

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

薛亚鹏^{1,2}, 王蓉^{1,2}, 柴小娇³, 王若楠^{1,2}, 王倩^{1,2}, 刘少雄¹, 王瑞云², 刘敏轩¹

¹中国农业科学院作物科学研究所/作物基因资源与育种全国重点实验室, 北京 100081;

²山西农业大学农学院, 太谷 030801; ³赤峰农牧科学研究所, 内蒙古赤峰 024031)

摘要: 对谷子四大名米(沁州黄、桃花米、龙山小米及金米)原始地方品种及其同名品种共计179份开展为期两年的农艺性状调查并对其进行基于SNP标记的亲缘关系分析, 从中选择51份进行营养品质测定。结果表明: 从农艺性状来看, 四类名米品种在数量性状上具有明显差异, 而质量性状在不同类品种间差异不大。相关性分析表明, 穗重与穗粒重、草重与穗重呈极显著正相关。主成分分析表明前3个主成分解释了累积变异的89.414%, 基于主成分分析结果计算了综合得分F值, 菠菜根-30的综合得分最高(F=7.42), 阴天旱-27的综合得分最低(F=-9.17)。亲缘关系结果表明, 各同名品种间存在多样的进化关系, 不同名品种间可能存在基因交流。基于农艺性状对179份材料进行聚类分析, 发现材料划归4个类群, 同名品种内聚集相对集中, 农艺性状相似度较大。从营养品质上看, 四类名米间营养品质差异较小, 除粗纤维外其余营养品质指标差异均不显著。相关性分析发现粗蛋白与粗脂肪呈现显著的正相关; 淀粉与蛋白质、脂肪之间呈现显著的负相关。主成分分析表明前6个主要成分解释了累积变异的88.414%, 能够基本涵盖10个营养品质的信息, 基于主成分分析, 结合不同品种谷子的综合得分, 对小米品质进行排名, 排名靠前的品种有菠菜根-77、菠菜根-33、菠菜根-44、爬坡糙-15、九根齐-25和阴天旱-13。本研究对四大名米品种群的农艺性状、品质性状和亲缘关系的鉴定和研究, 对种质资源保护和利用, 以及优异资源的挖掘具有重要意义。

关键词: 谷子传统名米; 农艺性状; 营养品质; 相关性分析; 亲缘关系

Evaluation of Agronomic and Quality Traits in Four Famous Landraces Groups of Foxtail Millet and Relationship Analysis

XUE Yapeng^{1,2}, WANG Rong^{1,2}, CHAI Xiaojiao³, WANG Ruonan^{1,2},

WANG Qian^{1,2}, LIU Shaoxiong¹, WANG Ruiyun², LIU Minxuan¹

¹Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences/State Key

Laboratory of Crop Gene Resources and Breeding, Beijing 100081;

²College of Agronomy, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801;

³Chifeng Academy of Agricultural & Animal Husbandry Sciences, Chifeng 024031, Inner Mongolia)

Abstract: A two-year field trials and agronomic performance analysis were conducted in 179 foxtail millet accessions which are homonyms of the four famous landraces (Qin Zhou Huang, Taohuami, Longshanxiaomi and Jinmi), as well as exploring the genetic relationships between the materials. Fifty-one accessions including the four original varieties were subjected for nutritional quality analysis. The significant differences on quantitative traits were detected in 179 accessions, while the quality traits were detected without much differences. Through the correlation analysis, a highly significant positive correlation between kernel weight of single ear and ear

收稿日期: 2023-06-09 修回日期: 2023-07-16 网络出版日期: 2023-09-13

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20230609004>

第一作者研究方向为谷子分子育种, E-mail: 745703453@qq.com; 王蓉为共同第一作者

通信作者: 刘敏轩, 研究方向为谷子糜子高粱种质资源, E-mail: liuminxuan@caas.cn

基金项目: 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-06-14.5-A2); 农作物种质资源保护与利用专项(2022NWB036-06)

Foundation projects: China Agriculture Research System of MOF and MARA (CARS-06-14.5-A2); Protection and Utilization for Crop Germplasm Resources (2022NWB036-06)

weight, as well as stalk weight and ear weight, were found. Principal component analysis showed that the first three principal components contributed to 89.414% of the cumulative variation. Gained from the composite score F -value calculated based on the results of principal component analysis, we observed the highest and lowest composite scores in Bocaigen-30 ($F=7.42$) and Yintianhan-27 ($F=-9.17$), respectively. Cluster analysis based on agronomic traits revealed that the 179 accessions were classified into four clusters with relatively concentrated clustering within homonyms varieties and greater similarity of agronomic traits. The results of phylogenetic relationships indicate that there are diverse evolutionary relationships among different varieties with the same name, and there may be gene exchange between different varieties with different names. The differences in nutritional quality among the four categories of famous foxtail millet were small, and the differences in all nutritional quality indexes except crude fiber were not significant. The crude protein and crude fat was positively correlated, while starch negatively correlated with protein and fat. The first six major components explained 88.414% of the cumulative variation and could basically cover the information of the 10 nutritional qualities. Based on the principal component analysis of nutritional qualities, the top ranked varieties were Bocaigen-77, Bocaigen-33, Bocaigen-44, Papocao-15, Jugenqi-25 and Yintianhan-13, combined with the comprehensive scores of different accessions. This study identifies and studies the agronomic traits, quality traits, and phylogenetic relationships of the four famous foxtail millet groups, which is of great significance for the protection and utilization of germplasm resources, as well as the excavation of excellent resources.

Key words: Chinese traditional foxtail millet accessions; agronomic traits; nutritional quality; correlation analysis; relationship

谷子(*Setaria italica* (L.) Beauv.)是起源于我国黄河流域且具有代表性的杂粮作物,因其耐旱、水分利用率高、耐瘠薄,在种植业结构调整、绿色农业发展中起到重要作用,同时也是应对气候变化的战略储备作物之一^[1-3]。谷子在我国栽培历史悠久,种植面积广阔,生态环境差异显著,在长期自然和人工选择下形成了非常丰富的表型多样性,例如刺毛、粒色、穗型、米色、粒形、株型、生育期、温光性、丰产性等^[4-5]。此外,谷子单穗粒多、繁殖系数大,同时具有一定的异花授粉习性,容易形成种质分化,进一步丰富了资源多样性。目前国家作物种质库中保存谷子资源 28000 多份,根据形态特征和生物学特性差异可划分为 67 个组群^[6]。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。

谷子富含淀粉、蛋白质、人体必需氨基酸、多种矿物元素和维生素^[7-9],可作为一种很好的药食同源作物利用。《本草纲目》中记载谷子味甘性寒,有补中益气的作用,具有很高的食用价值。谷子淀粉含量高,主要成分为不易消化淀粉和持续消化淀粉,对糖尿病患者十分友好^[10];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^[11-12];谷子中不饱和脂肪酸很高,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]测定了张杂谷系列

品种的营养成分,结果显示张杂谷不仅高产而且具有较好的营养品质;根据测定的 4 种蒸煮品质和适口性指标,发现张杂谷 5 号和 10 号的适口性最好。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]选取了 5 个省份的 15 个谷子品种,研究了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,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。

种质资源的近缘关系研究对确定不同谷子品种的遗传背景,促进资源的高效利用以及育种亲本的选择等具有重要意义。分子标记法是开展种质间亲缘关系研究的有效且常用手段之一^[18-20],单核苷酸多态性(SNP)为第三代分子标记,是指由单个核苷酸的变化进而引起基因水平的变化,相较于简单重复序列(SSR),SNP 标记在基因组中的密度高,同时遗传稳定且准确度更高,更加适合大样本量等的分析。随着谷子全基因组的测序完成,SNP 标记逐渐成为谷子亲缘关系鉴定的有效手段。王振山^[21]利用 18000 个 SNP 标记将 160 份谷子划分为 4 类;高豪^[22]利用重测序获得的 SNP 标记对 435 份谷子的亲缘关系进行研究,发现 84.66% 材料之间的亲

缘关系为0~0.1,群体结构将参试材料划分为15类,表明参试材料间存在着丰富的遗传变异。

我国历史上谷子有四大传统名米,即山西沁县的沁州黄、河北蔚县的桃花米、山东章丘的龙山小米、山东金乡的金米。上述名米品种商品性和适口性俱佳、营养丰富、品质优异,都曾被选做皇家贡米,同时也深受民间百姓喜爱。随着市场经济的发展,各地都在挖掘传统名米资源,打造现代名米品牌,提升小米经济效益。例如山西的沁州黄目前已成为小米高端品牌,经济效益显著^[23]。研究我国传统名米的综合农艺性状和品质特性,利用名米资源改良现有谷子品种,对我国谷子的品质育种具有积极意义,但目前对这些名米品种开展的系统研究比较匮乏。根据本课题组前期对谷子传统名米资源的考察可知,沁州黄、桃花米、龙山小米和金米分别对应地方品种爬坡糙、九根齐、阴天旱和菠菜根。通过查询国家种质库中保存的谷子资源名录发现,以传统名米原产地向周边地区辐射存在很多同名品种,其中爬坡糙同名品种15个、九根齐同名品种26个、阴天旱同名品种41个、菠菜根同名品种97个。名米同名品种之间农艺性状、营养品质是否存在差异以及同名品种间的亲缘关系目前还未曾进行系统的研究。

为了系统研究谷子四大传统名米(沁州黄、桃花米、龙山小米、金米)的原始品种及其同名品种在农艺性状上是否存在显著差异,哪类名米类群具有更好的生产潜力,以及不同品种之间的亲缘关系如何,本研究对179份谷子材料在河北张家口进行了为期两年的农艺性状调查,并基于SNP标记探究不同材料之间的亲缘关系,同时在遗传多样性分析^[24]基础上根据聚类结果筛选51份代表性品种进行蛋白质、脂肪、淀粉含量等营养成分测定,综合分析农艺性状和品质性状测定结果以及探究亲缘关系,旨在发掘生产潜力大、营养品质好的名米资源,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

本研究进行农艺性状调查和亲缘关系分析的179份谷子材料均来源于国家作物种质库(<https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20230609004>,附表1),其中包含爬坡糙15份,九根齐26份,阴天旱41份和菠菜根97份。根据前期研究结果^[24]于上述材料中选出51份材料进行营养品质分析(<https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20230609004>,附表1),其中爬

坡糙8份、九根齐10份、阴天旱14份、菠菜根19份。

1.2 试验方法

试验材料于2021-2022年种植于河北省张家口市试验基地(40.6°N, 115.1°E),每个品种种植5行,行长2 m,行距50 cm。

在不同生育阶段调查表型性状。幼苗期记录材料的鞘色和叶色,灌浆期记录刺毛颜色,成熟期记录穗颈形状、穗码密度及穗形,对6个质量性状进行赋值用于统计分析(表1)。材料成熟后,每份材料取5株单收进行考种,调查株高、穗长、穗粗、穗重、草重、穗粒重等数量性状。

