文章编号:1000-7601(2025)05-0001-14 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2025.05.01

谷子种质资源农艺性状与品质的多样性分析及综合评价

任瑞玉[1],李亚伟[1],董孔军[1],何继红[1],刘天鹏[1],张 磊[1],杨天育[2]

(1. 甘肃省农业科学院作物研究所,甘肃 兰州 730070;2.甘肃省农业科学院,甘肃 兰州 730070)

摘 要:为挖掘谷子优异种质资源,从国家和省资源库及国内相关单位选取 126 份谷子种质资源,开展 2 年农艺性状调查,并从中筛选 100 份测定其营养品质,采用多种分析方法进行研究及综合评价。结果表明:农艺性状方面,谷子种质资源变异丰富,16 个性状变异系数介于 9.30%~66.66%之间,主茎高变异最小,幼苗色变异最大。相关性分析显示株草质量与株穗质量、小区产量、株粒质量等指标间存在显著正相关关系($P<0.05$)。聚类分析将所有材料划分为五大类群,第 I 类群高杆大穗,可用于筛选饲草谷子;第 II 类群穗颈最短,可用于筛选矮秆宜机收谷子;第 III 类群平均主茎高最低,株穗和株粒质量及小区产量的均值最大,可筛选矮秆高产谷子;第Ⅳ类群千粒重最大,可作粒用育种材料。主成分分析将数量性状划分为 4 个主成分,累计贡献率 77.493%;根据各性状贡献率的权重计算综合得分 F 值,筛选出'60 天红酒谷'、'黄酒谷'等 10 份优异材料。品质分析中,微量元素 Fe 和 Se 变异系数较大,分别为44.97%和 70.00%,总淀粉与支链淀粉含量显著正相关($r=0.83$),而淀粉和粗蛋白含量则表现出负相关关系($r=-0.98$)。主成分分析将营养品质划分为 3 个主成分,其累计贡献率达到 72.559%,构建函数表达式综合评价营养品质,得分领先的'济糯谷 1 号'等 10 份资源可作优良育种材料。

关键词:谷子;种质资源;农艺性状;品质;多样性分析;综合评价

中图分类号:S515; S32 **文献标志码**:A

Diversity analysis and comprehensive evaluation of agronomic traits and quality of foxtail millet germplasm resources

REN Ruiyu[1], LI Yawei[1], DONG Kongjun[1], HE Jihong[1], LIU Tianpeng[1], ZHANG Lei[1], YANG Tianyu[2]

(1. *Crop Research Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*;
2. *Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*)

Abstract: In order to explore the excellent germplasm resources of foxtail millet, 126 foxtail millet germplasm accessions were selected from national and provincial resource banks and relevant domestic institutions. A two-year agronomic trait investigation was conducted, and 100 accessions were selected for nutritional quality analysis. Various analytical methods were employed for research and comprehensive evaluation. The results showed that, in terms of agronomic traits, there was abundant variation among the millet germplasm accessions. The coefficient of variation for 16 traits ranged from 9.30% to 66.66%. The variation of main stem height was the smallest and the variation of seedling color was the largest. Correlation analysis revealed significant positive correlations between straw per plant mass and various factors such as spike mass per plant, community production, grain mass per plant ($P<0.05$). Cluster analysis divided the materials into five major groups, each with distinct characteristics. Group I was characterized by tall plants and large panicles, which could be used for screening forage millet. Group II, with the shortest peduncle, could be employed for selecting short-statured millet suitable for mechanical harvesting. Group III had the lowest average main stem height and the highest average spike mass per plant, grain mass per plant, and community production, making it suitable for selecting short yet high-yielding millet. Group IV had the

收稿日期:2024-12-12 **修回日期**:2025-02-19

基金项目:甘肃省农业科学院区域协同创新项目(2024GAAS03);甘肃省农业科学院重点研发计划项目(2022GAAS41);国家现代农业产业技术体系(CARS-06-14.5-A8);甘肃省科技计划项目(23CXNA0036)

作者简介:任瑞玉(1966-),女,甘肃临洮人,研究员,主要从事谷子糜子遗传育种及栽培研究。E-mail: lzhrry2006@163.com

通信作者:杨天育(1968-),男,甘肃渭源人,研究员,主要从事小杂粮遗传育种与栽培研究。E-mail:13519638111@163.com

largest thousand-seed weight, ideal for grain breeding materials. Principal component analysis divided quantitative traits into four principal components, with a cumulative contribution rate of 77.493%. According to the comprehensive score (F value) calculated by the weight of contribution rates of each trait, the top 10 excellent materials, such as '60-day hongjiugu' and 'Huangjiugu', were selected. In the quality analysis, the coefficients of variation for the trace elements Fe and Se were relatively large, at 44.97% and 70.00%, respectively. There was a significant positive correlation between total starch content and amylopectin content ($r=0.83$), while starch content and crude protein content exhibited a negative correlation ($r=-0.98$). Principal component analysis divided nutritional quality into three principal components, with a cumulative contribution rate of 72.559%. A functional expression was constructed to comprehensively evaluate nutritional quality, and 10 resources, including 'Jinuogu No.1' with the highest score, could be used as excellent breeding materials.

Keywords: foxtail millet; germplasm resources; agronomic traits; quality; diversity analysis; comprehensive evaluation

谷子是重要的杂粮作物,在我国有8000多年的种植历史[1]。谷子的适播期长、生育期短、耐旱、耐瘠薄,在全球干旱与半干旱地区普遍种植[2],是应对气候变化的战略储备作物之一[3-4]。近年来,随着消费者对杂粮认知度的提高,我国谷子种植面积有所扩大,据国家谷子高粱产业技术体系统计,2020年中国谷子种植面积约150万hm^2[5]。在不断的人工栽培和驯化过程中,谷子积累了丰富的种质资源[6]。种质资源是关系到国家粮食安全的重要战略性资源[7],也被称为遗传资源,是进行作物育种和品种改良最原始、最有价值的材料[8],而表型性状的鉴定因具有直观性且易于获取,在遗传多样性分析中具有独特优势,成为了解作物种质资源和培育新品种的基石[9]。目前我国国家作物种质库中保存谷子资源27 000多份,根据形态特征和生物学特性差异可划分为67个组群[10]。对谷子表型性状进行分析,可以了解不同环境下谷子资源的性状分化和表型变异,鉴定优异种质,为育种提供可利用亲本材料。谷子淀粉含量高,主要成分为抗性淀粉和持续消化淀粉,对糖尿病患者十分友好[11];谷子蛋白是一种安全的低过敏性蛋白,适合老人和婴幼儿食用[12];谷子中不饱和脂肪酸含量很高,约为80%,经常食用谷子有利于预防心脑血管疾病[13-14]。曲丽洁等[15]研究发现,'张杂谷'系列谷子品种不仅产量高,而且具有优良的营养品质。穆秋霞等[16]测定了6个黑龙江主栽谷子品种的营养品质和糊化特性,结果显示这6种小米的平均粗蛋白、粗脂肪含量分别为10.40%和3.26%。李星等[17]选取来自我国5个省份的15个谷子品种,研究其主要营养成分含量和糊化特性发现,不同品种间的水分和脂肪含量差异性不明显,而蛋白质、淀粉含量等营养成分以及糊化特性存在差异,其中'长农35号'和'黄金米'具有较好的食用品质,为品质育种和栽培生产提供理论基础。发掘谷子优质品种资源的品质特性,利用优质资源改良现有品种,对我国谷子的品质育种具有积极意义。

目前,不少优异的谷子种质资源尚未被挖掘利用,本研究从国家和省资源库及国内相关单位引进126份谷子材料,基于2年的农艺性状调查,进行遗传多样性分析、相关性分析和聚类分析,将试验材料依据特征特性分成不同的类群,为不同的功能育种目标提供资源,并通过主成分分析筛选优异材料,同时综合分析谷子农艺性状和品质性状,发掘生产潜力大、营养品质好的优质资源,为谷子品质育种提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料共126份,来自国家资源库、甘肃省资源库、国内省市相关单位,试验材料基本信息见表1。

1.2 试验方法

试验于2022—2023年在甘肃省天水市甘谷试验站(105.29°E, 34.77°N)进行,试验站海拔1 277.6 m,为大陆性季风气候,年平均气温11.6℃,年降水量500 mm左右,全年日照时数2 300 h左右,无霜期190 d左右。供试土壤为黄绵土,耕层土壤有机质含量11.6 g·kg^{-1},碱解氮含量49.29 mg·kg^{-1},有效磷含量28.3 mg·kg^{-1},速效钾含量136.5 mg·kg^{-1}。

谷子播种日期为4月28日—4月30日,露地条播,顺序排列,小区面积6 m^2,田间进行跟踪调查记载,在幼苗期调查幼苗色、抽穗后调查成株色;灌浆期调查穗部刺毛长度、刺毛颜色;成熟期调查穗型、穗松紧度,对6个质量性状进行赋值用于统计分析(表2)。谷子成熟后每份材料取10株考种,调查

