

# 多环境评估谷子资源主要农艺性状遗传参数

杨朋娟<sup>1</sup>, 张世文<sup>1</sup>, 王振山<sup>1</sup>, 闫留延<sup>1</sup>, 张小梅<sup>1</sup>, 桑璐曼<sup>1</sup>, 王慧洁<sup>1</sup>,  
祖超凡<sup>1</sup>, 何占祥<sup>1</sup>, 贾小平<sup>1</sup>, 白俊艳<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 河南科技大学农学院, 洛阳 471023; <sup>2</sup> 河南科技大学动物科技学院, 洛阳 471023)

**摘要:** 本研究于 2015-2016 年在海南梅东、河南洛阳、吉林公主岭 3 个不同纬度环境调查了 160 份谷子资源的株高、叶片数、穗长、穗粗、穗重、穗粒重、穗码数、码粒数 8 个农艺性状, 系统估算这些性状在年份、纬度环境、品种基因型三因素组合条件下的广义遗传力, 并进行性状间的遗传相关分析。单因素分析表明 8 个农艺性状的平均遗传力均超过 0.9000, 普遍高于单株遗传力, 且平均遗传力不受调查年份和纬度环境的影响; 单株遗传力在梅东低纬度环境不受调查年份影响, 而在洛阳中纬度环境、公主岭高纬度环境穗长、码粒数和穗重、穗粒重、穗码数均受调查年份影响; 株高、叶片数、穗长、穗粗、穗码数为高遗传力性状, 而穗重、穗粒重、码粒数为中遗传力性状。三因素组合条件 8 个性状的平均遗传力由 0.9000 以上下降为 0.7266~0.8483, 单株遗传力由 0.5209~0.9931 下降为 0.2292~0.4263, 株高、叶片数、穗粗等 3 个性状适合作为谷子广生态适应性育种的选择指标。株高、叶片数、穗粗与穗重、穗粒重均存在极显著遗传正相关 ( $P < 0.001$ ), 通过有针对性地选择株高、叶片数和穗粗可以实现对穗重、穗粒重进行选择, 选育出广适性、稳产或高产的品种。

**关键词:** 谷子; 生态适应性; 农艺性状; 遗传力; 相关分析

## Genetic Parameters Estimation of Main Agronomical Traits of Foxtail Millet Germplasm Resources under Multiple Environments

YANG Peng-juan<sup>1</sup>, ZHANG Shi-wen<sup>1</sup>, WANG Zhen-shan<sup>1</sup>, YAN Liu-yan<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-mei<sup>1</sup>,  
SANG Lu-man<sup>1</sup>, WANG Hui-jie<sup>1</sup>, ZU Chao-fan<sup>1</sup>, HE Zhan-xiang<sup>1</sup>, JIA Xiao-ping<sup>1</sup>, BAI Jun-yan<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023; <sup>2</sup> College of Animal Science and Technology, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023)

**Abstract:** In this study, eight agronomic characters (including plant height, leaf number, panicle length, panicle diameter, panicle weight, grain weight per panicle, branch number per panicle and grain number per branch) of 160 foxtail millet germplasm resources were investigated at three environmental conditions (Ledong, Hainan province; Luoyang, Henan province; Gongzhuling, Jilin province) from 2015 to 2016. Their broad-sense heritability were estimated by simultaneously considering the years, latitude environments and genotypic variations, and the genetic relationship among these traits was analyzed. The average heritability at each of eight traits using single-factor analysis method was over 0.9000 at years and latitude environments. While no variation on individual heritability at eight traits was detected at Ledong (low latitude environment), for the traits panicle length, grain number per branch and panicle weight, grain weight per panicle as well as branch number per panicle this factor the significant variation on individual heritability was detected at Luoyang and Gongzhuling. Several traits such as plant height, leaf number, panicle length, panicle diameter, and branch number per panicle

收稿日期: 2022-01-03 修回日期: 2022-02-07 网络出版日期: 2022-02-17

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20220103001>

第一作者研究方向为植物学, E-mail: y18437915207@163.com

通信作者: 贾小平, 研究方向为谷子资源评价与分子育种, E-mail: jiaxiaoping2007@163.com

白俊艳, 研究方向为动物遗传育种, E-mail: junyanbai@163.com

基金项目: 国家自然科学基金 (31471569)