表1 6个谷子质量性状的赋值标准

Table 1 Six assignment standard for quality traits in foxtail millet

性状 Traits	赋值标准 Assignment standard				
	1	2	3	4	5
鞘色 LSC	绿色	黄绿色	淡紫色	中紫色	紫色
苗色 PC	绿色	黄绿色	淡紫色	中紫色	紫色
刺毛颜色 CC	绿色	黄绿色	淡紫色	中紫色	紫色
穗颈姿态 NS	直立	中弯	弯曲	勾形	-
穗码密度 SD	稀疏	中	紧密	-	-
穗形 ES	鸡嘴形	纺锤形	圆筒形	棍棒形	佛手形

-: 无赋值

-: No assignment; LSC: Leaf sheath color; PC: Plant color; CC: Chaeta color; NS: Ear neck posture; SD: Spike density; SS: Ear shape; The same as below

成熟籽粒脱粒后测定水分,籽粒脱皮磨粉后测定总淀粉、粗蛋白、粗脂肪、灰分、粗纤维含量、胶稠度、抗性淀粉含量、直链淀粉含量和淀粉的消化特性9项营养品质指标。水分测量方法参考《GB 5009.3-2016 食品安全国家标准 食品中水分的测定》^[25];粗蛋白测定方法参考《GB 5009.5-2016 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》^[26];粗脂肪测定方法参考《GB 5009.6-2016 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》^[27];灰分测定方法参考《GB5009.4-2016 食品安全国家标准 食品中灰分的测定》^[28];粗纤维测定方法参考《GB/T 5009.10-2003 植物类食品中粗纤维的测定》^[29];胶稠度测定方法参考《NY83-2017 米质测定方法》^[30];淀粉含量测定使用索莱宝公司提供的淀粉含量检测试剂盒;直链淀粉测定方法参考《NY/T 55-1987 水稻、玉米、谷子籽粒直链淀粉测定法》^[31];抗性淀粉含量测定使用Megazyme抗性淀粉试剂盒;淀粉的消化特性的测定方法参照Englyst方法^[10],其中快速消化淀粉是指在20 min内被人体小肠迅速吸收的淀粉,慢速消化

淀粉是指在 20~120 min 内被人体小肠消化吸收的淀粉,抗性淀粉是指在 120 min 内不被人体小肠消化吸收的淀粉。

1.3 数据分析

用 Excel 2016 进行数据整理,用 R(4.1.2) 进行相关性分析和聚类分析,用 SPSS 25 进行单因素方差分析及主成分分析,使用 MEGA 和 Structure 进行进化树和群体结构分析。主成分分析综合得分 = $w_1 \times$ 主成分 1 得分 + $w_2 \times$ 主成分 2 得分 + $w_3 \times$ 主成分 3 得分 + $\dots + w_n \times$ 主成分 n 得分,其中 w_1 、 w_2 、 $w_3 \dots w_n$ 分别表示各主成分的权重。

2 结果与分析

2.1 农艺性状

2.1.1 四大名米及其同名地方品种主要农艺性状变异分析 对 179 份谷子材料的数量性状统计分析(表 2、图 1)结果发现,阴天旱同名品种平均株高(196.14 cm)最高;爬坡糙同名品种的平均穗长(34.82 cm)、穗粗(3.44 cm)、穗粒重(30.08 g)、穗重

(54.51 g)和草重(137.07 g)均最高。整体而言,6 个数量性状均基本符合正态分布,大部分材料株高介于 150.00~180.00 cm,穗长介于 20.00~35.00 cm,穗粗介于 2.00~3.50 cm,穗粒重介于 10.00~25.00 g,穗重介于 20.00~40.00 g,草重介于 40.00~80.00 g。四大名米的数量性状的变异系数结果显示,阴天旱同名品种的株高平均变异系数最大,为 14.61%;菠菜根同名品种的穗长平均变异系数最大,为 19.51%;九根齐同名品种的穗粗、穗粒重、草重和穗重平均变异系数均最大,分别为 36.81%、43.99%、39.12% 和 35.59%。

其中,通过分子标记进行亲缘关系分析筛选的用于品质分析的 51 份材料中,株高介于 141.12~234.64 cm,变异系数为 12.37%;穗长介于 17.56~39.88 cm,变异系数为 19.07%;穗粗介于 1.60~4.96 cm,变异系数为 25.42%;穗粒重介于 15.00~74.00 g,变异系数为 41.54%;穗重介于 8.40~47.40 g,变异系数为 39.44%;草重介于 4.20~168.00 g,变异系数为 44.62%。

表 2 参试材料在 2021 年和 2022 年张家口调查数据

Table 2 Survey data of 2021 and 2022 in Zhangjiakou

性状 Traits	名称 Name	2021 年 Year 2021		2022 年 Year 2022	
		平均值±标准差 Mean±SD	变异系数(%) CV	平均值±标准差 Mean±SD	变异系数(%) CV
株高(cm) PH	爬坡糙	194.95±10.75	5.51	190.45±11.88	6.24
	九根齐	162.66±13.85	8.51	164.08±13.32	8.12
	阴天旱	196.55±28.41	14.46	195.73±28.88	14.76
	菠菜根	165.14±11.30	6.84	165.11±11.69	7.08
穗长(cm) EL	爬坡糙	34.91±3.89	11.14	34.73±3.77	10.84
	九根齐	33.01±5.38	16.30	33.08±5.51	16.64
	阴天旱	22.99±3.35	14.58	22.87±3.40	14.87
	菠菜根	25.31±5.01	19.80	25.15±4.83	19.21
穗粗(cm) ED	爬坡糙	3.51±0.39	11.23	3.37±0.46	13.57
	九根齐	3.18±1.12	35.18	3.16±1.21	38.43
	阴天旱	2.83±0.58	20.52	2.85±0.63	22.16
	菠菜根	2.53±0.65	25.70	2.51±0.62	24.60
穗粒重(g) KW	爬坡糙	30.38±8.97	29.52	29.78±8.74	29.36
	九根齐	23.00±10.11	43.96	23.00±10.13	44.02
	阴天旱	17.79±4.92	27.65	17.56±4.97	28.32
	菠菜根	16.48±6.29	38.15	16.26±6.35	39.06
穗重(g) EW	爬坡糙	53.60±12.87	24.00	55.42±10.98	19.81
	九根齐	36.51±15.17	41.54	40.94±12.13	29.63
	阴天旱	27.38±6.80	24.85	33.79±5.69	16.82
	菠菜根	24.70±8.71	35.28	31.58±7.23	22.89

表2(续)

性状 Traits	名称 Name	2021年 Year 2021		2022年 Year 2022	
		平均值±标准差	变异系数(%)	平均值±标准差	变异系数(%)
		Mean±SD	CV	Mean±SD	CV
草重(g) SW	爬坡糙	137.87±22.18	16.09	136.26±22.96	16.85
	九根齐	83.98±32.21	38.35	82.37±32.85	39.88
	阴天早	71.60±21.35	29.81	69.99±21.62	30.88
	菠菜根	58.21±21.00	36.07	56.08±20.58	36.70

PH: Plant height; EL: Ear length; ED: Ear diameter; KW: Kernel weight of single ear; EW: Ear weight; SW: Stalk weight; The same as below

