

# 谷子主要表型性状与籽粒叶酸含量的相关分析

杨馥熔, 杜冰, 郭浩杰, 王成, 张富厚, 孟超敏

(河南科技大学农学院/河南省旱地作物种质资源利用工程研究中心, 河南 洛阳 471000)

**摘要:**于2022年6月在河南省洛阳市汝阳县农场,采用随机区组设计种植66份新优谷子品种,测定成熟期不同品种的8个农艺性状指标、12个品质性状指标及籽粒叶酸含量,通过变异系数分析、相关性分析、聚类分析和主成分分析筛选出高叶酸谷子品种并确定谷子高叶酸评价指标。结果表明:66个谷子品种农艺性状的变异范围为7.69%~22.36%,变异系数最大的是穗下节间长度,变异系数最小的是叶宽;品质性状的变异范围为1.45%~39.34%,变异系数最大的是粗纤维含量,变异系数最小的是碳水化合物含量。籽粒叶酸含量在0.89~2.80  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间,叶酸含量最高的是济糯米2号,叶酸含量最低的是中谷989。相关性分析结果表明:谷子叶酸含量与碳水化合物和蛋氨酸含量呈极显著正相关,相关系数分别为0.120和0.108;与含水量,粗蛋白干基、粗脂肪、赖氨酸、苯丙氨酸和苏氨酸含量呈极显著负相关,相关系数分别为-0.131、-0.150、-0.152、-0.113、-0.134和-0.129。聚类分析结果显示,66个谷子品种可分成3个类群,第I类群植株较矮,穗长和穗下节间长度较小;第II类群营养成分及叶酸含量较高;第III类群穗长较长,穗粗和茎粗较大。主成分分析结果表明,谷子21个指标可分为7个主成分,累计贡献率达86.144%。综上所述,谷子籽粒叶酸含量和品质性状间关系密切,碳水化合物和蛋氨酸含量可作为筛选高叶酸谷子品种的重要指标。

**关键词:**谷子;籽粒叶酸含量;表型;相关性;聚类分析

**中图分类号:**S515;S32 **文献标志码:**A

## Correlation analysis between main phenotypic traits and grain folic acid content of millet

YANG Furong, DU Bing, GUO Haojie, WANG Cheng, ZHANG Fuhou, MENG Chaomin

(College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Henan Dryland Crop Germplasm Resources Utilization Engineering Research Center, Luoyang, Henan 471000, China)

**Abstract:** In June 2022, a randomized block group design was employed to plant 66 new superior millet varieties at Ruyang County farm, Luoyang City, Henan Province. The aim was to evaluate eight agronomic traits, twelve quality traits, and seed folate content in millet varieties at the maturity stage. The goal was to identify high-folate millet varieties and establish evaluation indexes for high folate content in millet using coefficient of variation analysis, correlation analysis, cluster analysis, and principal component analysis. The study found that among the 66 millet varieties, the agronomic traits varied between 7.69% and 22.36%, with the length of the internode under the spike having the highest coefficient of variation and the width of the leaf having the lowest. The quality traits varied between 1.45% and 39.34%, with the crude fiber content having the highest coefficient of variation and the carbohydrate content having the lowest. The folate content of the seeds ranged from 0.89  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  to 2.80  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ . Jिनuomi 2 had the highest folate content, while Zhonggu 989 had the lowest. The results of the correlation analyses indicated that millet folate content was positively correlated with carbohydrate and methionine content, and the correlation coefficients were 0.120 and 0.108, respectively. The millet folate content was negatively correlated with water content, crude protein dry basis, crude fat, lysine, phenylalanine, and threonine content, and the correlation coef-

收稿日期:2024-03-14

修回日期:2024-09-07

**基金项目:**河南省科技攻关项目(242102110278);河南省产业科技特派员项目(2018HNCYTPY01);河南省旱地绿色智慧农业特色骨干学科群建设项目(17100001)

**作者简介:**杨馥熔(1999-),女,河南驻马店人,硕士研究生,研究方向为谷子遗传育种与栽培。E-mail:2659950786@qq.com

**通信作者:**孟超敏(1977-),男,陕西咸阳市人,副教授,主要从事旱地特色作物遗传育种与栽培研究。E-mail:chaominm@haust.edu.cn

ficients were  $-0.131$ ,  $-0.150$ ,  $-0.152$ ,  $-0.113$ ,  $-0.134$  and  $-0.129$ , respectively. These correlations were highly significant. The cluster analysis results indicated that the 66 millet varieties could be classified into three groups. Group I consisted of shorter plants with smaller spike length and internode length under the spike. Group II had higher nutrient and folate contents. Group III had longer spike length and larger spike and stem thickness. The principal component analysis results showed that the 21 millet indexes could be divided into 7 principal components, cumulatively contributing to 86.144%. In summary, there was a strong correlation between the folate content and quality traits in millets. Carbohydrate and methionine content can serve as important indicators for screening high folate millet varieties.

**Keywords:** millet; grain folic acid content; phenotype; correlation; cluster analysis

谷子(*Setaria italica* L.)属于禾本科植物,起源于中国,在我国北方地区广泛种植<sup>[1]</sup>,具有耐贫瘠、抗旱性强以及适应性广等特性<sup>[2]</sup>,其籽粒中含有丰富的营养物质,包括膳食纤维、维生素、叶酸等<sup>[3-4]</sup>,是重要的药食营养作物<sup>[5]</sup>。叶酸属于维生素B9,在菠菜中首次被发现<sup>[6]</sup>,参与DNA合成、氨基酸代谢、细胞分裂等一系列生化反应<sup>[7]</sup>,是人体必需的营养物质之一<sup>[8]</sup>。因此探明谷子高叶酸评价指标,选育与种植高叶酸谷子品种,是目前解决人体叶酸缺乏的途径之一。

农艺性状和品质性状是评估作物产量和营养品质的重要依据。白玉婷等<sup>[9]</sup>将31个品种的谷子进行农艺性状相关性分析,研究结果显示,穗长、穗粗、单穗重、穗粒重和千粒重等农艺性状与谷子产量之间存在极显著的正相关关系,而茎粗与产量之间则呈极显著负相关关系。宁娜<sup>[10]</sup>发现,谷子的营养成分以及品质特征在不同地区差异较大,除了谷子黄色素、蛋白质、脂肪等营养成分在不同地区含量不同外,谷子的粒色、米色、籽粒大小等也存在差异。叶酸在人体细胞分裂增殖、代谢途径调控、心脏组织发育分化、神经系统功能完备等方面起着决定性作用,是谷子重要的品质性状<sup>[11]</sup>。相关研究表明,谷子籽粒叶酸含量与株高和生育期相关性较强<sup>[12]</sup>。目前,有关谷子农艺性状和品质性状的报道较多,主要包括农艺性状和产量之间的相关性<sup>[13-15]</sup>,农艺性状与营养品质的相关性及其差异性<sup>[16-17]</sup>,以及食用品质和营养品质的相关性<sup>[18]</sup>,关于谷子农艺性状和品质性状与其籽粒叶酸含量之间关系的报道较少。本研究以引进的66份谷子新优品种为材料,对成熟期谷子的农艺性状和品质性状及其籽粒叶酸含量进行相关性分析、聚类分析和主成分分析,旨在为阐明影响谷子籽粒叶酸含量的因素提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

