穗、伞形、红壳红粒为主,颖壳包被度以 3/4 为主,平均株高最矮,为 149.07 cm,最小值为 113.1 cm,穗柄较长,千粒重和穗重较低,综合性状表现较差,育种利用价值有限;第 IV 类共 4 份,占比为 9.09%,穗重和千粒重均值均为最大,分别是 111.67 g 和 32.17 g,属于粒大粒重型高粱,可作为育种材料加以利用,主要代表资源为 35、19 等;第 V 类共 1 份,占比为 2.27%,株高和穗柄长最高,平均值达到 368.77 cm 和 55.67 cm,该类群穗长中等、穗柄长且伸出较长,单穗重和千粒重中等,适宜做工艺用资源,如编织篮子或席垫。

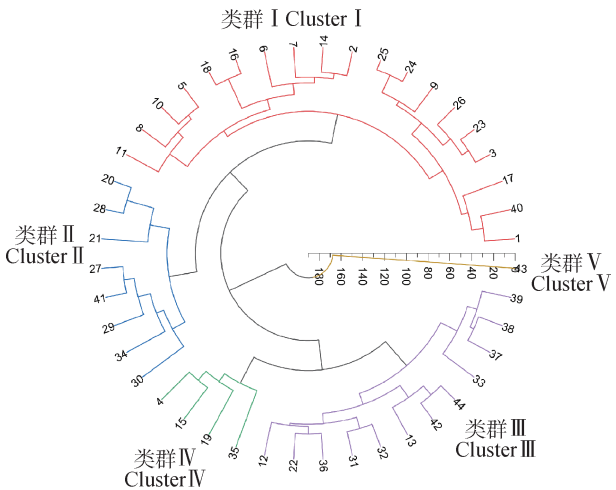


图 2 44 份高粱种质资源遗传聚类图
Fig. 2 Genetic cluster tree of the 44 sorghum germplasm resources

注:材料序号同表 1
Note: The codes of samples are the same as table 1

表 5 不同类群的高粱数量性状均值分析

Table 5 Analysis of the mean values of the quantitative traits in different clusters

性状 Traits	类群 I Cluster I			类群 II Cluster II			类群 III Cluster III			类群 IV Cluster IV			类群 V Cluster V		
	平均值 Mean	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	最小值 Min.	最大值 Max.
株高 Plant height/cm	220.83	135.50	285.10	286.33	245.10	351.20	149.07	113.10	198.20	153.11	129.90	200.00	368.77	361.50	378.70
茎粗 Stem diameter/mm	17.67	11.63	27.76	16.81	2.76	24.08	16.70	6.84	27.10	18.00	11.63	26.88	13.75	11.40	15.16
叶片数 Leaf number/个	9.90	6.00	13.00	11.46	10.00	13.00	7.53	4.00	11.00	9.83	8.00	12.00	11.00	10.00	12.00
主穗长 Main panicle length/cm	27.07	12.00	52.00	46.81	20.00	75.00	28.81	16.00	46.00	24.50	20.00	35.00	23.67	22.00	25.00
穗柄长 Peduncle length/cm	36.43	18.00	64.00	27.00	16.00	43.00	43.81	24.00	82.00	29.75	22.00	39.00	55.67	50.00	61.00
穗柄粗 Peduncle diameter/mm	7.62	3.36	14.19	10.61	7.46	14.96	5.93	2.16	12.33	8.85	3.39	14.48	6.85	6.28	7.50
千粒重 1000-Grain weight/g	22.29	4.25	42.55	15.60	6.71	32.29	16.60	3.78	5.65	32.17	9.60	79.29	30.31	17.83	45.25
粒长 Grain length/mm	4.73	4.46	5.03	5.38	5.32	5.45	4.73	2.68	4.04	4.23	4.02	4.61	4.61	4.50	4.94
粒宽 Grain width/mm	3.56	2.64	4.07	3.23	3.12	3.45	3.31	1.16	2.07	3.56	3.49	3.71	3.37	3.30	3.42
籽粒长宽比 Grain length-to-width ratio	1.38	1.14	1.90	4.13	1.56	13.98	1.50	8.43	15.14	1.27	1.24	1.29	1.41	1.32	1.57
籽粒面积 Grain area/mm ²	12.72	11.67	14.39	11.74	11.00	12.21	10.88	11.07	15.42	12.95	12.34	13.56	11.22	10.71	12.11
籽粒周长 Grain perimeter/mm	13.73	13.12	14.24	13.53	13.08	14.24	13.25	11.07	10.00	13.37	13.12	13.62	13.07	12.61	13.93
穗重 Panicle weight/g	67.37	20.00	160.00	102.50	70.00	170.00	41.67	10.00	100.00	111.67	40.00	250.00	66.67	60.00	70.00