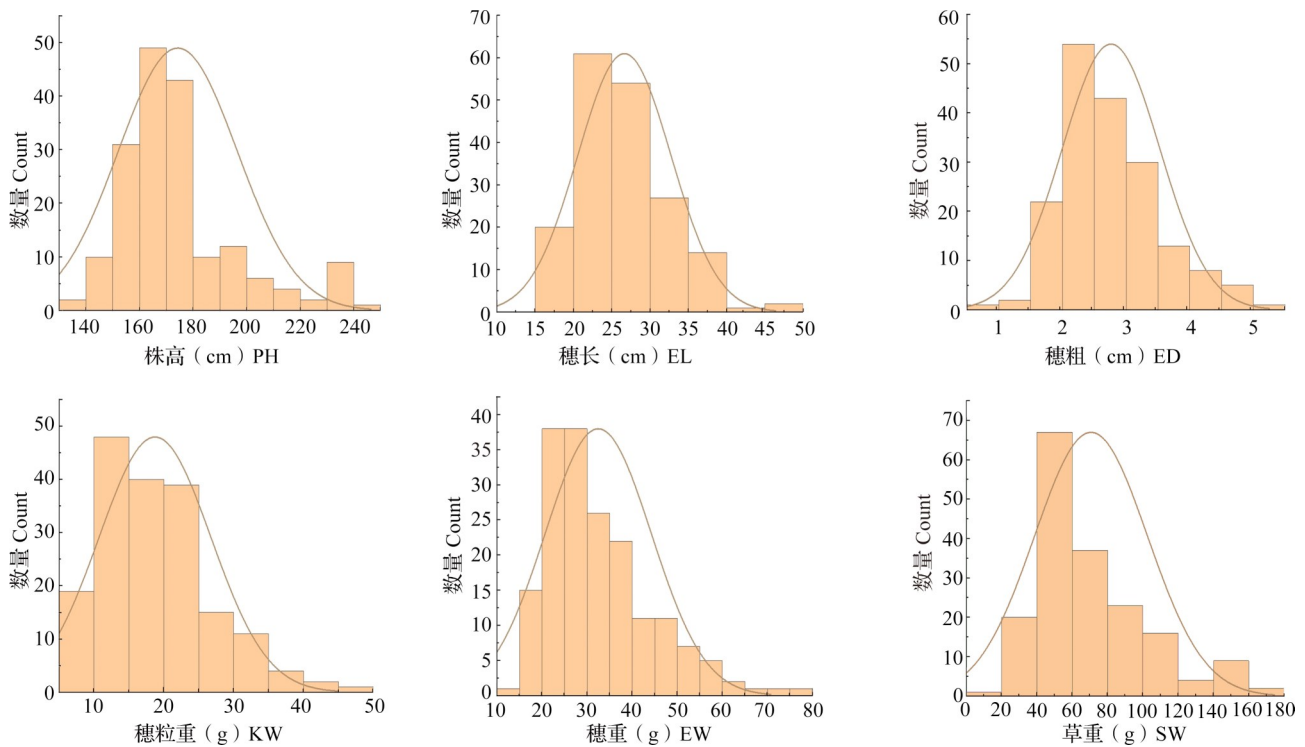


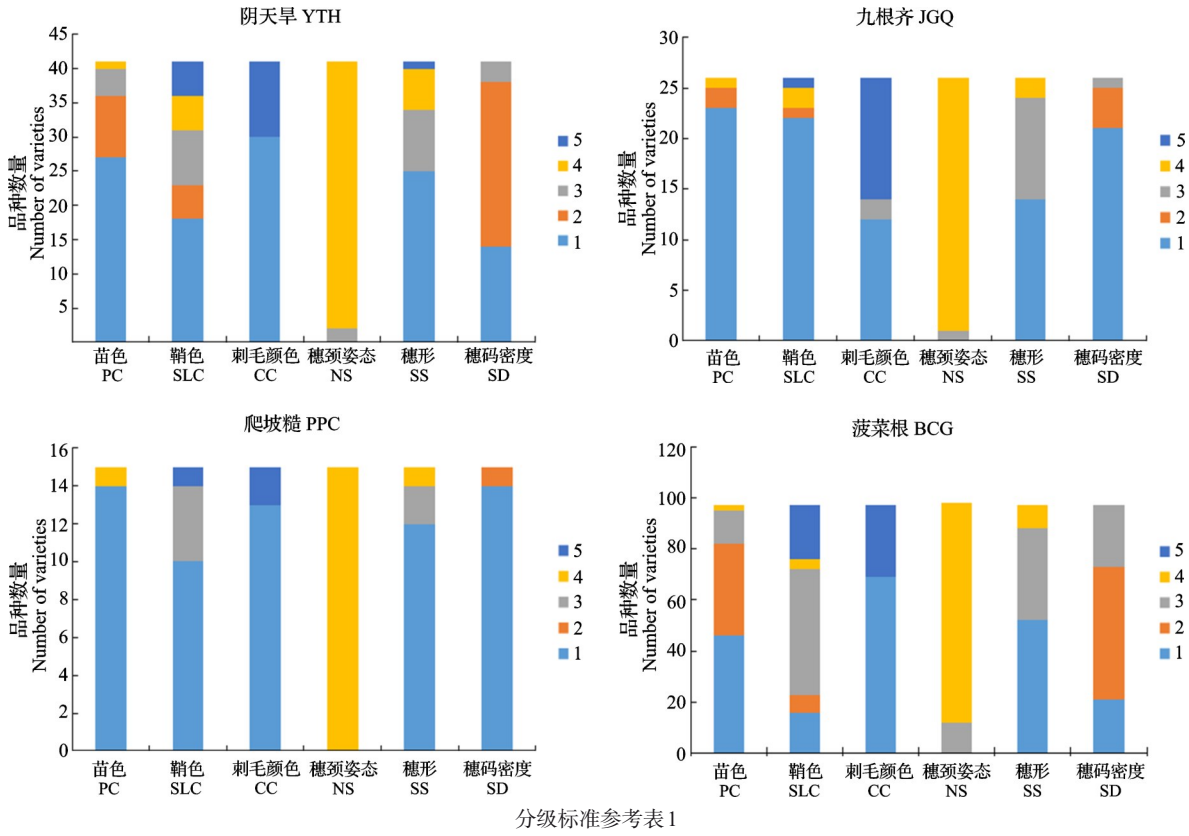
图1 参试材料的数量性状统计

Fig. 1 Quantitative trait statistics of the participating materials

对苗色、鞘色、刺毛颜色、穗颈姿态、穗形和穗码密度6项质量性状统计结果显示,179份材料的苗色、鞘色和刺毛颜色绿色最多,分别有110、66和124份。穗颈姿态勾形资源最多,有165份,其余为弯曲;穗形中鸡嘴形和圆筒形最多,分别有103份和57份;穗码密度中等和稀疏的材料较多,分别为83和71份。对于四类同名品种而言,爬坡糙、九根齐和阴天早的苗色、鞘色和刺毛颜色为绿色的材料占比均在43.9%以上;菠菜根苗色和刺毛颜色绿色占比50.5%和75.8%,鞘色淡紫色占比53.8%。四种同名品种的穗颈姿态勾形最多;穗形鸡嘴形最多,其次为圆筒形;同时,爬坡糙与九根齐的穗码密度比较稀疏,阴天早与菠菜根穗码密度则以中等为主(图2)。

2.1.2 农艺性状的相关性分析 为探究不同性状之间的相关性,对参试材料的12个农艺性状进行相关性分析,结果表明草重与穗重、穗重与穗粒重相关系数较大,分别为0.841和0.899,苗色与鞘色、穗粗与草重、穗长与草重、穗粗与穗粒重均呈极显著正相关;穗码密度与草重、穗长、穗粗、穗粒重均呈极显著负相关。在12个表型性状中,穗形与其他大多数性状相关系数均较小,穗码密度与其他大多数性状呈负相关关系(图3)。

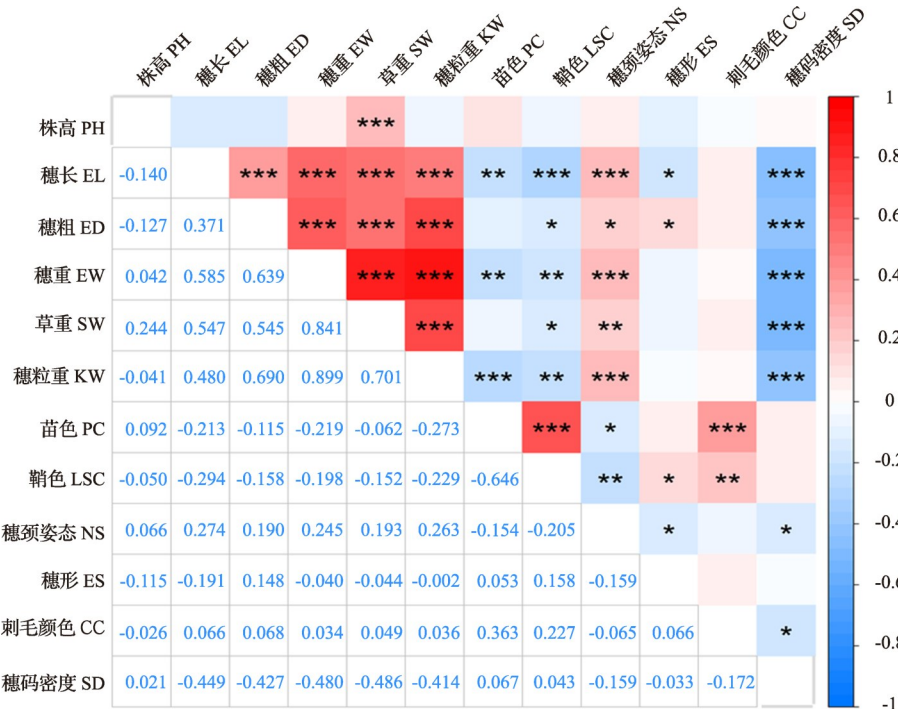
2.1.3 数量性状的主成分分析 为更加准确、标准地对谷子种质资源进行评价,对参试材料的7个数量性状进行主成分分析(表3),以累计贡献率达80%以上为选择主成分的标准。结果表明,第1主



Grading criteria reference table 1; PPC: Papocao; JGQ: Jiugenqi; YTH: Yintianhan; BCG: Bocaigen

图2 同名品种质量性状统计

Fig.2 Statistics of quality characters of homonyms accessions



*在0.05水平上显著相关; **在0.01水平上显著相关; ***在0.001水平上显著相关; 红色正相关, 蓝色负相关, 颜色越深代表相关系数越大; 下同
*Significantly correlated at the 0.05 level; **Significantly correlated at the 0.01 level; ***Significantly correlated at the 0.001 level; Red is positively correlated, blue is negatively correlated, with darker colors representing larger correlation coefficients; The same as below

图3 参试品种的农艺性状相关性分析

Fig.3 Correlative coefficient of tested accessions

成分主要与穗重和穗粒重等性状相关,贡献率为 59.348%;第2主成分主要与株高等性状相关,贡献率为 18.919%;第3主成分主要与穗长等性状相关,贡献率为 11.147%,前3个主成分的累计贡献率为 89.414%。将数据进行标准化,基于主成分分析结果进行综合得分 F 值的计算 (<https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20230609004>, 附表 1), 以此来衡量不同品种数量性状,得分越高,其数量性状的综合评价价值越高。结果表明菠菜根-30的综合得分最高($F=7.42$),阴天旱-27的综合得分最低($F=-9.17$)。沁州黄的原始品种爬坡糙-11的综合得分为-2.78,位于第151;桃花米原始品种九根齐-7的综合得分为-4.06,位于第163;龙山小米原始品种阴天旱-30的综合得分为0.22,位于第99;金米原始品种菠菜根-44的综合得分为2.04,位于第39。

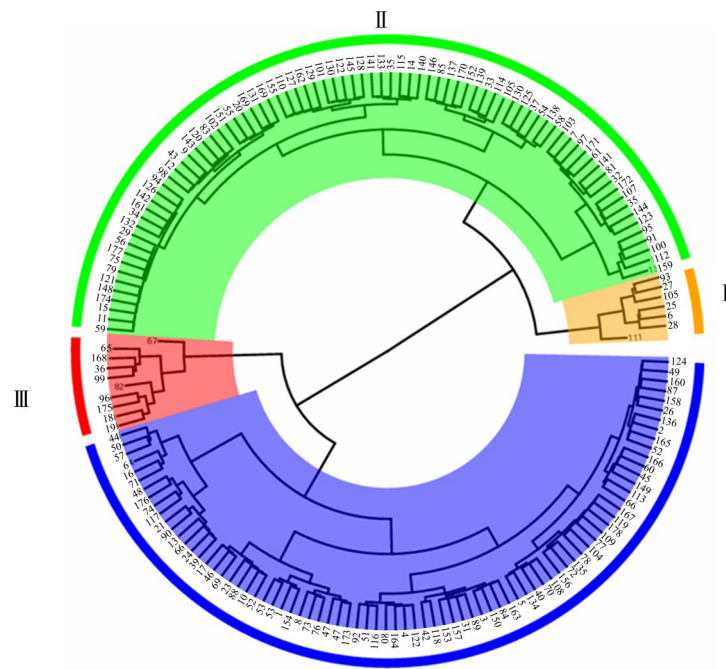
2.1.4 基于农艺性状的聚类分析 聚类分析可以探究不同谷子品种之间的亲缘关系,进而将不同品种进行分类。为探寻不同谷子种质资源间的亲缘性,基于农艺性状数据,利用R(4.1.2)软件包对179份材料进行聚类分析(图4)。结果显示179份谷子材料可以被分为4个类群,其中类群I包括7份材料,爬坡糙同名品种1份,九根齐同名品种3份,菠菜根同名品种3份;类群II包括80份材料,其中爬坡糙同

名品种6份,九根齐同名品种10份,阴天旱同名品种11份,菠菜根同名品种53份;类群III有10份材料,九根齐同名品种3份,阴天旱同名品种3份,菠菜根同名品种4份;类群IV材料最多,包括82份材料,其中爬坡糙同名品种8份,九根齐同名品种10份,阴天旱同名品种27份,菠菜根同名品种37份。

表3 基于数量性状的主成分分析

Table 3 Principal component analysis based on quantitative traits

性状 Traits	主成分 Principal component		
	1	2	3
穗重 EW	0.954	0.063	-0.016
穗粒重 KW	0.909	-0.045	-0.204
草重 SW	0.873	0.302	0.1
穗粗 ED	0.768	-0.195	-0.436
穗长 EL	0.686	-0.208	0.654
株高 PH	0.009	0.978	0.013
特征值 Eigenvalue	3.561	1.135	0.669
贡献率(%) Contribution rate	59.348	18.919	11.147
累计贡献率(%) Cumulative contribution rate	59.348	78.267	89.414