Foundation project: The National Natural Science Foundation of China (31471569)

showed higher heritability, whereas the traits including panicle weight, grain weight per panicle, and grain number per branch were detected with moderate heritability. Under three-factor combined conditions, the average heritability decreased from 0.9000 to 0.7266-0.8483, and the individual heritability decreased from 0.5209-0.9931 to 0.2292-0.4263. The characters including plant height, leaf number and panicle diameter were suitable for selection of foxtail millet ecological adaptability breeding. The plant height, leaf number and panicle diameter positively correlated with either of panicle weight and grain weight per panicle ( $P < 0.001$ ). Thus, selection for plant height, leaf number and panicle diameter might achieve the selection of panicle weight and grain weight per panicle in breeding for ecological adaptability, stable yield or high yield cultivars in foxtail millet.

**Key words:** foxtail millet; ecological adaptability; agronomic characters; heritability; correlation analysis

谷子(*Setaria italica*(L.)Beauv.)是我国的传统杂粮作物,营养丰富,粮饲兼用,具有节水抗旱、耐贫瘠、耐贮藏的特点,是典型的环境友好型作物<sup>[1-4]</sup>,但是谷子对光温比较敏感,不同生态环境对其生长发育有显著影响<sup>[5]</sup>,选育广生态适应性的品种是解决这一问题的根本途径。

农艺性状可以直观地反映品种的优劣,具有易观察、好测量的特点<sup>[6]</sup>,在不同生态环境条件对其进行遗传参数估计,是制定广适应性谷子新品种选育方案的前提和基础。遗传参数分析是遗传育种和品种资源研究的重要方法<sup>[7]</sup>,在棉花、糜子、水稻等多种农作物种质资源研究中得到应用<sup>[8-10]</sup>。谷子作为一种短日照喜温作物,种植年份、地区、播期对农艺性状和产量均有不同程度影响<sup>[11]</sup>。Zhi等<sup>[12]</sup>根据3~4年间6~7个地点的重组自交系表型数据表明谷子穗构型的遗传控制对光周期或其他环境因子非常敏感。史关燕等<sup>[13]</sup>研究两系杂交组合得出谷子的小区产量与千粒重、单穗粒重、株高和穗长等显著相关。有关稈和谷子的农艺性状间关联分析指出协调好作物间各个农艺性状的关系能有效选育出高产优质的作物品种<sup>[14-17]</sup>。另有珍珠粟的研究表明,利用一些遗传力较高的农艺性状可以进行品种改良<sup>[18-20]</sup>。此外,谷子在旱作生态可持续农业建设和种植业结构调整中具有重要作用,也是应对未来更加干旱环境的战略储备作物<sup>[21]</sup>。然而作为短日照喜温作物,谷子对光周期和温度比较敏感,导致种植区域受到限制。

目前不同光温环境谷子农艺性状遗传力及遗传相关分析的研究尚未见报道,谷子广生态适应性育种实践中关键性状的选择和育种方案的制定缺少依据。本研究选用160份代表国内外不同生态区域的谷子资源(详见<http://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20220103001>,附表1)连续2年分别在海南梅东、河南洛阳和吉林公主岭3个纬度差异较大的光温环

境调查株高、叶片数、穗粗、穗长、穗码数、码粒数、穗重和穗粒重8个农艺性状,估算遗传力并进行遗传相关分析,揭示性状遗传规律,为广适应性谷子新品种选育方案的制定和育种效率的提升提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

本研究使用的160份谷子材料主要来自中国各生态区,部分来自美国、德国、日本、印度等国外地区。160份谷子材料于2015-2016年连续2年种植于海南梅东河北农林科学院谷子研究所试验田(18°45'N, 109°10'E)、河南洛阳河南科技大学开元校区试验田(34°37'N, 112°26'E)、吉林公主岭吉林省农科院试验田(43°11'N, 124°02'E),表1为3个地区的日照时数及活动积温,其中公主岭为长日照地区,洛阳为中等日照地区,梅东为短日照地区,计算活动积温的起始温度标准为10℃。每个品种种植1行,株距5cm,行距50cm,行长200cm,两侧种植3行保护行。除草、间苗、培土等管理措施与当地常规管理相同。

