

## 69 份黍子地方种质资源表型多样性评价

李基光<sup>1</sup>, 王艳兰<sup>1</sup>, 向兰舟<sup>1</sup>, 邓 晶<sup>2</sup>, 朱建宇<sup>1</sup>, 王利群<sup>1</sup>, 汤 睿<sup>1</sup>, 余应弘<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>湖南省农业科学院作物研究所, 长沙 410125; <sup>2</sup>湖南省农业科学院, 长沙 410125)

**摘要:** 中国对黍子种质资源开展的系统性研究较少。为进一步挖掘黍子的利用价值, 选育高品质的黍子品种, 本研究对从湖南、江西、广西以及西藏 40 个县市收集的 69 份黍子种质资源进行表型多样性评价。结果表明, 收集到的 69 份地方资源主要分布于 201~600 m 的中低海拔地区。19 个农艺性状表型分析显示其遗传多样性丰富; 主成分分析将 19 个农艺性状分为 7 个主成分, 其主要与单株草重、主穗分枝数、幼苗叶色、生育期、粒色、千粒重、米粳糯相关, 累计贡献率 75.525%。聚类分析将 69 份资源分为 2 大类群, 第 I 类群包括 44 份种质, 株型小、生物量小、产量较低; 第 I 类群又分为 2 个亚群, 相比于亚群 I-1, 亚群 I-2 株型、生物量更小, 产量更低。第 II 类群包括 25 份种质, 株型大、生物量大、产量较高; 第 II 类群又可以分为 2 个亚群, 与亚群 II-1 相比亚群 II-2 生物量相对较小, 产量较低。根据聚类分析结果及数量性状极值和质量性状变异类型提取出 12 份黍子特异种质, 并从中筛选出 4 类可以代表类群特征的资源: 生物量大适合作饲草的资源, 长穗型优质资源, 糯性优质资源, 高产、高生物量的粮饲两用资源。

**关键词:** 黍子; 鉴定评价; 种质资源

## Evaluation of Phenotypic Diversity of 69 Finger Millet Germplasms

LI Ji-guang<sup>1</sup>, WANG Yan-lan<sup>1</sup>, XIANG Lan-zhou<sup>1</sup>, DENG Jing<sup>2</sup>,

ZHU Jian-yu<sup>1</sup>, WANG Li-qun<sup>1</sup>, TANG Rui<sup>1</sup>, YU Ying-hong<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Crop Research Institute, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125;

<sup>2</sup>Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125)

**Abstract:** There are few systematic studies on finger millet germplasm resources in China. In order to further explore the utilization value of finger millet, breeding high-quality millet varieties, the phenotypic diversity of 69 finger millet germplasms collected from 40 counties and cities in Hunan, Jiangxi, Guangxi and Tibet was evaluated in the study. The results showed that the 69 local resources were mainly distributed in the low and medium altitude of 201-600 m. The diversity analysis based on 19 phenotypic traits revealed a rich genetic diversity in this collection. The correlation analysis and principal component analysis suggested 7 principal components including weight per plant, number of branches on main spike, leaf color of seedling, whole growth period, seed coat color, 1000-grain weight and glutinousness. The cumulative contribution rate was 75.525%. Two main categories were suggested for the 69 accessions. The first group included 44 germplasms with small plant, low biomass and low grain yield, and was further divided into two subgroups: compared with subgroup I-1, subgroup I-2 had even smaller plant, lower biomass and lower grain yield. The second group included 25

收稿日期: 2021-04-06 修回日期: 2021-05-10 网络出版日期: 2021-05-21

URL: <http://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20210406001>

第一作者研究方向为作物栽培及育种相关研究, E-mail: 214770366@qq.com; 王艳兰为共同第一作者

通信作者: 汤睿, 研究方向为作物遗传育种与栽培, E-mail: 195424399@qq.com

余应弘, 研究方向为作物遗传育种, E-mail: yyh30678@163.com

**基金项目:** 湖南省自然科学基金(2020JJ4422); 国家作物种质资源库(NCGRC-2021-56); 湖南省创新平台与人才计划项目(2020NK4258); 湖南省农业科技创新资金项目(2020CX28)

**Foundation projects:** Natural Science Foundation of Hunan Province(2020JJ4422), National Crop Germplasm Repository(NCGRC-2021-56), Innovation Platform and Talent Plan Project of Hunan Province(2020NK4258), Agricultural Science and Technology Innovation Fund Project of Hunan Province(2020CX28)

germplasms with relatively large plant, high biomass and high grain yield, and was further divided into two subgroups: compared with subgroup II -1, subgroup II -2 had lower biomass and lower grain yield. A core collection containing 12 finger millet accessions were identified, by cluster analysis results and extreme-values of quantitative traits and variation types of qualitative traits, as representative resources of the following four types: forage accessions with large biomass, grain accessions with long spikes, glutinous grain accessions, and dual-purpose grain and forage accessions with high grain yield and high biomass.

**Key words:** finger millet; appraisal; germplasm resources

穆属隶属于禾本科虎尾草族核心群, 约有 10 个种, 穆属植物都为异源四倍体, 且其异源四倍体谱系具有多样性<sup>[1]</sup>。其中穆子 (*Eleusine coracana* (L.) Gaertn.) 为 1 年生草本植物, 是干旱区三大禾谷类作物之一, 被美国国家科学院认为是一种潜在的“超级谷物”, 是所有主要谷物中最有营养的一种<sup>[2]</sup>。穆子起源于非洲<sup>[3]</sup>, 主要分布在乌干达、印度、尼泊尔、中国等地<sup>[4]</sup>, 在我国安徽、广西、河南、湖南、西藏、陕西等省区皆有栽培<sup>[5]</sup>。

穆子营养丰富, 适应性强。Chethan 等<sup>[6]</sup>和 Singh 等<sup>[7]</sup>对穆子营养成分进行了研究, 发现穆子中蛋白质含量为 5%~8%、脂肪酸 1%~2%、膳食纤维 15%~20%, 穆子的钙和钾含量在所有谷物中是最高的<sup>[8]</sup>, 还富含维生素 B 复合物, 如硫胺素、核黄素、叶酸和烟酸等<sup>[9-10]</sup>。穆子对不同生长环境适应性强, 表现出良好的抗旱、耐盐碱性<sup>[11]</sup>。

