

引用格式: 温蕊, 赵雅杰, 贾祎明, 等. 基于 SSR 标记的 197 份谷子遗传多样性分析[J]. 西北植物学报, 2025, 45(2): 0000-0000. [WEN R, ZHAO Y J, JIA Y M, *et al.* Genetic diversity analysis of 197 Foxtail Millet accessions based on SSR markers[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2025, 45(2): 0000-0000.] DOI:10.7606/j.issn.1000-4025.20240522

基于 SSR 标记的 197 份谷子遗传多样性分析

温蕊, 赵雅杰, 贾祎明, 金晓蕾, 张永虎

(内蒙古自治区农牧业科学院, 呼和浩特 010031)

摘要 【目的】通过分析 197 份谷子种质的遗传多样性, 拓展谷子种质创新利用途径, 加快育种进程。【方法】利用筛选出的 12 对引物对 197 份谷子种质进行分子标记试验, 分析谷子种质资源遗传多样性、群体结构、遗传分化关系以及亲缘关系。【结果】谷子种质中共检测到 173 个等位基因 (N_a), 平均每对引物检测出 14.417 个; Shannon's 指数 (I) 平均为 1.621, 其中 7 对引物达到 1.5 以上; PIC 平均值为 0.628, 8 对引物具有高度多态性 ($PIC > 0.5$)。分子方差分析 (AMOVA) 结果表明 197 份谷子种质的群体间变异为 12.0%, 群体内变异达 88.0%。群体间遗传分化指数为 0.034~0.756, 均值为 0.141。PCoA 分析将 197 份谷子种质分为 4 大类。第一主成分和第二主成分分别可以解释总变量的 23.08% 和 20.33%。【结论】选用的 12 对引物能很好地反映谷子种质的遗传多样性 ($PIC > 0.5$); 197 份谷子种质群体间存在中等程度的遗传分化 ($F_{st} = 0.141$) 和广泛的基因交流 ($N_m = 3.462$)。

关键词 谷子; SSR 分子标记; 遗传多样性; 遗传分化; 基因流

中图分类号 S515 文献标志码 A

Genetic diversity analysis of 197 Foxtail Millet accessions based on SSR markers

WEN Rui, ZHAO Yajie, JIA Yiming, JIN Xiaolei, ZHANG Yonghu

(Inner Mongolia Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010031, China)

Abstract [Objective] This study aims to analyze the genetic diversity of 197 foxtail millet germplasm resources, in order to expand the utilization of foxtail millet germplasm resources and to accelerate the breeding process. [Methods] 12 pairs of primers were used to test the molecular markers of 197 millet germplasm resources. The genetic diversity, population structure, genetic differentiation, and genetic relationship of millet germplasm resources were analyzed. [Results] A total of 173 alleles (N_a) were detected by 12 SSR primers in 197 millet germplasm resources, with an average of 14.417 alleles per primer. The average Shannon's index (I) was 1.621, of which 7 pairs of primers reached more than 1.5. The average PIC was 0.628, and 8 pairs of primers were highly polymorphic ($PIC > 0.5$). Molecular variance analysis (AMOVA) showed that the inter-population variation of 197 foxtail millet germplasm resources was 12.0%, while the intra-population variation was 88.0%. The genetic differentiation index among populations was between 0.034 and 0.756, with an average of 0.141. PCoA analysis divided the 197 foxtail millet germplasm resources into four categories.

收稿日期: 2024-09-24; 修改稿收到日期: 2024-11-13

基金项目: 财政部和农业农村部——国家现代农业产业技术体系项目 (CARS-06-14.5-B11); 内蒙古科技计划项目 (2021GG0375)

作者简介: 温蕊 (1992—), 女, 助理研究员, 主要从事谷子育种与栽培研究。E-mail: 15848120452@163.com

通信作者: 张永虎, 博士, 副研究员, 主要从事谷子育种与栽培研究。E-mail: zhangyonghu0815@126.com

The first principal component and the second principal component can explain 23.08% and 20.33% of the total variables, respectively. [Conclusion] The selected 12 pairs of primers well reflect the genetic diversity of millet germplasms ($PIC > 0.5$). There are moderate genetic differentiation ($F_{st}=0.141$) and extensive gene flow ($N_m=3.462$) among the 197 millet populations.

Key words foxtail millet; simple-sequence-repeat (SSR) markers; genetic diversity; genetic differentiation; gene flow

谷子是起源于中国的传统特色作物,其驯化栽培历史可追溯到 16 000 年前,属于人类最早驯化栽培的禾谷类作物之一^[1]。谷子抗旱、耐瘠薄、稳产且营养丰富^[2],一直是中国北方的主要粮食作物^[3-4],更是中国旱作生态农业的重要支柱作物^[5]。随着中国种业发展,谷子种质资源收集鉴定评价、品种育繁推也成为谷子产业发展的重点研究方向之一。中国拥有 28 000 余份谷子种质资源^[6],居世界第一位,解析其遗传多样性、遗传分化和遗传关系是种质资源遗传改良、杂交育种以及创新利用的关键^[7-9]。近年来,由于国家提出的一系列“种业振兴行动方案”,种质资源遗传多样性的研究成为遗传学家备受关注的方向。因此,如何高效衡量遗传变异也是该研究领域的热点问题^[10]。目前,研究遗传多样性的人有很多,研究谷子遗传多样性的也多见报道^[11-14]。采用的标记技术也从形态学标记等发展为 SSR (simple sequence repeat)、AFLP (amplified fragment length polymorphism) 和 SNP (single nucleotide polymorphism) 等分子标记。SSR 分子标记技术是共显性标记,可以鉴别出杂合子和纯合子,试验操作简单、重复性好、结果可靠^[15]。秦岭等^[16]通过对 20 世纪 80 年代以来代表华北夏谷区的 20 个主栽谷子品种进行 SSR 标记多态性分析,结果表明华北夏谷区谷子品种遗传多样性较低,遗传基础狭窄。丁银灯等^[17]对国内外 124 份谷子种质资源的表型鉴定以及 SSR 遗传多样性分析表明,表型性状及 SSR 聚类分析均存在明显的地理聚类特征,结合表型性状鉴定出 12 份适宜新疆种植的谷子优异种质。杨慧卿等^[18]利用谷子 SNP 和 SSR 共 77 个标记对 68 份谷子分蘖种质进行了遗传多样性分析,结果揭示 68 份谷子分蘖种质遗传多样性较好,为分蘖基因或数量性状位点 (quantitative trait loci, QTL) 挖掘奠定基础。Kim 等^[19]利用 28 对引物对 37 份来自中国、韩国和巴基斯坦的谷子资源进行遗传多样性分析,其结果证明了谷子起源于中国这一结论。Pandey

等^[20]通过全基因组测序设计了 21 294 个 SSR 引物,在 8 份狗尾草属材料中成功验证了约 159 个标记,多态性潜力约为 67%,并对 15 573 个谷子微卫星标记与高粱(16.9%)、玉米(14.5%)和水稻(6.4%)的定位数据进行了计算机比对,结果表明谷子与目标种染色体之间存在同源关系,这为谷子等禾谷类作物在种质鉴定、系统发育、遗传连锁图谱构建、基因或数量性状位点发现、比较定位等方面提供了理论依据。文章通过对 197 份来自全国各地的谷子地方农家种、育成品种(系)进行 SSR 分子标记多样性分析,从多态性分析、分子方差分析、群体遗传分化及基因流、群体遗传关系等方面系统研究了 197 份谷子种质之间的遗传多样性和遗传分化,为今后品种改良和选育、亲本选择、杂交组配等提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试材料为 197 份来自全国各地的地方农家种、育成品种(系)。国内品种 196 份,其中北京市 1 个、甘肃省 4 个、广东省 1 个、贵州省 1 个、海南省 1 个、河北省 29 个、河南省 2 个、黑龙江省 15 个、湖南省 1 个、吉林省 5 个、辽宁省 7 个、内蒙古自治区 83 个、山东省 7 个、山西省 31 个以及陕西省 3 个品种(系);国外品种 1 份,为日本的 1 个品种,详见表 1。