### 1.2 性状调查

记录每个品种谷子的出苗日期和50%植株抽穗的日期,则抽穗期表示为50%植株抽穗日期减去出苗日期。成熟期每个品种选择行中部10株调查株高、叶片数、穗长和穗粗,将10株谷穗收获后进行自然风干,风干后的谷穗测量穗重、穗码数、穗粒重和码粒数。

### 1.3 数据处理与分析

利用SPSS 19.0软件对160份谷子材料8个农艺性状进行描述性统计分析,包括极大值、极小值、均值、标准差。每个性状在单因素、多因素条件下的广义遗传力估算及性状间的遗传相关分析用中国农业科学院作物科学研究所王建康实验室开发的IciMapping软件进行。

表 1 不同地区的日照时长和活动积温

Table 1 Sunshine hours and active accumulated temperature in different regions

地区 Region	时间(年-月) Date	日照 (h) Sunshine	活动积温 (d·℃) AAT
公主岭 Gongzhuling	2015-05	241.9	492.9
	2015-06	269.6	636.0
	2015-07	311.2	737.8
	2015-08	240.8	703.7
	2015-09	259.0	507.0
	平均值	264.5	615.5
	2016-05	272.4	511.5
	2016-06	274.7	624.0
	2016-07	268.2	747.1
	2016-08	289.2	696.0
洛阳 Luoyang	2016-09	192.7	523.9
	平均值	259.4	620.5
	2015-05	202.4	691.3
	2015-06	131.7	792.0
	2015-07	195.9	868.0
	2015-08	148.8	830.8
	2015-09	142.2	669.0
	平均值	164.2	770.2
	2016-05	204.2	651.0
	2016-06	227.9	747.0
梅东 Meidong	2016-07	189.4	902.1
	2016-08	151.0	876.0
	2016-09	164.1	753.0
	平均值	187.3	785.82
	2015-11	180.2	606.0
	2015-12	77.4	784.3
	2016-01	27.4	561.1
	2016-02	113.4	456.4
	2016-03	154.1	635.5
	平均值	110.5	608.7
	2016-11	115.7	696.0
	2016-12	98.5	647.9
	2017-01	25.8	534.0
	2017-02	110.7	484.3
	2017-03	138.8	647.9
	平均值	97.9	602.0

AAT: Active accumulated temperature

## 2 结果与分析

### 2.1 不同纬度环境谷子 8 个农艺性状的描述性统计分析

纬度对 8 个性状的影响存在差异,随着纬度的增加,株高、叶片数和穗长 3 个性状表现出逐步递增的趋势,穗粗、穗重、穗粒重、穗码数和码粒数 5 个性状在梅东、洛阳 2 个纬度环境差异不明显,而在公主岭纬度环境测量值明显高于洛阳、梅东的,说明株高、叶片数和穗长 3 个性状对纬度或光温的敏感度要高于其他 5 个性状(表 2)。8 个性状在公主岭的变异幅度最大,表明在高纬度环境谷子资源的表型变异最丰富,反映出纬度升高到一定程度会对谷子内在遗传调控机制产生明显影响。

### 2.2 单因素分析 2015-2016 年间、多纬度环境下谷子 8 个农艺性状遗传力

不同纬度的单株遗传力和平均遗传力估计结果表明(表 3),在梅东低纬度环境,8 个农艺性状在 2 年间的单株遗传力和平均遗传力均没有明显变化( $P<0.01$ ),所有性状的平均遗传力都在 0.9000 以上,单株遗传力在 0.6536~0.9472 之间,说明低纬度环境对遗传力影响较小,且多数性状的单株遗传力、平均遗传力较高,属于高遗传力性状。在洛阳中纬度环境,8 个农艺性状的平均遗传力在两年间变化不大,且均在 0.9000 以上,穗长和码粒数单株遗传力在两年间变化较大,分别在 0.6876~0.8024、0.5209~0.8410 之间,综合单株遗传力和平均遗传力数据,在洛阳中纬度环境,株高、叶片数、穗长、穗粗和穗码数 5 个性状均为高遗传力性状,其余 3 个性状为中遗传力性状。在公主岭高纬度环境,8 个性状的平均遗传力同样均达到 0.9000 以上,且两年间没有明显变化,穗重、穗粒重和穗码数单株遗传力在两年间有一定变化,变化范围分别在 0.5817~0.7031、0.6048~0.6917、0.6777~0.7876 之间。综合单株遗传力和平均遗传力数据,株高、叶片数、穗长、穗粗和穗码数为高遗传力性状,穗重、穗粒重和码粒数为中遗传力性状。