穆子的抗性、营养成分、功能利用等被国内外广泛报道<sup>[12-14]</sup>。Joshi 等<sup>[4]</sup>对 28 份穆子进行了多样性分析, 对比了非洲与印度栽培种及野生种的表型性

状, 发现野生种的大多数数量性状平均值较高。吴应齐等<sup>[15]</sup>仅对广西南宁、桂林、浙江庆元 3 份穆子地方资源的农艺性状及营养成分进行比较与评价, 其农艺性状及营养成分差异较大。

种质资源表型多样性分析是优异资源的基因挖掘与利用的坚实基础, 目前, 中国对穆子种质资源开展的系统性研究较少。为进一步挖掘穆子的利用价值, 选育高品质的穆子品种, 本研究通过对在湖南、广西、江西以及西藏 40 个县市收集的 69 份穆子种质资源进行了表型性状的评价和多样性分析, 并通过相关性分析、主成分分析、聚类分析等, 综合评价了这些资源, 以为穆子的种质创新和品种选育提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与试验地点

本试验以 69 份地方种质资源为参试材料 (表 1)。试验地点设于湖南省农业科学院作物研究所试验地, 113° E, 28.3° N, 海拔 50 m。试验地为红壤黏土, 肥力中等。

表 1 69 份穆子地方种质资源的基本信息

Table 1 Information of 69 *Eleusine coracana* (L.) Gaertn. germplasm resources

序号 Serial number	名称 Name	经度 (°E) Longitude	纬度 (°N) Latitude	海拔 (m) Altitude	来源 Source
1	芭蕉山穆子	111.035	27.729	405	新化县文田镇
2	东华穆子	111.441	27.963	248	新化县吉庆镇
3	桃村穆子	111.477	27.935	441	新化县坐石乡
4	槽头冲穆子	111.477	27.935	441	新化县坐石乡
5	和平穆子	111.384	28.097	478	新化县圳上镇
6	新河穆子	111.477	27.935	441	新化县坐石乡
7	茶村穆子	111.384	28.097	309	新化县圳上镇
8	农光穆子	111.441	27.963	414	新化县吉庆镇
9	久大穆子	111.384	28.097	309	新化县圳上镇
10	祖湾穆子	111.441	27.963	414	新化县吉庆镇
11	横茶穆子	111.189	28.056	306	新化县荣华乡
12	秀岩穆子	111.477	27.935	441	新化县坐石乡

表 1( 续 )

序号 Serial number	名称 Name	经度 ( °E ) Longitude	纬度 ( °N ) Latitude	海拔 ( m ) Altitude	来源 Source
13	张家岭穆子	111.441	27.963	248	新化县吉庆镇
14	放马坪穆子	111.384	28.097	478	新化县圳上镇
15	石桥穆子	111.477	27.935	441	新化县坐石乡
16	杉木穆子	111.441	27.963	414	新化县吉庆镇
17	东华糯穆子	111.441	27.963	248	新化县吉庆镇
18	向北穆子	110.871	27.798	425	新化县奉家镇
19	干家穆子	111.384	28.097	309	新化县圳上镇
20	寨门穆子	111.189	28.056	289	新化县荣华乡
21	粟山穆子	111.477	27.935	441	新化县坐石乡
22	大沅溪穆子	111.441	27.963	414	新化县吉庆镇
23	添壁长糯穆子	111.101	27.364	582	隆回县岩口镇
24	添壁糯穆子	111.101	27.364	582	隆回县岩口镇
25	大平穆子	111.628	25.903	558	双牌县永江乡
26	界脚穆子	110.296	27.340	426	洪江市雪峰镇
27	水晶沘穆子	111.445	25.749	365	道县桥头镇
28	真武穆子	112.804	26.207	159	耒阳市太平圩乡
29	平山穆子	110.132	26.181	1484	城步县南山镇
30	梅花山穆子	111.150	27.485	674	隆回县高平镇
31	楠竹坪穆子	111.816	25.294	1010	道县洪塘营瑶族乡
32	雀儿穆子	109.483	28.188	762	凤凰县禾库镇
33	瓦窑穆子	110.175	27.199	342	洪江市熟坪乡
34	大寨糯穆子	110.108	26.275	844	城步县长安营乡
35	岩口穆子	111.101	27.364	581	隆回县岩口镇
36	群山穆子	111.651	27.898	680	涟源市古塘乡
37	树凉穆子	110.485	27.410	574	溆浦县黄茅园镇
38	石板穆子	110.457	27.159	802	洞口县月溪乡
39	大冲穆子	112.131	25.116	545	蓝山县大桥瑶族乡
40	寨背岭穆子	113.811	26.442	156	炎陵县奎溪乡
41	林子冲穆子	110.054	26.507	387	绥宁县寨市乡
42	上湾穆子	112.198	26.478	221	常宁市大堡乡
43	奔塘穆子	111.476	25.747	385	道县桥头林场
44	大寨鸡爪穆	110.108	26.275	831	城步县长安营乡
45	枫木岭穆子	110.828	27.235	436	隆回县西洋江镇
46	白水穆子	113.182	25.518	287	宜章县赤石乡
47	管竹穆子	110.457	27.159	801	洞口县月溪乡
48	塘杯穆子	111.497	25.657	438	道县乐福堂乡
49	吉庆穆子	111.441	27.963	248	新化县吉庆镇
50	秋坪穆子	113.708	25.917	911	桂东县青山乡
51	南山黄穆子	111.441	27.963	485	新化县吉庆镇
52	文坪穆子	110.673	26.641	397	武冈市文坪镇

表 1( 续 )

序号 Serial number	名称 Name	经度( °E )Longitude	纬度( °N )Latitude	海拔( m )Altitude	来源 Source
53	永丰穆子	110.487	26.624	535	城步县西岩镇
54	花桥穆子	110.487	26.624	487	城步县西岩镇
55	西岩穆子	110.487	26.624	457	城步县西岩镇
56	园艺穆子	112.113	29.112	405	常德市西湖管理区
57	大塘穆子	110.180	22.657	521	玉州区大塘镇( 广西 )
58	茂林穆子	110.050	22.621	111	玉州区茂林镇( 广西 )
59	贺街穆子	111.577	24.411	589	八步区贺街镇( 广西 )
60	兴隆穆子	115.125	24.759	515	定南县天九镇( 江西 )
61	柱石穆子	115.268	24.822	530	定南县鹅公镇( 江西 )
62	新联穆子	110.673	26.641	397	武冈市文坪镇
63	赤竹穆子	111.216	26.631	541	新宁县一渡水镇
64	上阳穆子	112.345	26.184	759	常宁市塔山乡
65	塔山穆子	112.345	26.184	759	常宁市塔山乡
66	大龙穆子	110.563	26.429	1240	新宁县黄金乡
67	察隅穆子	97.472	28.667	2300	察隅县上察隅镇( 西藏 )
68	南山穆子	111.441	27.963	411	新化县吉庆镇
69	南山红穆子	111.441	27.963	411	新化县吉庆镇