IV
材料序号同附表1

Material serial number as in supplementary table 1

图4 基于农艺性状的谷子品种聚类分析

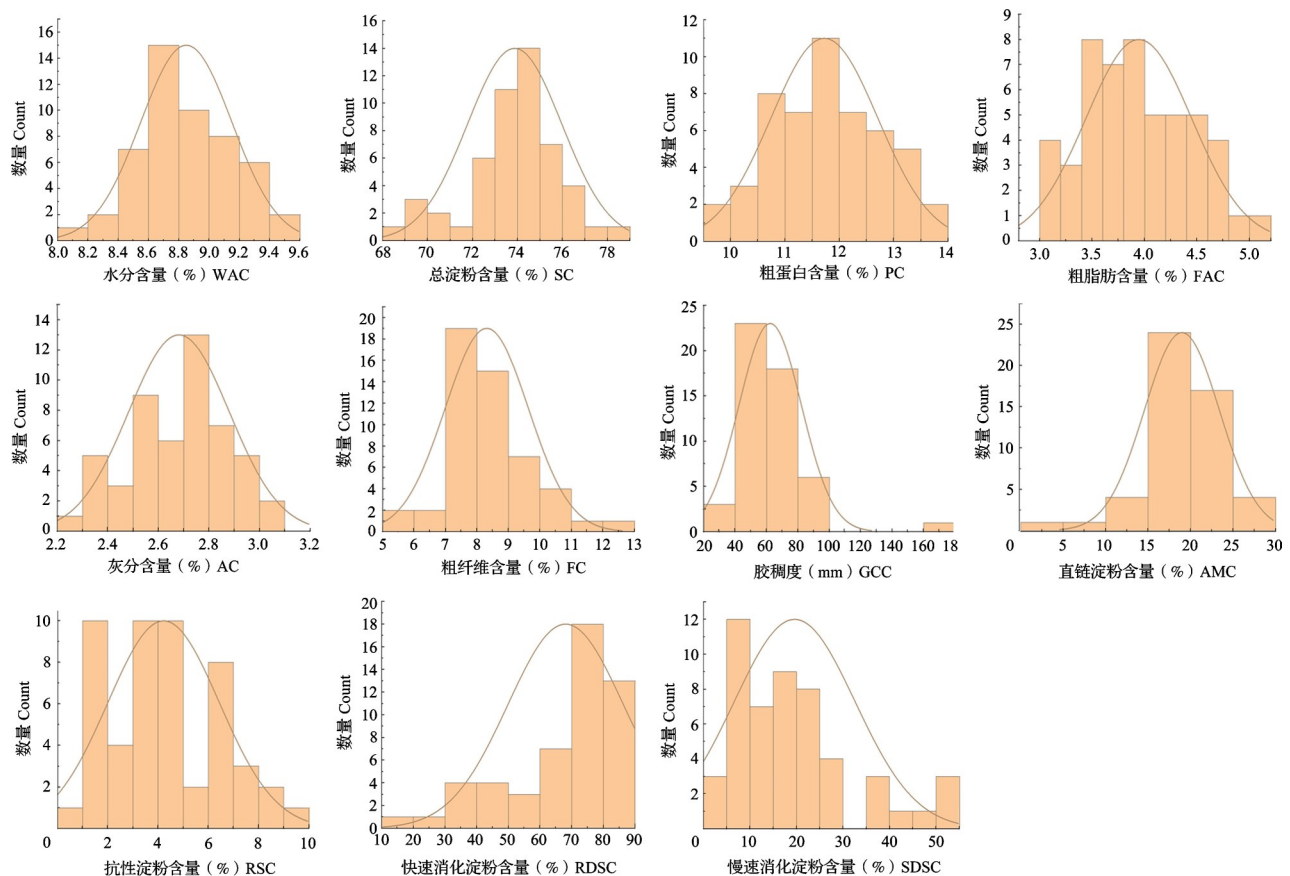
Fig. 4 Cluster analysis of 179 foxtail millet accessions based on agronomic traits

2.2 营养品质

2.2.1 营养品质测定 本研究测定了 51 份谷子材料的水分、营养品质、胶稠度和消化特性共 10 个指标(图 5)。参试材料水分含量介于 8.13%~9.50%, 平均 8.86%。总淀粉含量介于 68.84% (菠菜根-44)~78.84% (菠菜根-6), 平均 73.91%, 含量在 73.00%~75.00% 的材料占比 49.02%。粗蛋白含量介于 9.61% (爬坡糙-3)~13.73% (九根齐-23), 平均 11.70%, 含量在 11.00%~12.50% 的材料占比 41.18%; 粗脂肪含量介于 3.02% (九根齐-7)~5.05% (九根齐-14), 平均 3.94%, 含量在 3.40%~4.00% 的材料占比 49.02%。灰分含量介于 2.23% (阴天早-3)~3.09% (菠菜根-72), 平均 2.68%, 含量在 2.60%~2.90% 的材料占比 50.98%; 粗纤维含量范围为 5.26% (爬坡糙-15)~12.24% (阴天早-3), 平均 8.32%, 含量在 7.00%~9.00% 的材料占比 66.67%; 胶稠度介于 33 (九根齐-10)~160 mm (九根齐-25), 平均 62.12 mm, 在 40.00~60.00 mm 的材料占比 45.10%。直链淀粉含量介于 0 (九根齐-25)~27.59%

(菠菜根-2), 平均 19.31%, 含量在 15.74%~19.88% 的材料占比 47.06%; 抗性淀粉含量介于 0.72% (九根齐-21)~9.13% (阴天早-10), 平均 4.09%, 含量在 3.05%~4.70% 的材料占比 39.22%; 快速消化淀粉和慢速消化淀粉的变化范围分别为 17.81% (九根齐-23)~88.72% (阴天早-1) 和 2.97% (菠菜根-78)~52.82% (九根齐-23), 平均分别为 68.16% 和 19.62%, 快速消化淀粉含量在 70.10%~88.72% 的材料占比 60.78%, 慢速消化淀粉含量在 5.68%~20.00% 的材料占比 54.90%。

四大名米同名品种间水分、总淀粉和灰分含量相近, 粗蛋白、粗脂肪、粗纤维存在差异, 其中九根齐同名品种的粗蛋白含量最高, 爬坡糙同名品种的粗脂肪含量最高, 阴天早同名品种的粗纤维含量最高。总淀粉含量变异系数最小的是阴天早群体 (1.9652%), 最大的是爬坡糙群体 (3.4535%); 粗蛋白含量变异系数最小的是九根齐群体 (6.1027%), 最大的是爬坡糙群体 (9.4584%); 粗脂肪含量变异系数最小的是菠菜根群体 (10.3554%), 最大的是九



WAC: Water content; SC: Starch content; PC: Protein content; FAC: Fat content; AC: Ash content; FC: Fiber content; GCC: Gel consistency content; AMC: Amylose content; RSC: Resistance starch content; RDSC: Readily digestible starch content; SDSC: Slowly digestible starch content; The same as below

图 5 谷子营养品质测定结果

Fig. 5 Nutrient quality test of foxtail millet

根齐群体(14.9168%);粗纤维含量变异系数最小的是九根齐群体(8.0012%),最大的是阴天旱群体(16.8318%)。在胶稠度方面,菠菜根群体的胶稠度略高于其他群体;九根齐群体的直链淀粉和慢速消化淀粉平均含量略高于其他群体;菠菜根抗性淀粉和快速消化淀粉平均含量略高于其他群体;抗性淀粉和直链淀粉含量变异系数最大的是九根齐群体(68.9591%和23.5923%),快速、慢速消化淀粉含量变异系数最大的分别是爬坡糙群体(39.3072%)和菠菜根群体(79.9064%)。方差分析显示水分、淀粉、粗蛋白、粗脂肪、灰分、直链淀粉、抗性淀粉含量、胶稠度和消化特性在四大名米群体间差异不显著,粗纤维含量有显著性差异($P < 0.05$)(表4)。

对四大名米原始品种进一步分析,结果显示沁州黄的原始品种爬坡糙-11的淀粉、粗纤维、直链淀粉和快速消化淀粉含量低于爬坡糙同名品种的平均值,其余指标均高于爬坡糙同名品种的平均值;桃花米原始品种九根齐-7的粗纤维、直链淀粉和慢速消化淀粉含量低于九根齐同名品种的平均值,其余指标均高于九根齐同名品种的平均值;龙山小米原始品种阴天旱-30的淀粉、粗蛋白、粗脂肪、粗纤维、直链淀粉、抗性淀粉含量低于同名品种的平均值,灰分含量、胶稠度、快速消化淀粉和慢速消化淀粉含量高于平均值;金米原始品种菠菜根-44的淀粉、灰分、快速和慢速消化淀粉低于九根齐同名品种的平均值,其余指标均高于九根齐同名品种的平均值。

表4 同名品种间的营养成分

Table 4 Nutrient composition between four groups of foxtail millet accessions

性状 Traits	参数 Parameter	爬坡糙 PPC	九根齐 JGQ	阴天旱 YTH	菠菜根 BCG
水分含量(%) WAC	平均值±标准差	8.8975±0.2187a	8.948±0.289a	8.8943±0.2623a	8.7453±0.3254a
	变异系数(%)	2.4580	3.2298	2.9491	3.7209
总淀粉含量(%) SC	平均值±标准差	73.2474±2.5296a	73.0918±1.8176a	74.6781±1.4676a	73.9564±2.1412a
	变异系数(%)	3.4535	2.4867	1.9652	2.8952
粗蛋白含量(%) PC	平均值±标准差	11.6975±1.1064a	12.224±0.746a	11.2643±0.8411a	11.8089±0.966a
	变异系数(%)	9.4584	6.1027	7.467	8.1803
粗脂肪含量(%) FAC	平均值±标准差	4.1275±0.5536a	4.088±0.6098a	3.7729±0.4283a	3.9168±0.4056a
	变异系数(%)	13.4125	14.9168	11.352	10.3554
灰分含量(%) AC	平均值±标准差	2.6163±0.1851a	2.716±0.1601a	2.6436±0.166a	2.7184±0.2278a
	变异系数(%)	7.0749	5.8947	6.2793	8.3799
粗纤维含量(%) FC	平均值±标准差	7.0306±1.1061b	8.035±0.6429ab	9.0014±1.5151a	8.4882±1.0393ab
	变异系数(%)	15.7327	8.0012	16.8318	12.2441
胶稠度(%) GCC	平均值±标准差	54.2500±13.1601a	57.4000±34.9548a	63.2143±13.6391a	67.6316±11.0034a
	变异系数(%)	24.2582	60.8969	21.576	16.2696
抗性淀粉含量(%) RSC	平均值±标准差	3.8400±1.5327a	2.9100±2.0084a	4.1300±2.4135a	4.8700±2.2882a
	变异系数(%)	39.9316	68.9591	58.3939	47.0260
直链淀粉含量(%) AMC	平均值±标准差	17.4600±2.7136a	20.4200±4.8167a	18.6900±3.3055a	20.1100±3.1237a
	变异系数(%)	15.5376	23.5923	17.6852	15.5310
快速消化淀粉含量(%) RDSC	平均值±标准差	60.8600±23.9225a	60.3200±22.2359a	72.1200±10.6289a	72.2500±14.3252a
	变异系数(%)	39.3072	36.8662	14.7368	19.8269
慢速消化淀粉含量(%) SDSC	平均值±标准差	21.2300±10.1137a	23.7300±17.8876a	18.6400±5.7149a	17.4400±13.9395a
	变异系数(%)	47.6583	75.3942	30.6524	79.9064