1.2 DNA 提取

将参试材料种子在室内进行培养,四叶一心时剪取适量叶片放入 1.5 mL 离心管中,−80 °C 超低温冰箱保存备用。采用试剂盒(天根生化有限公司)提取基因组 DNA,用 0.8% 琼脂糖凝胶电泳,紫外分光光度计检测 DNA 纯度和浓度,并配制 100 μL 使用液,4 °C 保存。

1.3 SSR 引物

研究所用的 12 对多态性高、扩增效果好、条带差异明显的 SSR 引物序列是从 100 对引物中筛选出来的,由擎科生物科技有限公司合成(表 2)。

表 1 参试材料名称及来源信息

Table 1 Name and origin of the foxtail millets in this study

编号 ID Code ID	种质名称 Germplasm name	来源地 Source	编号 ID Code ID	种质名称 Germplasm name	来源地 Source
millet-1	矮 88 Ai88	河南郑州 Zhengzhou, Henan	millet-102	毛瓜子谷子 Maozhuaziguzi	山东临沂 Linyi, Shandong
millet-2	蒙草谷 1 号 Mengcaogu 1	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	millet-103	黄那糯 Huangnauo	湖南湘西 Xiangxi, Hu'nan
millet-3	陇谷 13 Longgu 13	甘肃兰州 Lanzhou, Gansu	millet-104	一窝蚕谷子 Yiwocanguzi	山东东营 Dongying, Shandong
millet-4	大同 29 Datong 29	山西大同 Datong, Shanxi	millet-105	狗尾粟 Gouweisu	广东惠州 Huizhou, Guangdong
millet-5	峰红 4 号 Fenghong 4	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	millet-106	谷子 Guzi	内蒙古兴安盟 Xing'an League, Inner Mongolia
millet-6	黄金苗 Huangjinmiao	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	millet-107	黄壳狗尾粟(糯粟) Huangkegouwuisu (nuosu)	海南海口 Haikou, Hainan
millet-7	公矮 2 号 Gongai 2	吉林长春 Changchun, Jilin	millet-108	黔南农家种 Qiannannongjiazhong	贵州 Guizhou
millet-8	衡谷 20 Henggu 20	河北衡水 Hengshui, Hebei	millet-109	昭和糯 Zhaobenuo	日本 Japan
millet-9	豫谷 18 Yugu 18	河南安阳 Anyang, Henan	millet-110	谷子 Guzi	内蒙古兴安盟 Xing'an League, Inner Mongolia
millet-10	龙谷 38 Longgu 38	黑龙江哈尔滨 Harbin, Heilongjiang	millet-111	本地谷子 Bendiguzi	内蒙古通辽 Tongliao, Inner Mongolia
millet-11	山西红谷 Shanxihonggu	山西 Shanxi	millet-112	大乌谷 Dawugu	河北张家口 Zhangjiakou, Hebei
millet-12	长农 35 Changnong35	山西长治 Changzhi, Shanxi	millet-113	小乌谷子 Xiaowuguzi	河北张家口 Zhangjiakou, Hebei
millet-13	晋谷 21 Jingu 21	山西汾阳 Fenyang, Shanxi	millet-114	吨谷 Dungu	山西太原 Taiyuan, Shanxi
millet-14	金苗 K1 Jinmiao K1	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	millet-115	济谷 20 Jigu 20	山东济南 Jinan, Shandong
millet-15	燕谷 18 Yangu 18	辽宁朝阳 Chaoyang, Liaoning	millet-116	赤谷 6 号 Chigu 6	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia
millet-16	济谷 22 Jigu 22	山东济南 Jinan, Shandong	millet-117	毛毛谷 Maomaogu	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia
millet-17	九根齐 Jiugenqi	内蒙古鄂尔多斯 Ordos, Inner Mongolia	millet-118	朝谷 14 Chaogu 14	辽宁朝阳 Chaoyang, Liaoning
millet-18	大白谷 Dabaigu	内蒙古乌兰察布 Ulanqab, Inner Mongolia	millet-119	农 2 Nong 2	内蒙古鄂尔多斯 Ordos, Inner Mongolia
millet-19	赤草 6 号 Chicao 6	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	millet-120	赤谷 4 号 Chigu 4	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia
millet-20	朝谷 58 Chaogu 58	辽宁朝阳 Chaoyang, Liaoning	millet-121	A2	河北张家口 Zhangjiakou, Hebei
millet-21	红钙谷 Honggaigu	内蒙古乌兰察布 Ulanqab, Inner Mongolia	millet-122	黄金谷 Huangjingu	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia
millet-22	冀谷 45 Jigu 45	河北石家庄 Shijiazhuang, Hebei	millet-123	济白米 1 号 Jibaimi 1	山东济南 Jinan, Shandong
millet-23	九谷 23 Jiugu 23	吉林吉林 Jilin, Jilin	millet-124	赤谷 7 号 Chigu 7	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia
millet-24	中谷 2 号 Zhonggu 2	北京市 Beijing	millet-125	赤 121-31 Chi 121-31	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia
millet-25	公谷 88 Gonggu 88	吉林长春 Changchun, Jilin	millet-126	大金苗 Dejinmiao	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia
millet-26	嫩选 18 Nenuan 18	黑龙江齐齐哈尔 Qiqihar, Heilongjiang	millet-127	峰优谷 18 Fengyougu 18	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia

续表 1 Continued table 1

编号 ID Code ID	种质名称 Germplasm name	来源地 Source	编号 ID Code ID	种质名称 Germplasm name	来源地 Source
millet-27	8311	河北张家口 Zhangjiakou, Hebei	millet-128	农 1 Nong 1	内蒙古阿拉善盟 Alxa League, Inner Mongolia
millet-28	齐新谷 1 号 Qixingu 1	黑龙江齐齐哈尔 Qiqihar, Heilongjiang	millet-129	赤谷 27 Chigu 27	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia
millet-29	沁州黄 Qinzhouhuang	内蒙古呼和浩特 Hohhot, Inner Mongolia	millet-130	赤 231-9 Chi 231-9	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia
millet-30	汾选 3 号 Fenxuan 3	山西汾阳 Fenyang, Shanxi	millet-131	朝谷 13 Chaogu 13	辽宁朝阳 Chaoyang, Liaoning
millet-31	蒙黑谷 1 号 Mengheigu 1	内蒙古呼和浩特 Hohhot, Inner Mongolia	millet-132	陇谷 4 号 Longgu 4	甘肃兰州 Lanzhou, Gansu
millet-32	蒙谷 4 号 Menggu 4	内蒙古呼和浩特 Hohhot, Inner Mongolia	millet-133	红粘谷 Hongniangu	黑龙江黑河 Heihe, Heilongjiang
millet-33	L4033	内蒙古呼和浩特 Hohhot, Inner Mongolia	millet-134	大小穗红谷 Daxiaosuhonggu	山东济南 Jinan, Shandong
millet-34	L4035	内蒙古呼和浩特 Hohhot, Inner Mongolia	millet-135	鸟谷 Niaogu	山东济南 Jinan, Shandong
millet-35	蒙谷 5 号 Menggu 5	内蒙古呼和浩特 Hohhot, Inner Mongolia	millet-136	坝 91-0628 Ba 91-0628	河北张家口 Zhangjiakou, Hebei
millet-36	蒙红谷 2 号 Menghonggu 2	内蒙古呼和浩特 Hohhot, Inner Mongolia	millet-137	龙选 1 号 Longxuan 1	黑龙江黑河 Heihe, Heilongjiang
millet-37	L5002	内蒙古呼和浩特 Hohhot, Inner Mongolia	millet-138	嫩选 5 号 Nenxuan 5	黑龙江齐齐哈尔 Qiqihar, Heilongjiang
millet-38	L5003	内蒙古呼和浩特 Hohhot, Inner Mongolia	millet-139	黄粘谷 Huangniangu	黑龙江黑河 Heihe, Heilongjiang
millet-39	L5013	内蒙古呼和浩特 Hohhot, Inner Mongolia	millet-140	红苗粘谷 Hongmiaoniangu	辽宁抚顺 Fushun, Liaoning
millet-40	蒙红谷 3 号 Menghonggu 3	内蒙古呼和浩特 Hohhot, Inner Mongolia	millet-141	黄粘谷 Huangniangu	黑龙江黑河 Heihe, Heilongjiang
millet-41	3-23	内蒙古呼和浩特 Hohhot, Inner Mongolia	millet-142	昭衣 4 号 Zhaonong 4	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia
millet-42	L5021	内蒙古呼和浩特 Hohhot, Inner Mongolia	millet-143	延谷 2 号 Yangu 2	陕西延安 Yan'an, Shaanxi
millet-43	L5022	内蒙古呼和浩特 Hohhot, Inner Mongolia	millet-144	晋谷 6 号 Jingu 6	山西吕梁 Lüliang, Shanxi
millet-44	蒙谷 6 号 Menggu 6	内蒙古呼和浩特 Hohhot, Inner Mongolia	millet-145	张衣 15 号 Zhangnong 15	河北张家口 Zhangjiakou, Hebei
millet-45	蒙谷 7 号 Menggu 7	内蒙古呼和浩特 Hohhot, Inner Mongolia	millet-146	薄地高 Bodigao	河北遵化 Zunhua, Hebei
millet-46	3-14	内蒙古呼和浩特 Hohhot, Inner Mongolia	millet-147	四留钱 Siliuqian	河北唐山 Tangshan, Hebei
millet-47	蒙谷 1 号 Menggu 1	内蒙古呼和浩特 Hohhot, Inner Mongolia	millet-148	黄毛谷 Huangmaogu	北京市 Beijing
millet-48	6-5 叶绿髀紫 6-5 Yelutiaozhi	内蒙古呼和浩特 Hohhot, Inner Mongolia	millet-149	钻头白 Zuantoubai	北京市 Beijing
millet-49	公矮 2 号 × 安 16h-8283 Gongai 2 × An 16h-8283	内蒙古呼和浩特 Hohhot, Inner Mongolia	millet-150	黄苗大滑皮 Huangmiaodahuapi	北京市 Beijing
millet-51	蒙谷 2 号 Menggu 2	内蒙古呼和浩特 Hohhot, Inner Mongolia	millet-151	冀谷 168 Jigu 168	河北石家庄 Shijiazhuang, Hebei
millet-52	蒙红谷 1 号 Menghonggu 1	内蒙古呼和浩特 Hohhot, Inner Mongolia	millet-152	冀谷 46 Jigu 46	河北石家庄 Shijiazhuang, Hebei
millet-53	蒙谷 3 号 Menggu 3	内蒙古呼和浩特 Hohhot, Inner Mongolia	millet-153	嫩选 15 Nenxuan 15	黑龙江齐齐哈尔 Qiqihar, Heilongjiang
millet-54	蒙白米 1 号 Mengbaimi 1	内蒙古呼和浩特 Hohhot, Inner Mongolia	millet-154	赤优金苗 1 号 Chiyujinmiao 1	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia

续表 1 Continued table 1

编号 ID Code ID	种质名称 Germplasm name	来源地 Source	编号 ID Code ID	种质名称 Germplasm name	来源地 Source
millet-55	L5023	内蒙古呼和浩特 Hohhot, Inner Mongolia	millet-156	金苗 K2 Jimmiao K2	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia
millet-56	3-24	内蒙古呼和浩特 Hohhot, Inner Mongolia	millet-157	长农 47 Changnong 47	山西长治 Changzhi, Shanxi
millet-57	00020566	国家种质资源库 National Germplasm Repository	millet-158	冀谷 38 Jigu 38	河北石家庄 Shijiazhuang, Hebei
millet-59	峰红 3 号 Fenghong 3	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	millet-159	冀早谷 1 号 Jizaogu 1	河北石家庄 Shijiazhuang, Hebei
millet-60	峰黑谷 Fengheigu	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	millet-160	赤谷 6 Chigu 6	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia
millet-61	赤谷 5 号 Chigu 5	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	millet-161	冀谷 40 Jigu 40	河北石家庄 Shijiazhuang, Hebei
millet-62	赤谷 16 Chigu 16	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	millet-162	赤谷 17 Chigu 17	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia
millet-63	冀谷 41 Jigu 41	河北石家庄 Shijiazhuang, Hebei	millet-163	晋谷 51 号 Jingu 51	山西太原 Taiyuan, Shanxi
millet-64	2017M001	河北石家庄 Shijiazhuang, Hebei	millet-164	冀杂金苗 1 号 Jizajimmiao 1	河北石家庄 Shijiazhuang, Hebei
millet-65	冀谷 35 Jigu 35	河北石家庄 Shijiazhuang, Hebei	millet-165	冀杂金苗 2 号 Jizajimmiao 2	河北石家庄 Shijiazhuang, Hebei
millet-66	冀谷 36 Jigu 36	河北石家庄 Shijiazhuang, Hebei	millet-166	九谷 25 Jiugu 25	吉林吉林 Jilin, Jilin
millet-67	冀谷 39 Jigu 39	河北石家庄 Shijiazhuang, Hebei	millet-167	承 13-1126 Cheng 13-1126	河北承德 Chengde, Hebei
millet-68	大同 27 Datong 27	山西大同 Datong, Shanxi	millet-168	晋谷 44 号 Jingu 44	山西汾阳 Fenyang, Shanxi
millet-69	大同 32 Datong 32	山西大同 Datong, shanxi	millet-169	晋谷 40 号 Jingu 40	山西汾阳 Fenyang, Shanxi
millet-70	大同 34 Datong 34	山西大同 Datong, Shanxi	millet-170	龙谷 26 Longgu 26	黑龙江哈尔滨 Harbin, Heilongjiang
millet-71	大同 37 Datong 37	山西大同 Datong, Shanxi	millet-171	汾选 8 号 Fenxuan 8	山西汾阳 Fenyang, Shanxi
millet-72	晋谷 23 Jingu 23	山西大同 Datong, Shanxi	millet-172	承 17-M922 Cheng 17-M922	河北承德 Chengde, Hebei
millet-73	晋谷 33 Jingu 33	山西大同 Datong, Shanxi	millet-173	赤优金苗 4 号 Chiyoujimmiao 4	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia
millet-74	中谷 9 号 Zhonggu 9	北京市 Beijing	millet-174	承 15-M328 Cheng 15-M328	河北承德 Chengde, Hebei
millet-75	峰红 2 号 Fenghong 2	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	millet-175	赤 209-3 Chi 209-3	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia
millet-76	峰红 5 号 Fenghong 5	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	millet-176	青珍珠 Qingzhenzhu	山西汾阳 Fenyang, Shanxi
millet-77	赤优抗谷 1 号 Chiyoukanggu 1	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	millet-177	赤谷 K3 Chigu K3	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia
millet-78	赤优抗谷 2 号 Chiyoukanggu 2	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	millet-178	大和尚 Daheshang	内蒙古清水河 Qingshuihe, Inner Mongolia
millet-79	峰红谷 Fenghonggu	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	millet-179	陇绿谷 Longlugu	甘肃兰州 Lanzhou, Gansu
millet-80	公矮 5 号 Gongai 5	吉林长春 Changchun, Jilin	millet-180	丰谷 2 号 Fenggu 2	河北石家庄 Shijiazhuang, Hebei
millet-81	赤谷 10 号 Chigu 10	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	millet-181	丹谷 2 号 Dangu 2	甘肃兰州 Lanzhou, Gansu
millet-82	衡水 19 Hengshui 19	河北衡水 Hengshui, Hebei	millet-182	绿野谷 Lüyegu	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia

续表 1 Continued table 1

编号 ID Code ID	种质名称 Germplasm name	来源地 Source	编号 ID Code ID	种质名称 Germplasm name	来源地 Source
millet-83	衡谷 21 Henggu 21	河北衡水 Hengshui, Hebei	millet-183	峰红 6 号 Fenghong 6	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia
millet-84	龙谷 25 Longgu 25	黑龙江哈尔滨 Harbin, Heilongjiang	millet-184	赤谷 K1 Chigu K1	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia
millet-85	龙谷 29 Longgu 29	黑龙江哈尔滨 Harbin, Heilongjiang	millet-185	长谷 4 号 Changgu 4	山西长治 Changzhi, Shanxi
millet-86	龙谷 31 Longgu 31	黑龙江哈尔滨 Harbin, Heilongjiang	millet-186	赤 89-4 Chi 89-4	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia
millet-87	龙谷 39 Longgu 39	黑龙江哈尔滨 Harbin, Heilongjiang	millet-187	赤谷 K2 Chigu K2	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia
millet-88	晋谷 34 Jingu 34	山西太原 Taiyuan, Shanxi	millet-188	张家口(早) Zhangjiakou(zao)	河北张家口 Zhangjiakou, Hebei
millet-89	晋谷 36 Jingu 36	山西太原 Taiyuan, Shanxi	millet-189	赤 135-28 Chi 135-28	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia
millet-90	晋谷 52 Jingu 52	山西太原 Taiyuan, Shanxi	millet-190	60 d 还仓 60 d Huancang	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia
millet-91	晋谷 59 Jingu 59	山西太原 Taiyuan, Shanxi	millet-191	赤 84-49 Chi 84-49	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia
millet-92	晋谷 60 Jingu 60	山西太原 Taiyuan, Shanxi	millet-192	长生 13 Changsheng 13	山西长治 Changzhi, Shanxi
millet-93	长农 36 Changnong 36	山西长治 Changzhi, Shanxi	millet-193	峰红 7 号 Fenghong 7	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia
millet-94	长农 38 Changnong 38	山西长治 Changzhi, Shanxi	millet-194	赤 62-26 Chi 62-26	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia
millet-95	长农 40 Changnong 40	山西长治 Changzhi, Shanxi	millet-195	赤 79-19 Chi 79-19	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia
millet-96	长农 44 Changnong 44	山西长治 Changzhi, Shanxi	millet-196	赤 264-7 Chi 264-7	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia
millet-97	晋谷 29 Jingu 29	山西汾阳 Fenyang, Shanxi	millet-197	赤优金谷 Chiyoujingu	陕西榆林 Yulin, Shaanxi
millet-98	糜子亮 Miziliang	辽宁铁岭 Tieling, Liaoning	millet-198	赤 1509 Chi 1509	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia
millet-99	锦谷 5 号 Jingu 5	辽宁省锦州市 Jinzhou, Liaoning	millet-199	赤 114-7 Chi 114-7	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia
millet-100	延夏谷 1 号 Yanxiagu 1	陕西延安 Yan'an, Shaanxi	millet-200	赤 205-25 Chi 205-25	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia
millet-101	红粘谷 Hongniangu	黑龙江黑河 Heihe, Heilongjiang			

表 2 12 对 SSR 分子标记引物序列信息

Table 2 Primer sequence information of 12 pair SSR molecular markers

引物名称 Primer name	正向引物(5'→3') Forward primer	反向引物(5'→3') Reverse primer
M2	CTTGTGCTCGCTTCCCTCT	GCCTGTTGGTGTGAAAAGGT
M3	TCTGTTTGCGATTCTCGTCA	GCGCAAGAGATAGATCCAGG
M22	ACCCTATTGCCAAAGCCTCT	CCTTTTAGCCAGCCAATGAG
M33	GATGCAGAACC GGAGACTA	TTTCCACCACAAAACCCAAT
M34	ACAGGGGTGCATAGCAAATC	TTCCAAGGGGAGATGAGATG
M37	ATACGAAGGTGGTGGTGCTC	AAACTCCCTCTTGTCCAGCA
M45	TGCATCATCTCCTGATGGTC	GCAGCAGTCAGGAAGGGTAG
M49	TTCCGTTTTAGAATAGTTGGCA	GGTTTTGACTAGCAATATTTGTCCA
M58	CTCAGCTGCCACATTCAAAA	GCTGTTCTGCAATTGGTTT
M68	CATGGGTAAATGGAAGCAAAA	ATAGGAGTTCTGCGTTTGGG
M86	TATATCCGTGCATAACCGCA	CTGCAGGAGGATGACCAAAT
M94	CGGTGCGAGTTGTGCCTTAAT	CCCAAATCCACGATCATTTC

1.4 PCR 扩增及电泳检测

采用 PCR 仪(型号:XPcycle,制造商:杭州 BIO-ER)进行扩增。PCR 反应体系为 10 μ L,其中包括 2 \times Taq PCR Master Mix 5 μ L,DNA(浓度 20~50 ng/ μ L) 1 μ L,上下游引物(浓度 10 μ mol/L)各 1 μ L,最后加 2 μ L ddH₂O 补足至 10 μ L。用于 PCR 扩增的程序:95 $^{\circ}$ C 预变性 2 min,94 $^{\circ}$ C 变性 40 s,56 $^{\circ}$ C 退火 45 s,72 $^{\circ}$ C 延伸 1 min,共 29 个循环,72 $^{\circ}$ C 彻底延伸 7 min。PCR 扩增产物用 8% PAGE 胶进行检测,180 V,400 mA,电泳 1.5 h,电泳结束后银染检测。

1.5 SSR 分析与统计分析

利用 GenAlEx 6.51 软件和 Powermarker 3.25 软件计算单个 SSR 位点在样本整体的等位基因数(number of alleles, N_a)、有效等位基因数(number of effective alleles, N_e)、Shannon's 多样性指数(Shannon's information index, I)、观测杂合度(observed heterozygosity, H_o)、期望杂合度(expected heterozygosity, H_e)、各位点近交系数(inbreeding coefficient, F_{is})、各位点分化系数(coefficient of genetic differentiation, F_{st})、各位点的多态性信息含量(polymorphism information content, PIC)等遗传多样性指数。利用 GenAlEx 6.51 软件进行分子遗传变异方差 AMOVA 分析,利用 GenAlEx 6.51 软件计算遗传距离矩阵 PCoA(principal component analysis)分析,使用软件 Ntsys 2.10 中 Qualitative data 功能计算 Jaccard 遗传相似系数。