1.2 试验设计与方法

本试验于 2019-2020 年进行。种质鉴定顺序排列, 不设重复, 试验小区行长 2 m, 5 行区, 行距 50 cm, 株距 30 cm, 穴播, 每穴留苗 2~3 株。小区面积 5 m<sup>2</sup>。

农艺性状调查: 田间调查每个小区的叶鞘色、幼苗叶色、分蘖性、分枝性、穗形、粒色、米粳糯、抗倒性。收获时每小区随机连续取 5 株测定主茎节数、一株茎数、主茎长度、主茎直径、主穗长度、主穗分枝数、全生育期、单株草重、单株穗重、单株粒重、千粒重等农艺性状。由于目前中国没有穆子种质资源的描述规范, 本研究的调查、考种方法参照《谷子种质资源描述规范和数据标准》执行。

采用 Shannon 多样性指数分析法对表型性状进行遗传多样性分析, 根据性状表现及相关分析筛选特异种质。

1.3 数据整理与分析

采用 Microsoft Excel 2019 进行数据整理, 分别对穆子的叶鞘色等 8 个质量性状赋以代码值( 表 2、图 1 ), 统计各性状类别的频率分布和多样性指数; 以变异范围、变异系数和多样性指数为评价指标, 对数量性状进行 10 级分类, 从第一级 [  $X_i < (X - 2\sigma)$  ]

到第十级 [  $X_i > (X + 2\sigma)$  ], 每 0.5 $\sigma$  为一级, 每一级的相对频率用于计算 Shannon 多样性指数。Shannon 多样性系数  $H' = -\sum P_i \ln P_i$ 。式中,  $P_i$  为该性状第  $i$  级别内的材料份数占总份数的百分比,  $\ln$  为自然对数<sup>[16]</sup>; 采用 DPS 7.05 软件进行相关性分析、主成分分析及聚类分析。

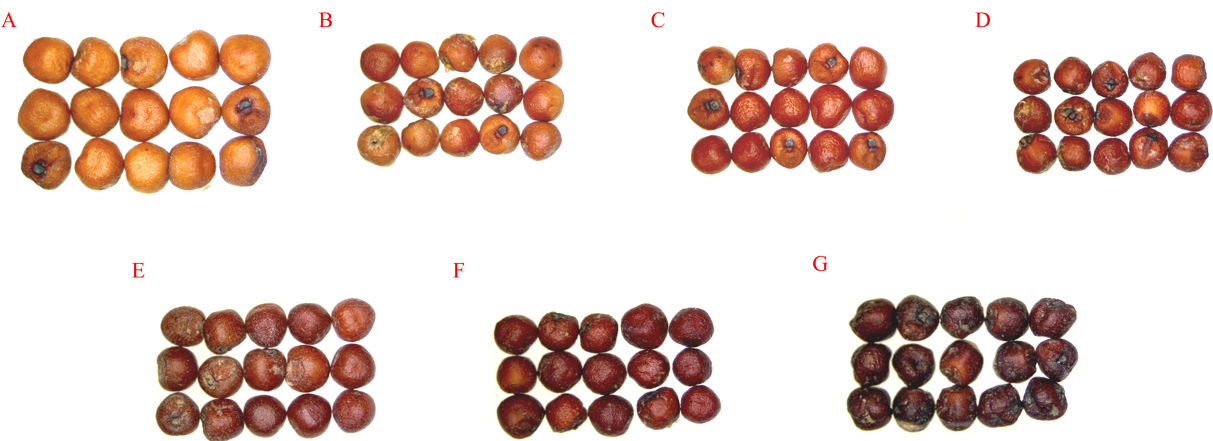
表 2 穆子种质资源质量性状赋值

Table 2 Coding for qualitative traits of *Eleusine coracana* ( L. ) Gaertn. germplasm resources

性状 Trait	赋值 Coding
叶鞘色 LSC	1= 浅绿, 2= 绿色
幼苗叶色 SLC	1= 浅绿, 2= 绿色
分蘖性 T	1= 弱, 2= 较弱, 3= 中等, 4= 较强, 5= 强
分枝性 B	1= 弱, 2= 较弱, 3= 中等, 4= 较强, 5= 强
穗形 SS	1= 张, 2= 松, 3= 紧
粒色 SCC	1= 棕黄, 2= 棕, 3= 棕红, 4= 褐黄, 5= 褐色, 6= 褐红, 7= 黑红
米粳糯 G	1= 粳, 2= 糯
抗倒性 LR	1= 强, 2= 中, 3= 弱

LSC: Leaf sheath color, SLC: Seedling leaf color, T: Tillering, B: Branching, SS: Spike shape, SCC: Seed coat color, G: Glutinousness, LR: Lodging resistance. The same as below





A: 棕黄; B: 棕; C: 棕红; D: 褐黄; E: 褐色; F: 褐红; G: 黑红  
A: Brownish-yellow, B: Brownish, C: Brownish-red, D: Brown-yellow, E: Brown, F: Brown-red, G: Blackish-red

图 1 穆子粒色 (体式显微镜拍摄)  
Fig.1 Seed coat color of *Eleusine coracana* ( L. ) Gaertn. ( photographs taken under stereo microscope )

2 结果与分析

2.1 垂直分布

穆子种质资源在海拔 156~2300 m 的区域均有分布。由图 2 可知,海拔 401~600 m 地区收集到的资源最多,共有 35 份,其次是 201~400 m,有 17 份,海拔 601~800 m、801~1000 m 以及 1000 m 以上地区分别为 6、5、4 份。海拔 200 m 以下地区收集到的资源最少,只有 2 份。由此可知,收集的品种主要集中在海拔 201~600 m 地区,占收集资源总数的 75.36 %。