同行不同小写字母表示差异在0.05水平显著

Different lowercase letters in the same row indicate that the difference is significant at the 0.05 level

2.2.2 营养品质的相关性分析 为探究不同营养品质之间的关联程度,对 51 份试验材料的营养品质进行相关性分析(图 6),结果表明粗蛋白含量与粗脂肪含量间的正相关系数最高,为 0.499;粗蛋白含量与总淀粉含量、粗脂肪含量与总淀粉含量之间呈现显著的负相关关系,相关系数分别为-0.822 和-0.671。而粗纤维含量、胶稠度、直链淀粉含量、抗性淀粉含量与其他营养成分之间的相关性不显著。

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 10 个营养指标进行主成分分析(表 5)。结果显示,第 1 主成分与总淀粉含量(0.913)、粗蛋白含量(0.830)和灰分含量(0.876)等相关,贡献率为 26.906%;第 2 主成分与快速消化淀粉含量(0.790)、慢速消化淀粉含量(0.723)等相关,贡献率为 17.889%;第 3 主成分与胶

稠度(-0.539)等相关,贡献率为 15.088%;第 4 主成分与粗脂肪含量(0.518)等相关,贡献率为 11.028%;第 5 主成分与胶稠度(0.523)等相关,贡献率为 10.605%,第 6 主成分与粗纤维含量(0.732)等相关,贡献率为 6.890%。前 6 个主成分的累计贡献率为 88.414%,基本涵盖 10 个营养指标的信息,可对参试材料进行综合评价。

2.2.4 基于营养成分的综合评价 基于主成分分析,结合不同品种的综合得分对参试材料进行排名(表 6),得分高的品种,说明该品种的综合品质越好,排名靠前的品种有菠菜根-77、菠菜根-33、菠菜根-44、爬坡糙-15、九根齐-25 和阴天早-13。四大名米原始品种中金米原始品种菠菜根-44 与沁州黄原始品种爬坡糙-11 排名靠前,排名分别为 3 和 15;龙山小米原始品种阴天早-30 与桃花米原始品种九根齐-7 排名偏后,排名分别为 43 和 34。

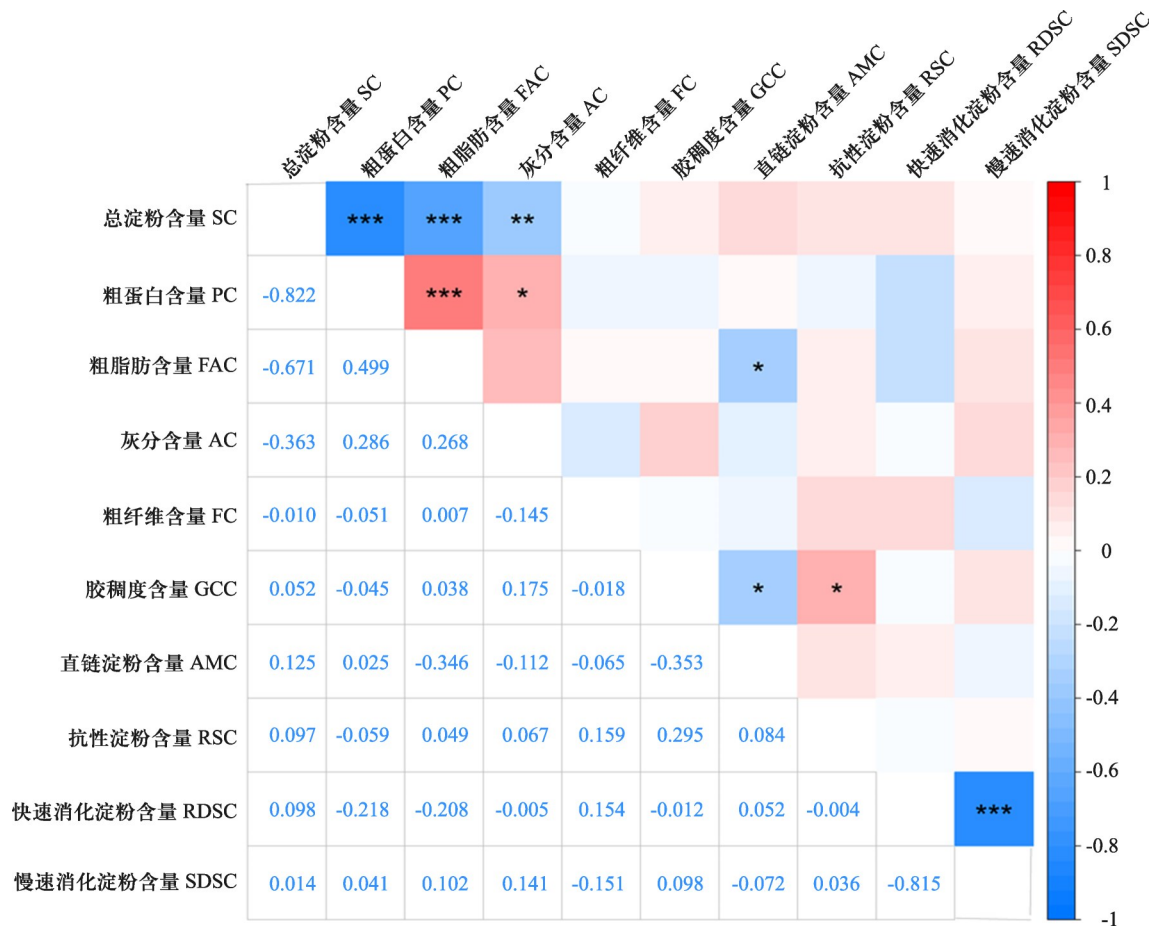


图 6 营养品质的相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis of nutritional qualities

表5 营养品质的主成分分析

Table 5 Principal component analysis based on nutritional qualities

性状 Traits	主成分 Principal component					
	1	2	3	4	5	6
慢速消化淀粉含量 SDSC	-0.366	0.723	0.049	-0.023	-0.253	0.137
快速消化淀粉含量 RDSC	-0.335	0.790	0.206	0.063	-0.136	0.119
抗性淀粉含量 RSC	-0.616	-0.294	0.092	-0.138	-0.068	0.073
直链淀粉含量 AMC	0.052	0.650	-0.086	0.404	0.218	-0.156
胶稠度含量 GCC	-0.145	0.216	-0.539	-0.392	0.523	0.403
粗纤维含量 FC	0.382	-0.229	0.255	0.382	-0.163	0.732
灰分含量 AC	0.876	0.052	-0.054	-0.204	-0.090	0.036
粗脂肪含量 FAC	0.420	-0.034	-0.114	0.518	0.478	0.004
粗蛋白含量 PC	0.830	0.218	0.251	-0.220	0.079	-0.058
总淀粉含量 SC	0.913	0.114	0.058	-0.204	-0.067	-0.032
特征值 Eigenvalue	2.691	1.789	1.509	1.103	1.061	0.689
贡献率(%) Contribution rate	26.906	17.889	15.088	11.028	10.605	6.890
累计贡献率(%) Cumulative contribution rate	26.906	44.796	59.883	70.911	81.517	88.407

表6 51个谷子品种营养品质综合得分

Table 6 Comprehensive score of nutrition quality of 51 foxtail millet accessions

品种 Accessions	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F 综合值 F synthesis value	排名 Ranking
菠菜根-77 Bocaigen-77	1.28	2.43	1.58	2.12	-0.68	0.20	1.19	1
菠菜根-33 Bocaigen-33	2.84	2.07	0.25	-1.34	0.75	0.39	1.13	2
菠菜根-44 Bocaigen-44	2.03	1.38	0.53	2.12	0.35	-1.27	1.06	3
爬坡糙-15 Papocao-15	3.25	1.01	-1.01	-0.88	1.36	-1.20	0.87	4
九根齐-25 Jiugenqi-25	2.61	-3.33	5.57	-2.05	-0.24	-0.21	0.68	5
阴天早-13 Yintianhan-13	2.04	0.75	1.08	-0.82	-0.96	0.27	0.67	6
九根齐-21 Jiugenqi-21	2.39	1.99	0.06	-2.35	-0.65	-0.21	0.66	7
九根齐-23 Jiugenqi-23	4.05	-1.86	-2.26	1.62	0.15	0.69	0.66	8
菠菜根-72 Bocaigen-72	-0.01	1.23	1.07	0.50	1.20	1.39	0.66	9
阴天早-38 Yintianhan-38	0.95	0.90	0.48	0.65	-0.10	1.50	0.65	10
菠菜根-50 Bocaigen-50	0.40	1.39	1.53	0.31	-0.02	-0.01	0.62	11
爬坡糙-10 Papocao-10	1.66	0.88	0.40	-0.01	-0.45	-0.05	0.61	12
菠菜根-23 Bocaigen-23	0.48	1.73	0.19	0.15	0.67	0.42	0.58	13
阴天早-16 Yintianhan-16	-0.06	0.98	1.15	0.47	0.13	0.24	0.41	14
爬坡糙-11 Papocao-11	2.49	-1.47	-0.04	-0.69	0.34	-0.58	0.32	15

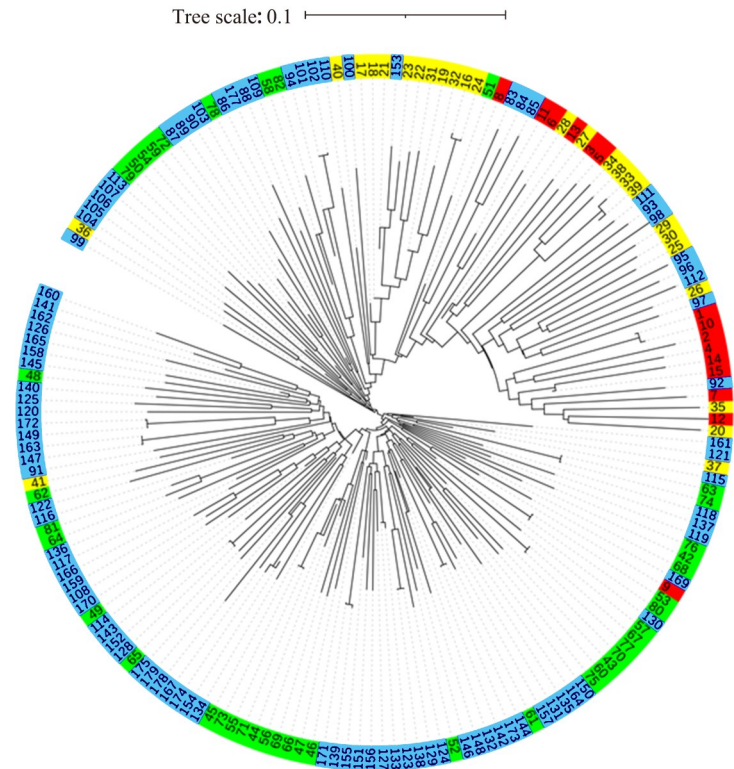
表 6 (续)