### 2.3 年份、环境、基因型三因素组合条件下谷子 8 个农艺性状遗传力分析

为进一步了解谷子主要农艺性状的遗传表现,在年份、环境、基因型三因素组合条件下估算 8 个农艺性状的遗传力(表 4)。结果表明,8 个农艺性状的单株遗传力和平均遗传力比单因素分析结果普遍降低( $P<0.01$ ),单株遗传力由 0.5209~0.9931

表 2 不同纬度环境条件谷子农艺性状描述性统计分析  
Table 2 Descriptive statistical analysis of agronomic characters of millet under different latitude environments

环境 Environment	项目 Item	株高 ( cm ) PH	叶片数 NL	穗长 ( cm ) PL	穗粗 ( cm ) PD	穗重 ( g ) SW	穗粒重 ( g ) GW	穗码数 SN	码粒数 GN
梅东 Meidong	极小值	10.6000	3.0000	1.6000	2.5100	0.2000	0.0300	3.0000	1.2500
	极大值	174.1000	13.0000	31.0000	13.4000	40.0000	26.0300	121.0000	245.0000
	均值	98.7477	8.4100	12.5066	6.2290	8.4792	6.9397	55.4667	46.8505
	标准差	19.8215	1.9580	3.7259	1.3888	2.5890	2.2618	18.5871	16.5919
洛阳 Luoyang	极小值	12.3000	3.0000	2.7000	2.1000	0.2200	0.0300	6.0000	1.1900
	极大值	190.2000	21.0000	48.4000	11.5000	30.6500	24.7600	175.0000	533.3300
	均值	118.9449	9.2900	17.0360	5.9513	7.8962	5.7623	88.4317	32.2515
	标准差	22.3803	2.0580	4.4670	1.2304	2.2497	1.5127	25.5907	12.7707
公主岭 Gongzhuling	极小值	12.8000	4.0000	2.2000	2.9800	0.3600	0.0300	11.0000	1.1300
	极大值	245.0000	24.0000	48.0000	21.1800	58.3700	46.0600	306.0000	637.2200
	均值	158.4242	16.0300	26.1170	9.1017	19.6435	14.2197	113.3661	57.6239
	标准差	36.6893	3.8580	5.5121	1.9779	5.0259	3.2924	31.0567	22.9127

PH: Plant height; NL: Number of leaves; PL: Panicle length; PD: Panicle diameter; SW: Spike weight; GW: Grain weight per panicle; SN: Spikelet number; GN: Grain number per branch; the same as below

表 3 2015-2016 年间、多纬度环境下谷子 8 个农艺性状的遗传力比较分析  
Table 3 Comparison analysis of heritabilities of eight agronomic traits in millet under multi-latitude environment during 2015-2016

性状 Trait	环境 Environment	年份 Year	自由 度 DF	平方和 SS	均方 Mean square	方差估 计值 MS	单株遗传力 Individual heritability	平均遗传力 Average heritability	F
株高 PH	梅东	2015	157	477733.5625	3042.8889	435.1736	0.8919	0.9827	57.6710
		2016	191	588076.3750	3078.9338	370.9691	0.9205	0.9896	96.0926
	洛阳	2015	215	709192.3750	3298.5691	351.8228	0.7908	0.9718	35.4410
		2016	186	634154.0000	3409.4302	407.6827	0.8501	0.9789	47.4403
	公主岭	2015	147	574836.2500	3910.4507	583.1355	0.8464	0.9729	36.9554
		2016	197	1130547.2500	5738.8184	648.8802	0.8723	0.9834	60.4070
叶片数 NL	梅东	2015	157	3307.4487	21.0666	3.0413	0.9472	0.9920	124.3333
		2016	191	3488.6909	18.2654	2.1625	0.8110	0.9724	36.2345
	洛阳	2015	215	6735.8623	31.3296	3.3472	0.8007	0.9734	37.6002
		2016	186	5214.6245	28.0356	3.3100	0.7792	0.9665	29.8934
	公主岭	2015	147	9446.4053	64.2613	9.8389	0.9931	0.9989	942.3750
		2016	197	7095.1465	36.0160	4.0580	0.8492	0.9800	49.9773
穗长 PL	梅东	2015	157	10873.8604	69.2602	9.6349	0.7591	0.9559	22.6517
		2016	191	25092.0508	131.3720	15.6936	0.8638	0.9812	53.0781
	洛阳	2015	215	28681.5938	133.4028	13.9464	0.6876	0.9525	21.0562
		2016	186	29498.9590	158.5966	18.8129	0.8024	0.9711	34.6176
	公主岭	2015	147	31808.9766	216.3876	31.7648	0.7766	0.9578	23.6757
		2016	197	46279.3711	234.9207	26.2915	0.8081	0.9734	37.6309