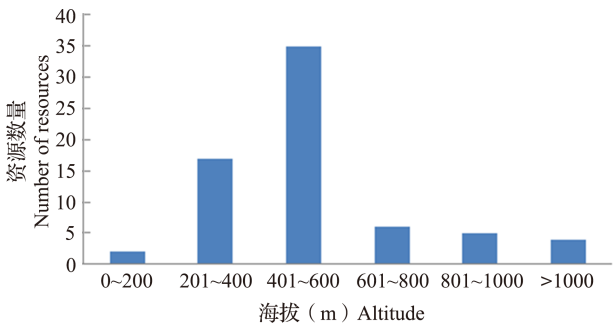


图 2 69 份穆子种质资源垂直分布情况  
Fig.2 Vertical distribution of *Eleusine coracana* ( L. ) Gaertn. germplasm resources

2.2 遗传多样性分析

2.2.1 质量性状 对 8 个质量性状进行多样性分析,由表 3 可看出,穆子资源各性状之间表现出不同程度的多样性。其中,粒色性状较为丰富,频率

分布离散度最高,多样性指数最大,有 7 种粒色,棕红色和褐红色较多;其次是分蘖性和分枝性,近半数的穆子资源分蘖性中等,分枝性弱;穆子的穗形以松、张 2 种居多,紧的较少;抗倒性较强;叶鞘色和幼苗叶色只有浅绿和绿色,多样性均小于 1;米粳糯的多样性指数最小,绝大多数的穆子米为粳性。

2.2.2 数量性状 由表 4 可知,69 份穆子种质资源农艺性状的变异相对丰富,11 个数量性状的变异系数范围在 10.3%~54.0% 之间,其中,单株草重最大,其次是单株穗重、单株粒重、主茎直径、一株茎数、主穗长度,均大于 30%,表明这 6 个数量性状具有丰富的变异,进行遗传改良的潜力较大。其他 5 个数量性状的变异系数较小。

穆子 11 个数量性状的多样性指数均超过了 1.80,范围在 1.810~2.080 之间。其中,有 3 个数量性状的多样性指数超过 2.0,分别是主穗分枝数、主茎长度、一株茎数;4 个数量性状的多样性指数超过 1.9,分别是主穗长度、全生育期、单株粒重和单株草重;各个材料间差异明显,各数量性状存在着广泛的遗传多样性。

一株茎数、主茎直径、主穗长度、单株草重、单株穗重、单株粒重的变异程度较高;单株草重、单株穗重、主茎长度、全生育期的离散程度较高;其中单株草重、单株穗重的变异程度和离散程度都较高。

表 3 8 个质量性状的频率分布和多样性指数  
Table 3 Frequency distribution and diversity of 8 qualitative traits

性状 Trait	频率分布 ( % ) Frequency distribution							多样性指数 Diversity index
	1	2	3	4	5	6	7	
叶鞘色 LSC	43.5	56.5						0.68
幼苗叶色 SLC	37.7	62.3						0.66
分蘖性 T	13.1	15.9	47.8	20.3	2.9			1.34
分枝性 B	50.7	21.8	18.8	7.2	1.4			1.24
穗形 SS	34.8	49.3	15.9					1.01
粒色 SCC	5.8	7.2	29.0	11.6	13.1	23.2	10.1	1.80
米粳糯 G	84.1	15.9						0.44
抗倒性 LR	47.8	30.4	21.8					1.05

表 4 11 个数量性状的多样性分析  
Table 4 Diversity analysis of 11 quantitative traits

性状 Trait	最大值 Max.	最小值 Min.	平均值 Mean	极差 Range	标准差 SD	变异系数 ( % ) CV	多样性指数 Diversity index
主茎节数 NNMS	10.3	5.0	7.1	5.3	1.2	16.7	1.810
一株茎数 NS	14.7	2.3	6.9	12.4	2.2	31.3	2.008
主茎长度 ( cm ) LS	139.8	75.4	104.4	64.4	13.4	12.8	2.078
主茎直径 ( cm ) DS	1.6	0.4	1.0	1.2	0.3	35.0	1.871
主穗长度 ( cm ) SL	21.4	5.5	11.8	15.9	3.6	30.2	1.997
主穗分枝数 NB	9.7	3.3	6.5	6.4	1.6	24.4	2.080
全生育期 ( d ) GP	149.0	93.0	118.9	56.0	12.3	10.3	1.970
单株草重 ( g ) WP	292.4	22.0	118.8	270.4	64.2	54.0	1.905
单株穗重 ( g ) SW	78.6	6.5	32.3	72.1	16.3	50.3	1.858
单株粒重 ( g ) GW	36.6	3.2	16.1	33.4	7.6	47.3	1.965
千粒重 ( g ) TGW	2.6	1.2	1.8	1.4	0.2	12.8	1.826

NNMS: Node number on main stem, NS: Number of stems per plant, LS: Length of main stem, DS: Diameter of main stem, SL: Main spike length, NB: Number of branches on main spike, GP: Whole growth period, WP: Weight per plant, SW: Spike weight per plant, GW: Grain weight per plant, TGW: 1000-grain weight. The same as below

2.3 相关性分析

19 个农艺性状的相关性分析显示 ( 表 5 ), 叶鞘色与幼苗叶色存在极显著相关性; 单株粒重与一株茎数、分蘖性、单株草重、单株穗重等多个性状呈极显著相关, 其中, 单株粒重大的资源大多分蘖性好、一株茎数多, 单株草重和单株穗重也大; 单株穗重、单株草重与一株茎数、分蘖性、主茎长度、分枝性、单株粒重呈极显著相关, 单株草重与单株

穗重同样相关性极显著; 全生育期与分枝性呈显著负相关, 与主茎直径呈极显著负相关, 晚熟品种分枝性相对较弱, 主茎直径较小; 粒色、千粒重、米粳糯与其他性状均无极显著相关性; 其中, 一株茎数与单株的草重、穗重、粒重以及分蘖性和分枝性都极显著相关。因此, 选育高产高生物量的穆子品种关键是需要有一株茎数、分蘖性和分枝性好的资源。