品种 Accessions	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F综合值 F synthesis value	排名 Ranking
阴天旱-8 Yintianhan-8	-0.41	0.58	0.51	1.94	-0.51	-0.14	0.22	16
菠菜根-53 Bocaigen-53	0.40	-0.08	-0.20	0.19	0.61	0.40	0.18	17
菠菜根-2 Bocaigen-2	1.09	-1.83	-0.83	0.98	1.98	0.09	0.17	18
菠菜根-95 Bocaigen-95	0.02	0.10	0.48	1.57	0.70	-2.49	0.17	19
菠菜根-13 Bocaigen-13	-1.48	0.93	0.35	1.15	1.30	0.41	0.11	20
菠菜根-65 Bocaigen-65	-0.39	-0.20	0.57	0.78	0.07	0.83	0.10	21
九根齐-14 Jiugenqi-14	1.74	0.25	-1.98	0.31	-2.04	-0.75	-0.02	22
菠菜根-19 Bocaigen-19	0.51	-1.30	-0.74	-0.37	0.91	1.52	-0.04	23
九根齐-26 Jiugenqi-26	-0.47	1.01	-0.67	-0.53	0.47	-0.31	-0.08	24
九根齐-16 Jiugenqi-16	-0.15	0.72	-1.25	0.35	-0.48	0.14	-0.10	25
九根齐-8 Jiugenqi-8	-0.21	0.57	-0.49	-0.45	-0.38	0.01	-0.11	26
菠菜根-75 Bocaigen-75	-1.63	0.46	1.32	0.42	-0.34	0.14	-0.14	27
菠菜根-42 Bocaigen-42	0.55	-2.77	0.04	0.47	0.65	0.97	-0.15	28
阴天旱-1 Yintianhan-1	-0.94	1.33	-0.83	-1.09	0.24	0.92	-0.17	29
阴天旱-10 Yintianhan-10	-1.46	-0.65	1.83	1.45	-1.00	0.05	-0.18	30
菠菜根-78 Bocaigen-78	-0.63	1.77	-0.06	-1.11	-1.70	-0.57	-0.20	31
爬坡糙-12 Papocao-12	-0.04	0.41	-1.04	-0.69	-0.17	-0.53	-0.23	32
九根齐-11 Jiugenqi-11	-1.23	0	-0.91	1.45	1.26	-0.86	-0.23	33
九根齐-7 Jiugenqi-7	-1.32	0.72	-0.48	-0.40	0.88	0.21	-0.24	34
阴天旱-5 Yintianhan-5	-0.37	0.13	-0.73	0.68	-1.35	0.20	-0.24	35
九根齐-10 Jiugenqi-10	1.04	-1.88	-2.31	0.01	0.01	1.76	-0.28	36
阴天旱-21 Yintianhan-21	-0.63	-1.07	0.25	0.19	-1.45	1.26	-0.37	37
阴天旱-37 Yintianhan-37	-2.42	0.05	0.09	0.12	2.14	-0.06	-0.39	38
爬坡糙-13 Papocao-13	0.65	-0.82	-1.35	-0.73	-1.01	-0.86	-0.42	39
阴天旱-32 Yintianhan-32	-1.79	-0.64	0.70	-0.54	1.56	-0.50	-0.42	40
爬坡糙-2 Papocao-2	0.65	-3.17	-0.05	0.78	-0.67	-1.54	-0.49	41
阴天旱-29 Yintianhan-29	-1.41	-0.83	0.62	-0.63	0.46	-0.58	-0.50	42
阴天旱-30 Yintianhan-30	-1.28	-0.33	-0.03	-1.27	-0.11	0.49	-0.53	43
爬坡糙-9 Papocao-9	-1.28	0.51	-1.03	-2.17	0.99	0	-0.54	44
菠菜根-80 Bocaigen-80	-1.15	0.44	-0.85	-1.11	0.06	-1.35	-0.57	45
菠菜根-41 Bocaigen-41	-1.41	-1.08	0.03	-0.38	-0.07	0.43	-0.59	46
阴天旱-4 Yintianhan-4	-1.06	-0.85	-1.19	-0.96	-0.35	-0.15	-0.77	47
阴天旱-3 Yintianhan-3	-1.65	-0.06	-0.34	0.48	-3.56	0.62	-0.79	48
菠菜根-6 Bocaigen-6	-3.17	-0.23	0.61	-0.15	0.18	0.21	-0.79	49
菠菜根-84 Bocaigen-84	-1.40	-2.22	-0.62	-0.17	-0.74	-0.97	-1.03	50
爬坡糙-3 Papocao-3	-3.69	-0.04	0.01	-0.34	-0.42	-0.55	-1.12	51

2.3 遗传多样性分析

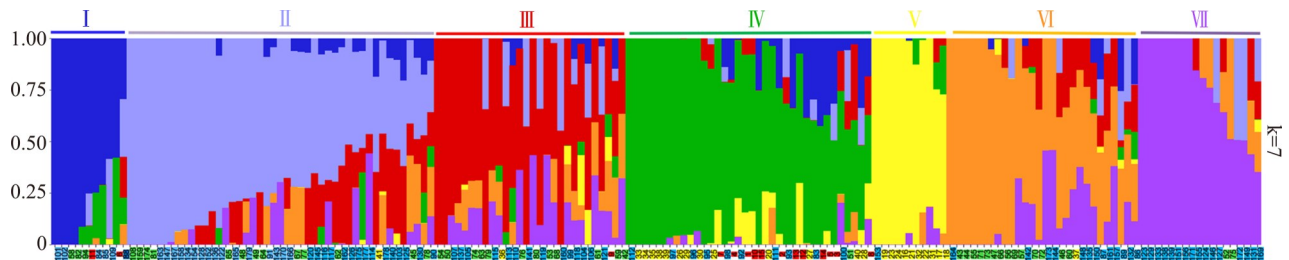
对 179 份名米品种进行重测序, 过滤获得了 4052768 个高质量 SNP 标记, 利用 SNP 标记对参试材料进行群体结构分析。进化树结果表明(图 7)多数的同名品种之间存在较近的亲缘关系, 部分非同名品种之间的亲缘关系较近, 这可能与地理来源相关。例如阴天早-11 与菠菜根-64 虽为非同名品种, 但是均来自山东省, 所以亲缘关系较近; 爬坡糙-12 与九根齐-20 则均来自山西省; 九根齐-11 与菠菜根

-15 则均来自内蒙古翁牛特旗; 这些结果表明, 地理来源相近的品种在长期的种植过程中存在着基因交流。群体结构分析结果表明(图 8), 参试材料被划分为 7 类, 爬坡糙同名品种主要分布在类群 IV 中, 九根齐同名品种主要分布在类群 IV 和 V 中, 阴天早同名品种主要分布于类群 III 和 VI 中, 菠菜根同名品种主要分布于类群 II、III、VI 和 VII 中, 少数非同名但地理来源相近的品种聚在一起, 进一步验证了进化树的结果。



红色:爬坡糙;黄色:九根齐;绿色:阴天早;蓝色:菠菜根;下同
Red: Papocao; Yellow: Jiugenqi; Green: Yintianhan; Bluet: Bocaigen; The same as below

图 7 基于 SNP 标记的进化树
Fig. 7 Evolutionary tree based on the SNP



纵坐标表示类群构成比例; I - VII 表示不同类群
The vertical coordinate indicates the proportion of group composition; I - VII indicate different groups

图 8 基于 SNP 标记的群体结构
Fig. 8 A population structure analysis based on the SNP

3 讨论

3.1 四大名米及其同名地方品种的农艺性状

我国谷子种质资源在形态性状方面具有丰富的多样性,地方品种的广泛变异为谷子育种提供了重要的遗传资源,对地方品种进行全面评价和利用是拓展谷子育种遗传基础的重要途径^[32]。

本研究对179份谷子名米品种及其同名地方品种的12项农艺性状进行调查,以期筛选出兼具产量潜力和优异食用品质的种质提供育种利用。结果显示四类名米群体的数量性状有明显差异,爬坡糙群体均表现为中等株高、大穗、大粒以及高产草量,阴天旱群体表现为高秆、穗小且细、籽粒小以及低产草量,九根齐表现为矮秆、长穗、中等穗粗、中等穗重以及中等产草量,菠菜根则表现为矮秆、小细穗、穗重和草重轻。在质量性状方面,爬坡糙与九根齐两类品种性状表现相似,苗色、鞘色和刺毛颜色均为绿色最多、穗颈姿态勾形最多、穗形多为鸡嘴形且穗码密度较稀疏,阴天旱群体的苗色、叶鞘色和刺毛颜色均为绿色最多、穗颈姿态为勾形最多、穗形多为鸡嘴形但穗码密度中等,而菠菜根群体鞘色为淡紫色最多、穗颈姿态勾形最多、穗形多为鸡嘴形且穗码密度中等。这一结果说明同名品种群体间具有相似的表型,为利用优良地方品种开展谷子高产和品质育种提供了良好的数据支撑。

从179个品种个体间统计来看,数量性状基本符合正态分布,在颜色性状方面,占比最大的均是绿色,除此之外在鞘色和刺毛颜色中,淡紫色材料也较多,推测可能是材料中菠菜根同名品种占比较多,菠菜根品种大多因为幼苗时期鞘色呈现淡紫色到深紫色而得名。与贾小平等^[33]对42个育成谷子品种的株高、穗长、穗粗等9个农艺性状的测定结果相比发现,其平均株高(66.36 cm)、穗长(12.74 cm)均小于本研究结果(174.27 cm和26.64 cm),平均穗粗(4.88 cm)高于本研究结果(2.76 cm),各项数量性状的变异系数(株高0.97%、穗长1.16%、穗粗0.86%)均小于本研究结果(株高12.88%、穗长22.86%、穗粗28%)。造成差异的原因一方面与材料自身特性有关,另一方面是因为贾小平等^[33]研究中选择的材料为育成品种,对产量相关性状进行了选育,普遍具有株高较矮、穗径较粗的性状,而本研究选择的材料均为地方品种,对于产量性状的选择要低于育成品种;而变异系数则说明本研究选用的材料表型变异更为丰富。解云等^[34]分析了30份谷