2 结果与分析

2.1 SSR 标记多态性分析

12 对 SSR 引物在 197 份谷子种质中均表现多

态性,共检测到 173 个等位基因(N_a),平均每对引物检测出 14.417 个,变化范围 2~29 个,M22 标记检测出的等位变异最少(2 个),M86 标记的等位变异最多(29 个);有效等位基因数(N_e)变化范围在 1.081~10.237,有效等位基因变异占比 33.94%;Shannon's 信息指数(I)范围在 0.207~2.623,平均为 1.621,其中 7 对引物达到 1.5 以上;期望杂合度(H_e)变化范围为 0.075~0.901,平均为 0.652($H_e > 0.5$),提示供试材料遗传多样性较高;观测杂合度(H_o)变化范围为 0.000~0.944,平均为 0.148,仅 1 个引物的期望杂合度小于观测杂合度外,其余引物期望杂合度均大于观测杂合度,这说明供试种质内杂合子过剩现象少;PIC 值变化范围在 0.074~0.894,平均为 0.628,周于波等^[21]根据 Botstein 等对高、中、低度多态性位点的划分,PIC 值平均值具有中度多态性($0.25 < PIC < 0.5$)。本研究的多态性位点中 8 对引物具有高度多态性($PIC > 0.5$),3 对引物为中度多态性($0.25 < PIC < 0.5$),1 对引物多态性低。

本研究中高 PIC 值的引物占 66.7%,表明这些 SSR 位点可从分子水平解释基因型差异,具有丰富的遗传差异性(表 3)。

2.2 分子方差分析

利用 AMOVA 对 197 份谷子种质的群体遗传结构进行分析(表 4)表明,群体间差异不显著($P > 0.05$),变异百分率为 12.0%,群体内也表现显著差异性($P < 0.001$),变异百分率达 88.0%。说明 197 份谷子种质的种群内的遗传变异是其总体变异的主要来源。

表 3 12 对 SSR 标记在 197 份谷子种质中的多态性

Table 3 Polymorphism of 12 SSR markers in 197 foxtail millets

引物编号 Primer code	等位基因 N_a	有效等位基因 N_e	Shannon 信息指数 I	观测杂合度 H_o	期望杂合度 H_e	多态性信息含量 PIC
M2	5	1.081	0.206	0.005	0.075	0.073
M22	2	1.750	0.620	0.021	0.429	0.337
M3	6	1.665	0.860	0.021	0.400	0.380
M33	19	8.347	2.298	0.101	0.880	0.868
M34	12	6.810	2.041	0.091	0.853	0.836
M37	13	2.501	1.247	0.000	0.600	0.544
M45	10	4.166	1.540	0.945	0.760	0.719
M49	23	10.237	2.631	0.148	0.902	0.895
M58	13	8.047	2.306	0.086	0.876	0.865
M68	22	4.122	1.988	0.063	0.757	0.739
M86	29	8.446	2.555	0.232	0.882	0.872
M94	19	1.709	1.159	0.061	0.415	0.408
均值 Mean	14.417	4.907	1.621	0.148	0.652	0.628
SE	2.350	0.948	0.231	0.075	0.077	

表 4 197 份谷子种质的 AMOVA 分析

Table 4 Analysis of molecular variance (AMOVA) for 197 foxtail millets

变异来源 Variation source	自由度 Degree of freedom	平方和 Sum of square	均方差 Mean square	方差分量 Variance component	变异百分率/% Percentage of variation	P
种群间 Among populations	3	149.43	49.81	0.52	12	>0.05
种群内 Within population	390	1 491.49	3.82	3.82	88	<0.001
总体 Total	393	1 640.92		4.34	100	

2.3 群体遗传分化及基因流

近交指数(coefficient of inbreeding, F_{is})揭示群体间总样本杂合基因型缺失或过剩状态。近交指数为(-0.271)~1.000, 平均为 0.774, 1 个位点(M45)的杂合基因过剩, 居群平均杂合度较高, 表示谷子材料有近交现象; 遗传分化指数(genetic differentiation index, F_{st})介于 0.034~0.756 之间, 均值为 0.141, 表明居群间遗传分化(14.1%)低于居群内的遗传分化(85.9%); 197 份谷子种质居群基因流(gene flow, N_m)介于 0.080~7.190 间, 均值为 3.462, 表明居群间存在广泛的基因交流(表 5)。

2.4 群体的遗传关系

根据 12 对 SSR 引物扩增结果, 计算 197 份谷子种质间的遗传相似系数, 其变化范围为 0.838 2~1.000 0, 平均值为 0.905 2。其中来自山西省大同市的 millet-4 大同 29 与国家种质资源库的 millet-108 黔南农家种、山西省大同市的 millet-4 大同 29 与山西省太原市 millet-114 的吨谷、内蒙古自治区赤峰市的 millet-6 黄金苗与国家种质资源库的 millet-107 黄壳狗尾粟(糯粟)、山西省大同市的 millet-72 晋谷 23 与国家种质资源库的 millet-108 黔南农

家种遗传相似系数最低(0.838 2); 来自内蒙古自治区呼和浩特市自有品系 millet-41 蒙 21-3-23 与 millet-42 蒙 21-L5021、河北省石家庄市的 millet-151 冀谷 168 与河北省石家庄市的 millet-165 冀杂金苗 2 号遗传相似系数最高(1.000 0)。

表 5 遗传分化指数和基因流

Table 5 Coefficients of genetic differentiation and gene flow between *K. davidiana* populations

引物编号 Primer code	各位点近交系数 F_{is}	各位点分化系数 F_{st}	基因流 N_m
M2	0.904	0.034	7.190
M22	0.830	0.756	0.080
M3	0.950	0.053	4.450
M33	0.892	0.109	2.039
M34	0.837	0.228	0.848
M37	1.000	0.043	5.556
M45	-0.271	0.040	6.048
M49	0.824	0.071	3.266
M58	0.885	0.071	3.281
M68	0.875	0.145	1.475
M86	0.742	0.084	2.716
M94	0.819	0.052	4.590
均值 Mean	0.774	0.141	3.462