表 5 主要农艺性状的相关性分析

Table 5 Correlation analysis of main agronomic traits

性状 Trait	叶鞘色 LSC	幼苗 叶色 SLC	主茎 节数 NNMS	一株 茎数 NS	分蘖性 T	主茎 长度 LS	分枝性 B	主茎 直径 DS	穗形 SS	主穗 长度 SL	主穗 分枝数 NB	粒色 SCC	全生 育期 GP	单株 草重 WP	单株 穗重 SW	单株 粒重 GW	千粒重 TGW	米粳糯 G
幼苗叶色 SLC	0.89**																	
主茎节数 NNMS	0.05	-0.09																
一株茎数 NS	-0.21	-0.23	-0.02															
分蘖性 T	-0.17	-0.19	0.02	0.88**														
主茎长度 LS	-0.07	-0.14	0.35**	0.17	0.18													
分枝性 B	-0.03	0.05	-0.30*	0.34**	0.30*	0.07												
主茎直径 DS	0.07	0.02	0.38**	-0.16	-0.06	0.24*	-0.17											
穗形 SS	-0.03	0.09	-0.09	0.16	0.19	-0.21	0.27*	-0.25*										
主穗长度 SL	0.15	0.06	0.28*	0.02	0.01	0.40**	-0.17	0.37**	-0.31**									
主穗分枝数 NB	0.28*	0.19	0.38**	-0.03	0	0.27*	-0.23	0.58**	-0.26*	0.59**								
粒色 SCC	0.06	0.10	0.12	-0.14	-0.06	0.12	0.06	-0.15	0.25*	-0.05	-0.22							
全生育期 GP	-0.07	-0.15	0.1	-0.12	-0.24*	-0.13	-0.27*	-0.31**	-0.02	0.12	-0.11	0.02						
单株草重 WP	-0.01	0.04	0.25*	0.58**	0.56**	0.42**	0.31**	0.11	0.28*	0.27*	0.28*	0.14	-0.15					
单株穗重 SW	0.05	0.04	0.12	0.46**	0.43**	0.36**	0.40**	-0.06	0.28*	0.15	0.21	-0.04	-0.08	0.70**				
单株粒重 GW	-0.04	-0.03	0.15	0.40**	0.33**	0.30*	0.21	-0.05	0.16	0.06	0.18	-0.15	0.03	0.50**	0.86**			
千粒重 TGW	-0.02	0.05	-0.05	-0.03	0	0.02	0.04	0	-0.02	-0.01	0.05	-0.12	-0.08	-0.12	0.12	0.27*		
米粳糯 G	-0.02	-0.07	0.06	0	-0.01	0.01	-0.17	-0.01	0.12	0.02	-0.05	0.04	0.25*	-0.14	-0.06	0.06	-0.05	
抗倒性 LR	0.01	-0.07	0.15	-0.10	0.02	0.28*	-0.04	0.48**	-0.25*	0.08	0.22	-0.01	-0.13	0.02	-0.06	-0.07	-0.17	0.14

\* 和 \*\* 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著

\* and \*\* mean significant (  $P < 0.05$  ) and extremely significant (  $P < 0.01$  ) correlation

2.4 主成分分析

对 19 个农艺性状进行主成分分析(表 6), 19 个农艺性状的主要信息集中在前 7 个主成分中, 累计贡献率 75.525%。其中, 第 1 主成分贡献率 20.346%, 载荷较高且有较大的正系数的农艺性状有单株草重、单株穗重、一株茎数、分蘖性、单株粒重等, 说明第 1 主成分主要反映了产量性状; 在一定程度上, 一株茎数越多、分蘖性越强、单株草重越重产量越高。第 2 主成分贡献率 16.321 %, 主茎直径、主穗长度、主穗分枝数系数绝对值大于其他性状, 而穗形和分枝性为相对较高的负向载荷, 它们在一定程度上制约了主穗长度及主穗分枝数。第 3 主

成分贡献率 11.054%, 叶鞘色和幼苗叶色系数绝对值大于其他性状, 说明第 3 主成分是由叶鞘色和幼苗叶色组成, 该主成分主要反映籽粒的叶色特征。第 4 主成分贡献率 8.384%, 全生育期特征向量值最高, 表明第 4 主成分为全生育期因子。第 5 主成分贡献率 7.787%, 粒色系数绝对值最大, 千粒重为最高负向载荷, 分析表明褐红色籽粒的籽粒千粒重较小。第 6 主成分贡献率 5.922%, 载荷较大的是千粒重, 一株茎数和分蘖性呈较大负向, 过多追求一株茎数和分蘖性会导致千粒重降低。第 7 主成分贡献率 5.712%, 其中米梗糯和抗倒性的特征向量值较大, 糯性品种相对抗倒伏能力较强。

表 6 主要农艺性状的主成分分析

Table 6 Principal component analysis of main agronomic traits

性状 Trait	因子 1 Factor 1	因子 2 Factor 2	因子 3 Factor 3	因子 4 Factor 4	因子 5 Factor 5	因子 6 Factor 6	因子 7 Factor 7
叶鞘色 LSC	-0.049	0.179	0.585	0.059	0.041	-0.215	0.062
幼苗叶色 SLC	-0.053	0.106	0.638	0.009	0.034	-0.140	0.063
主茎节数 NNMS	0.116	0.311	-0.122	0.276	0.164	0.122	-0.065
一株茎数 NS	0.379	-0.184	-0.129	-0.094	-0.024	-0.388	-0.068
分蘖性 T	0.373	-0.145	-0.110	-0.166	0.065	-0.338	0.004
主茎长度 LS	0.261	0.239	-0.132	0.038	0.144	0.320	-0.068
分枝性 B	0.214	-0.249	0.166	-0.279	0.087	0.166	0.044
主茎直径 DS	0.049	0.426	-0.067	-0.266	0.064	0.056	0.198
穗形 SS	0.112	-0.296	0.185	0.182	0.250	0.059	0.202
主穗长度 SL	0.127	0.374	-0.016	0.152	-0.074	-0.137	-0.311
主穗分枝数 NB	0.144	0.444	0.092	-0.001	-0.154	-0.129	-0.032
粒色 SCC	-0.021	-0.065	0.107	0.211	0.581	0.367	-0.169
全生育期 GP	-0.117	-0.033	-0.150	0.596	-0.095	-0.174	-0.107
单株草重 WP	0.436	0.033	0.076	0.057	0.201	-0.044	-0.168
单株穗重 SW	0.433	-0.041	0.143	0.163	-0.112	0.141	0.089
单株粒重 GW	0.370	-0.033	0.057	0.243	-0.284	0.180	0.235
千粒重 TGW	0.039	-0.021	0.086	0.002	-0.517	0.453	0.173
米梗糯 G	-0.039	0.012	-0.134	0.361	0.118	-0.241	0.653
抗倒性 LR	0.020	0.265	-0.159	-0.244	0.283	0.021	0.460
特征值 Eigenvalue	3.866	3.101	2.100	1.593	1.480	1.125	1.085
贡献率(%) Contribution rate	20.346	16.321	11.054	8.384	7.787	5.922	5.712
累计贡献率(%) Cumulative contribution rate	20.346	36.667	47.721	56.105	63.892	69.813	75.525