供试材料为河南科技大学旱地特色作物遗传育种与栽培课题组引进的66个谷子品种,种质名称

及其来源地见表1。

### 1.2 试验设计

大田试验于2022年6月在河南省洛阳市河南科技大学农学院汝阳县试验农场开展,采用随机区组设计,每个小区长2 m,宽1.1 m,种植3行,行距0.36 m,四周设置1 m的保护行。每个品种3次重复,66个谷子品种,共计198个小区。6月中下旬播种,播前深耕施肥,播后除草浇水,及时定苗补苗,采用常规田间管理方式。

### 1.3 农艺性状指标的测定

参照《谷子种质资源描述规范和数据标准》<sup>[19]</sup>,在成熟期每个小区取3株,对谷子的农艺性状指标:株高(PH)、穗下节间长度(LIS)、叶长(LL)、叶宽(WL)、穗长(SL)、穗粗(SW)、茎粗(SD)和千粒重(TSW)进行测定。

### 1.4 品质性状指标的测定

参考田翔等<sup>[20]</sup>的方法,使用近红外分析仪Pertem DA7250对成熟期谷子的籽粒品质:水分(Water content, WC)、碳水化合物(Carbohydrate, CAR)、粗蛋白干基(Crude protein, CP)、粗脂肪(Crude fat, CFT)、粗纤维(Crude fibre, CFB)、粗灰分(Crude ash, CA)、赖氨酸(Lysine, Lys)、苯丙氨酸(Phenylalanine, Phe)、蛋氨酸(Methionine, Met)、亮氨酸(Leucine, Leu)、色氨酸(Tryptophan, Try)和苏氨酸(Threonine, Thr)含量进行测定,每个小区3次重复。

### 1.5 叶酸含量的测定

采用侯思宇等<sup>[21]</sup>方法提取叶酸(folic acid),方法如下:将0.3 g小米粉与1 mL叶酸提取液混合均匀;加入20  $\mu$ L  $\alpha$ -淀粉酶,室静置40 min;加入150  $\mu$ L蛋白酶,37 $^{\circ}$ C恒温培养1 h;水浴煮沸10 min,冰浴10 min,14 000 rpm,4 $^{\circ}$ C离心20 min;取上清,加入大鼠血清,混匀后于37 $^{\circ}$ C恒温培养2 h;水浴煮沸10 min、冰浴10 min,14 000 rpm,4 $^{\circ}$ C离心20 min;吸取20  $\mu$ L上清过滤后进行高效液相色谱分析,每个小区重复3次。叶酸测定的色谱条件为:流动相0.01 mol  $\cdot$  L<sup>-1</sup> KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>:乙腈=89:11,pH值为6.3;柱温

表 1 供试谷子材料信息

Table 1 Information of tested foxtail millet materials

编号 Code	种质名称 Name of germplasm	来源地 Origin	编号 Code	种质名称 Name of germplasm	来源地 Origin
1	中谷 1 号 Zhonggu 1	北京 Beijing	34	豫谷 37 Yugu 37	河南 Henan
2	中谷 2 号 Zhonggu 2	北京 Beijing	35	豫谷 40 Yugu 40	河南 Henan
3	中谷 15 Zhonggu 15	北京 Beijing	36	豫谷 41 Yugu 41	河南 Henan
4	中谷 989 Zhonggu 989	北京 Beijing	37	豫谷 43 Yugu 43	河南 Henan
5	中杂谷 5 号 Zhongzagu 5	北京 Beijing	38	豫谷 45 Yugu 45	河南 Henan
6	中杂谷 32 Zhongzagu 32	北京 Beijing	39	豫谷 47 Yugu 47	河南 Henan
7	中杂谷 36 Zhongzagu 36	北京 Beijing	40	豫谷 48 Yugu 48	河南 Henan
8	张杂谷 26 Zhangzagu 26	河北 Hebei	41	豫杂谷 1 号 Yuzagu 1	河南 Henan
9	长生 07 Changsheng 07	山西 Shanxi	42	金谷 5 号 Jingu 5	河北 Hebei
10	长生 13 Changsheng 13	山西 Shanxi	43	东昌金谷 Dongchangjingu	河北 Hebei
11	晋谷 21 Jingu 21	山西 Shanxi	44	冀谷 37 Jigu 37	河北 Hebei
12	晋品谷 5 号 Jipingu 5	山西 Shanxi	45	冀谷 38 Jigu 38	河北 Hebei
13	长农 35 Changnong 35	山西 Shanxi	46	冀谷 39 Jigu 39	河北 Hebei
14	长农 47 Changnong 47	山西 Shanxi	47	冀谷 41 Jigu 41	河北 Hebei
15	济谷 11 Jigu 11	山东 Shandong	48	冀谷 42 Jigu 42	河北 Hebei
16	济谷 13 Jigu 13	山东 Shandong	49	冀谷 48 Jigu 48	河北 Hebei
17	济谷 17 Jigu 17	山东 Shandong	50	天粟 1 号 Tiansu 1	河北 Hebei
18	济谷 19 Jigu 19	山东 Shandong	51	天粟 2 号 Tiansu 2	河北 Hebei
19	济谷 20 Jigu 20	山东 Shandong	52	沧谷 9 号 Canggu 9	河北 Hebei
20	济谷 21 Jigu 21	山东 Shandong	53	朝谷 58 Chaogu 58	辽宁 Liaoning
21	济谷 22 Jigu 22	山东 Shandong	54	衡谷 36 Henggu 36	河北 Hebei
22	济白米 1 号 Jibaimi 1	山东 Shandong	55	华谷 12 Huagu 12	山东 Shandong
23	济糯米 2 号 Jiniuomi 2	山东 Shandong	56	京谷 3 号 Jinggu 3	北京 Beijing
24	豫谷 18 Yugu 18	河南 Henan	57	京谷 4 号 Jinggu 4	北京 Beijing
25	豫谷 27 Yugu 27	河南 Henan	58	九谷 25 Jiugu 25	吉林 Jilin
26	豫谷 28 Yugu 28	河南 Henan	59	龙谷 39 Longgu 39	黑龙江 Heilongjiang
27	豫谷 29 Yugu 29	河南 Henan	60	洛谷 05 Luogu 05	河南 Henan
28	豫谷 30 Yugu 30	河南 Henan	61	农谷 09-6 Nonggu 09-6	河南 Henan
29	豫谷 31 Yugu 31	河南 Henan	62	宛谷 1 号 Wangu 1	河南 Henan
30	豫谷 33 Yugu 33	河南 Henan	63	宛谷 2 号 Wangu 2	河南 Henan
31	豫谷 34 Yugu 34	河南 Henan	64	浙粟 1 号 Zhesu 1	浙江 Zhejiang
32	豫谷 35 Yugu 35	河南 Henan	65	浙粟 2 号 Zhesu 2	浙江 Zhejiang
33	豫谷 36 Yugu 36	河南 Henan	66	天粟 10 号 Tiansu 10	河北 Hebei