表 1　126 份谷子种质资源基本信息

Table 1　Basic information of 126 foxtail millet germplasm resources

序号 No.	种质名称 Germplasm name	来源 Source	序号 No.	种质名称 Germplasm name	来源 Source
1	白沙粘-1 Baishanian-1	甘肃省东乡县 Dongxiang County, Gansu Province	29	冯特 5 号 Fengte No.5	宁夏回族自治区固原市 Guyuan City, Ningxia Hui Autonomous Region
2	华池三爪谷 Huachisanzhuagu	甘肃省华池县 Huachi County, Gansu Province	30	赤峰地方品种 Chifeng local variety	宁夏回族自治区固原市 Guyuan City, Ningxia Hui Autonomous Region
3	白沙粘-2 Baishanian-2	甘肃省东乡县 Dongxiang County, Gansu Province	31	红酒谷 Hongjiugu	宁夏回族自治区固原市 Guyuan City, Ningxia Hui Autonomous Region
4	白粘谷 Bainiangu	甘肃省皋兰县 Gaolan County, Gansu Province	32	酒谷子 Jiuguzi	甘肃省崇信县 Chongxin County, Gansu Province
5	红小谷谷子 Hongxiaoguguzi	甘肃省华池县 Huachi County, Gansu Province	33	粘谷混-1 Nianguhun-1	内蒙古自治区 Inner Mongolia Autonomous Region
6	黄草酒谷 Huangcaojiugu	甘肃省华池县 Huachi County, Gansu Province	34	粘谷混-2 Nianguhun-2	内蒙古自治区 Inner Mongolia Autonomous Region
7	红酒谷 Hongjiugu	甘肃省华池县 Huachi County, Gansu Province	35	粘谷混-3 Nianguhun-3	内蒙古自治区 Inner Mongolia Autonomous Region
8	红紫杆酒谷-1 Hongziganjiugu-1	甘肃省华池县 Huachi County, Gansu Province	36	大粘谷-1 Daniangu-1	内蒙古自治区 Inner Mongolia Autonomous Region
9	酒谷 Jiugu	甘肃省环县 Huan County, Gansu Province	37	窝死牛粘谷 Wosiniuniangu	内蒙古自治区 Inner Mongolia Autonomous Region
10	酒谷 Jiugu	甘肃省宁县 Ning County, Gansu Province	38	齐头粘 Qitounian	内蒙古自治区 Inner Mongolia Autonomous Region
11	红酒谷 Hongjiugu	甘肃省宁县 Ning County, Gansu Province	39	二罕蛋粘谷 Erhandanniangu	内蒙古自治区 Inner Mongolia Autonomous Region
12	黄酒谷 Huangjiugu	甘肃省镇原县 Zhenyuan County, Gansu Province	40	大粘谷-2 Daniangu-2	内蒙古自治区 Inner Mongolia Autonomous Region
13	红酒谷 Hongjiugu	甘肃省灵台县 Lingtai County, Gansu Province	41	青苗粘谷-1 Qingmiaoniangu-1	内蒙古自治区 Inner Mongolia Autonomous Region
14	60 天红酒谷 60-day hongjiugu	甘肃省平凉市 Pingliang City, Gansu Province	42	青苗粘谷-2 Qingmiaoniangu-2	内蒙古自治区 Inner Mongolia Autonomous Region
15	黄酒谷 Huangjiugu	甘肃省平凉市 Pingliang City, Gansu Province	43	翁 33 白粘谷 Wen33 bainiangu	内蒙古自治区 Inner Mongolia Autonomous Region
16	红粘谷 Hongniangu	甘肃省会宁县 Huining County, Gansu Province	44	大罕蛋粘谷 Dahandanniangu	内蒙古自治区 Inner Mongolia Autonomous Region
17	红粘谷 Hongniangu	甘肃省金塔县 Jinta County, Gansu Province	45	小鸡乐粘谷 Xiaojileniangu	内蒙古自治区 Inner Mongolia Autonomous Region
18	红紫杆酒谷-2 Hongziganjiugu-2	甘肃省华池县 Huachi County, Gansu Province	46	白粘谷 Bainiangu	内蒙古自治区 Inner Mongolia Autonomous Region
19	黑酒谷 Heijiugu	甘肃省镇原县 Zhenyuan County, Gansu Province	47	大白粘谷 Dabainiangu	内蒙古自治区 Inner Mongolia Autonomous Region
20	红粘谷 Hongniangu	甘肃省民勤县 Minqin County, Gansu Province	48	压破车粘谷 Yapocheniangu	辽宁省朝阳市 Chaoyang City, Liaoning Province
21	济糯谷 1 号 Jinuogu No.1	山东省 Shandong Province	49	老虎尾粘谷 Laohuweiniangu	辽宁省朝阳市 Chaoyang City, Liaoning Province
22	济糯谷 2 号 Jinuogu No.2	山东省 Shandong Province	50	红粘谷-1 Hongniangu-1	辽宁省 Liaoning Province
23	济谷 18 Jigu No.18	山东省 Shandong Province	51	粘菠菜根 Nianbocaigen	辽宁省 Liaoning Province
24	冀创 1 号 Jichuang No.1	河北省 Hebei Province	52	粘刀把齐 Niandaobaqi	辽宁省 Liaoning Province
25	黑软谷 Heiruangu	河北省张家口市 Zhangjiakou City, Hebei Province	53	红粘谷-2 Hongniangu-2	辽宁省 Liaoning Province
26	岚县红酒谷 Lanxianhongjiugu	宁夏回族自治区固原市 Guyuan City, Ningxia Hui Autonomous Region	54	杏核红粘谷 Xinghehongniangu	辽宁省 Liaoning Province
27	汾选 8 号 Fenxuan No.8	宁夏回族自治区固原市 Guyuan City, Ningxia Hui Autonomous Region	55	粘儿谷 Nianergu	甘肃省 Gansu Province
28	石榴糯 Shiliunuo	宁夏回族自治区固原市 Guyuan City, Ningxia Hui Autonomous Region	56	白沙粘-1 Baishanian-1	甘肃省 Gansu Province

续表 1

Continued table 1

序号 No.	种质名称 Germplasm name	来源 Source	序号 No.	种质名称 Germplasm name	来源 Source
57	白沙粘-2 Baishanian-2	甘肃省 Gansu Province	86	黄粘谷-1 Huangniangu-1	河北省张家口市 Zhangjiakou City, Hebei Province
58	红眼粘谷 Hongyanniangu	山西省 Shanxi Province	87	小红粘谷 Xiaohongniangu	河北省张家口市 Zhangjiakou City, Hebei Province
59	石榴粘谷 Shiliuniangu	山西省 Shanxi Province	88	黄粘谷-2 Huangniangu-2	河北省张家口市 Zhangjiakou City, Hebei Province
60	大黄糯谷 Dahuangnuogu	河南省 Henan Province	89	红粘谷 Hongniangu	河北省张家口市 Zhangjiakou City, Hebei Province
61	红糯谷 Hongnuogu	宁夏回族自治区 Ningxia Hui Autonomous Region	90	粘谷子-2 Nianguzi-2	河北省张家口市 Zhangjiakou City, Hebei Province
62	猫蹄白粘谷 Maotibainiangu	山西省 Shanxi Province	91	大粘谷 Daniangu	河北省张家口市 Zhangjiakou City, Hebei Province
63	红粘谷-1 Hongniangu-1	山西省 Shanxi Province	92	毛粘谷 Maoniangu	河北省 Hebei Province
64	红粘谷-2 Hongniangu-2	山西省 Shanxi Province	93	红粘谷-1 Hongniangu-1	河北省 Hebei Province
65	黑糕粘谷-1 Heigaoniangu-1	河北省张家口市 Zhangjiakou City, Hebei Province	94	白根红粘 Baigenhongnian	河北省 Hebei Province
66	吃糕粘谷-1 Chigaoniangu-1	河北省张家口市 Zhangjiakou City, Hebei Province	95	大叶青粘谷 Dayeqingniangu	河北省 Hebei Province
67	吃糕粘谷-2 Chigaoniangu-2	河北省张家口市 Zhangjiakou City, Hebei Province	96	红粘谷-2 Hongniangu-2	河北省 Hebei Province
68	青糕粘谷-1 Qinggaoniangu-1	河北省张家口市 Zhangjiakou City, Hebei Province	97	粘破锅 Nianpoguo	河北省 Hebei Province
69	黄糕粘谷-2 Huanggaoniangu-2	河北省张家口市 Zhangjiakou City, Hebei Province	98	杏黄粘 Xinghuangnian	河北省 Hebei Province
70	白糕粘谷-1 Baigaoniangu-1	河北省张家口市 Zhangjiakou City, Hebei Province	99	大金苗粘谷 Dajinmiaoniangu	河北省 Hebei Province
71	白糕粘谷-2 Baigaoniangu-2	河北省张家口市 Zhangjiakou City, Hebei Province	100	黄青苗粘谷 Huangqingmiaoniangu	河北省 Hebei Province
72	黑糕粘谷-2 Heigaoniangu-2	河北省张家口市 Zhangjiakou City, Hebei Province	101	大粘黄谷 Danianhuanggu	河北省 Hebei Province
73	软粘谷 Ruanniangu	河北省张家口市 Zhangjiakou City, Hebei Province	102	海里粘谷 Hailiniangu	河北省 Hebei Province
74	黑软粘谷-1 Heiruanniangu-1	河北省张家口市 Zhangjiakou City, Hebei Province	103	黑粘谷 Heiniangu	北京市 Beijing
75	黑软粘谷-2 Heiruanniangu-2	河北省张家口市 Zhangjiakou City, Hebei Province	104	大毛粘谷 Damaoniangu	北京市 Beijing
76	糯米谷 Nuomigu	河北省 Hebei Province	105	粘红谷-1 Nianhonggu-1	河北省 Hebei Province
77	白米粘谷 Baiminiangu	河北省张家口市 Zhangjiakou City, Hebei Province	106	红粘谷-3 Hongniangu-3	河北省 Hebei Province
78	青苗粘谷混 Qingmiaonianguhun	河北省张家口市 Zhangjiakou City, Hebei Province	107	红粘谷-4 Hongniangu-4	河北省 Hebei Province
79	二青苗粘谷 Erqingmiaoniangu	河北省张家口市 Zhangjiakou City, Hebei Province	108	粘红谷-2 Nianhonggu-2	河北省 Hebei Province
80	菠菜根粘谷 Bocaigenniangu	河北省张家口市 Zhangjiakou City, Hebei Province	109	粘谷-1 Niangu-1	河北省 Hebei Province
81	狼尾巴粘 Langweibanian	河北省张家口市 Zhangjiakou City, Hebei Province	110	粘谷-2 Niangu-2	河北省 Hebei Province
82	青苗粘谷 Qingmiaoniangu	河北省张家口市 Zhangjiakou City, Hebei Province	111	黄毛粘谷 Huangmaoniangu	河北省 Hebei Province
83	粘谷子-1 Nianguzi-1	河北省张家口市 Zhangjiakou City, Hebei Province	112	山西粘谷 Shanxiniangu	河北省 Hebei Province
84	含大粘 Handanian	河北省张家口市 Zhangjiakou City, Hebei Province	113	大黄毛粘谷 Dahuangmaoniangu	河北省 Hebei Province
85	狼尾巴粘谷 Langweibaniangu	河北省张家口市 Zhangjiakou City, Hebei Province	114	黄粘谷-1 Huangniangu-1	河北省 Hebei Province