2.5 表型性状的主成分分析

对 44 份高粱的 22 个表型性状(因芽鞘色只有绿色,这里不参与分析)进行主成分分析,通过降维将多个性状指标转化为较少的综合指标,能够为高粱种质资源的评估提供更加精确和标准化的方法^[11-12]。确定 KMO 值为 0.657,大于 0.6 表示数据适合进行主成分分析^[13]。

基于特征值 $\lambda > 1$ 的提取标准,共确定出 5 个主成分(Principal components, PCs),累计方差贡献率达

68.034%(表 6)。前 5 个 PCs 可解释 22 个表型性状的主要变异信息,可作为综合性状评价的降维依据。各主成分解析如下:PC1($\lambda=5.972$):贡献率 27.144%,主导穗部与籽粒形态特征,其中穗形(0.789)和粒长(0.789)载荷最高;PC2($\lambda=4.263$):贡献率 19.375%,表征茎秆-穗柄结构属性,贡献最大的为茎粗(0.817);PC3(贡献率 9.863%):主要关联幼苗叶色(0.738);PC4(贡献率 6.253%):千粒重(0.617)解释其主要变异;PC5(贡献率 5.400%):株高(0.517)贡献度为最高。

表 6 表型性状的主成分分析
Table 6 Principal component analysis of phenotypic traits

性状 Traits	主成分 Principal components				
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
穗形 Panicle shape	0.789	-0.180	0.043	-0.182	-0.050
粒长 Grain length	0.789	0.107	0.393	0.240	-0.093
穗长 Panicle length	0.787	0.111	-0.133	0.082	-0.045
穗型 Panicle type	0.781	-0.268	-0.099	-0.033	0.171
粒色 Grain color	0.735	0.002	0.176	-0.389	0.112
壳色 Glume color	0.617	-0.100	-0.069	0.380	0.217
颖壳包被度 Hull coated degree	0.614	-0.094	-0.272	0.120	-0.209
株高 Plant height	0.580	0.410	-0.020	0.164	0.517
粒宽 Grain width	-0.557	0.510	0.332	0.105	-0.192
粒形 Grain shape	-0.514	0.276	-0.141	0.090	0.459
籽粒长宽比 Grain length-to-width ratio	0.501	-0.026	0.006	0.135	-0.141
茎粗 Stem diameter	-0.099	0.817	-0.137	0.036	-0.241
穗重 Panicle weight	0.022	0.790	-0.137	-0.216	0.068
穗柄粗 Peduncle diameter	0.374	0.720	-0.024	-0.301	-0.011
穗柄长 Peduncle length	-0.049	-0.660	0.428	0.104	0.187
叶片数 Leaf number	0.437	0.610	-0.204	0.187	0.260
穗柄状态 Peduncle extension	0.356	0.587	-0.163	0.186	-0.449
主脉色 Main vein color	-0.157	0.428	-0.234	-0.381	0.166
幼苗叶色 Seedling leaf color	0.04	0.142	0.738	-0.326	-0.118
籽粒面积 Grain area	0.423	0.322	0.721	0.227	-0.067
籽粒周长 Grain perimeter	-0.274	0.515	0.581	0.002	0.306
千粒重 1000-grain weight	-0.533	0.277	0.013	0.617	-0.006
特征值 Eigenvalue	5.972	4.263	2.17	1.376	1.188
贡献率 Contribution rates	27.144	19.375	9.863	6.253	5.400
累计贡献率 Cumulative contribution rates	27.144	46.519	56.382	62.634	68.034