25℃;进样量为 20 μL;流速为 1 mL · min<sup>-1</sup>;紫外检测波长 280 nm; C18 色谱柱 (4.6 nm × 150 nm × 5 μm)。

### 1.6 数据统计分析

使用 SPSS 16.0 进行变异系数分析、Pearson 相关分析、聚类分析和主成分分析,利用 Origin 2018 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 谷子农艺性状、品质性状和叶酸含量分析

2.1.1 谷子农艺性状分析 为明确谷子品种农艺性状的整体特征,本研究对 66 个谷子品种的农艺性状进行变异系数分析(表 2)。结果表明,穗下节间长度、茎粗、株高、穗粗、穗长、千粒重、叶长和叶宽的变异系数依次递减。变异系数最大的是穗下节

间长度,为 22.36%,变幅为 7.86~22.62 cm,说明谷子的穗下节间长度变异丰富,较易受到环境条件和栽培措施的影响,因此可通过调整种植条件等措施来改变穗下节间长度;变异系数最小的是叶宽,为 7.69%,变幅为 2.48~3.72 cm,说明谷子的叶宽长度较为稳定,很难通过栽培技术手段改变这一性状。其他农艺性状的变异系数介于两者之间,说明通过改变栽培条件,可在一定程度上改变这些农艺性状指标。从偏度和峰度的结果可以看出,各农艺性状指标均呈现出近正态分布。

2.1.2 谷子品质性状分析 为明确谷子品种品质性状的整体特征,本研究对 66 个谷子品种的品质性状进行变异系数分析(表 3)。结果表明,品质性状变异系数大小排列为粗纤维>赖氨酸>蛋氨酸>粗脂肪>亮氨酸>苏氨酸>粗蛋白干基>苯丙氨酸>色氨酸>粗灰分>水分>碳水化合物。粗纤维含量的变异系

数最大,为39.34%,变幅为0.15%~1.43%,说明谷子粗纤维含量变异丰富,不同条件下含量有差异,因此通过栽培手段可以改变粗纤维的含量;碳水化合物含量的变异系数最小,为1.45%,变幅为71.55%~78.48%,说明谷子碳水化合物含量最为稳定,不容易发生变化。其他品质性状的变异系数位于两者之间,因此通过改变种植条件等方式,可在一定程度上改变这些品质性状指标。由偏度和峰度可知,各品质性状指标均呈现近正态分布。

2.1.3 谷子叶酸含量特性 以不同浓度的叶酸标准品为横坐标,以对应的峰面积为纵坐标,绘制叶酸标准曲线(图1)。计算得到线性回归方程: $y =$

$365854x+91620$ ,相关系数  $R^2 = 0.999$ ,线性关系良好。将样品测得的峰面积代入叶酸标准曲线方程中,即可计算出样品中叶酸的含量。谷子叶酸含量的总体特性见图2和表4,由图2可知,叶酸含量最高的3个品种依次是13号>53号>14号,对应的品种分别为济糯米2号、豫谷41和豫谷18;叶酸含量最低的3个品种依次为5号<62号<63号,对应的品种分别为长生13、中谷15和中谷989。由表3偏度和峰度系数可以看出,谷子叶酸含量呈现近似正态分布,66个谷子品种叶酸平均含量为  $1.49 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ,变幅为  $0.89 \sim 2.80 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ,变异系数为27.52%,这表明不同品种之间叶酸含量差异较大。

表2 谷子农艺性状的统计分析

Table 2 Statistical analysis of agronomic traits of foxtail millet

统计值 Statistics	PH/cm	LIS/cm	LL/cm	WL/cm	SL/cm	SW/mm	SD/mm	TSW/g
变幅 Range	86.53~172.31	7.86~22.62	33.47~53.69	2.48~3.72	17.90~29.08	12.76~28.10	4.21~10.60	1.90~3.09
平均值±标准差 Mean±SD	107.91±13.99	14.18±3.17	41.60±3.39	3.25±0.25	22.62±2.10	21.89±2.83	7.99±1.11	2.57±0.21
变异系数 CV/%	12.96	22.36	8.15	7.69	9.28	12.93	13.89	8.17
偏度 Skewness	2.38	0.08	0.39	-0.60	0.60	-0.40	-0.52	-0.50
峰度 Kurtosis	7.54	0.01	1.79	0.83	0.96	0.98	0.95	1.79

注:PH:株高;LIS:穗下节间长度;LL:叶长;WL:叶宽;SL:穗长;SW:穗粗;SD:茎粗;TSW:千粒重。下同。

Note:PH: Plant height; LIS: Length of internode under spike; LL: Length of leaf; WL: Width of leaf; SL: Spike length; SW: Spike width; SD: Stem diameter; TSW: Thousand seed weight. The same below.