子种质资源的农艺性状,结果表明株高、穗长、穗粗和穗粒重的平均值分别为135.74 cm、26.87 cm、3.57 cm和36.67 g,变异系数分别为19.03%、1.965%、1.943%和2.071%,其株高低于本研究结果,穗粗略高于本研究结果,穗长与穗粒重与本研究结果相近;在变异系数方面,株高的变异系数高于本研究,穗长、穗粗和穗粒重的变异系数均低于本研究,推测本研究中各性状的变异系数较高的原因是所选用试验材料来自山西、山东、河北等省的农家种,遗传背景复杂,导致各性状差异较大,解云等^[34]试验材料引进于赤峰市农牧科学研究所和中国农业科学院,遗传背景较为单一。本研究测定的各项农艺性状的变异系数从大到小依次为穗粒重、草重、穗粗、穗重、穗长、株高,这一结果与赵芳等^[35]对224个谷子品种的测定结果以及任芹勇等^[36]对65份谷子品种的农艺性状测定结果相一致。

相关性分析表明数量性状如穗粗与穗粒重性状间极显著相关,而穗形与其他大部分性状相关性不显著,穗形与其他性状相关性小的原因推测为本研究中的材料穗形种类较少,且多为鸡嘴形、圆筒形等相近的穗形。李涛等^[37]对37份谷子材料的农艺性状进行相关性分析,结果显示穗长与总穗重、穗粒重呈正相关关系,穗粗与穗粒重有较强的正相关关系,与本研究结果相似;但株高与穗长、穗粗呈正相关关系,与本研究得到的株高与穗长和穗粗呈不显著的负相关关系的结果不同。

基于农艺性状的聚类分析将参试179份材料分为4个类群,同名品种聚类相对集中,爬坡糙同名品种大部分聚在类群II和类群IV中,九根齐同名品种大部分聚在类群IV中;阴天旱同名品种大部分聚在类群II和类群IV中,少量聚在类群III中;菠菜根同名品种大部分聚在类群II和类群IV中,类群II中的菠菜根同名品种草重轻、穗码紧密,而类群IV中的菠菜根同名品种草重较大、穗码密度较稀疏。由此可知,聚类结果与品种来源以及主要农艺性状相一致,同名品种的农艺性状相似性较高。

3.2 四大名米及其同名地方品种品质性状

脱壳后谷子称为小米,小米中含有蛋白质、脂肪、淀粉、维生素和矿物质等营养成分,以及丰富的叶酸、维生素E、类胡萝卜素及硒等微量元素^[38-41],作为药食同源作物对维持人体健康具有重要作用。本研究测定了四大名米原始品种及其同名品种的营养品质,结果发现直链淀粉含量、抗性淀粉含量、粗纤维含量、粗脂肪含量、胶稠度、淀粉消化特性在

不同品种间差异较大,而水分、总淀粉含量、粗蛋白含量和灰分含量在品种间差异较小。粮食中的水分含量与其生理、化学性质有密切联系,在一定温度范围内,能够保持粮食稳定状态的水分含量称为安全水分含量。参试材料水分含量均低于安全含水量标准,且变异程度小,维持了籽粒中稳定的生理生化活动,为其他成分测定提供了基础。李星等^[17]测定了5个省份共15份谷子的营养成分,结果显示水分含量为8.3%~10.39%,总淀粉含量70.90%~82.75%,粗蛋白含量10.09%~14.35%,粗脂肪含量5.2%~6.6%,与本研究的水分(8.13%~9.50%)、淀粉(68.84%~78.84%)和粗蛋白(9.61%~13.73%)含量相近,粗脂肪含量(3.02%~5.05%)偏低,推测为不同种植环境对材料中营养成分积累的影响,并且其研究内容显示相同地区谷子品种的营养品质也存在差异,与本研究结果相似。古世禄等^[42]测定了416个谷子品种的蛋白质含量介于10.00%~13.99%;杨延兵等^[43]测定全国270个谷子品种的蛋白质含量为11.18%±1.14%;冯链等^[44]测定了山西省83个谷子品种的蛋白质含量为12.62%±1.15%;本研究测定的51份谷子名米品种的蛋白质含量介于9.61%~13.73%,与前人研究结果基本一致。

胶稠度是衡量谷子适口性的重要指标,胶稠度与适口性呈正相关关系,本研究所选材料胶稠度差异很大,变化范围为33~160 mm,其中九根齐-25胶稠度高达160 mm。曲丽洁等^[15]测定了张杂谷系列谷子的6个品种的营养成分,结果发现水分含量约为12.6%,总淀粉含量65.7%~72.1%,粗蛋白含量10.4%~12.9%,粗脂肪含量2.5%~4.0%,胶稠度97.3~127.3 mm。与曲丽洁等^[15]结果相比,本研究中材料淀粉含量较高,粗蛋白含量、粗脂肪含量相近,而大多数材料胶稠度较低,推测淀粉含量较高原因是本试验使用的谷子材料收获后经过了一段时间的晾晒和贮藏,籽粒内水分下降,干物质积累上升;而多数材料胶稠度较低的原因是材料为农家品种,而“张杂谷”系列谷子为育成品种,在适口性和商品性上进行过较大程度的改良,但九根齐-25的胶稠度高于“张杂谷”系列谷子,显示这份资源可作为一份优异资源应用于谷子品质育种。

相关性分析发现淀粉与蛋白质含量的相关性最高,而脂肪含量、胶稠度、直链淀粉、抗性淀粉和消化特性与其他营养成分之间的相关性较弱。主成分分析结果表明前6个主成分解释了累积变异的88.407%,能够表示参测材料营养品质的大部分

信息。通过测定结果,筛选到了一些营养品质综合表现优异的材料,例如菠菜根-77、菠菜根-33、菠菜根-44、爬坡糙-15、九根齐-25和阴天早-13等,这些资源为谷子品质育种提供优异的可供育种利用材料。

3.3 四大名米及其同名地方品种亲缘关系分析

同名品种的存在是种质资源收集过程中的常见现象,而在保存于国家作物种质库中的谷子资源中,存在同名现象的谷子约占总资源的60%。亲缘关系分析是资源鉴定、育种改良和创新的重要手段。在本研究中,基于SNP的亲缘关系分析结果表明,参试材料之间亲缘关系较为多样化,进化树分析可以将四大名米同名品种明显区分,说明各同名品种之间的遗传一致性较高;部分不同名但地理来源相近的品种间存在较近的亲缘关系,说明相近地理来源的品种经过长期种植过程中存在部分的基因交流。群体结构分析将四大名米同名品种划分为7个类群,各同名品种大多数聚在一起,少数不同名品种聚在一起,结果与进化树分析结果相一致。此外,个别材料的亲缘关系与地理来源存在略微差异,这与前人研究结果相一致^[45-46],进一步表明参试材料间存在遗传变异,为种质资源的区分鉴定和保护提供了参考。

4 结论

谷子四大名米品种间农艺性状具有显著差异,爬坡糙系列品种具有穗粗、穗粒重大等优异性状,可作为谷子高产育种的亲本材料;聚类分析显示同名品种基本聚为一类,其农艺性状相似度较大。四大名米品种间营养品质差异较小,名米品种的原始品种较其他同名品种相比品质性状更突出。进化树和群体结构结果表明参试材料存在丰富的遗传变异。根据营养品质的综合得分对品质进行排名,筛选出一批在营养成分上表现优良的谷子品种,例如九根齐-25,可为谷子品质育种提供可利用材料。

参考文献

- [1] 李荣德,程汝宏,陈应志,孙海艳,史梦雅.《种子法》实施以来我国谷子品种管理的成效与建议.中国种业,2019(3): 26-29
- Li R D, Cheng R H, Chen Y Z, Sun H Y, Shi M Y. The achievements and suggestions of millet variety management in China since the implementation of《Seed Law》. China Seed Industry, 2019(3): 26-29

- [2] 李顺国, 刘斐, 刘猛, 程汝宏, 夏恩君, 刁现民. 中国谷子产业和种业发展现状与未来展望. 中国农业科学, 2021, 54(3): 459-470
Li S G, Liu F, Liu M, Cheng R H, Xia E J, Diao X M. Current status and future prospective of foxtail millet production and seed industry in China. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(3): 459-470
- [3] 赵利蓉, 马珂, 张丽光, 汤沙, 原向阳, 刁现民. 不同生态区谷子品种农艺性状和品质分析. 作物杂志, 2022(2): 44-53
Zhao L R, Ma K, Zhang L G, Tang S, Yuan X Y, Diao X M. Analysis of agronomic traits and quality of foxtail millet varieties in different ecological regions. Crops, 2022(2): 44-53
- [4] 孙宇燕. 春谷子农艺和品质性状与 Waxy 基因多态性分析. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014
Sun Y Y. Analysis on agronomic and qualities traits associated with polymorphism of Waxy gene in spring foxtail millets. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014
- [5] 孙艺丹. 不同谷子品种主要农艺性状、营养品质与食味品质的关系. 太谷: 山西农业大学, 2016
Sun Y D. Millet varieties in different types of main agronomic traits nutritional quality and their relation with eating quality. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2016
- [6] 刁现民. 育种创新造就谷子种业新发展. 中国种业, 2022(4): 4-7
Diao X M. Breeding innovation creates new development of millet seed industry. China Seed Industry, 2022(4): 4-7
- [7] Hithamani G, Srinivasan K. Effect of domestic processing on the polyphenol content and bioaccessibility in finger millet (*Eleusine coracana*) and pearl millet (*Pennisetum glaucum*). Food Chemistry, 2014, 164: 55-62
- [8] Kharat S, Medina-Meza I G, Kowalski R J, Hosamani A, C T R, Hiregoudar S, Ganjyal G M. Extrusion processing characteristics of whole grain flours of select major millets (foxtail, finger, and pearl). Food and Bioproducts Processing, 2019, 114: 60-71
- [9] 王力立. 小米中主要营养成分的测定及小米茶的制备. 太原: 山西大学, 2011
Wang L L. Detection of principal nutrition constituents in foxtail millet and the preparation of foxtail millet tea. Taiyuan: Shanxi University, 2011
- [10] 杜文娟, 林娟, 许辉, 姜龙波, 李萍, 张喜文. 山西谷子全粉淀粉指标间相关性及其消化特性研究. 粮油加工, 2014(7): 60-65
Du W J, Lin J, Xu H, Jiang L B, Li P, Zhang X W. Correlational among indexes and digestibility of whole-grain millet starch obtained from Shanxi province. Cereals and Oils Processing, 2014(7): 60-65
- [11] 范冬雪, 李静洁, 杨金芹, 沈群. 热处理对小米蛋白体外消化率的影响. 中国食品学报, 2016, 16(2): 56-61
Fan D X, Li J J, Yang J Q, Shen Q. Effects of heat treatments on the *in vitro* digestibility of millet protein. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(2): 56-61
- [12] 杨春, 栗红瑜, 邓晓燕, 田志芳, 王海平. 小米蛋白质的氨基酸组成及品质评价分析. 农产品加工(学刊), 2008(12): 8-10
Yang C, Li H Y, Deng X Y, Tian Z F, Wang H P. The amino acid composition of protein in millet and quality evaluation. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2008(12): 8-10
- [13] Zhang A, Liu X, Wang G, Wang H, Liu J, Zhao W, Zhang Y. Crude fat content and fatty acid profile and their correlations in foxtail millet. Cereal Chemistry, 2015, 92: 455-459
- [14] 刘玉兰, 黄会娜, 范文鹏, 王旭朝. 小米糠(胚)制油及油脂品质研究. 中国粮油学报, 2019, 34(5): 44-49, 55
Liu Y L, Huang H N, Fan W P, Wang X C. Millet bran (embryo) oil and its oil quality. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(5): 44-49, 55
- [15] 曲丽洁, 刘镇, 陈一, 孙丰梅. “张杂谷”系列谷子品种营养成分的测定与评价. 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, Sun F M. Determination and evaluation of nutritional components of “Zhangzagu” millet varieties. Journal of Hebei North University: Natural Science Edition, 2021, 37(1): 35-42
- [16] 穆秋霞, 崔素萍, 张卓敏, 张洪微, 祝令文, 钱丽丽, 左豫虎. 黑龙江主栽小米品种品质特性及其相关性分析. 中国粮油学报, 2019, 34(7): 26-32, 67
Mu Q X, Cui S P, Zhang Z M, Zhang H W, Zhu L W, Qian L L, Zuo Y H. Analysis correlation and quality properties on main cultivar millets in Heilongjiang province. 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. 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. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2017, 17(7): 248-254
- [18] 庞冰. 基于 SSR 分子标记技术的谷子种质资源遗传多样性分析. 太原: 山西大学, 2019
Pang B. Genetic diversity analysis of millet germplasm based on SSR molecular markers. Taiyuan: Shanxi University, 2019
- [19] 王海岗. 山西谷子种质资源遗传多样性与主要农艺性状的 QTL 关联分析. 晋中: 山西农业大学, 2019
Wang H G. Genetic diversity and association analysis of major agronomic traits in foxtail millet [*Setaria italica* (L.) P. Beauv.] of Shanxi province. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2019
- [20] 王春芳. 利用微卫星标记分析中国谷子地方品种的群体结构与遗传多样性. 石家庄: 河北师范大学, 2011
Wang C F. Population structure and genetic diversity of foxtail millet landraces in China assessed by microsatellites. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2011
- [21] 王振山. 基于全基因组关联分析鉴定谷子穗分枝数 QTL 位