续表 1
Continued table 1

序号 No.	种质名称 Germplasm name	来源 Source	序号 No.	种质名称 Germplasm name	来源 Source
115	黄粘谷-2 Huangniangu-2	河北省 Hebei Province	121	糯米香-2 Nuomixiang-2	河北省 Hebei Province
116	红粘谷-5 Hongniangu-5	河北省 Hebei Province	122	赤糯 Chinuo	日本 Japan
117	红粘谷-6 Hongniangu-6	河北省 Hebei Province	123	昭和糯 Zhaohenuo	日本 Japan
118	红粘谷-7 Hongniangu-7	河北省 Hebei Province	124	团子糯 1 Tuanzinuo No.1	日本 Japan
119	猪屎糯酒谷 Zhushinuojiugu	河南省 Henan Province	125	糯黄谷 Nuohuanggu	山西省 Shanxi Province
120	糯米香-1 Nuomixiang-1	河北省 Hebei Province	126	白糯谷 Bainuogu	山西省 Shanxi Province

表 2　谷子质量性状的赋值标准

Table 2　Criteria for assigning value to quality traits of foxtail millet

性状 Trait	赋值 Assignment			
	1	2	3	4
幼苗色 Seedling color	绿色 Green	黄绿 Olivine	紫绿 Purpie-green	紫色 Purple
成株色 Mature plant color	绿色 Green	紫色 Purple	紫绿 Purpie-green	—
刺毛颜色 Bristle color	绿色 Green	黄色 Yellow	紫色 Purple	—
刺毛长度 Bristle length	短 Short	中 Middle	长 Long	—
穗形 Spike shape	纺锤形 Fusiform	圆筒形 Cylindrical	棍棒形 Stick-shaped	猫爪形 Cat's paw shape
穗松紧度 Spike compactness	松 Loose	中 Middle	紧 Tighten	—

注:"-"表示不存在该赋值。

Note:"-" indicates the assignment does not exist.

数量性状,用直尺测量主茎高、主穗长、穗颈长,用游标卡尺测定主穗粗、主茎粗,用电子天平称量株草质量、株穗质量,穗脱粒后称株粒质量,用电子天平测量千粒重。试验收获时间为 9 月 2 日—9 月 30 日,风干后脱粒计产。

通过 2 a 的田间鉴定试验,从 126 份资源中选取田间表型较理想和产量较好的资源 100 份,籽粒脱皮后,测定小米水分含量,小米磨粉后测定其中总淀粉、支链淀粉、粗蛋白、粗脂肪、铁、硒 6 项品质指标含量。参照 GB 5009.9-2016 中方法测定小米总淀粉含量[18];参照王春霞等[19]双波长分光光度法测定小米支链淀粉含量;参照 GB 5009.5-2025 中方法测定小米粗蛋白含量[20];参照 GB 5009.6-2016 中方法测定小米粗脂肪含量[21];采用硝酸消解,ICP-OES/MS 测定硒、铁元素含量[22]。

1.3　数据分析

用 Excel 2016 进行数据整理,遗传多样性指数采用"Shannon-weaver 信息指数($H' = -\sum Pi \times \ln Pi$)"计算,式中 Pi 指某一性状第 i 个级别出现的频率;用 Origin 2024 进行相关性分析和聚类分析;用 SPSS Statistics 26.0 进行单因素 ANOVA 分析和主成分分析。主成分分析综合得分 $F_{综合} = V_1F_1 + V_2F_2 + \cdots + V_nF_n$,其中 V_1、V_2、…、V_n 分别表示各主成分的贡献率,F_1、F_2、…、F_n 分别表示各主成分的得分值。

2　结果与分析

2.1　谷子种质资源农艺性状综合评价

2.1.1　质量性状的遗传多样性分析　对 126 份谷子材料幼苗色、成株色、刺毛颜色、刺毛长度、穗形、穗松紧度 6 个质量性状统计结果显示(表 3),幼苗色、成株色、刺毛颜色以绿色为主,分别占各性状总数的 61.11%、57.94%、69.84%,紫色的材料较少;穗形以纺形穗居多,占比 65.08%,其次是棍棒形,占比 25.40%;82.54%的材料穗松紧度中等,49.21%材料穗部刺毛短,15.08%的材料穗部表现为长刺毛。变异系数和多样性指数表明,穗松紧度表现最为稳定。

2.1.2　数量性状的遗传多样性分析　对 126 份谷子(表 4、图 1)数量性状和产量统计结果进行分析发现,各性状均呈现出不同程度的变异。主茎高、主茎粗、主穗长、主穗粗、穗颈长、株草质量、株穗质量、株粒质量、千粒重和小区产量的平均值分别为

156.22 cm、0.93 cm、25.32 cm、2.80 cm、31.02 cm、35.26 g、29.70 g、19.73 g、2.95 g 和 3.34 kg;9 个数量性状及产量的变异系数介于 9.30%~24.85%之间,平均为 16.75%,变异系数表现为主茎高<株草质量<穗颈长<主穗长<株穗质量<千粒重<主穗粗<主茎粗<株粒质量<小区产量;9 个数量性状及产量的多样性指数介于1.2073~1.8715 之间,平均为 1.4814,多样性指数表现为主穗长<株穗质量<穗颈长<株草质量<主穗粗<主茎粗<株粒质量<千粒重<主茎高<小区产量,可见 10 个数量指标中小区产量最不稳定,多样性水平最高。

2.1.3 相关性分析 通过对 126 份谷子的 6 个质量性状和 9 个数量性状及小区产量进行相关性分析(图 2,见 11 页)发现,多个不同性状之间存在显著甚至极显著的相关关系。其中,幼苗色与成株色、刺毛颜色间存在极显著正相关关系;刺毛颜色与主茎高间存在极显著正相关关系;千粒重与穗形间、主穗粗与穗松紧度间存在极显著负相关关系;千粒重与主茎粗及穗颈长间存在显著正相关关系;与株草质量及株穗质量存在极显著正相关关系的主要有小区产量、株粒质量等;小区产量与株粒质量间存在极显著正相关关系。