表3 谷子品质性状统计分析/%

Table 3 Statistical analysis of quality character of foxtail millet

统计值 Statistics	WC	CAR	CP	CFT	CFB	CA	Lys	Phe	Met	Leu	Try	Thr
变幅 Range	8.16~9.96	71.55~78.48	7.20~12.40	1.80~5.48	0.15~1.43	1.06~1.43	0.01~0.18	0.42~0.63	0.27~0.46	1.17~1.72	0.26~0.35	0.28~0.43
平均值±标准差 Mean±SD	9.58±0.25	74.25±1.08	10.53±0.84	4.70±0.43	0.61±0.24	1.25±0.06	0.13±0.02	0.54±0.04	0.30±0.03	1.37±0.12	0.29±0.02	0.37±0.03
变异系数 CV/%	2.60	1.45	7.98	9.15	39.34	4.80	15.38	7.41	10.00	8.76	6.90	8.11
偏度 Skewness	-3.05	0.13	-0.20	-4.67	1.04	0.32	-1.82	0.44	3.21	1.10	0.81	0.31
峰度 Kurtosis	14.79	2.94	3.14	32.17	2.09	1.33	8.17	0.67	16.02	0.51	-0.29	1.19

注:WC:水分含量;CAR:碳水化合物含量;CP:粗蛋白含量(干基);CFT:粗脂肪含量;CFB:粗纤维含量;CA:粗灰分含量;Lys:赖氨酸含量;Phe:苯丙氨酸含量;Met:蛋氨酸含量;Leu:亮氨酸含量;Try:色氨酸含量;Thr:苏氨酸含量。下同。

Note:WC:Water content;CAR:Carbohydrate content;CP:Crude protein content;CFT:Crude fat content;CFB:Crude fiber content;CA:Crude ash content;Lys:Lysine content;Phe:Phenylalanine content;Met:Methionine content;Leu:Leucine content;Try:Tryptophan content;Thr:Threonine content. The same below.

## 2.2 谷子农艺性状和品质性状与叶酸含量的相关性分析

由表5可知,谷叶籽粒叶酸含量与叶长、叶宽、茎粗和千粒重呈正相关,与株高、穗下节间长度和穗长呈负相关,但不显著,与穗粗呈极显著负相关。由表6可知,谷子籽粒叶酸含量与碳水化合物、蛋氨酸含量呈极

显著正相关,且相较于其他品质性状指标,高叶酸谷子品种中碳水化合物和蛋氨酸含量也较高(表7),说明碳水化合物和蛋氨酸的合成与谷子籽粒叶酸的合成具有类似规律,提高谷子中的碳水化合物和蛋氨酸含量可显著提升谷子籽粒叶酸含量,而与含水量、粗蛋白干基、粗脂肪、赖氨酸、苯丙氨酸和苏氨酸含量呈极显著负

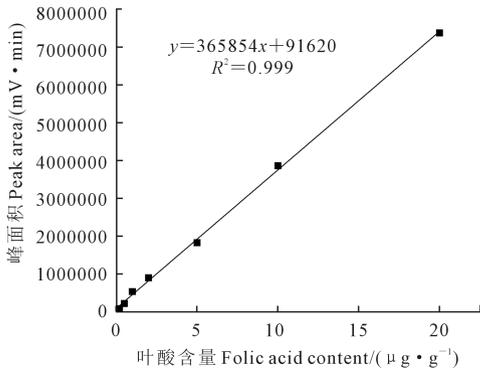


图 1 叶酸标准曲线

Fig.1 Folate standard curve

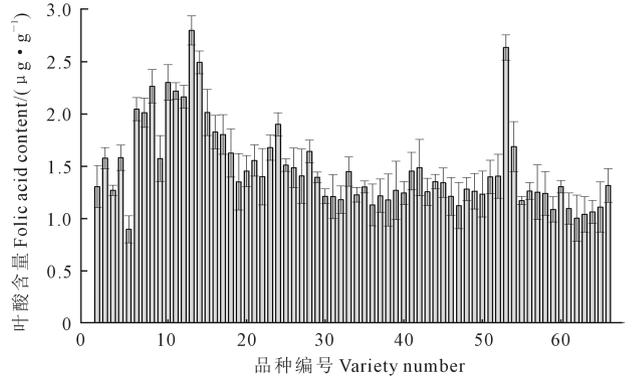


图 2 谷子叶酸含量分布

Fig.2 Distribution of folic acid content in foxtail millet

表 4 谷子叶酸含量总体特性

Table 4 General characteristics of folic acid content in foxtail millet

平均值 Mean /( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )	极小值 Min. /( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )	极大值 Max. /( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )	标准差 Sd.	变异系数 CV/%	偏度系数 Skewness	峰度系数 Kurtosis
1.49	0.89	2.80	0.41	27.52	1.40	1.58

表 5 谷子农艺性状、叶酸含量相关系数

Table 5 Correlation coefficient of agronomic traits and folic acid content of foxtail millet

指标 Index	PH	LIS	LL	WL	SL	SW	SD	TSW	FA
PH	1.000								
LIS	0.214 **	1.000							
LL	0.122 **	0.073	1.000						
WL	0.116 **	0.050	0.214 **	1.000					
SL	0.219 **	-0.056	0.419 **	0.362 **	1.000				
SW	-0.067	-0.185 **	0.202 **	0.500 **	0.298 **	1.000			
SD	0.067	-0.244 **	0.131 **	0.416 **	0.293 **	0.486 **	1.000		
TSW	-0.212 **	-0.098 *	-0.117 **	-0.088 *	-0.054	-0.096 *	-0.105 *	1.000	
FA	-0.029	-0.044	0.070	0.014	-0.041	-0.133 **	0.076	0.032	1.000

注:FA:叶酸含量。\* 和 \*\* 分别表示在  $P<0.05$  和  $P<0.01$  水平下差异显著,下同。

Note: FA:Folic acid content. \* and \*\* indicate significant differences at  $P<0.05$  and  $P<0.01$  levels, respectively. The same below.

表 6 谷子品质性状与叶酸含量间的相关系数

Table 6 Correlation coefficient between quality traits and folic acid content of foxtail millet

指标 Index	WC	CAR	CP	CFT	CFB	CA	Lys	Phe	Met	Leu	Try	Thr	FA
WC	1.000												
CAR	-0.260 **	1.000											
CP	0.221 **	-0.932 **	1.000										
CFT	0.201 **	-0.736 **	0.701 **	1.000									
CFB	0.364 **	0.098 *	-0.145 **	-0.277 **	1.000								
CA	0.447 **	-0.170 **	0.297 **	0.160 **	0.751 **	1.000							
Lys	0.362 **	-0.041	0.183 **	0.297 **	0.515 **	0.855 **	1.000						
Phe	0.374 **	-0.823 **	0.902 **	0.493 **	0.206 **	0.569 **	0.362 **	1.000					
Met	-0.412 **	-0.263 **	0.238 **	-0.304 **	0.031	-0.138 **	-0.466 **	0.298 **	1.000				
Leu	-0.042	-0.858 **	0.861 **	0.390 **	-0.209 **	-0.008	-0.241 **	0.769 **	0.645 **	1.000			
Try	0.027	-0.646 **	0.705 **	0.199 **	0.308 **	0.492 **	0.201 **	0.863 **	0.653 **	0.771 **	1.000		
Thr	0.277 **	-0.904 **	0.964 **	0.584 **	0.039	0.411 **	0.240 **	0.964 **	0.315 **	0.860 **	0.822 **	1.000	
FA	-0.131 **	0.120 **	-0.150 **	-0.152 **	0.025	-0.081	-0.113 **	-0.134 **	0.108 **	-0.047	-0.018	-0.129 **	1.000