2.6 综合评价

结合 5 个主成分中每个指标所对应的特征向量,以特征向量为权重,构建 5 个主成分的函数表达式,随后以每个主成分所对应的特征值占所提取主成分总的特征值之和的比例作为权重计算主成分综合模型: $F=0.399F_1+0.285F_2+0.145F_3+0.092F_4+0.079F_5$ 。

根据 F 值对 44 份高粱进行表型性状的综合评价,得分越高,综合表现越好。44 份高粱的得分范围在 20.00~35.00 之间。综合得分在前 10 名($F>31.25$)的资源信息见表 7,其中 7 份资源均来自于类群 II,塔吉克斯坦的‘海鸥’及乌兹别克斯坦的‘WZGL2309-1’两个品种的综合得分最高,分别为 35.00 和 34.93。

表 7 前 10 名综合评价结果
Table 7 Top 10 comprehensive evaluation results

编号 No.	来源 Origination	种质名称 Germplasm name	综合得分 Scores	类群 Cluster
28	塔吉克斯坦 Tajikistan	海鸥	35.00	II
20	乌兹别克斯坦 Uzbekistan	WZGL2309-1	34.93	II
30	塔吉克斯坦 Tajikistan	卡尼巴达白	34.86	II
21	塔吉克斯坦 Tajikistan	塞维利亚	34.58	II
29	塔吉克斯坦 Tajikistan	巨人	33.62	II
27	塔吉克斯坦 Tajikistan	卡拉尔	33.52	II
40	塔吉克斯坦 Tajikistan	地方品种 9	33.44	I
41	塔吉克斯坦 Tajikistan	地方品种 10	32.99	II
23	塔吉克斯坦 Tajikistan	卡哈朗	31.49	I
24	塔吉克斯坦 Tajikistan	地方品种 1	31.25	I

3 讨论

表型性状鉴定是认识作物种质资源和培育新品种的基础,而作物种质资源的表型多样性是遗传物质(DNA)的多态性在不同环境下的总体表达^[14]。表型性状反映了基因与环境的互作,易于获取且便于评估^[15],成为发掘具有生产利用价值但尚未被充分利用的特异性种质及其基因的关键手段。这些通过准确表型鉴定后的优异种质,是育种家培育可大范围推广种植品种的重要亲本^[16-17]。例如,来自水稻种质“矮仔占”的半矮秆基因用于育种,引发了水稻生产的绿色革命,产量提升 20%~30%;“野败”型野生稻的发现为水稻杂种优势的利用打开了突破口等^[18-19]。这些优异资源最初都是通过表型性状的评价和鉴定而发掘出来的。

研究高粱种质资源表型的多样性,可以揭示不同来源种质性状间的遗传差异。本研究比较了 44 份中亚引进高粱资源的 23 个表型性状数据,发现这些材料具有较高的遗传多样性。除芽鞘色主要集中在绿色外,其他质量性状频率分布都较为分散。在质量性状中,穗形的遗传多样性指数最高,为 1.7104,说明穗形的遗传变异程度较高,遗传基础复杂(涉及多基因位点或丰富的等位基因变异),对环境变化的适应潜力也更强。在数量性状中,穗重和千粒重的变异系数最大,籽粒面积和穗柄粗等性状的遗传多样性指数最高,这与牛雪婧等人^[21]提到的高粱穗部性状易分离的结论相一致。同时,从本研究可以看出数量性状的遗传多样性指数远高于质量性状的遗传多样性指数,这与牛雪婧^[21]、冯国郡^[22]、高杰^[23]的结论相一致,说明供试材料的类型广泛,可为不同高粱育种目标的创新提供材料基础。