2.1.4 聚类分析 对 126 份谷子资源进行聚类分析(图 3,见 11 页,表 5),将其划分为五大类群。其中第Ⅰ类群 2 份,该群体穗形以纺锤形为主,穗松紧度中等,主茎高、主茎粗、主穗长、主穗粗均值在 5 个类群中最大,是典型的高杆大穗;第Ⅱ类群共 8 份,该群体平均主茎高只有 146.69 cm,穗颈最短,但株草质量、株穗质量、株粒质量及小区产量均值在 5 个类群中排第二位;第Ⅲ类群共 7 份,该群体平均主茎高最低,为 146.10 cm,株穗质量、株粒质量及小区产量的均值最大;第Ⅳ类群共 6 份,千粒重在 5 个类群中最大;第Ⅴ类群共 103 份,是数量最多的一个群体,各数量指标表现均不突出。

2.1.5 数量性状的主成分分析 为更加准确地评价谷子种质资源,对参试材料的 9 个数量性状进行主成分分析(表 6)。第 1 个主成分的贡献率为 26.043%,其主要包括千粒重、主茎粗、株草质量、主茎高等性状;第 2 个主成分的贡献率为 22.612%,其主要与千粒重、主茎粗、主茎高、主穗长等性状有关;第 3 主成分主要与千粒重、株穗质量、株粒质量、主茎粗、穗颈长等性状相关,贡献率为 15.364%;第 4 主成分主要与千粒重、主茎粗、主穗粗等性状相关,贡献率为 13.475%。各主成分累计贡献率达到 77.493%。

表 3 谷子质量性状的多样性统计

Table 3 Diversity statistics of quality traits in foxtail millet

性状 Trait	分布百分比/% Distribution percentage				变异系数 *CV*/%	多样性指数 *H′*
	1	2	3	4		
幼苗色 Seedling color	61.11	0.79	7.94	30.16	66.66	0.9019
成株色 Mature plant color	57.94	31.74	10.32	—	44.48	0.9148
刺毛颜色 Bristle color	69.84	3.97	26.19	—	56.34	0.7297
刺毛长度 Bristle length	49.21	35.71	15.08	—	43.91	1.0019
穗形 Spike shape	65.08	2.38	25.40	6.35	60.85	0.8917
穗松紧度 Spike compactness	3.97	82.54	13.49	—	19.50	0.5567

注:表头 1、2、3、4 代表各性状赋值,赋值标准同表 2。

Note: The 1, 2, 3 and 4 in the header represent the characterization standard of each trait, and the assignment standards are the same as those in Table 2.

表 4 谷子数量性状的多样性统计

Table 4 Diversity statistics of quantitative traits in foxtail millet

指标 Index	主茎高/cm Main stem length	主穗长/cm Main panicle length	主茎粗/cm Main stem diameter	主穗粗/cm Main panicle diameter	穗颈长/cm Peduncle length	株草质量/g Straw mass per plant	株穗质量/g Spike mass per plant	株粒质量/g Grain mass per plant	千粒重/g 1000-grain weight	小区产量/kg Community production
平均值 Mean	156.22	25.32	0.93	2.80	31.02	35.26	29.70	19.73	2.95	3.34
最大值 Max.	191.90	36.40	2.00	4.50	45.00	47.42	39.74	28.51	4.10	5.37
最小值 Min.	130.30	14.90	0.50	1.80	20.90	27.27	19.16	10.17	2.00	1.25
标准差 *SD*	14.53	3.95	0.17	0.50	4.16	4.64	4.72	4.44	0.49	0.83
变异系数 *CV*/%	9.30	15.60	18.28	17.86	13.41	13.16	15.89	22.50	16.61	24.85
多样性指数 *H′*	1.7380	1.2073	1.5122	1.3998	1.3065	1.3288	1.2965	1.5170	1.6359	1.8715

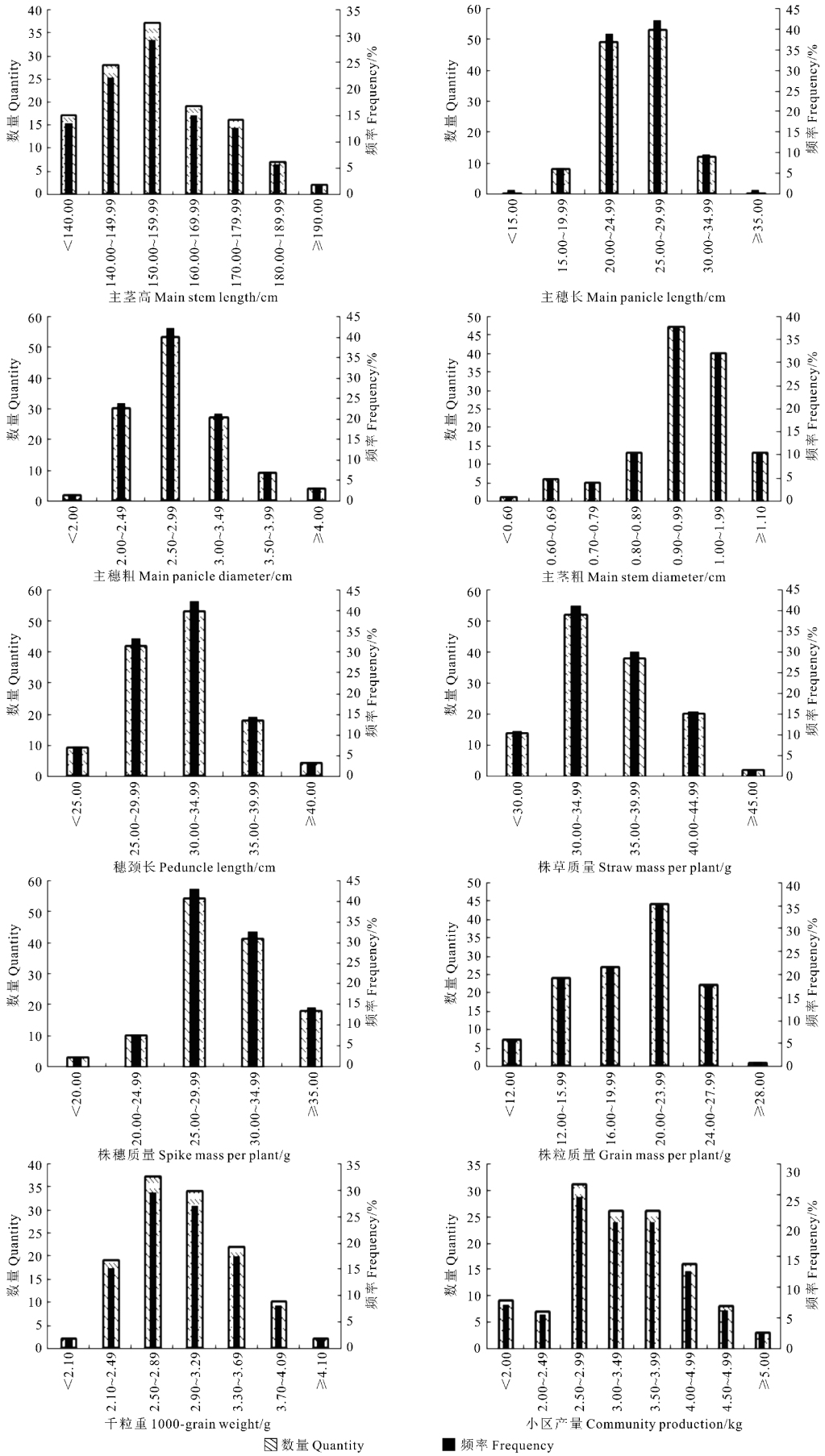


图 1　谷子数量性状的频率分布直方图

Fig.1　Histogram of frequency distribution of quantitative traits in foxtail millet

表5 不同类群的谷子数量性状均值分析

Table 5 Mean analysis of quantitative traits of foxtail millet in different clusters

类群 Cluster	指标 Index	主茎高 Main stem length/cm	主穗长 Main panicle length /cm	主茎粗 Main stem diameter/cm	主穗粗 Main panicle diameter /cm	穗颈长 Peduncle length /cm	株草质量 Straw mass per plant /g	株穗质量 Spike mass per plant /g	株粒质量 Grain mass per plant /g	千粒重 1000-grain weight /g	小区产量 Community production /kg
Ⅰ	平均值 Mean	185.25	35.00	1.05	3.45	33.05	31.16	23.06	13.84	2.95	2.09
	极差 Range	8.10	2.80	0.10	0.30	0.70	4.06	7.80	7.34	0.30	1.68
Ⅱ	平均值 Mean	146.69	22.84	0.88	2.70	28.19	39.74	36.05	25.48	2.70	4.48
	极差 Range	30.20	12.40	0.30	0.60	6.10	9.62	8.35	6.89	1.10	1.79
Ⅲ	平均值 Mean	146.10	25.74	0.81	2.51	31.94	30.83	36.54	25.91	3.27	4.56
	极差 Range	24.60	7.40	0.50	1.50	13.80	8.48	5.31	4.73	1.10	1.18
Ⅳ	平均值 Mean	150.58	26.48	1.03	2.80	37.60	38.78	24.85	15.01	3.37	2.46
	极差 Range	26.90	8.60	0.40	1.10	10.60	14.30	7.76	6.92	0.80	1.44
Ⅴ	平均值 Mean	157.40	25.22	0.93	2.81	30.76	35.09	29.15	19.25	2.92	3.24
	极差 Range	61.60	19.10	1.40	2.70	24.10	18.76	17.81	15.86	2.10	3.34