- 点及候选基因分析. 洛阳:河南科技大学, 2022
- Wang Z S. Identification of QTL loci for branch number per panicle based on genome-wide association and analyzing the candidate genes in foxtail millet. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2022
- [22] 高豪. 谷子三个农艺性状及叶酸含量全基因组关联分析. 晋中:山西农业大学, 2023
- Gao H. Genome-wide association analysis of three agronomic traits and folic acid content in foxtail millet. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2023
- [23] 赵晓燕, 张彬, 李倩, 沙淑莉, 李丹丹, 周冠霖, 肖霄, 于宏伟. 优质小米结构研究及鉴别. 特产研究, 2021, 43(1): 33-38, 48
- Zhao X Y, Zhang B, Li Q, Sha S L, Li D D, Zhou G L, Xiao X, Yu H W. Structure study and identification of quality millet. Special Wild Economic Animal and Plant Research, 2021, 43(1): 33-38, 48
- [24] 王蓉, 陈小红, 王倩, 刘少雄, 陆平, 刁现民, 刘敏轩, 王瑞云. 中国谷子名米品种遗传多样性与亲缘关系研究. 作物学报, 2022, 48(8): 1914-1925
- Wang R, Chen X H, Wang Q, Liu S X, Lu P, Diao X M, Liu M X, Wang R Y. Genetic diversity and genetic relationship of Chinese traditional foxtail millet accessions. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(8): 1914-1925
- [25] 中华人民共和国卫生部. GB5009.3-2016 食品安全国家标准 食品中水分的测定. 北京: 中国标准出版社, 2017
- Ministry of Health of the People's Republic of China. GB5009.3-2016 National Food Safety Standard-Determination of moisture content in food. Beijing: Standards Press of China, 2017
- [26] 中华人民共和国卫生部. GB5009.5-2016 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定. 北京: 中国标准出版社, 2017
- Ministry of Health of the People's Republic of China. GB5009.5-2016 National Food Safety Standard-Determination of protein in food. Beijing: Standards Press of China, 2017
- [27] 中华人民共和国卫生部. GB5009.6-2016 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定. 北京: 中国标准出版社, 2017
- Ministry of Health of the People's Republic of China. GB5009.6-2016 National Food Safety Standard-Determination of fat in food. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [28] 中华人民共和国卫生部. GB5009.4-2016 食品安全国家标准 食品中灰分的测定. 北京: 中国标准出版社, 2017
- Ministry of Health of the People's Republic of China. GB5009.4-2016 National Food Safety Standard-Determination of ash in food. Beijing: Standards Press of China, 2017
- [29] 中华人民共和国卫生部. GB/T5009.10-2003 植物类食品中粗纤维的测定. 北京: 中国标准出版社, 2004
- Ministry of Health of the People's Republic of China. GB/T5009.10-2003 Determination of fiber in plant foods. Beijing: Standards Press of China, 2004
- [30] 中国水稻研究所. NY83-2017 米质测定方法. 北京: 中国农业出版社, 2017
- China National Rice Research Institute. NY83-2017 Determination of rice quality. Beijing: China Agriculture Press, 2017
- [31] 黑龙江农业科学院. NY/T 55-1987 水稻、玉米、谷子籽粒直链淀粉测定法. 北京: 中国农业出版社, 2002
- Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences. NY/T 55-1987 Determination of amylose in grains of rice maize and millet. Beijing: China Agriculture Press, 2002
- [32] 田伯红. 谷子地方品种和育成品种的遗传多样性研究. 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. Journal of Plant Genetic Resources, 2010, 11(2): 224-228
- [33] 贾小平, 陆平, 董志平, 董普辉, 郝飞燕. 42个谷子品种的聚类分析. 种子, 2016, 35(1): 64-67
- Jia X P, Lu P, Dong Z P, Dong P H, Yu F Y. Cluster analysis of 42 millet varieties. Seed, 2016, 35(1): 64-67
- [34] 解云, 李强, 郭世华. 30份谷子品种农艺性状的遗传多样性及相关性. 分子植物育种, 2020, 18(9): 3079-3085
- Xie Y, Li Q, Guo S H. Genetic diversity and correlation of agronomic traits in 30 foxtail millet cultivars. Molecular Plant Breeding, 2020, 18(9): 3079-3085
- [35] 赵芳, 魏玮, 张晓磊, 宋国亮, 王晓明, 赵治海, 赵春慧. 224个谷子品种农艺性状聚类和相关性分析. 种子, 2022, 41(1): 74-83
- Zhao F, Wei W, Zhang X L, Song G L, Wang X M, Zhao Z H, Zhao C H. Clustering and correlation analysis of agronomic traits of 224 millet varieties. Seed, 2022, 41(1): 74-83
- [36] 任芹勇, 樊巧利, 李涛, 郭世华. 65份谷子品种农艺性状聚类和相关性. 分子植物育种, 2017, 15(12): 5178-5188
- Ren Q Y, Fan Q L, Li T, Guo S H. Clustering and correlation of agronomic traits in 65 foxtail millets. Molecular Plant Breeding, 2017, 15(12): 5178-5188
- [37] 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. 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. Anhui Agricultural Science Bulletin. 2021, 27(11): 96-100
- [38] 马贵芳, 满夏夏, 张益娟, 高豪, 孙朝霞, 李红英, 韩渊怀, 侯思宇. 谷子穗发育期转录组与叶酸代谢谱联合分析. 作物学报, 2021, 47(5): 826-846
- Ma G F, Man X X, Zhang Y J, Gao H, Sun Z X, Li H Y, Han Y H, Hou S Y. Integrated analysis between folate metabolites profiles and transcriptome of panicle in foxtail millet. Acta Agronomica Sinica, 2021, 47(5): 826-846
- [39] 李暮男, 兰凤英. 小米的营养成分及保健功能研究进展. 河北北方学院学报:自然科学版, 2017, 33(7): 56-60
- Li M N, Lan F Y. Research progress on nutritional components and health function of millet. Journal of Hebei North University: Natural Science Edition, 2017, 33(7): 56-60
- [40] 刘三才, 朱志华, 李为喜, 刘方, 李燕, 黄蓉. 谷子品种资源微量元素硒和蛋白质含量的测定与评价. 中国农业科学,

- 2009, 42(11): 3812-3818
- Liu S C, Zhu Z H, Li W X, Liu F, Li Y, Huang R. Evaluation of selenium and protein content of foxtail millet landraces originated from different ecological regions of China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(11): 3812-3818
- [41] 韩昀桦. 52 份谷子种质资源的富硒能力评价. 太谷: 山西农业大学, 2019
- Han J Y. Evaluation of selenium-enriching ability of 52 millet germplasm resources. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2019
- [42] 古世禄, 刘厦. 中国谷子蛋白质氨基酸组成的研究. 华北农学报, 1989(1): 8-15
- Gu S L, Liu X. Study on amino acid composition of Chinese foxtail millet protein. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 1989 (1): 8-15
- [43] 杨延兵, 秦岭, 陈二影, 王海莲, 张华文, 刘宾, 管延安. 谷子籽粒蛋白质、脂肪、千粒重的遗传变异. 植物遗传资源学报, 2017, 18(5): 819-829
- Yang Y B, Qin L, Chen E Y, Wang H L, Zhang H W, Liu B, Guan Y A. Genetic variations of protein content, fat content and TGW in foxtail millet (*Setaria italica* (L.) Beauv.) in China. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2017, 18 (5): 819-829
- [44] 冯链, 田翔, 乔治军, 王海岗. 谷子农艺性状与蛋白质含量相关性分析. 河南农业科学, 2022, 51(6): 43-53
- Feng L, Tian X, Qiao Z J, Wang H G. Correlation analysis between protein content and agronomic traits of foxtail millet. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2022, 51(6): 43-53
- [45] 丁银灯, 胡相伟, 聂石辉, 王仙, 冯国郡, 耿洪伟, 郭丁. 谷子种质资源表型及 SSR 遗传多样性分析. 植物遗传资源学报, 2018, 19(6): 1210-1221
- Ding Y D, Hu X W, Nie S H, Wang X, Feng G J, Geng H W, Guo D. Analysis of phenotypic traits and SSR genetic diversity of foxtail millet germplasms. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2018, 19(6): 1210-1221
- [46] 杨慧卿, 王军, 王智兰, 杜晓芬, 郭二虎, 王玉文, 袁峰, 田岗, 刘鑫, 王秋兰, 李会霞, 张林义, 彭书忠. 分蘖型谷子资源的表型和遗传多样性分析. 植物遗传资源学报, 2017, 18(4): 685-695
- Yang H Q, Wang J, Wang Z L, Du X F, Guo E H, Wang Y W, Yuan F, Tian G, Liu X, Wang Q L, Li H X, Zhang L Y, Peng S Z. Analysis of phenotype and genetic diversity of foxtail millet germplasm with tillering. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2017, 18(4): 685-695