本研究对作物表型性状的相关性分析表明,在数量性状中,籽粒长度与籽粒面积表现出高度正相关($r=0.79$),可能源于二者在籽粒形态建成过程中受共同的遗传调控路径或协同发育机制的影响,因此在育种中可作为耦合性状进行同步选择。更为重要的是,在质量性状方面,粒色与穗形之间也存在较强相关性($r=0.72$),这一结果提示穗部形态特征与籽粒色素沉积可能受内在生理或遗传因素的共同调控,例如控制穗结构的基因与色素合成通路间的连锁关系,或是在长期选育过程中因人为偏好形成的性状组合。Ayana 等人^[24]的研究同样支持穗部性状在高粱选育中的指导作用,本文结果不仅进一步印证了该观点,更通过粒色与穗形的关联为穗型选育提供了潜在的形态标记参考。此外,本研究也发现数量性状与质量性状间的相关性普遍较弱,这一现象与张一中等^[25]在同类作物中的发现一致,谷子的相关研究^[26]也呈现相似规律。这可能源于两类性状的遗传基础差异:数量性状通常由多基因控制,易受环境影响;而质量性状多为主效基因所调控,遗传机制的不同自然限制了其表型协同变异的强度。综上,本研究结果强调在育种实践中应重视穗部性状组合的整体选育策略,尤其在早期选择阶段,可借助如粒色等易辨质量性状,辅助预判如穗形等复杂数量性状的表现,从而提高选择效率与育种精准度。

本研究通过主成分分析揭示了五个重要的主成分,其累计贡献率达到 68.034%。主成分 1 和 4 的代表性状主要是穗部形态与籽粒发育特征,是指向产量潜力指标的;主成分 2 和 5 主要反映的是抗倒伏与株型优化方向;主成分 3 幼苗叶色代表了幼苗期光合潜力或抗逆性;结合 5 个主成分中每个指标所对应的特征向量,计算主成分综合得分,最终

筛选出表型优异的 10 份资源;对 44 份高粱进行主成分分析,能够有效地提取高粱表型多样性的核心特征,为种质资源分类、性状关联挖掘及育种目标选择提供量化支持。

关于中亚高粱资源的研究报道很少。Strelchenko 等人^[27]第一次对中亚高粱种质资源进行了系统性的遗传多样性分析,他们利用分子标记(水稻 cDNA-STS 和 Indel 标记)对来自非洲和亚洲的 48 个高粱种质资源进行了遗传多样性分析,结果表明,来自亚洲和非洲的种质可以按照地理来源明显的区分开来,而来自亚洲的种质资源可以按照地理来源清楚地分成了南亚、中亚和东亚三个亚组,来自中亚的种质具有不同于其他来源地的独特基因型,这些资源中可能蕴藏着新的基因,是独具特色的高粱基因库,同时新疆与中亚地区的塔吉克斯坦等国家接壤,具有相近的地理和气候条件,同样面临农业生产中存在的气候干旱、高温以及土壤盐碱和贫瘠等问题,因此对这些种质进行充分的了解和应用对于新疆乃至全国高粱的遗传改良具有重要的意义。

中亚地区分为山地气候、沙漠和草原气候,为了应对干旱气候和盐碱、贫瘠的土壤条件,国际半干旱热带作物研究所(ICRISAT)、国际旱地农业研究中心(ICARDA)和国际生物盐农业中心(ICBA)2011 年在中亚地区联合发起了“利用高粱和珍珠粟的多样性改良中亚粮食和饲料供应”计划,对部分高粱种质资源进行了耐盐碱鉴定和分类,鉴定并选育出 4 个优良的高粱新品种,提高了产量和种植效益^[28](<http://www.icarda.org/cac>)。本研究首次在国内对部分中亚高粱种质资源进行了系统的表型遗传分析与评价,为利用此类资源提供了依据。为进一步挖掘其育种潜力,后续将开展苗期与成株期的耐盐碱及抗旱性鉴定。同时,为实现对种质的精准挖掘,团队已利用基因组重测序技术完成了基因型分型,拟结合表型数据开展全基因组关联分析,以期鉴定新的抗逆与丰产基因,为我国高粱遗传改良提供资源与理论支撑。