表6 数量性状的主成分分析

Table 6 Principal component analysis based on quantitative traits

性状 Trait	主成分 Principal component			
	PC1	PC2	PC3	PC4
主茎高 Main stem length	0.638	0.447	−0.405	−0.135
主穗长 Main panicle length	0.388	0.653	0.044	−0.281
主茎粗 Main stem diameter	0.333	0.374	0.245	0.556
主穗粗 Main panicle diameter	0.341	0.116	−0.378	0.739
穗颈长 Peduncle length	0.318	0.555	0.397	−0.381
株草质量 Straw mass per plant	0.680	−0.022	−0.460	−0.141
株穗质量 Spike mass per plant	0.685	−0.671	0.219	−0.077
株粒质量 Grain mass per plant	0.690	−0.664	0.230	−0.056
千粒重 1000-grain weight	0.226	0.236	0.737	0.294
特征值 Eigenvalues	4.310	5.310	6.310	0.941
贡献率 Contribution rate/%	26.043	22.612	15.364	13.475
累计贡献率 Cumulative contribution/%	26.043	48.655	64.019	77.493

2.1.6 数量性状的综合评价 基于4个主成分各指标对应的特征向量,并具体设置权重值,建立函数表达式。在此基础上计算主成分综合得分,计算时的权重为各主成分因子的贡献率,表达式为 $F_{综合}=0.260F_1+0.226F_2+0.154F_3+0.135F_4$。根据 F 值对126份谷子进行数量性状的综合评价,得分越高,综合表现越好。126份谷子的得分介于60.415~39.528之间,平均值为48.260。综合得分在前10位的资源信息见表7。

2.2 谷子种质资源营养品质综合评价

2.2.1 营养品质分析 从126份资源中选取产量表现较好(4 128.75~8 136.45 kg·hm^{-2})的100份种质,测定脱掉种皮后的籽粒水分含量,磨粉后测定总淀粉、支链淀粉、粗蛋白、粗脂肪、铁、硒6项品质指标。测定结果(表8、图4)显示,参试材料的籽粒水分、总淀粉、支链淀粉、粗蛋白、粗脂肪、Fe和Se含量的平均值分别为8.44、74.93、62.39、13.84、4.23 g·$100g^{-1}$,81.23 mg·kg^{-1}和81.23 μg·kg^{-1},7个品质指标的变异系数介于4.50%~70.00%之间,平均为22.74%,变异系数表现为水分<总淀粉<支链淀粉<粗蛋白<粗脂肪<Fe<Se;7个品质指标的多样性指数介于1.1071~1.4024之间,平均为1.2611,多样性指数表现为水分<粗脂肪<支链淀粉<Se<粗蛋白<Fe<总淀粉,可见7个品质指标中籽粒水分含量表

现较为稳定,其次为总淀粉含量,多样性水平不高,而微量元素 Fe 和 Se 的含量变异度较大。

2.2.2　营养品质的相关性分析　为进一步探究谷子不同营养成分之间的关联程度,对检测的 100 份谷子的 7 个品质指标展开相关性分析发现,支链淀粉和总淀粉含量间存在极显著正相关关系;粗蛋白与支链淀粉、总淀粉含量间存在显著负相关关系;粗脂肪与 Fe 含量存在正相关关系。

表 7　排名前 10 位种质资源的综合评价结果

Table 7　Comprehensive evaluation results of the top 10 germplasm resources

序号 No.	种质名称 Germplasm name	来源 Source	综合得分 Score	名次 Rank
14	60 天红酒谷 60-day hongjiugu	甘肃省平凉市 Pingliang City, Gansu Province	60.415	1
15	黄酒谷 Huangjiugu	甘肃省平凉市 Pingliang City, Gansu Province	57.762	2
18	红紫杆酒谷-2 Hongziganjiugu-2	甘肃省华池县 Huachi County, Gansu Province	57.222	3
2	华池三爪谷 Huachisanzhuagu	甘肃省华池县 Huachi County, Gansu Province	56.632	4
19	黑酒谷 Heijiugu	甘肃省镇原县 Zhenyuan County, Gansu Province	56.174	5
10	酒谷 Jiugu	甘肃省宁县 Ning County, Gansu Province	55.918	6
112	山西粘谷 Shanxiniangu	河北省 Hebei Province	55.552	7
32	酒谷子 Jiuguzi	甘肃省崇信县 Chongxin County, Gansu Province	54.994	8
7	红酒谷 Hongjiugu	甘肃省华池县 Huachi County, Gansu Province	54.756	9
1	白沙粘-1 Baishanian-1	甘肃省东乡县 Dongxiang County, Gansu Province	54.603	10

2.2.3　营养品质的主成分分析　为综合性评价不同谷子种质资源的营养品质,对测定的 7 个营养成分进行主成分分析(表 9)。结果表明,第 1 主成分与总淀粉、支链淀粉等指标相关,贡献率为 39.662%;第 2 主成分与粗脂肪、Fe、Se 等指标相关,贡献率为 17.685%;第 3 主成分与 Fe 相关,贡献率为 15.212%。各成分累计贡献率可达到 72.559%,基本涵盖了营养品质的信息。

2.2.4　综合评价　综合 3 个主成分各指标及其特征向量,基于特征向量,具体建立函数表达式。在此基础上,计算主成分综合模型,该模型的权重为各主成分因子的贡献率。表达式为 $F_{综合}=0.397F_1+0.177F_2+0.152F_3$。根据 F 值对 100 份谷子进行营养品质的综合评价,得分越高,综合表现越好。100 份谷子的得分介于 36.95 ~ 79.57 之间,平均为 57.46。综合得分在前 10 名(66.62 ~ 79.57)的资源信息见表 10,可结合每份资源性状特点,直接作为优良育种材料加以利用。

3　讨　论

3.1　基于谷子农艺性状的品种筛选和评价

农作物表型性状的遗传多样性分析是最简便、直观的遗传研究方法,可以为育种利用、遗传分析、基因挖掘研究提供非常准确的信息[9]。从形态性状方面分析,我国谷子种质资源呈现出多样性的特征,广泛变异的地方品种是谷子育种的遗传资源,全面评价与利用地方品种是拓展谷子育种遗传基础的重要途经[23]。本研究通过对收集的 126 份谷子品种的 15 项农艺性状及产量表现进行调查和遗传多样性分析发现,10 个数量指标中主茎高表现较为稳定,其变异系数为 9.30%,穗部性状及产量变异程度最高,其变异系数分别为 16.61%和 24.85%,这一结果与赵芳等[24]对 224 个谷子品种的单穗重、穗粒重、茎粗、穗粗、穗长、颈长的测定结果及任芹勇等[25]对 65 份谷子品种的农艺性状测定结果相一致。

表 8　谷子籽粒营养品质的多样性统计

Table 8　Diversity statistics of nutritional quality of foxtail millet grain

指标 Index	水分 /(g·100g^{-1}) Grain moisture	总淀粉 /(g·100g^{-1}) Total starch	支链淀粉 /(g·100g^{-1}) Amylose	粗蛋白 /(g·100g^{-1}) Crude protein	粗脂肪 /(g·100g^{-1}) Crude fat	铁 /(mg·kg^{-1}) Fe	硒 /(μg·kg^{-1}) Se
平均值 Mean	8.44	74.93	62.39	13.84	4.23	81.23	91.47
最大值 Max.	9.20	83.82	70.58	16.50	6.06	217.70	370.07
最小值 Min.	7.13	66.52	48.59	12.00	2.22	18.48	19.27
标准差 *SD*	0.38	3.45	4.73	1.06	0.84	36.53	64.03
变异系数 *CV*/%	4.50	4.60	7.58	7.66	19.86	44.97	70.00
多样性指数 *H′*	1.1071	1.4024	1.1583	1.3766	1.1475	1.3867	1.2490