相关,随着这些指标含量的增加,叶酸含量出现下降的趋势,通过降低这些指标含量可显著提升谷子籽粒叶酸含量。

### 2.3 谷子主要性状与籽粒叶酸含量的聚类分析

将不同品种谷子的农艺性状、品质性状和叶酸含量进行聚类分析(图 3),结果表明,当欧式距离为

30 时,66 个谷子品种被分为 3 类。各类群主要性状的平均值及差异显著性见表 8,第 I 类群包含 58 个谷子品种,占 87.88%,该类群株高最矮,穗长、穗下节间长度最小,可作为抗倒伏品种培育的潜在材料。第 II 类群包含 6 个品种,占 9.09%,千粒重较大,水分、粗蛋白干基、粗脂肪、粗灰分、苯丙氨酸、蛋

表 7 不同谷子品种品质性状及叶酸含量变化

Table 7 Changes of quality traits and folic acid content of different foxtail millet varieties

品种 Variety	WC/%	CAR/%	CP/%	CFT/%	CFB/%	CA/%	Lys/%
东昌金谷 Dongchangjingu	9.53±0.44	73.03±0.44	11.62±0.25	5.31±0.19	0.92±0.55	1.43±0.12	0.18±0.03
朝谷 58 Chaogu 58	9.61±0.31	73.05±0.43	11.70±0.50	4.86±0.10	0.38±0.30	1.27±0.13	0.13±0.04
冀谷 41 Jigu 41	9.48±0.33	73.71±0.39	11.06±0.29	4.77±0.07	0.42±0.35	1.24±0.09	0.14±0.02
天粟 1 号 Tiansu 1	9.60±0.26	74.14±0.23	10.76±0.18	4.72±0.04	0.33±0.30	1.22±0.08	0.13±0.02
豫谷 33 Yugu 33	9.74±0.30	74.38±0.10	10.03±0.33	4.61±0.15	0.72±0.68	1.25±0.18	0.13±0.05
冀谷 37 Jigu 37	9.44±0.30	74.76±0.22	10.13±0.17	4.68±0.21	0.49±0.33	1.20±0.09	0.12±0.02
豫谷 31 Yugu 31	9.67±0.29	74.97±0.36	9.98±0.29	4.59±0.16	0.23±0.36	1.15±0.09	0.11±0.02
济谷 17 Jigu 17	8.16±0.30	78.48±1.22	7.17±0.97	1.80±0.80	1.43±0.42	1.06±0.15	0.01±0.04

品种 Variety	Phe/%	Met/%	Leu/%	Try/%	Thr/%	FA/( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )
东昌金谷 Dongchangjingu	0.60±0.04	0.31±0.00	1.46±0.03	0.33±0.02	0.40±0.01	1.40±0.27
朝谷 58 Chaogu 58	0.60±0.04	0.33±0.01	1.54±0.05	0.32±0.03	0.41±0.02	1.45±0.14
冀谷 41 Jigu 41	0.55±0.03	0.31±0.01	1.43±0.03	0.29±0.01	0.38±0.01	1.48±0.19
天粟 1 号 Tiansu 1	0.54±0.03	0.31±0.01	1.38±0.02	0.28±0.02	0.37±0.01	1.64±0.11
豫谷 33 Yugu 33	0.51±0.03	0.29±0.01	1.29±0.08	0.27±0.02	0.35±0.02	1.83±0.16
冀谷 37 Jigu 37	0.51±0.03	0.29±0.00	1.29±0.04	0.26±0.01	0.35±0.01	1.90±0.11
豫谷 31 Yugu 31	0.50±0.02	0.29±0.00	1.29±0.04	0.26±0.01	0.35±0.01	2.01±0.22
济谷 17 Jigu 17	0.42±0.05	0.46±0.02	1.30±0.05	0.32±0.01	0.28±0.03	2.26±0.16

表 8 谷子各类群主要性状显著性分析

Table 8 Significance analysis of main traits in various groups of foxtail millet

类群 Group	PH /cm	LIS /cm	LL /cm	WL /cm	SL /cm	SW /mm	SD /mm
I	103.57c	11.89b	41.55b	3.24a	21.73b	22.03a	7.99a
II	131.55b	16.96a	39.22b	3.34a	22.57b	20.39a	7.72a
III	162.76a	13.97ab	50.13a	3.27a	26.74a	22.48a	8.71a

类群 Group	TSW /g	WC /%	CAR /%	CP /%	CFT /%	CFB /%	CA /%
I	2.59a	9.58a	74.45a	10.39b	4.66a	0.61ab	1.25a
II	2.63a	9.60a	72.67b	11.69a	5.02a	0.54b	1.27a
III	1.93b	9.22b	72.42b	11.26ab	4.98a	0.92a	1.19a

类群 Group	Lys /%	Phe /%	Met /%	Leu /%	Try /%	Thr /%	FA /( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )
I	0.13a	0.53b	0.30a	1.35b	0.29b	0.36b	1.49a
II	0.11a	0.59a	0.33a	1.56a	0.32a	0.41a	1.52a
III	0.12a	0.57ab	0.33a	1.54a	0.32a	0.40a	1.20a

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at  $P < 0.05$  level.

氨酸、亮氨酸、色氨酸、苏氨酸和叶酸含量较高,可作为高营养和高叶酸品种深入研究。第 III 类群包括 2 个品种,占 3.03%,穗长较长,茎粗、穗粗较大,增产潜力较大,可作为产量性状的研究材料。

### 2.4 谷子主要性状与籽粒叶酸含量的主成分分析

对 66 个谷子品种的 21 个指标进行主成分分析(表 9),第 I 主成分贡献率为 32.539%,第 II 主成分的贡献率为 16.374%,第 III 主成分的贡献率为 12.670%,第 IV 主成分的贡献率为 7.118%,第 V 主成分的贡献率为 6.994%,第 VI 主成分的贡献率为 5.608%,第 VII 主成分的贡献率为 4.841%。7 个主成分的累计贡献率为 86.144%,因此,将原来的 21 个性