## 2.5 聚类分析

根据主成分分析的结果,用离差平方和法对 69 份穆子种质资源的 19 个农艺性状数据的聚类分析,在卡方距离为 36.29 处可以把全部种质资源划分为 2 个类群,在卡方距离为 15.12 处每个类群可再分为 2 个亚群(图 3)。

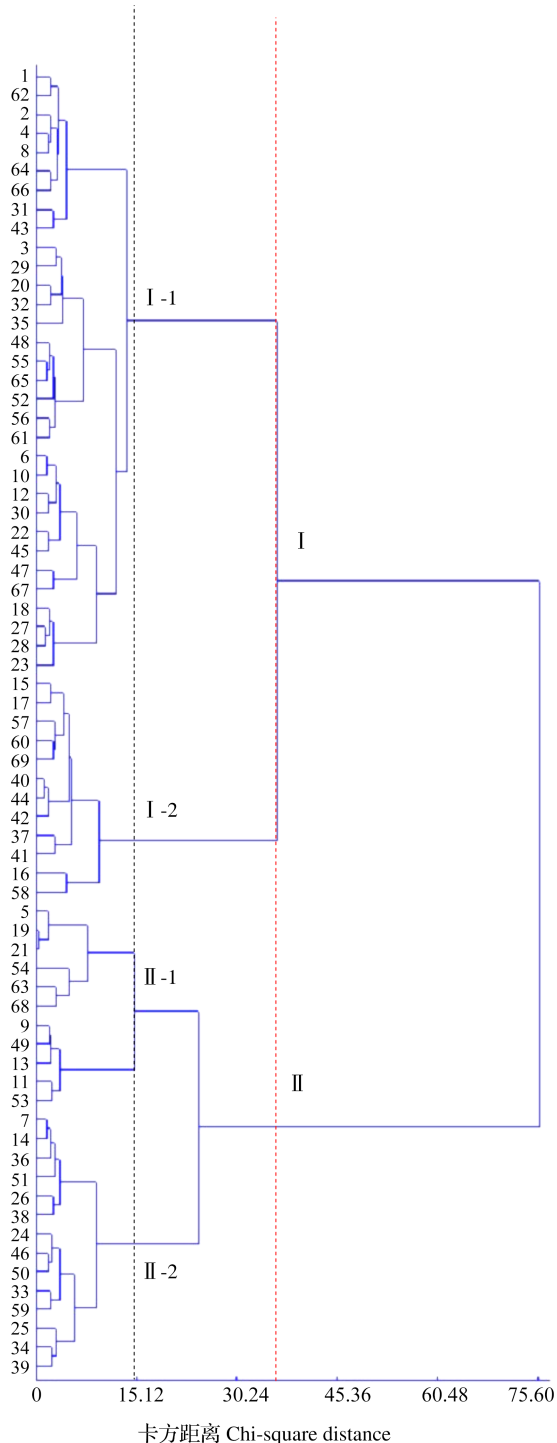


图 3 穆子种质资源聚类图

Fig.3 Cluster graph of *Eleusine coracana* (L.) Gaertn. germplasm resources

第 I 类群包括 44 份种质,其主要特征是单株平均草重(83.78 g)、穗重(23.01 g)、粒重(12.46 g)均较低,分蘖性及分枝性均较弱,该类群资源为株型小、生物量小、产量较低的种质。

第 II 类群包括 25 份种质,其主要特征是单株平均草重(180.40 g)、穗重(48.75 g)、粒重(22.59 g)均较高,分蘖性及分枝性均较弱,该类群资源为株型大、生物量大、产量较高的种质。

亚群 I -1 包括 32 份种质,亚群 I -2 包括 12 份种质。与亚群 I -1 相比,亚群 I -2 株型、生物量更小,产量更低,抗倒性更强,且亚群 I -2 叶鞘及幼苗叶色颜色更深。

亚群 II -1 包括 11 份种质,亚群 II -2 包括 14 份种质。亚群 II -1 种质均为粳性穆子,亚群 II -2 与亚群 II -1 相比生物量较小,产量较低,分枝性较弱。

## 2.6 优异种质筛选

通过田间调查和数据分析,从 69 份穆子种质资源中筛选了 12 份综合表现好的材料,相关性状见表 7。根据性状鉴定结果,综合考虑早熟(全生育期  $\leq 110$  d)、高产(单株粒重  $\geq 30$  g)、矮生(主茎长度  $\leq 100$  cm)、大粒(千粒重  $> 2$  g)、高生物量(单株草重  $\geq 150$  g)等性状,初步筛选 4 类优异种质。

糯性资源 2 份:白水穆子(图 4A),高产糯性优质资源,来源于宜章县赤石乡白水村,单株草重、单株穗重和单株粒重都较大,口感好,同时也可以作饲草用;杉木穆子,矮生早熟糯性资源,来源于新化县吉庆镇杉木冲村,抗倒伏,当地一般用来磨粉与糯米粉混合做穆子粑粑,可以当点心,也可以做菜,是传统佳肴新化三大碗之一“穆子粑粑蒸鸡”的主要原料。

粒用与饲草兼用型资源 3 份:秋坪穆子(图 4B),来源于桂东县青山乡彩洞村,高产,单株草重、单株穗重和单株粒重都较大,抗倒;大平穆子(图 4C),来源于双牌县永江乡大平村,高产、大粒,植株矮,抗倒;永丰穆子,长穗高产资源,来源于城步县西岩镇永丰村,主穗长度大且分枝数较多,早熟、高产、生物量大,综合性状优良。