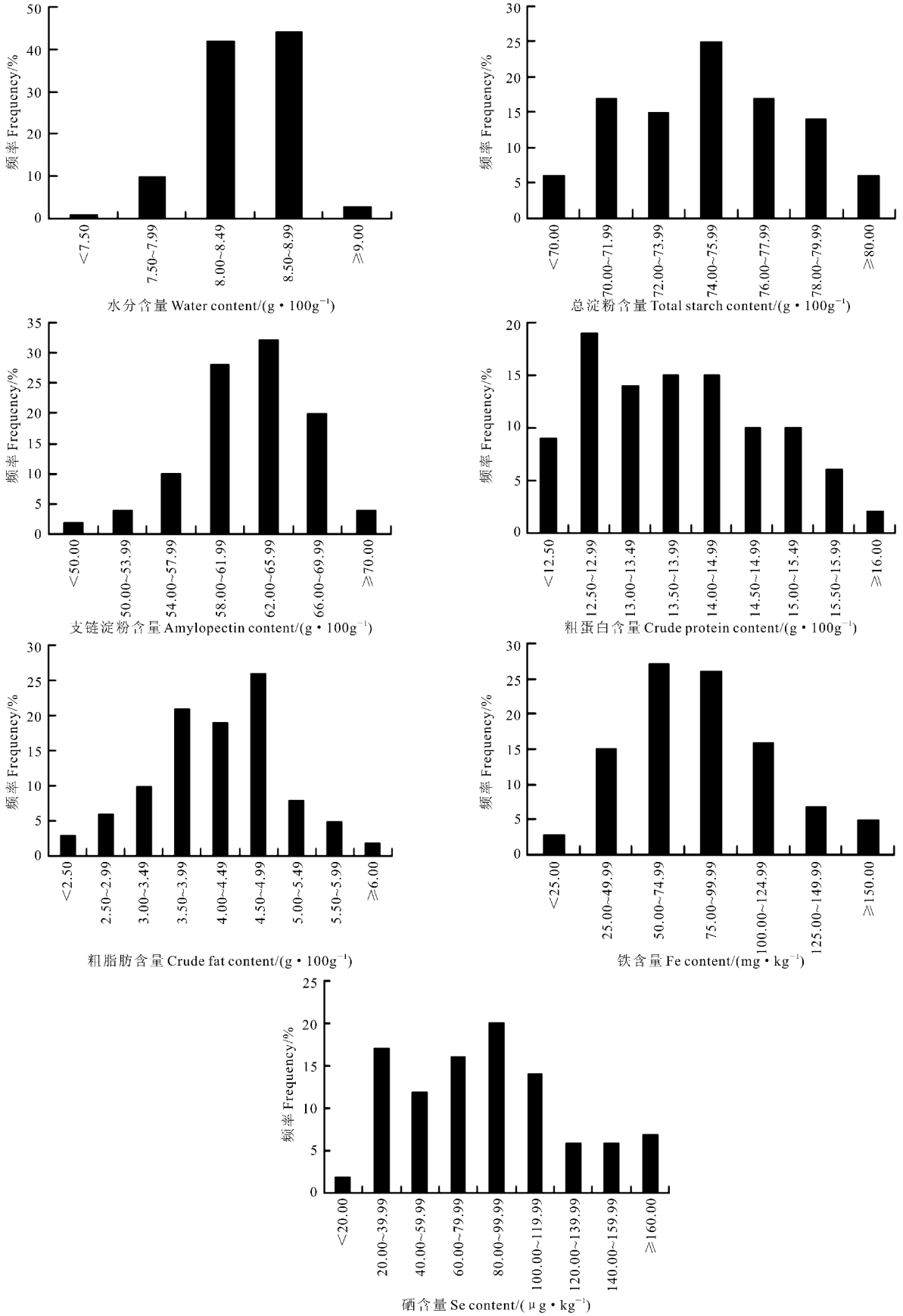
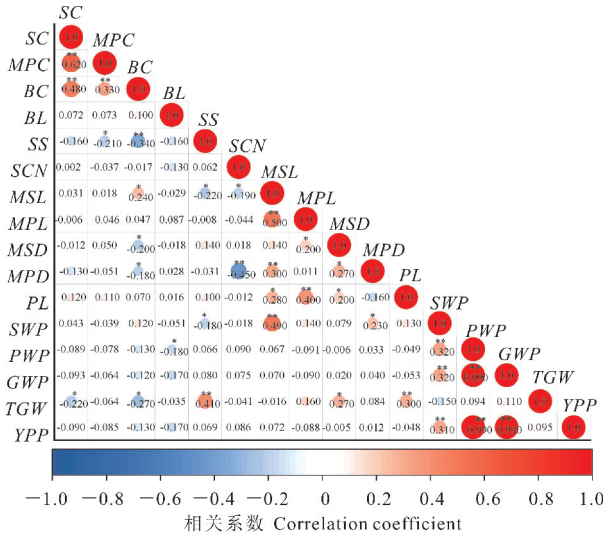


图 4 谷子籽粒营养品质频率分布直方图

Fig.4 Histogram of frequency distribution of nutritional qualities in foxtail millet grain

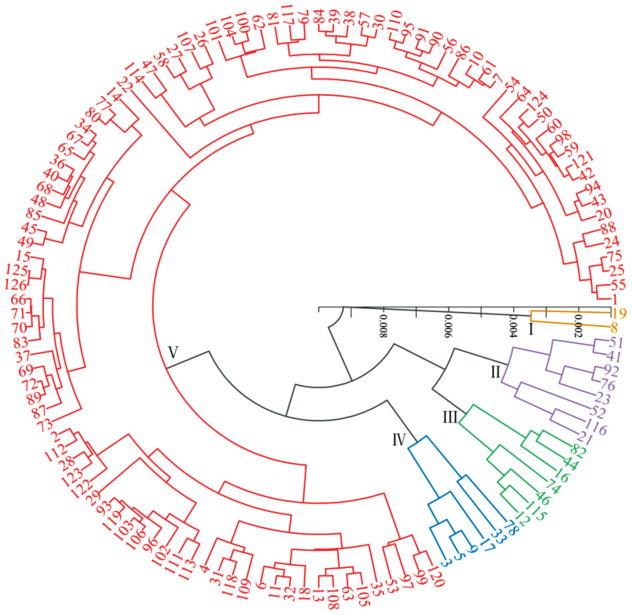


注:*SC*:幼苗色;*MPC*:成株色;*BC*:刺毛颜色;*BL*:刺毛长度;*SS*:穗形;*SCN*:穗松紧度;*MSL*:主茎高;*MPL*:主穗长;*MSD*:主茎粗;*MPD*:主穗粗;*PL*:穗颈长;*SWP*:株草质量;*PWP*:株穗质量;*GWP*:株粒质量;*TGW*:千粒重;*YPP*:小区产量;*和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平显著相关;红色表示正相关,蓝色表示负相关,颜色越深代表相关系数越大。下同。

Note: *SC*: Seedling color; *MPC*: Mature plant color; *BC*: Bristle color; *BL*: Bristle length; *SS*: Spike shape; *SCN*: Spike compactness; *MSL*: Main stem length; *MPL*: Main panicle length; *MSD*: Main stem diameter; *MPD*: Main panicle diameter; *PL*: Peduncle length; *SWP*: Straw mass per plant; *PWP*: Spike mass per plant; *GWP*: Grain mass per plant; *TGW*: 1000-grain weight; *YPP*: Community production. * and ** indicate significant correlation at the levels of $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively. Red color indicates positively correlation, blue color indicates negatively correlation, with darker colors representing larger correlation. The same below.

图 2　表型性状相关性分析

Fig.2　Correlation analysis of phenotypic traits

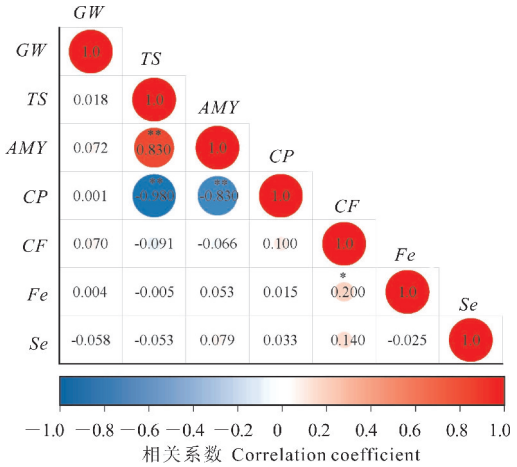


注:材料序号同表 1。

Note: The codes of soybean landraces are the same as table 1.

图 3　126 份谷子种质资源遗传聚类图

Fig.3　Genetic cluster tree of the 126 millet germplasm resources



注:*GW*:水分含量;*TS*:总淀粉含量;*AMY*:支链淀粉含量;*CP*:粗蛋白含量;*CF*:粗脂肪含量;*Fe*:铁含量;*Se*:硒含量。

Note: *GW*: Grain water content; *TS*: Total starch content; *AMY*: Amylose content; *CP*: Crude protein content; *CF*: Crude fat content; *Fe*: Fe content; *Se*: Se content.