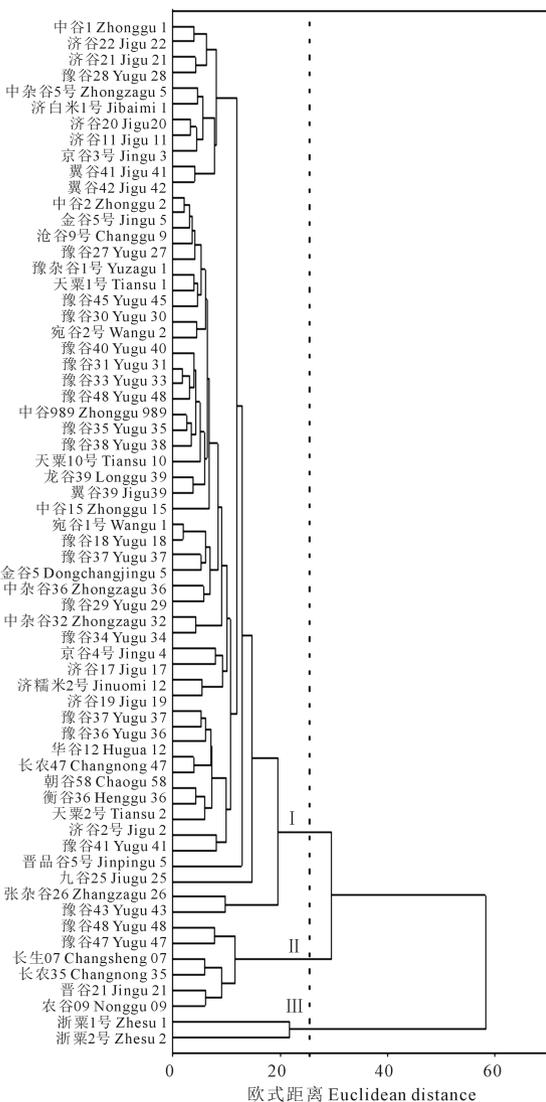


图 3 不同品种谷子主要性状聚类图

Fig.3 Cluster map of main traits of foxtail millet of different varieties

表 9 谷子农艺性状、品质性状和叶酸含量的主成分分析

Table 9 Principal component analysis of agronomic traits, quality traits and folic acid content of millet

性状 Traits	I	II	III	IV	V	VI	VII
<i>PH</i>	0.428	-0.236	<u>0.502</u>	0.106	0.305	0.235	0.194
<i>LIS</i>	0.251	-0.089	-0.296	-0.201	0.374	<u>0.683</u>	0.248
<i>LL</i>	-0.205	-0.072	0.499	-0.223	<u>0.598</u>	-0.320	-0.020
<i>WL</i>	-0.318	0.306	<u>0.484</u>	0.188	-0.170	0.483	0.209
<i>SL</i>	-0.135	0.172	<u>0.555</u>	-0.311	0.501	-0.074	-0.115
<i>SW</i>	-0.374	0.424	<u>0.480</u>	0.233	-0.229	0.085	-0.370
<i>SD</i>	-0.352	0.318	<u>0.563</u>	0.211	-0.384	-0.179	0.167
<i>TSW</i>	0.025	0.038	<u>-0.541</u>	-0.497	-0.212	0.010	-0.080
<i>WC</i>	0.110	<u>0.795</u>	-0.003	-0.147	-0.166	0.261	0.029
<i>CAR</i>	<u>-0.915</u>	-0.158	-0.299	-0.028	0.027	0.028	-0.077
<i>CP</i>	<u>0.963</u>	0.196	0.108	-0.053	-0.046	-0.038	0.002
<i>CFT</i>	<u>0.639</u>	0.623	0.131	-0.026	0.049	-0.124	0.211
<i>CFB</i>	-0.287	-0.252	-0.135	<u>0.778</u>	0.319	0.055	0.063
<i>CA</i>	0.452	0.416	<u>-0.541</u>	0.457	0.161	-0.062	0.021
<i>Lys</i>	0.131	<u>0.704</u>	-0.427	0.162	0.316	-0.292	0.072
<i>Phe</i>	<u>0.983</u>	0.084	0.023	0.023	-0.050	-0.026	-0.040
<i>Met</i>	0.371	<u>-0.862</u>	0.089	0.115	-0.136	0.027	-0.177
<i>Leu</i>	<u>0.918</u>	-0.268	0.237	-0.022	-0.120	0.016	-0.049
<i>Try</i>	<u>0.852</u>	-0.422	-0.005	0.166	-0.058	-0.064	-0.097
<i>Thr</i>	<u>0.979</u>	0.098	0.121	0.002	-0.057	-0.035	-0.005
<i>FA</i>	-0.196	-0.372	0.024	-0.086	-0.225	-0.301	<u>0.764</u>
特征值 Characteristic value	6.833	3.438	2.661	1.495	1.469	1.178	1.017
百分率 Percentage /%	32.539	16.374	12.670	7.118	6.994	5.608	4.841
累计百分率 Cumulative percentage /%	32.539	48.913	61.583	68.701	75.695	81.302	86.144

注:表格中画横线数据代表每一主成分中载荷较高的性状指标。

Note: The data outlined in the table represent the trait index with the higher loads in each principal component.

状转化为 7 个主成分指标。第 I 主成分中,碳水化合物、粗蛋白干基、粗脂肪、苯丙氨酸、亮氨酸、色氨酸和苏氨酸载荷较高,分别为-0.915、0.963、0.639、0.983、0.918、0.852 和 0.979,这些性状主要与谷子的营养品质有关;第 II 主成分中,水分、赖氨酸和蛋氨酸载荷较高,分别为 0.795、0.704 和-0.862,这些性状主要与谷子的含水量和氨基酸含量有关;第 III 主成分中,株高、叶宽、穗长、穗粗、茎粗、千粒重和粗灰分载荷较高,分别为 0.502、0.484、0.555、0.480、0.563、-0.541 和-0.541,这些性状主要与谷子的农

艺性状有关;第 IV 主成分中,粗纤维载荷较高,为 0.778;第 V 主成分中,叶长载荷较高,为 0.598;第 VI 主成分中,穗下节间长度载荷较高,为 0.683;第 VII 主成分中,叶酸载荷较高,为 0.764。