单株草重大、适合作饲草的优异资源 4 份:和平穆子,来源于新化县圳上镇和平村,早熟、矮生抗倒伏、耐贫瘠;瓦窑穆子(图 4D),来源于洪江市熟坪乡高宝村,早熟、主穗分枝数较多;张家岭穆子(图 4E),来源于新化县吉庆镇张家岭村,单株草重和单株穗重是 69 份资源中最大的,生育期较短,抗倒性好;干家穆子,来源于新化县圳上镇干家村,早熟、矮生抗倒伏、耐旱、耐贫瘠。



表 7 筛选的优异种质资源  
Table 7 Selected elite germplasm resources

编号 Number	名称 Name	主茎长度 ( cm ) LS	主穗长度 ( cm ) SL	主穗 分枝数 NB	全生育期 ( d ) GP	单株草重 ( g ) WP	单株穗重 ( g ) SW	单株粒重 ( g ) GW	千粒重 ( g ) TGW	米粳糯 G	抗倒性 LR
5	和平穆子	96.9	10.9	7.3	106	189.9	40.6	17.7	1.2	1	1
13	张家岭穆子	110.1	14.5	6.7	105	292.4	69.4	24.5	1.7	1	1
16	杉木穆子	77.2	6.3	3.7	100	28.6	6.5	3.2	2.0	2	1
19	干家穆子	97.4	9.1	4.3	110	192.2	38.3	18.7	2.0	1	1
23	添壁长糯穆子	107.4	21.4	8.3	133	80.3	29.4	15.4	1.8	2	1
25	大平穆子	95.1	10.4	5.3	134	158.5	45.7	25.3	2.1	1	1
33	瓦窑穆子	107.4	10.1	8.3	109	152.4	58.7	24.9	1.9	1	2
36	群山穆子	106.2	16.0	6.7	113	122.0	50.5	30.7	2.5	1	1
46	白水穆子	131.2	8.1	7.7	122	172.0	53.7	33.7	1.9	2	2
50	秋坪穆子	117.1	11.1	7.0	126	173.9	59.7	29.3	1.9	1	1
53	永丰穆子	120.2	18.6	8.3	108	260.4	64.8	32.9	1.8	1	2
64	上阳穆子	120.4	16.3	9.3	110	135.8	21.2	6.6	2.2	1	2



A: 白水穆子(高产); B: 秋坪穆子(主穗分枝多); C: 大平穆子(长穗); D: 瓦窑穆子(穗紧抱);  
E: 张家岭穆子(早熟); F: 上阳穆子(矮生)  
A: Qiuping finger millet ( main spike branched more ), B: Baishui finger millet ( high-yield ), C: Daping finger millet ( long spike ),  
D: Wayao finger millet ( compact spike ), E: Zhangjialing finger millet ( early mature ), F: Shangyang finger millet ( dwarf )

图 4 部分优异穆子资源  
Fig.4 Some of the selected elite germplasm resources of *Eleusine coracana* ( L. ) Gaertn.

长穗资源 3 份: 添壁长糯穆子, 长穗糯性资源, 来源于隆回县岩口镇添壁村, 主穗分枝较多且抗倒; 群山穆子, 长穗大粒型资源, 来源于涟源市古塘乡群山村, 高产、抗倒性好; 上阳穆子(图 4F), 长穗早熟型资源, 来源于常宁市塔山乡上阳村, 主穗分枝数多, 千粒重也较大。

### 3 讨论

随着国民经济的增长, 人民生活日益改善, 人们饮食结构不断优化, 未来对食物健康提出了更高的要求, 穆子是一种极具特色的粮食作物, 而国内对穆子的相关研究较少。穆子种质资源的有效利用是穆子品种改良的关键, 研究种质资源最基本的方法和途径是农艺性状的鉴定和描述。加强对穆子地方种质资源的鉴定评价, 一是可以筛选出高产、优质等适用于生产的优异资源, 二是可为穆子后续的充分利用挖掘优异基因。

通过对湖南、广西、江西以及西藏 40 个县市收集的 69 份穆子种质资源的表型评价, 发现 24.64% 的资源分布在海拔 201~400 m 地区, 50.72 % 的资源分布在海拔 401~600 m 地区, 说明穆子在中低海拔地区分布较为广泛, 表明这些地区可作为今后资源考察收集的重点区域。

对 19 个农艺性状进行遗传多样性分析, 发现穆子种质资源具有丰富的遗传变异, 其中, 性状变异系数最大的是单株草重, 其次是单株穗重, 遗传多样性指数最高的是主穗分枝数, 其次是主茎长度和一株茎数。8 个质量性状中有 5 个质量性状的多样性指数超过 1.00, 其中粒色的多样性指数最高。上述结果表明 69 份穆子种质资源类型多样, 可为穆子的种质创新和育种提供丰富材料。

主成分分析用于作物农艺性状的评价和筛选, 既能把握其综合性状表现, 又能简化选择程序, 且更具有科学性<sup>[17]</sup>。通过主成分分析发现, 19 个性状分为 7 个主成分, 分别反映了穆子的产量水平、主穗特征、叶色、全生育期、千粒重、抗倒性等, 累计贡献率 75.525%, 可根据这 7 个主要特征, 有针对性地发掘育种中间材料, 为资源的有效利用提供依据。

进一步的聚类分析将 69 份资源分为两大类群, 类群间种质的单株平均草重、穗重、粒重有明显差异, 但在聚类分析中这些种质在地理来源上没有呈现明显的关联性, 这与万述伟等<sup>[18]</sup>和王丽侠等<sup>[19]</sup>的研究结果是一致的, 该现象可能是由于收集的地区间引种等因素造成的。通过性状表现及相关分

析, 从 69 份穆子种质中筛选了长穗、糯性、饲草型、粒饲兼用型 4 类优异资源共 12 份, 可用于生产, 也可作为穆子育种的亲本材料。加快推动以上优异穆子资源的合理利用, 将有助于提升穆子的丰产性、抗逆性等, 大幅度提升我国当前的穆子栽培水平。

以上虽对 69 份穆子资源进行了表型鉴定与评价, 但是, 目前国内没有统一的穆子种质资源描述规范和数据标准, 此次调查、考种的方法参照的是《谷子种质资源描述规范和数据标准》, 因此统计的性状具有一定的主观性; 而且用形态学标记对作物进行研究, 数量性状很易受到自然条件和其他环境因素的影响, 得到的结论往往不够完善, 因此下一步需要利用分子标记对穆子种质资源进行深入的遗传多样性分析和基因挖掘, 揭示其内在的遗传信息, 提高资源利用效率。