表 6 部分谷子种质间的遗传距离

Table 6 Genetic distance among some foxtail millets

编号 Code ID	种质名称 Germplasm name	来源地 Source	编号 Code ID	种质名称 Germplasm name	来源地 Source	遗传距离 Genetic distance
millet-41	3-23	内蒙古呼和浩特 Hohhot, Inner Mongolia	millet-42	L5021	内蒙古呼和浩特 Hohhot, Inner Mongolia	0
millet-151	冀谷 168 Jigu 168	河北石家庄 Shijiazhuang, Hebei	millet-165	冀杂金苗 2 号 Jizajinmiao 2	河北石家庄 Shijiazhuang, Hebei	0
millet-10	龙谷 38 Longgu 38	黑龙江哈尔滨 Harbin, Heilongjiang	millet-132	陇谷 4 号 Longgu 4	甘肃兰州 Lanzhou, Gansu	1
millet-10	龙谷 38 Longgu 38	黑龙江哈尔滨 Harbin, Heilongjiang	millet-18	大白谷 Dabaigu	内蒙古乌兰察布 Ulanqab, Inner Mongolia	1
millet-10	龙谷 38 Longgu 38	黑龙江哈尔滨 Harbin, Heilongjiang	millet-183	峰红 6 号 Fenghong 6	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	1
millet-101	红粘谷 Hongnangu	黑龙江黑河 Heihe, Heilongjiang	millet-170	龙谷 26 Longgu 26	黑龙江哈尔滨 Harbin, Heilongjiang	1
millet-102	毛爪子谷子 Maozhuziguzi	山东临沂 Linyi, Shandong	millet-172	承 17-M922 Cheng 17-M922	河北承德 Chengde, Hebei	1
millet-103	黄那糯 Huangnanuo	湖南湘西 Xiangxi, Hunan	millet-65	冀谷 35 Jigu 35	河北石家庄 Shijiazhuang, Hebei	1
millet-103	黄那糯 Huangnanuo	湖南湘西 Xiangxi, Hunan	millet-73	晋谷 33 Jingu 33	山西大同 Datong, Shanxi	1
millet-104	一窝蚕谷子 Yiwocanguzi	山东东营 Dongying, Shandong	millet-130	赤 231-9 Chi 231-9	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	1
millet-105	狗尾粟 Gouweisu	广东惠州 Huizhou, Guangdong	millet-177	赤谷 K3 Chigu K3	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	1
millet-106	谷子 Guzi	内蒙古兴安盟 Xing'an League, Inner Mongolia	millet-170	龙谷 26 Longgu 26	黑龙江哈尔滨 Harbin, Heilongjiang	1
millet-116	赤谷 6 号 Chigu 6	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	millet-65	冀谷 35 Jigu 35	河北石家庄 Shijiazhuang, Hebei	1
millet-118	朝谷 14 Chaogu 14	辽宁朝阳 Chaoyang, Liaoning	millet-170	龙谷 26 Longgu 26	黑龙江哈尔滨 Harbin, Heilongjiang	1
millet-124	赤谷 7 号 Chigu 7	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	millet-170	龙谷 26 Longgu 26	黑龙江哈尔滨 Harbin, Heilongjiang	1
millet-130	赤 231-9 Chi 231-9	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	millet-141	黄粘谷 Huangnangu	黑龙江黑河 Heihe, Heilongjiang	1
millet-130	赤 231-9 Chi 231-9	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	millet-174	承 15-M328 Cheng 15-M328	河北承德 Chengde, Hebei	1
millet-130	赤 231-9 Chi 231-9	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	millet-190	60 d 还谷 60 d Huancang	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	1
millet-130	赤 231-9 Chi 231-9	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	millet-38	L5003	内蒙古呼和浩特 Hohhot, Inner Mongolia	1
millet-130	赤 231-9 Chi 231-9	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	millet-68	大同 27 Datong 27	山西大同 Datong, Shanxi	1
millet-130	赤 231-9 Chi 231-9	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	millet-69	大同 32 Datong 32	山西大同 Datong, shanxi	1
millet-132	陇谷 4 号 Longgu 4	甘肃兰州 Lanzhou, Gansu	millet-99	锦谷 5 号 Jingu 5	辽宁锦州 Jinzhou, Liaoning	1
millet-132	陇谷 4 号 Longgu 4	甘肃兰州 Lanzhou, Gansu	millet-65	冀谷 35 Jigu 35	河北石家庄 Shijiazhuang, Hebei	1
millet-133	红粘谷 Hongnangu	黑龙江黑河 Heihe, Heilongjiang	millet-170	龙谷 26 Longgu 26	黑龙江哈尔滨 Harbin, Heilongjiang	1
millet-137	龙选 1 号 Longxuan 1	黑龙江黑河 Heihe, Heilongjiang	millet-170	龙谷 26 Longgu 26	黑龙江哈尔滨 Harbin, Heilongjiang	1
millet-137	龙选 1 号 Longxuan 1	黑龙江黑河 Heihe, Heilongjiang	millet-172	承 17-M922 Cheng 17-M922	河北承德 Chengde, Hebei	1

续表 6 Continued table 6

编号 Code ID	种质名称 Germplasm name	来源地 Source	编号 Code ID	种质名称 Germplasm name	来源地 Source	遗传距离 Genetic distance
millet-141	黄粘谷 Huangmiangu	黑龙江黑河 Heihe, Heilongjiang	millet-177	赤谷 K3 Chigu K3	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	1
millet-161	冀谷 40 Jigu 40	河北石家庄 Shijiazhuang, Hebei	millet-177	赤谷 K3 Chigu K3	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	1
millet-170	龙谷 26 Longgu 26	黑龙江哈尔滨 Harbin, Heilongjiang	millet-200	赤 205-25 Chi 205-25	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	1
millet-170	龙谷 26 Longgu 26	黑龙江哈尔滨 Harbin, Heilongjiang	millet-88	晋谷 34 Jingu 34	山西太原 Taiyuan, Shanxi	1
millet-170	龙谷 26 Longgu 26	黑龙江哈尔滨 Harbin, Heilongjiang	millet-89	晋谷 36 Jingu 36	山西太原 Taiyuan, Shanxi	1
millet-170	龙谷 26 Longgu 26	黑龙江哈尔滨 Harbin, Heilongjiang	millet-98	糜子亮 Miziliang	辽宁铁岭 Tieling, Liaoning	1
millet-172	承 17-M922 Cheng 17-M922	河北承德 Chengde, Hebei	millet-176	青珍珠 Qinzhenzhu	山西汾阳 Fenyang, Shanxi	1
millet-172	承 17-M922 Cheng 17-M922	河北承德 Chengde, Hebei	millet-177	赤谷 K3 Chigu K3	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	1
millet-172	承 17-M922 Cheng 17-M922	河北承德 Chengde, Hebei	millet-19	赤草 6 号 Chicao 6	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	1
millet-172	承 17-M922 Cheng 17-M922	河北承德 Chengde, Hebei	millet-52	蒙红谷 1 号 Menghonggu 1	内蒙古呼和浩特市 Hohhot, Inner Mongolia	1
millet-172	承 17-M922 Cheng 17-M922	河北承德 Chengde, Hebei	millet-76	峰红 5 号 Fenghong 5	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	1
millet-174	承 15-M328 Cheng 15-M328	河北承德 Chengde, Hebei	millet-177	赤谷 K3 Chigu K3	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	1
millet-177	赤谷 K3 Chigu K3	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	millet-19	赤草 6 号 Chicao 6	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	1
millet-177	赤谷 K3 Chigu K3	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	millet-190	60 d 还仓 60 d Huancang	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	1
millet-177	赤谷 K3 Chigu K3	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	millet-38	L5003	内蒙古呼和浩特市 Hohhot, Inner Mongolia	1
millet-177	赤谷 K3 Chigu K3	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	millet-68	大同 27 Datong 27	山西大同 Datong, Shanxi	1
millet-177	赤谷 K3 Chigu K3	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	millet-69	大同 32 Datong 32	山西大同 Datong, shanxi	1
millet-18	大白谷 Dabaigu	内蒙古乌兰察布 Ulanqab, Inner Mongolia	millet-99	锦谷 5 号 Jingu 5	辽宁锦州 Jinzhou, Liaoning	1
millet-183	峰红 6 号 Fenghong 6	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	millet-65	冀谷 35 Jigu 35	河北石家庄 Shijiazhuang, Hebei	1
millet-183	峰红 6 号 Fenghong 6	内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	millet-99	锦谷 5 号 Jingu 5	辽宁锦州 Jinzhou, Liaoning	1
millet-23	九谷 23 Jiugu 23	吉林吉林 Jilin, Jilin	millet-73	晋谷 33 Jingu 33	山西大同 Datong, Shanxi	1
millet-65	冀谷 35 Jigu 35	河北石家庄 Shijiazhuang, Hebei	millet-69	大同 32 Datong 32	山西大同 Datong, shanxi	1
millet-65	冀谷 35 Jigu 35	河北石家庄 Shijiazhuang, Hebei	millet-70	大同 34 Datong 34	山西大同 Datong, Shanxi	1

197 份谷子种质间的遗传距离,其变化范围为 0.000 0~1.000 0,平均值为 0.685 1。其中来自内蒙古自治区呼和浩特市自有品系 millet-41 蒙 21-3-23 与 millet-42 蒙 21-L5021、河北省石家庄市的 millet-151 冀谷 168 与河北省石家庄市的 millet-165 冀杂金苗 2 号遗传距离最小(0.000 0);有 47 对谷子种质之间的遗传距离最大(1.000 0),如表 6 所示。