### 3 讨论

#### 3.1 谷子农艺性状、品质性状和叶酸含量的分布

丰富多样的种质资源涵盖着不同的基因背景,而农艺性状和品质性状的多样性对种质资源创新至关重要。本研究以 66 个谷子品种为试验材料,对 21 个主要性状(8 个农艺性状和 12 个品质性状及叶酸含量)进行分析和鉴定,21 个性状指标变异范围为 1.45%~39.34%,与冯链等<sup>[16]</sup>研究的 83 份谷子材料 8 个性状指标的变异系数(9.00%~30.75%),和王海岗等<sup>[22]</sup>研究的 878 个谷子品种 9 个性状的变异系数(7.94%~43.31%)变化趋势一致,由此可以看出,谷子不同品种之间变异丰富,差异较大,为针对性筛选特色谷子品种提供了材料基础。前人对谷子籽粒营养成分的研究主要聚焦于膳食纤维、淀粉、不饱和脂肪酸和低聚糖等领域<sup>[23]</sup>,对谷子籽粒叶酸含量的研究较少。本研究对 66 个谷子品种叶酸含量进行测定,发现不同谷子品种叶酸含量差异较大,谷子籽粒叶酸含量最小值为 0.89  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ,最大值为 2.80  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ,平均值为 1.49  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ,略低于邵丽华等<sup>[24]</sup>和潘炜奇<sup>[12]</sup>研究的谷子叶酸平均含量(分别为 1.53  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 1.74  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ),数量性状的差异可能与谷子材料的选择、播种方式、土壤中养分含量以及气候条件等因素有关。排除外界环境干扰的有效方法就是进行多年多点鉴定,同时可结合分子手段进行遗传学分析,以期更直观准确地反映不同谷子材料叶酸含量差异的内在原因。对谷子农艺性状、品质性状和叶酸含量的研究,有利于明确豫西地区 66 个谷子品种表型性状的整体特征及变化趋势,为评价谷子种质资源优劣提供数据支撑。

#### 3.2 谷子主要性状与籽粒叶酸含量的相关分析

作物的农艺性状指标与品质和产量关系密切,可以用此来评价作物品质的好坏。相关性分析可衡量 2 个不同变量关联的紧密程度,常作为一种重要的统计方法来指导育种工作<sup>[25]</sup>。潘炜奇<sup>[12]</sup>研究表明,谷子的株高和生育期与籽粒叶酸含量呈极显著正相关。本研究表明,谷子籽粒叶酸含量与株高呈负相关,与碳水化合物和蛋氨酸呈极显著正相关。李涌泉等<sup>[26]</sup>对 6 个谷子品种的农艺性状和营养品质进行研究,结果表明株高在两年间均为最高

的‘晋谷59’和‘晋谷21’,碳水化合物含量反而最低,从而证明谷子株高和碳水化合物含量存在一定程度的负相关关系,进一步支撑了较高的株高在一定程度上会抑制谷子籽粒叶酸合成的猜想,因此加快谷子矮秆品种的选育,可能对培育高叶酸谷子品种具有重要意义;而较高含量的碳水化合物和蛋氨酸可以提高谷子籽粒叶酸含量,说明谷子籽粒叶酸合成可能与碳水化合物和蛋氨酸的合成受同类因素调控,但这一机制尚不明确。通过研究谷子主要性状与籽粒叶酸含量的相关性,得到与谷子籽粒叶酸含量关系密切的性状指标,为提高谷子籽粒叶酸含量,培育优质高叶酸谷子品种提供理论支撑。通过聚类分析本研究将66个谷子品种的21个指标分为3类,第Ⅰ类群植株较矮,穗下节间长度较短,抗倒伏能力较强,可进行抗倒伏及适合机械收割品种的培育;第Ⅱ类群蛋白质和叶酸含量较高,可作为选育高品质谷子的潜在材料;第Ⅲ类群穗部性状较好,增产潜力大,可着重进行产量性状的研究,这与刁玉霖等<sup>[27]</sup>和刘思辰等<sup>[28]</sup>分别将13个和15个谷子农艺性状和品质性状分为3类的结果基本一致。本研究将谷子21个性状归为7个主成分,各主成分分别与谷子营养品质、含水量、氨基酸含量、农艺性状指标、粗纤维、叶长、穗下节间长度和籽粒叶酸含量相关,这与刁玉霖等<sup>[27]</sup>、冯链等<sup>[16]</sup>和刘思辰等<sup>[28]</sup>分别将谷子13个性状分成5个主成分、17个性状分成8个主成分和15个性状分成9个主成分略有差别,可能因选择的性状指标以及测定方法不同导致。通过聚类分析和主成分分析,对谷子众多性状指标进行分类简化,将相似性较强的个体归为同一类群,同时对数据进行降维,化繁为简,反映事物的本质规律,有利于从整体把握高叶酸谷子品种特性,为优质高叶酸谷子品种改良和育种提供科学依据。

## 4 结 论

综上所述,66个谷子品种变异幅度广泛,遗传资源丰富。谷子籽粒叶酸含量与品质性状之间关系紧密,碳水化合物和蛋氨酸含量与谷子籽粒叶酸含量呈极显著正相关,相关系数分别为0.120和0.108,因此可作为高叶酸谷子品种选育的重要指标。聚类分析将66个谷子品种划分为3个类群,主成分分析将谷子21个指标分为7个主成分,有利于提高谷子品种选育的针对性和准确性,为优质高叶酸谷子品种的筛选和育种指明了方向。

## 参 考 文 献:

- [1] 刘慧敏,张圣也,郭怀刚,等.生物炭对谷子幼苗生长及光合特性的影响[J].干旱地区农业研究,2020,38(1):86-91,116.  
LIU H M, ZHANG S Y, GUO H G, et al. Effects of biochar on growth and photosynthetic characteristics of millet seedlings[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(1): 86-91, 116.
- [2] 肖继兵,刘志,辛宗绪,等.基于主成分分析和隶属函数的谷子全生育期耐旱性鉴定[J].干旱地区农业研究,2022,40(6):34-44.  
XIAO J B, LIU Z, XIN Z X, et al. Identification of drought tolerance in foxtail millet during its entire growth period based on principal component analysis and membership function[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(6): 34-44.
- [3] 王钰文,袁进成,钟鑫,等.谷子营养功能研究进展[J].北方农业学报,2022,50(6):113-118.  
WANG Y W, YUAN J C, ZHONG X, et al. Research progress in nutritional function of millet[J]. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 2022, 50(6): 113-118.
- [4] 刘建奎,王文娟,王瑞杰,等.全国主要谷子品种的营养及食用品质分析[J].中国粮油学报,2022,37(11):227-235.  
LIU J L, WANG W J, WANG R J, et al. Nutrition and eating quality of main foxtail millet varieties in China[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(11): 227-235.
- [5] 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.
- [6] 张玖漪,蔡晓锋,徐晨曦,等.菠菜叶酸合成代谢途径基因鉴定及表达谱分析[J].上海师范大学学报(自然科学版),2020,49(6):637-649.  
ZHANG J Y, CAI X F, XU C X, et al. Gene identification and expression profiling analysis of spinach folate anabolic pathway[J]. Journal of Shanghai Normal University (Natural Sciences), 2020, 49(6): 637-649.
- [7] 季米,金龙妹,李春娟,等.备孕人群膳食叶酸营养状况横断面调查[J].中国循证儿科杂志,2018,13(6):401-405.  
JI M, JIN L M, LI C J, et al. Study on dietary folate nutrition status pre-pregnancy population[J]. Chinese Journal of Evidence Based Pediatrics, 2018, 13(6): 401-405.
- [8] BOURASSA P, HASNI I, TAJMIR-RIAAHI H A. Folic acid complexes with human and bovine serum albumins[J]. Food Chemistry, 2011, 129(3): 1148-1155.
- [9] 白玉婷,李强,高志军,等.春播夏谷子品系农艺性状的相关性和聚类分析[J].分子植物育种,2020,18(7):2338-2351.  
BAI Y T, LI Q, GAO Z J, et al. Correlation and cluster analysis of agronomic characters in summer foxtail millet lines cultivated in spring [J]. Molecular Plant Breeding, 2020, 18(7): 2338-2351.
- [10] 宁娜. 晒,除草剂及不同生态因子对谷子品质的影响[D].晋中:山西农业大学,2016.  
NING N. Effects of se, herbicides and different ecological factors on grain quality [D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2016.
- [11] MO H, RAO M, WANG G, et al. Polymorphism of MTHFR 1298A>C in relation to adverse pregnancy outcomes in Chinese populations