4 结 论

44 份中亚引进的参试高粱资源类型丰富,质量性状和数量性状多样性指数都较高。聚类分析将所有种质划分为 5 个类群,并对高粱资源进行了

主成分分析及综合评价,基于 F 值筛选 10 份综合表现优异的材料,其中来自塔吉克斯坦的‘海鸥’及乌兹别克斯坦的‘WZGL2309-1’两个品种的综合得分最高,特别是类群 II 中的高秆大穗型资源,可作为核心亲本用于高粱种质创新及杂交育种,为培育适宜干旱半干旱地区、兼具高产与抗逆性的高粱新品种提供了重要的材料基础和理论依据。后续研究应结合基因组学手段,深入挖掘其抗逆与丰产相关基因,推动种质资源的精准利用。

参考文献

- [1] SUHENDRO E L, MCDONOUGH C M, ROONEY L W, et al. Effects of processing conditions and sorghum cultivar on alkaline-processed snacks[J]. Cereal Chemistry, 2007, 75(2): 187-193
- [2] 张福耀, 平俊爱. 高粱的起源、驯化与传播[J]. 陕西农业科学, 2022, 68(4): 82-87
ZHANG F Y, PING J A. Origin, domestication and diffusion of sorghum[J]. Shanxi Journal of Agricultural Sciences, 2022, 68(4): 82-87
- [3] 杨焕春, 常向彩, 孙向东. 高粱营养品质及在食品和饲料方面开发应用研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2024, (12): 96-102
YANG H C, CHANG X C, SUN X D. Research advances in sorghum quality and its application in food and feed[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2024(12): 96-102
- [4] 曲祥春, 杨微, 梁军, 等. 中国粒用高粱产业问题探讨[J]. 东北农业科学, 2020, 45(2): 16-19, 35
QU X C, YANG W, LIANG J, et al. Discussion on problems of grain sorghum industry in China[J]. Northeast Agricultural Sciences, 2020, 45(2): 16-19, 35
- [5] 郭睿. 粒用高粱育种现状、问题与解决措施[J]. 农业工程技术, 2019, 39(2): 89
GUO R. Current situation problems and solutions of grain sorghum breeding [J]. Agricultural Engineering Technology, 2019, 39(2): 89
- [6] 许依, 唐朝臣, 何思洋, 等. 62 份从美国引进高粱不育系种质能源相关产量和品质性状评价[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(6): 1-11
XU Y, TANG C C, HE S Y, et al. Identification and evaluation of 62 american-introduced sorghum sterile lines germplasm based on yield and quality traits for energy utilization[J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(6): 1-11
- [7] 张一中, 李春宏, 孟珊, 等. 江苏省引进高粱种质表型性状遗传多样性分析[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2022, 42(3): 32-42
ZHANG Y Z, LI C H, MENG S, et al. Genetic diversity and cluster analysis of phenotypic traits of 175 imported sorghum (*Sorghum bicolor*(L.) Moench) germplasm resource in Jiangsu Province[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2022, 42(3): 32-42