2.5 二维主坐标分析(PCoA)

利用 GenALEX(6.51b2)软件计算遗传距离矩阵,基于 GD 矩阵进行二维主坐标分析,并绘制主坐标 1 和主坐标 2 的 PCoA (principal co-ordinates analysis)散点图,按照散点的密集性以及品种来源,将 197 份谷子种质分为 4 大类:第一亚群(A)包括 38 份谷子种质;第二亚群(B)包括 14 份谷子种质;第三亚群(C)包括 85 份谷子种质;第四亚群(D)包括 60 份谷子种质。其中,第四亚群(D)为混合亚群,包括第一亚群、第二亚群和第三亚群的部分种质,说明各亚群之间可能存在基因交流。第一主成分和第二主成分分别可以解释总变量的 23.08%和 20.33%(图 1)。主成分分析结果表明,地理位置相近的群体并没有被优先聚为一类,说明各品种(系)的遗传差异性与地区之间的关系可能没有相关性。

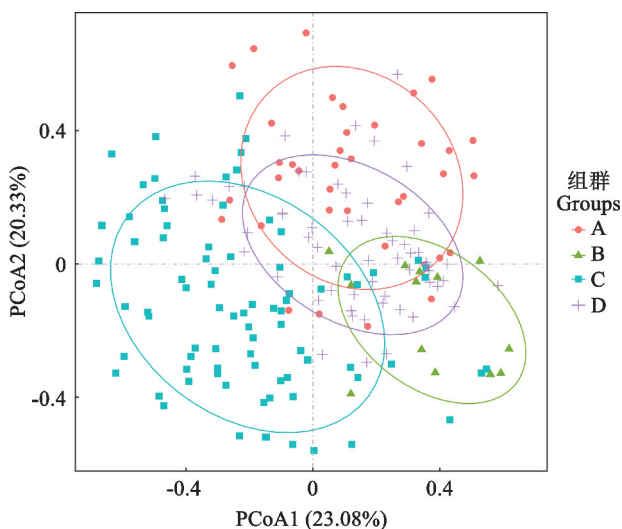


图 1 遗传距离的主坐标分析

Fig. 1 Principal coordinate analysis based on genetic distances

3 讨论

遗传多样性是衡量物种适应环境变化能力的重要指标^[13]。SSR 遗传多样性分析能直观地从 DNA 水平上反映出生物的多样性^[22]。Shannon 指数是

衡量植物遗传多样性重要指标之一^[23]。吕建珍等^[11]对 175 份来源不同的谷子品种进行 36 对简单序列重复(SSR)标记分析,结果表明 Shannon 指数和多态性信息含量(PIC)平均为 2.017 2 和 0.810 6,且不同生态区中汾阳的 SSR 标记 Shannon 指数最高。秦岭等^[16]通过 49 对引物在 20 个谷子品种中扩增出 142 个等位变异,多态性信息含量(PIC)变幅为 0.090 4~0.689 6,平均为 0.416 8。李剑峰等^[24]通过连续 2 年在吉林省吉林市和公主岭市、河南省洛阳市、海南省乐东县调查 102 份谷子资源的主要农艺性状和采用 70 个多态性 SSR 标记对谷子资源进行基因型鉴定,结果发现除了千粒重,其余 9 个性状在 4 个地理环境普遍存在显著或极显著正相关,70 对 SSR 引物共检测到 397 个等位基因,SSR 标记的 Shannon 指数变幅为 0.439~1.118,平均为 0.773 8。本研究选用的 100 对 SSR 引物对 30 份来源不同的谷子种质进行扩增,其中有 12 对引物在 30 份来源不同的谷子种质中扩增的多态性条带丰富。12 对有多态性的引物在 197 份谷子种质中共检测出 173 个等位变异基因,平均每个位点检测出的等位变异数位为 14.417 个,Shannon 指数范围在 0.207~2.623,平均为 1.621,高于吕建珍等和李剑峰等研究的 Shannon 指数,说明本研究的 197 份谷子种质资源的遗传多样性丰富。但是本试验利用的引物数量太少,多态性位点覆盖度低,有待进一步扩大引物数量,提高多态性位点的覆盖度。

群体间 F_{st} 与 N_m 是衡量种群间遗传差异的重要指标^[25]。任重等^[26]研究时参考 Wright 的建议,群体间遗传分化系数(F_{st})可评估群体遗传分化水平:弱, $F_{st} < 0.05$;中等, $0.05 < F_{st} < 0.15$;高, $0.15 < F_{st} < 0.25$;极高, $F_{st} > 0.25$ 。本研究中遗传分化指数(genetic differentiation index, F_{st})介于 0.034~0.756 之间,均值为 0.141,群体间存在中等程度的遗传分化;分子方差 AMOVA 分析显示品种(系)群体内的遗传变异占变异总量的 88%,群体间 12%,均揭示遗传变异主要来源于群体内部。较高的基因流($N_m = 3.462$)可能是引起谷子种质资源产生中等遗传分化的一个原因。虽然谷子是自花授粉作物,但是谷子也存在一定的天然异交率,本研究的 197 份谷子种质资源虽然来自不同的生态区,但是有很大一部分品种(系)均来源于同一亲本,亲缘关系较近。本研究主要利用 SSR 分子标记从基因水平反映谷子的遗传多样性,下一步将结合表型和生化品质成分进行更加深入的鉴定和评价,以便更

加准确地了解 197 份谷子种质资源的多样性分布,充分利用遗传距离较远的种质资源,进一步提高谷子育种工作效率^[27-28]。

4 结 论

197 份谷子种质具有较高的遗传多样性,并且

12 对引物中有 8 对引物具有高度多态性 ($PIC > 0.5$)。AMOVA 分析表明 197 份谷子种质的种群内的遗传变异是其总体变异的主要来源,且居群间存在广泛的基因交流;遗传相似系数、遗传距离和主成分分析也表明,地理位置相近的群体并没有被优先聚为一类。

参考文献:

- [1] 赵美丞,刁现民. 谷子近缘野生种的亲缘关系及其利用研究[J]. 作物学报, 2022, 48(2): 267-279.
ZHAO M C, DIAO X M. Phylogeny of wild *Setaria* species and their utilization in foxtail millet breeding[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(2): 267-279.
- [2] 李艳芬,郑君岗,尹美强,等. 低钾胁迫对谷子幼苗叶片光合作用的影响[J]. 西北植物学报, 2022, 42(6): 1012-1021.
LI Y F, ZHENG J G, YIN M Q, et al. Effect of low potassium stress on leaf photosynthesis of millet seedlings[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, 42(6): 1012-1021.
- [3] 李顺国,刘斐,刘猛,等. 我国谷子产业现状、发展趋势及对策建议[J]. 农业现代化研究, 2014, 35(5): 531-535.
LI S G, LIU F, LIU M, et al. The current industry situation, development trend, and suggestions for the future of foxtail millet in China[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2014, 35(5): 531-535.
- [4] 杨馥熔,杜冰,郭浩杰,等. 谷子 CPP 基因家族鉴定及外源硒响应分析[J]. 西北植物学报, 2024, 44(8): 1250-1260.
YANG F R, DU B, GUO H J, et al. Identification of the CPP gene family and its response to exogenous selenium in foxtail millet[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2024, 44(8): 1250-1260.
- [5] 张一中,张一弓,柳青山. 谷子在山西省旱作农业中的地位和作用[J]. 中国种业, 2011(8): 21-22.
ZHANG Y Z, ZHANG Y G, LIU Q S. The position and function of foxtail millet in dry farming in Shanxi Province [J]. *China Seed Industry*, 2011(8): 21-22.
- [6] 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.
- [7] 赵小琴,贾瑞玲,刘军秀,等. 120 份谷子种质资源的农艺性状表现和遗传多样性分析[J]. 作物杂志, 2022(6): 61-69.
ZHAO X Q, JIA R L, LIU J X, et al. Agronomic traits and genetic diversity analysis of 120 foxtail millet germplasms[J]. *Crops*, 2022(6): 61-69.
- [8] 井敏敏,黄炳钰,戴小红,等. 基于 SSR 标记的澳洲坚果种质资源遗传多样性分析[J]. 热带作物学报, 2022, 43(2): 262-270.
JING M M, HUANG B Y, DAI X H, et al. Genetic diversity analysis of *Macadamia germplasm* resources by SSR markers [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2022, 43(2): 262-270.
- [9] 丁田雨. 燕山板栗古树和品种(系)遗传多样性分析及分子身份证构建[D]. 秦皇岛:河北科技师范学院, 2023.
- [10] 郑长远,黄缨菊 SSR 分子标记开发及遗传多样性研究[D]. 西宁:青海师范大学, 2023.
- [11] 吕建珍,王宏勇,任莹,等. 不同生态区谷子品种表型鉴定及 SSR 遗传多样性分析[J]. 核农学报, 2023, 37(3): 471-482.
LÜ J Z, WANG H Y, REN Y, et al. Phenotypic evaluation and SSR genetic diversity analysis of foxtail millet cultivars in different ecological regions[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2023, 37(3): 471-482.
- [12] 刁玉霖,朱康宁,张海金,等. 谷子主要农艺性状和品质性状遗传多样性分析[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(11): 73-79.
DIAO Y L, ZHU K N, ZHANG H J, et al. Analysis of genetic diversity of main agronomic characters and quality characters of millet[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(11): 73-79.
- [13] 解慧芳,牛静,邢璐,等. 117 份谷子核心种质资源表型性状的遗传多样性分析[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(13): 76-81.
XIE H F, NIU J, XING L, et al. Genetic diversity analysis of phenotypic traits of 117 core germplasm resources of foxtail millet [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(13): 76-81.
- [14] 袁迪,智慧,王海岗,等. 我国谷子登记品种遗传多样性分析及综合评价[J]. 作物杂志, 2024(4): 14-23.
YUAN D, ZHI H, WANG H G, et al. Genetic diversity analysis and comprehensive evaluation of registered varieties of foxtail millet in China[J]. *Crops*, 2024(4): 14-23.
- [15] 仲小茹,柯叮,黄献峰,等. 基于 SSR 标记的江西省枫香古树遗传多样性评价[J]. 植物遗传资源学报, 2023, 24(2): 523-531.
ZHONG X R, KE D, HUANG X F, et al. Genetic diversity in the ancient *Liquidambar formosana* hance revealed by sim-

- ple sequence repeat markers[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2023, 24(2): 523-531.
- [16] 秦岭,于淑婷,杨延兵,等. 1980—2010s 华北夏谷区主栽谷子品种 SSR 遗传多样性分析[J]. *植物遗传资源学报*, 2019, 20(1): 221-228.
- QIN L, YU S T, YANG Y B, *et al.* Genetic diversity analysis of foxtail millet varieties [*Setaria italica* (L.) P. Beauv.] released from 1980s to 2010s in summer sowing region of North China using SSR markers[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2019, 20(1): 221-228.
- [17] 丁银灯,胡相伟,聂石辉,等. 谷子种质资源表型及 SSR 遗传多样性分析[J]. *植物遗传资源学报*, 2018, 19(6): 1210-1221.
- DING Y D, HU X W, NIE S H, *et al.* Analysis of phenotypic traits and SSR genetic diversity of foxtail millet germplasm[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2018, 19(6): 1210-1221.
- [18] 杨慧卿,王军,王智兰,等. 分蘖型谷子资源的表型和遗传多样性分析[J]. *植物遗传资源学报*, 2017, 18(4): 685-695.
- YANG H Q, WANG J, WANG Z L, *et al.* Analysis of phenotype and genetic diversity of foxtail millet germplasm with tillering[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2017, 18(4): 685-695.
- [19] KIM E J, SA K J, PARK K C, *et al.* Study of genetic diversity and relationships among accessions of foxtail millet [*Setaria italica* (L.) P. Beauv.] in Korea, China, and Pakistan using SSR markers[J]. *Genes & Genomics*, 2012, 34(5): 529-538.
- [20] PANDEY G, MISRA G, KUMARI K, *et al.* Genome-wide development and use of microsatellite markers for large-scale genotyping applications in foxtail millet [*Setaria italica* (L.) P. Beauv.] [J]. *DNA Research*, 2013, 20(2): 197-207.
- [21] 周于波,朱鹏,龚伟,等. 四川核桃良种 SSR 指纹图谱构建及遗传多样性分析[J]. *西北植物学报*, 2018, 38(7): 1254-1261.
- ZHOU Y B, ZHU P, GONG W, *et al.* SSR fingerprint construction and genetic diversity analysis of elite *Juglans regia* cultivars in Sichuan[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2018, 38(7): 1254-1261.
- [22] 任雪锋. 基于 SSR 标记的狗牙根遗传多样性及群体遗传结构分析[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2022.
- [23] 杨军,游小妹,陈常颂. 利用荧光 SSR 标记鉴定茶树自然杂交后代遗传背景[J]. *西北植物学报*, 2023, 43(12): 1981-1993.
- YANG J, YOU X M, CHEN C S. Genetic background identification of the natural hybrid progenies of tea on fluorescently labeled SSR[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2023, 43(12): 1981-1993.
- [24] 李剑峰,张博,全建章,等. 基于 SSR 标记的谷子主要农艺性状关联位点检测及等位变异分析[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(24): 4453-4472.
- LI J F, ZHANG B, QUAN J Z, *et al.* Associated loci detection and elite allelic variations analysis of main agronomic traits in foxtail millet [*Setaria italica* (L.) P. Beauv.] based on SSR markers[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(24): 4453-4472.
- [25] 杨军,张力岚,张雯婧,等. 福建茶树种质资源群体结构及遗传差异[J]. *茶叶科学*, 2023, 43(6): 769-783.
- YANG J, ZHANG L L, ZHANG W J, *et al.* Population structure and genetic differences of tea germplasm resources in Fujian[J]. *Journal of Tea Science*, 2023, 43(6): 769-783.
- [26] 任重,白倩,苏淑钗. 基于 SSR 分子标记的中国黄连木遗传多样性分析[J]. *西北植物学报*, 2022, 42(9): 1530-1539.
- REN Z, BAI Q, SU S C. Genetic diversity analysis of *Pistacia chinensis* Bunge based on SSR markers[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, 42(9): 1530-1539.
- [27] 吴河饶,任青艳,陈莹,等. 基于农艺性状的榕江茶核心种质构建[J]. *西北植物学报*, 2023, 43(11): 1931-1941.
- WU H R, REN Q Y, CHEN Y, *et al.* Construction of core germplasm of *Camellia yungkiangensis* based on agronomic traits[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2023, 43(11): 1931-1941.
- [28] 孙艳楠,路耿新,李冠义,等. 燕麦种质资源形态学性状的遗传多样性[J]. *西北植物学报*, 2024, 44(1): 112-121.
- SUN Y N, LU G X, LI G Y, *et al.* Analysis of the genetic diversity of morphological traits of oat germplasm[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2024, 44(1): 112-121.