- [J]. *Molecular Genetics & Genomic Medicine*, 2019, 7(5): e642.
- [12] 潘炜奇. 谷子高叶酸品种筛选及高光谱检测研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2020.  
PAN W Q. Selection of millet varieties with high folic acid content and study on hyperspectral detection [D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2020.
- [13] 苗泽志, 韩浩坤, 杜伟建, 等. 杂交谷子产量及品质相关性性状的主成分分析[J]. *山西农业科学*, 2013, 41(8): 785-788, 812.  
MIAO Z Z, HAN H K, DU W J, et al. Principal component analysis on traits related to yield and quality of hybrid millet [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2013, 41(8): 785-788, 812.
- [14] 史根生, 史关燕, 杨成元, 等. 谷子杂交种主要农艺性状的灰色关联度分析及综合评价[J]. *农学学报*, 2016, 6(5): 1-5.  
SHI G S, SHI G Y, YANG C Y, et al. Grey correlative degree analysis and comprehensive evaluation of main agronomic characters of millet hybrids [J]. *Journal of Agriculture*, 2016, 6(5): 1-5.
- [15] 张霞, 龚清世. 陕北旱地谷子品种主要农艺性状及产量的相关分析[J]. *陕西农业科学*, 2018, 64(3): 7-10, 22.  
ZHANG X, GONG Q S. Correlation analysis of main agronomic characters and yield of millet varieties in northern Shaanxi dryland [J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 64(3): 7-10, 22.
- [16] 冯铤, 田翔, 乔治军, 等. 谷子农艺性状与蛋白质含量相关性分析[J]. *河南农业科学*, 2022, 51(6): 43-53.  
FENG L, TIAN X, QIAO Z J, et al. Correlation analysis between protein content and agronomic traits of foxtail millet [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2022, 51(6): 43-53.
- [17] 张爱霞, 刘晓东, 王桂荣, 等. 谷子主要营养品质性状遗传差异与选择研究[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(21): 58-62.  
ZHANG A X, LIU X D, WANG G R, et al. Studies on genetic effects and selection of important nutrient quality characters in millet [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(21): 58-62.
- [18] 王瑞, 李齐霞, 祁丽婷, 等. 不同产地谷子籽粒营养品质与食味品质的比较研究[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(3): 154-157.  
WANG R, LI Q X, QI L T, et al. Comparative study on nutritional quality and tasting quality of millet grains from different producing areas [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(3): 154-157.
- [19] 陆平. 谷子种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006: 2-9.  
LU P. Descriptors and data standard for foxtail millet [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006: 2-9.
- [20] 田翔, 秦慧彬, 王君杰, 等. 近红外光谱法快速测定小米品质[J]. *粮食与油脂*, 2021, 34(10): 145-148.  
TIAN X, QIN H B, WANG J J, et al. Rapid determination of millet quality by near infrared reflectance spectrometry [J]. *Cereals & Oils*, 2021, 34(10): 145-148.
- [21] 侯思宇, 韩渊怀, 闫陆飞, 等. 一种谷子籽粒叶酸提取方法及叶酸含量的测定方法: CN201910026212.X [P]. 2019-04-16.  
HOU S Y, HAN Y H, YAN L F, et al. A method for extracting folic acid from grains of millet and determination of folic acid content: CN201910026212.X [P]. 2019-04-16.
- [22] 王海岗, 贾冠清, 智慧, 等. 谷子核心种质表型遗传多样性分析及综合评价[J]. *作物学报*, 2016, 42(1): 19-30.  
WANG H G, JIA G Q, ZHI H, et al. Phenotypic diversity evaluations of foxtail millet core collections [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(1): 19-30.
- [23] 郑楠楠, 綦文涛, 王春玲, 等. 不同品种谷子营养成分及功能活性成分差异化分析[J]. *粮油食品科技*, 2018, 26(2): 34-39.  
ZHENG N N, QI W T, WANG C L, et al. Comparative analysis of nutritional and functional components in different kinds of millet [J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2018, 26(2): 34-39.
- [24] 邵丽华, 王莉, 白文文, 等. 山西谷子资源叶酸含量分析及评价[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(7): 1265-1272.  
SHAO L H, WANG L, BAI W W, et al. Evaluation and analysis of folic acid content in millet from different ecological regions in Shanxi province [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(7): 1265-1272.
- [25] 张永芳, 高志慧, 史鹏清, 等. 基于不同大豆品种农艺性状及品质性状的适应性分析[J]. *中国农业科技导报*, 2020, 22(8): 25-32.  
ZHANG Y F, GAO Z H, SHI P Q, et al. Adaptability analysis of different soybean varieties based on agronomic and quality traits [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2020, 22(8): 25-32.
- [26] 李涌泉, 赵悠悠, 孙学良, 等. 晋北谷子农艺性状和营养品质的适应性评价[J]. *山西农业科学*, 2023, 51(6): 645-652.  
LI Y Q, ZHAO Y Y, SUN X L, et al. Adaptability evaluation of agronomic traits and nutrient quality of millet in northern Shanxi province [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2023, 51(6): 645-652.
- [27] 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. Genetic diversity analysis of main agronomic traits and quality traits of millet [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(11): 73-79.
- [28] 刘思辰, 曹晓宁, 温琪汾, 等. 山西谷子地方品种农艺性状和品质性状的综合评价[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(11): 2137-2148.  
LIU S C, CAO X N, WEN Q F, et al. Comprehensive evaluation of agronomic traits and quality traits of foxtail millet landrace in Shanxi [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(11): 2137-2148.