### 参考文献

- [1] Liu Q, Triplett J K, Wen J. Allotetraploid origin and divergence in *Eleusine* (Chloridoideae, Poaceae): evidence from low-copy nuclear gene phylogenies and a plastid gene chronogram. *Annals of Botany*, 2011, 108 (7): 1287-1298
- [2] Kumar A, Metwal M, Kaur S, Gupta A K, Puranik S, Singh S, Singh M, Gupta S, Babu B K, Sood S, Yadav R. Nutritional value of finger millet [*Eleusine coracana* (L.) Gaertn], and their improvement using omics approaches. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 934
- [3] Hilu K W, De Wet J M J, Harlan J R. Archeobotany and the origin of finger millet. *American Journal of Botany*, 1979, 66: 330-333
- [4] Joshi C, Subramanya S, Ravikumar R L. Evaluation of morphological and molecular diversity among the genotypes of *Eleusine africana*, cultivated and weedy types of finger millet (*Eleusine coracana* L. Gaertn.). *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2018, 7 (2): 1836-1848
- [5] 赵丽兰, 杨子彪, 郭向周. 龙爪稷替代饲喂对荷斯坦奶牛奶质的影响初探. *中国农业信息*, 2017 (4): 51-53  
Zhao L L, Yang Z B, Guo X Z. Preliminary study on the effect of alternative feeding of finger millet on milk quality of Holstein milk. *Agricultural Information of China*, 2017 (4): 51-53
- [6] Chethan S, Malleshi N G. Finger millet polyphenols: optimization of extraction and the effect of pH on their stability. *Food Chemistry*, 2007, 105 (2): 862-870
- [7] Singh N, David J, Thompkinson D K. Effect of roasting on functional and phytochemical constituents of finger millet (*Eleusine coracana* L.). *The Pharma Innovation Journal*, 2018, 7 (4): 414-418
- [8] Shobana S, Krishnaswamy K, Sudha V. Finger millet (*Ragi*, *Eleusine coracana* L.): a review of its nutritional properties, processing, and plausible health benefits. *Advances in Food and Nutrition Research*, 2013, 69 (1): 1-39
- [9] Saleh S M, Zhang Q, Chen J, Shen Q. Millet grains, nutritional

- quality, processing and potential health benefits. *Comprehensive Reviews in Food Science and Technology*, 2013, 12: 281-295
- [ 10 ] Gull A, Prasad K, Kumar P. Optimization and functionality of millet supplemented pasta. *Food Science and Technology*, 2015, 35( 4 ): 626-632
- [ 11 ] Muthamilarasan M, Dhaka A, Yadav R, Prasad M. Exploration of millet models for developing nutrient rich graminaceous crops. *Plant Science*, 2016, 242: 89-97
- [ 12 ] Amadou I, Mahamadou E G, Le G W. Millets, nutritional composition, some health benefits and processing-a review. *Food Science and Technology*, 2013, 25( 7 ): 501-508
- [ 13 ] Ramashiaa S E, Gwatab E T, Meddows-Taylorc S, Anyasia T A, Jideania A I O. Some physical and functional properties of finger millet( *Eleusine coracana* ) obtained in sub-Saharan Africa. *Food Research International*, 2018, 104: 110-118
- [ 14 ] 王双辉, 陈致印, 谢晶, 余书齐, 谢彦瑰, 吴福平, 罗育才. 糜子营养成分及功能利用研究进展. *食品工业科技*, 2017, 38( 13 ): 329-334  
Wang S H, Chen Z Y, Xie J, Yu S Q, Xie Y G, Wu F P, Luo Y C. Research progress in nutrient composition, function and utilization of finger millet. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38( 13 ): 329-334
- [ 15 ] 吴应齐, 王声森, 应国华, 姚理武, 彭小博, 余久华. 3 个不同种子来源糜子农艺性状及营养成分比较与评价. *浙江林业科技*, 2017, 37( 5 ): 29-34  
Wu Y Q, Wang S M, Ying G H, Yao L W, Peng X B, Yu J H. Comparison and evaluation of agronomic traits and nutrient content of *Eleusine coracana* from different areas. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 2017, 37( 5 ): 29-34
- [ 16 ] 郝曦煜, 杨涛, 梁杰, 郭文云, 肖焕玉, 王英杰, 马信飞, 刘婷婷, 宗绪晓. 160 份外引鹰嘴豆种质主要农艺性状的遗传多样性分析. *植物遗传资源学报*, 2020, 21( 4 ): 875-883  
Hao X Y, Yang T, Liang J, Guo W Y, Xiao H Y, Wang Y J, Ma X F, Liu T T, Zong X X. Genetic diversity analysis of major agronomic traits in 160 introduced chickpea( *Cicer arietinum* L. ) germplasm resources. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2020, 21( 4 ): 875-883
- [ 17 ] 张向前, 刘景辉, 齐冰洁, 郭晓霞, 焦伟红. 燕麦种质资源主要农艺性状的遗传多样性分析. *植物遗传资源学报*, 2010, 11( 2 ): 168-174  
Zhang X Q, Liu J H, Qi B J, Guo X X, Jiao W H. Cluster diversity analysis of the main agronomic traits in oat germplasm. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2010, 11( 2 ): 168-174
- [ 18 ] 万述伟, 宋凤景, 郝俊杰, 张晓艳, 李红卫, 邵阳, 赵爱鸿. 271 份豌豆种质资源农艺性状遗传多样性分析. *植物遗传资源学报*, 2017, 18( 1 ): 10-18  
Wan S W, Song F J, Hao J J, Zhang X Y, Li H W, Shao Y, Zhao A H. Genetic diversity of agronomic traits in 271 pea germplasm resources. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2017, 18( 1 ): 10-18
- [ 19 ] 王丽侠, 程须珍, 王素华. 中国饭豆种质资源遗传多样性及核心种质构建. *植物遗传资源学报*, 2014, 15( 2 ): 242-247  
Wang L X, Cheng X Z, Wang S H. Genetic diversity analysis and a core collection construction in Chinese rice bean( *Vigna umbellata* ). *Journal of Plant Genetic Resources*, 2014, 15( 2 ): 242-247