图 5　营养品质的相关性分析

Fig.5　Correlation analysis of nutritional qualities

表 9　营养品质的主成分分析

Table 9　Principal component analysis based on nutritional qualities

性状 Trait	主成分 Principal component		
	成分 1 PC1	成分 2 PC2	成分 3 PC3
水分 Grain moisture	0.042	0.180	0.647
总淀粉 Total starch	0.978	0.005	0.010
支链淀粉 Amylose	0.919	0.116	−0.039
粗蛋白 Crude protein	−0.977	0.003	0.017
粗脂肪 Crude fat	−0.139	0.789	−0.002
铁 Fe	0.002	0.641	0.292
硒 Se	−0.019	0.398	−0.748
特征值 Eigenvalues	2.776	1.238	1.065
贡献率 Contribution rate/%	39.662	17.685	15.212
累计贡献率 Cumulative contribution/%	39.662	57.348	72.559

相关性分析有助于了解作物性状间的相互关系,从而进一步了解不同性状间的协同变化关系。本研究通过相关性分析发现,幼苗色与成株色、刺毛颜色之间存在极显著正相关关系,主茎高与主穗粗、主穗长、株草质量间,穗颈长与主穗长间,千粒重、主穗粗与主茎粗间,株粒质量、株穗质量、株草质量与小区产量间均存在显著正相关性。这与李涛等[26]对 37 份谷子材料的农艺性状进行相关性分析的结果相似。薛亚鹏等[27]以 179 份谷子参试材料为例,分析其 13 个农艺性状间的相关性发现,相关系数最大的主要有穗粒重、草重与穗粗,鞘色与苗色、

表 10 谷子营养品质综合评价得分位于前 10 位的种质

Table 10 Top 10 comprehensive evaluation score of nutritional quality of foxtail millet

序号 No.	种质名称 Germplasm name	来源 Source	F_1	F_2	F_3	综合得分 Score
21	济糯谷 1 号 Jinuogu No.1	山东省 Shandong Province	109.11	161.46	50.49	79.57
44	大罕蛋粘谷 Dahandanniangu	内蒙古自治区 Inner Mongolia Autonomous Region	130.20	104.02	23.51	73.67
39	二罕蛋粘谷 Erhandanniangu	内蒙古自治区 Inner Mongolia Autonomous Region	134.37	103.19	13.25	73.62
78	青苗粘谷混 Qingmiaonianguhun	河北省张家口市 Zhangjiakou City, Hebei Province	123.47	142.22	-11.79	72.40
30	赤峰地方品种 Chifeng local variety	宁夏回族自治区固原市 Guyuan City, Ningxia Hui Autonomous Region	122.93	113.34	21.74	72.17
77	白米粘谷 Baiminiangu	河北省张家口市 Zhangjiakou City, Hebei Province	121.83	168.45	-47.64	70.94
59	石榴粘谷 Shiliuniangu	山西省 Shanxi Province	116.83	149.73	-20.04	69.84
75	黑软粘谷-2 Heiruanniangu-2	河北省张家口市 Zhangjiakou City, Hebei Province	106.34	148.69	-4.38	67.87
34	粘谷混-2 Nianguhun-2	内蒙古自治区 Inner Mongolia Autonomous Region	127.99	102.52	-12.77	67.01
80	菠菜根粘谷 Bocaigenniangu	河北省张家口市 Zhangjiakou City, Hebei Province	126.18	116.57	-27.00	66.62

草重与穗长、草重与穗粗、穗长与穗粒重均呈显著正相关关系，与本试验结果基本相似；但薛亚鹏等[27]研究提出穗码密度与草重、穗长、穗直径、穗粒重均呈显著负相关关系，与本试验的结果不完全一致，推测与试验群体组成及试验环境不同有关。

聚类分析有助于了解种质资源间的亲缘关系和遗传背景并加以利用。李赢等[28]依据 18 个表型性状对参试裸大麦资源进行聚类分析，将 398 份资源分为 4 类；薛亚鹏等[27]基于农艺性状将 179 份谷子资源进行聚类分析，共分为 4 类。本研究依据农艺性状和产量结果对 126 份谷子资源进行聚类分析，将其划分为 5 大类群，每个类群具有各自的性状特点，第 I 类群高杆大穗，可用于筛选饲草谷子资源进行种质创新；第 II 类群穗颈最短，主茎高度较低，株草质量、株穗质量、株粒质量及小区产量均在 5 个类群中占第二位，可用于筛选矮秆宜机收谷子资源进行种质创新；第 III 类群平均主茎高最低，株穗质量、株粒质量及小区产量的均值最大，可用于筛选矮秆高产谷子资源进行种质创新；第Ⅳ类群千粒重在 5 个类群中最大，可作为粒用谷子育种材料加以利用。

通过主成分分析简化评价指标，并以特征向量为权重，构建函数表达式对资源进行综合评价，从而筛选出评分较高的种质资源用于后续创新育种。目前这种资源评价方法已经应用在多种作物上[29-31]。本研究共提取了 4 个主成分，累计贡献率为 77.493%，根据各性状贡献率的权重计算所得的综合得分 F 值，共筛选出排名前 10 位的材料作为优异资源，可根据其不同性状特点加以利用。

3.2 基于谷子品质性状的品种筛选和评价

本研究从 126 份资源中选取田间表型和产量表现较好的资源 100 份，通过测定籽粒水分、总淀粉、支链淀粉、粗蛋白、粗脂肪、铁、硒含量发现，7 个品质指标中籽粒水分含量表现较为稳定，其次是总淀粉含量，在品种间差异较小，而粗脂肪、微量元素 Fe、Se 的含量变异度较大。李星等[17]通过测定 5 个省份共 15 份谷子的营养成分含量，结果显示籽粒水分含量为 8.30%～10.39%，总淀粉含量为 70.90%～82.75%，粗蛋白含量为 10.09%～14.35%，粗脂肪含量为 5.2%～6.6%，与本试验的水分含量（7.13～9.20 g·100g^{-1}）、淀粉含量（66.52～83.82 g·100g^{-1}）基本接近，粗蛋白含量（12.00～16.50 g·100g^{-1}）偏高，粗脂肪含量（2.22～6.06 g·100g^{-1}）偏低；薛亚鹏等[27]通过测定 51 份谷子名米品种的营养成分含量表明，其籽粒水分含量 8.13%～9.50%、淀粉含量 68.84%～78.84%、粗蛋白含量9.61%～13.73%、粗脂肪含量 3.02%～5.05%，水分含量与本试验结果相似，粗蛋白含量偏低。指标间差异可能是不同群体在不同的种植环境中营养成分积累的影响所致。古世禄等[32]测定结果发现，416 个谷子品种的蛋白质含量介于 10.00%～13.99%之间；杨延兵等[33]研究表明，来自我国 4 个主要谷子生态区的 270 个谷子品种的平均蛋白质含量为 11.18%±1.14%；冯链等[34]研究发现，山西省 83 个谷子品种的蛋白质含量为 12.62%±1.15%。本研究测定的 100 份谷子品种的蛋白质含量介于 12.00%～16.50%之间，与前人研究结果基本一致。

本研究相关性分析发现，总淀粉正向作用于支链淀粉，且其影响极显著，而总淀粉与蛋白质含量间则存在极显著负相关关系；Fe 含量与粗脂肪间存在极显著正相关关系。主成分分析结果表明，前 3 个主成分累计贡献率可达 72.559%，其基本包含所有营养品质信息。综合 3 个主成分各指标的特征向量对 100 份谷子进行营养品质的综合评价结果表

明,对于得分领先的资源,可结合其性状特点,直接作为优良育种材料加以利用。

4　结　论

通过对 126 份谷子资源的农艺性状及从中筛选的 100 份谷子的品质检测结果进行分析发现,不同品种间谷子农艺性状具有显著差异,同时基于聚类分析和综合评价,筛选出不同特性的资源,有高杆大穗型资源(如来自甘肃省华池县的‘红紫杆酒谷-1’和甘肃省镇原县的‘黑酒谷’)、穗颈短矮秆宜机收资源(如来自辽宁省的‘粘菠菜根’和河北省‘红粘谷-5’)、矮秆高产资源(如来自内蒙古自治区的‘大罕蛋粘谷’和‘白粘谷’)、大籽粒资源(如来自内蒙古自治区的‘粘谷混-1’和甘肃省东乡县的‘白沙粘-2’),可作为谷子育种的亲本材料,满足不同的育种目标需求。根据营养品质的综合得分对各种质进行排名,筛选出在营养成分上表现优良的谷子品种 10 份,其中‘济糯谷 1 号’综合得分最高(79.57),比平均值提高22.11,可作为谷子品质育种的备选材料。

参 考 文 献:

[1] YANG X Y, WAN Z W, PERRY L, et al. Early millet use in northern China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(10): 3726-3730.

[2] 贾冠清, 刁现民. 谷子(*Setaria italica*(*L.*)*P. Beauv.*)作为功能基因组研究模式植物的发展现状及趋势[J]. 生命科学, 2017, 29(3): 292-301.
JIA G Q, DIAO X M. Current status and perspectives of researches on foxtail millet (*Setaria italica* (*L.*) *P. Beauv.*): A potential model of plant functional genomics studies [J]. Chinese Bulletin of Life Sciences, 2017, 29(3): 292-301.

[3] 李顺国, 刘斐, 刘猛, 等. 中国谷子产业和种业发展现状与未来展望[J]. 中国农业科学, 2021, 54(3): 459-470.
LI S G, LIU F, LIU M, et al. Current status and future prospective of foxtail millet production and seed industry in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(3): 459-470.

[4] 赵利蓉, 马珂, 张丽光, 等. 不同生态区谷子品种农艺性状和品质分析[J]. 作物杂志, 2022, (2): 44-53.
ZHAO L R, MA K, ZHANG L G, et al. Analysis of agronomic traits and quality of foxtail millet varieties in different ecological regions[J]. Crops, 2022, (2): 44-53.