- [8] 廖梦婷,魏凤. 中亚地区粮食生产潜力及发展潜力分析-基于GAEZ方法[J]. 自然资源学报,2021,36(3):582-593
LIAO M T, WEI F. Analysis of grain production and development potentiality in Central Asia based on GAEZ method[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(3): 582-593
- [9] 陆平. 高粱种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京:中国农业出版社,2006:20-32
LU P. Descriptors and data standard for sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench][M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006: 20-32
- [10] 陈雪燕,王亚娟,雒景吾,等. 陕西省小麦地方品种主要性状的遗传多样性研究[J]. 麦类作物学报,2007,27(3):456-460
CHEN X Y, WANG Y J, LUO J W, et al. Genetic diversity in main characters of wheat landraces in shaanxi province [J]. Journal of Triticeae Crops, 2007, 27(3): 456-460
- [11] JONES J R, LAWRENCE H G, YULE I J. A Statistical comparison of international fertiliser spreader test methods-Confidence in bout width calculations[J]. Powder Technol. 2008 (184):337-351
- [12] TANG H, XU C, JIANG Y, et al. Evaluation of physical characteristics of typical maize seeds in a cold area of north China based on principal component analysis[J]. Processes, 2021, 9 (7):1167
- [13] YU S, TANG Y, LAN H, et al. Construction method of quantitative evaluation model for the maturity of korla fragrant pear. Engineering, 2022(15):243-250
- [14] 王晓鸣,邱丽娟,景蕊莲,等. 作物种质资源表型性状鉴定评价:现状与趋势[J]. 植物遗传资源学报,2022,23(1):12-20
WANG X M, QIU L J, JING R L, et al. Evaluation on phenotypic traits of crop germplasm: status and development [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2022, 23(1): 12-20
- [15] LIU Z, GAO C, LI J, et al. Phenotypic diversity analysis and superior family selection of industrial raw material forest species-Pinus yunnanensis Franch. Forests 2022(13):618
- [16] LAITINEN RAE, NIKOLOSKEI Z. Genetic basis of plasticity in plants[J]. Journal of Experimental Botany, 2019, 70(3): 739-745
- [17] LOZADA D N, CARTER A H. Insights into the genetic architecture of phenotypic stability traits in winter wheat [J]. Agronomy, 2020, 10(3):368
- [18] 余应弘,吴云天,曾翔,等. 水稻矮源遗传研究与利用. 湖南农业科学,2007(5):20-24
YU Y H, WU Y T, ZENG X, et al. Present situation of utilization on rice dwarf gene resources and its research advances in molecular biology[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2007(5): 20-24
- [19] 李胜男,刘伟,胡兴明,等. 近现代中国水稻育种历程[J]. 江苏农业科学,2023,51(11):20-26
LI S N, LIU W, HU X M, et al. History of rice breeding in modern and contemporary china[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(11): 20-26
- [20] 何中虎,庄巧生,程顺和,等. 中国小麦产业发展与科技进步[J]. 农学学报,2018,8(1):99-106
HE Z H, ZHUANG Q S, CHENG S H, et al. Wheat production and technology improvement in China[J]. Journal of Agriculture, 2018, 8(1): 99-106
- [21] 牛雪婧,王新栋,王金萍,等. 高粱地方种质资源表型多样性分析及综合评价[J]. 植物遗传资源学报, 2024, 25(4): 562-575
NIU X J, WANG X D, WANG J P, et al. Genetic diversity and comprehensive evaluation of sorghum germplasm based on phenotypic traits[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2024, 25 (4): 562-575
- [22] 冯国郡,李宏琪,叶凯,等. 甜高粱种质资源在新疆的多样性表现及聚类分析[J]. 植物遗传资源学报, 2012, 13(3): 398-405
FENG G J, LI H Q, YE K, et al. Genetic diversity and cluster analysis of sweet sorghum germplasm in Xinjiang[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2012, 13(3): 398-405
- [23] 高杰,封广才,李晓荣,等. 贵州不同地区高粱种质资源表型多样性与聚类分析[J]. 作物杂志,2020(6):54-60
GAO J, FENG G C, LI X R, et al. Phenotypic diversity and clustering analysis of sorghum germplasm resources in different regions of guizhou province[J]. Crops, 2020(6): 54-60
- [24] AYANA A, BEKELE E. Geographical patterns of morphological variation in sorghum (*Sorghum bicolor*(L.) Moench) germplasm from Ethiopia and Eritrea: Quantitative characters[J]. Euphytica, 2000, 115(2): 91-104
- [25] 张一中,张晓娟,梁笃,等. 基于表型性状的高粱育种材料遗传多样性分析及综合评价[J]. 中国农业科学,2023,56(15): 2837-2857
ZHANG Y ZH, ZHANG X J, LIANG D, et al. Genetic diversity analysis and comprehensive evaluation of sorghum breeding materials based on phenotypic traits [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(15): 2837-2857
- [26] 王海岗,贾冠清,智慧,等. 谷子核心种质表型遗传多样性分析及综合评价[J]. 作物学报, 2016, 42(1): 19-30
WANG H G, JIA G Q, ZHI H, et al. Phenotypic diversity evaluations of foxtail millet core collections [J]. Acta Agronomica Sinica, 2016, 42(1): 19-30
- [27] STRELCHENKO P, OKUIZUMI H, SHEHZAD T, et al. Genetic relationships of sorghum germplasm in Asia and Africa revealed by rice cDNA-STS and Indel markers[J]. Japan International Research Center for Agricultural Sciences, 2010(3): 259-268

(责任编辑 付 宸)