[5] 贾冠清, 刁现民. 中国谷子种业创新现状与未来展望[J]. 中国农业科学, 2022, 55(4): 653-665.
JIA G Q, DIAO X M. Current status and perspectives of innovation studies related to foxtail millet seed industry in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(4): 653-665.

[6] 吕建珍. 谷子种质资源遗传多样性研究进展[J]. 河北农业大学学报, 2020, 43(5): 40-45.
LV J Z. Advance in genetic diversity analysis of foxtail millet[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2020, 43(5): 40-45.

[7] 卢新雄, 陈晓玲. 我国作物种质资源保存与研究进展[J]. 中国农业科学, 2003, 36(10): 1125-1132.
LU X X, CHEN X L. Progress of conservation and research of crop germplasm resources in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(10): 1125-1132.

[8] 李炜, 毕影东, 刘淼, 等. 寒地野生大豆表型性状的评价和聚类分析[J]. 中国种业, 2021, (12): 73-79.
LI W, BI Y D, LIU M, et al. Evaluation and cluster analysis of phenotypic traits of *Glycinesoja Siebold*[J]. China Seed Industry, 2021, (12): 73-79.

[9] 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.

[10] 刁现民. 育种创新造就谷子种业新发展[J]. 中国种业, 2022, (4): 4-7.
DIAO X M. Breeding innovation creates new development of millet seed industry[J]. China Seed Industry, 2022, (4): 4-7.

[11] 杜文娟, 林娟, 许辉, 等. 山西谷子全粉淀粉指标间相关性及消化特性研究[J]. 粮油加工(电子版), 2014, (7): 60-65.
DU W J, LIN J, XU H, et al. Correlational among indexes and digestibility of whole-grain millet starch obtained from Shanxi Province [J]. Cereals and Oils Processing (Electronic Version), 2014, (7): 60-65.

[12] 范冬雪, 李静洁, 杨金芹, 等. 热处理对小米蛋白体外消化率的影响[J]. 中国食品学报, 2016, 16(2): 56-61.
FAN D X, LI J J, YANG J Q, et al. Effects of heat treatments on the *in vitro* digestibility of millet protein[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(2): 56-61.

[13] ZHANG A X, LIU X D, WANG G R, et al. Crude fat content and fatty acid profile and their correlations in foxtail millet[J]. Cereal Chemistry, 2015, 92(5): 455-459.

[14] 刘玉兰, 黄会娜, 范文鹏, 等. 小米糠(胚)制油及油脂品质研究[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(5): 44-49, 55.
LIU Y L, HUANG H N, FAN W P, et al. Millet bran(embryo) oil and its oil quality[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(5): 44-49, 55.

[15] 曲丽洁, 刘镇, 陈一, 等. “张杂谷”系列谷子品种营养成分的测定与评价[J]. 河北北方学院学报(自然科学版), 2021, 37(1): 35-42.
QU L J, LIU Z, CHEN Y, et al. Determination and evaluation of nutritional components of “Zhangzagu” millet varieties[J]. Journal of Hebei North University (Natural Science Edition), 2021, 37(1): 35-42.

[16] 穆秋霞, 崔素萍, 张卓敏, 等. 黑龙江主栽小米品种品质特性及其相关性分析[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(7): 26-32, 67.
MU Q X, CUI S P, ZHANG Z M, et al. Analysis correlation and quality properties on main cultivar millets in Heilongjiang Province [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(7): 26-32, 67.

[17] 李星, 王海寰, 沈群. 不同品种小米品质特性研究[J]. 中国食品

学报, 2017, 17(7): 248-254.
LI X, WANG H H, SHEN Q. Studies on the quality characteristics of different varieties of millet[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2017, 17(7): 248-254.

[18] 中华人民共和国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 of the People's Republic of China, State Food and Drug Administration. Determination of starch in food: GB 5009.9-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.

[19] 王春霞, 孙领霞, 刘满英. 双波长分光光度法测定河北省多种粮豆作物中直、支链淀粉含量[J]. 光谱实验室, 1999, 16(3): 259-261.
WANG C X, SUN L X, LIU M Y. Double wavelength spectrophotometry determination of amylose and amylopectin in many grain and bean of Hebei Province[J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory, 1999, 16(3): 259-261.

[20] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准食品中蛋白质的测定: GB 5009.5-2025[S]. 北京: 中国标准出版社, 2025.
National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. National food safety standard determination of protein in food: GB 5009.5-2025[S]. Beijing: Standards Press of China, 2025.

[21] 中华人民共和国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 of the People's Republic of China, State Food and Drug Administration. National food safety standard-determination of fat in food: GB 5009.6-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.

[22] 中华人民共和国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多元素的测定: GB 5009.268-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, State Food and Drug Administration. National food safety standard-determination of multielements in food: GB 5009.268-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.

[23] 田伯红. 谷子地方品种和育成品种的遗传多样性研究[J]. 植物遗传资源学报, 2010, 11(2): 224-228.
TIAN B H. Genetic diversity of landrace and improved cultivars in foxtail millet[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2010, 11(2): 224-228.

[24] 赵芳, 魏玮, 张晓磊, 等. 224个谷子品种农艺性状聚类和相关性分析[J]. 种子, 2022, 41(1): 74-83.
ZHAO F, WEI W, ZHANG X L, et al. Clustering and correlation analysis of agronomic traits of 224 millet varieties[J]. Seed, 2022, 41(1): 74-83.

[25] 任芹勇, 樊巧利, 李涛, 等. 65份谷子品种农艺性状聚类和相关性[J]. 分子植物育种, 2017, 15(12): 5178-5188.
REN Q Y, FAN Q L, LI T, et al. Clustering and correlation of agronomic traits in 65 foxtail millets[J]. Molecular Plant Breeding, 2017, 15(12): 5178-5188.

[26] 李涛, 高志军, 杨文耀. 37份谷子农艺性状多样性与相关性分析[J]. 安徽农学通报, 2021, 27(11): 96-100.
LI T, GAO Z J, YANG W Y. Diversity and correlation analysis of 37 millet agronomic traits[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2021, 27(11): 96-100.

[27] 薛亚鹏, 王蓉, 柴小娇, 等. 谷子四大名米品种群农艺及品质性状评价与亲缘关系分析[J]. 植物遗传资源学报, 2024, 25(4): 904-921.
XUE Y P, WANG R, CHAI X J, et al. Evaluation of agronomic and quality traits in four famous landraces groups of foxtail millet and relationship analysis[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2024, 25(4): 904-921.

[28] 李赢, 刘海翠, 石晓旭, 等. 398份裸大麦种质资源表型性状遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源报, 2023, 24(5): 1311-1320.
LI Y, LIU H C, SHI X X, et al. Phenotypic diversity analysis of 398 naked barley germplasm resources[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2023, 24(5): 1311-1320.

[29] 杜普旋, 刘军, 陈荣华, 等. 广东省花生种质资源收集与鉴定评价[J]. 植物遗传资源报, 2023, 24(3): 671-679.
DU P X, LIU J, CHEN R H, et al. Systematic collection,identification and evaluation of peanut germplasm resources in Guangdong Province[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2023, 24(3): 671-679.

[30] 胡标林, 万勇, 李霞, 等. 水稻核心种质表型性状遗传多样性分析及综合评价[J]. 作物学报, 2012, 38(5): 829-839.
HU B L, WAN Y, LI X, et al. Analysis on genetic diversity of phenotypic traits in rice (*Oryza sativa*) core collection and its comprehensive assessment[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(5): 829-839.

[31] 魏广伟, 阳慧怡, 王敏, 等. 芝麻种质资源表型性状遗传多样性分析及综合评价[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(18): 122-130.
WEI G W, YANG H Y, WANG M, et al. Analysis and comprehensive evaluation of genetic diversity of phenotypic traits of sesame germplasm resources[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(18): 122-130.

[32] 古世禄, 刘厦. 中国谷子蛋白质氨基酸组成的研究[J]. 华北农学报, 1989, (1): 8-15.
GU S L, LIU S. Study on amino acid composition of Chinese foxtail millet protein[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 1989, (1): 8-15.

[33] 杨延兵, 秦岭, 陈二影, 等. 谷子籽粒蛋白质、脂肪、千粒重的遗传变异[J]. 植物遗传资源学报, 2017, 18(5): 819-829.
YANG Y B, QIN L, CHEN E Y, et al. Genetic variations of protein content, fat content and TGW in foxtail millet (*Setaria Italica* (*L.*) *Beauv.*) in China[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2017, 18(5): 819-829.

[34] 冯链, 田翔, 乔治军, 等. 谷子农艺性状与蛋白质含量相关性分析[J]. 河南农业科学, 2022, 51(6): 43-53.
FENG L, TIAN X, QIAO Z J, et al. Correlation analysis between protein content and agronomic traits of foxtail millet[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2022, 51(6): 43-53.