表 3( 续 )

性状 Trait	环境 Environment	年份 Year	自由 度 DF	平方和 SS	均方 Mean square	方差估 计值 MS	单株遗传力 Individual heritability	平均遗传力 Average heritability	F
穗粗 PD	梅东	2015	157	1647.5859	10.4942	1.4533	0.7408	0.9515	20.6383
		2016	191	3675.3999	19.2429	2.3063	0.8848	0.9844	64.1064
	洛阳	2015	215	2550.2500	11.8616	1.2470	0.7139	0.9579	23.7383
		2016	186	18202.9047	9.6930	1.1384	0.7532	0.9615	25.9834
	公主岭	2015	147	2156.6663	14.6712	2.1187	0.7141	0.9422	17.2977
		2016	197	6264.1587	31.7978	3.5208	0.7498	0.9630	27.0632
穗重 SW	梅东	2015	157	13627.5977	86.8000	11.9229	0.7097	0.9438	17.8010
		2016	191	43407.6484	227.2652	27.1254	0.8584	0.9803	50.7790
	洛阳	2015	215	27016.8848	125.6599	12.8940	0.6118	0.9349	15.3592
		2016	186	18161.7383	97.6438	11.2317	0.6636	0.9417	17.1488
	公主岭	2015	147	43794.2891	297.9203	42.8861	0.7031	0.9392	16.4485
		2016	197	99466.4688	504.9059	53.6168	0.5817	0.9236	13.0945
穗粒重 GW	梅东	2015	157	10658.6699	67.8896	9.3274	0.7105	0.9440	17.8648
		2016	191	28713.9629	150.3349	17.9831	0.8566	0.9800	150.0587
	洛阳	2015	215	17219.5566	80.0910	8.1470	0.5815	0.9236	13.6618
		2016	186	12797.0625	68.8014	7.9053	0.6594	0.9406	16.8492
	公主岭	2015	147	30572.8184	207.9784	29.8382	0.6917	0.9360	15.6364
		2016	197	70656.3203	358.6615	38.3548	0.6048	0.9301	14.3121
穗码数 SN	梅东	2015	157	305008.8750	1942.7317	268.9755	0.7399	0.9513	20.5426
		2016	191	614784.8750	3218.7690	385.8400	0.8858	0.9845	64.7160
	洛阳	2015	215	939381.7500	4369.2173	459.1913	0.7123	0.9575	23.5570
		2016	186	988263.4375	5313.2441	629.0060	0.7934	0.9692	32.4411
	公主岭	2015	147	1001747.5625	6814.6094	973.5108	0.6777	0.9321	14.7186
		2016	197	1213732.1250	6161.0777	687.0455	0.7876	0.9699	33.2479
码粒数 GN	梅东	2015	157	614460.5625	3913.7615	528.8031	0.6536	0.9284	13.9629
		2016	191	848622.2500	4443.0483	514.8651	0.7061	0.9518	20.7338
	洛阳	2015	215	433019.4688	2014.0441	200.7880	0.5209	0.9083	10.9078
		2016	186	1560798.1250	8391.3788	1001.8742	0.8410	0.9774	44.3103
	公主岭	2015	147	807829.3750	5495.4380	780.3431	0.6588	0.9265	13.5981
		2016	197	2673330.0000	13570.2031	1486.8802	0.6999	0.9530	21.2816

下降到 0.2292~0.4263, 平均遗传力由 0.9000 以上下降到 0.7266~0.8483。三因素条件下单株遗传力相对较高的性状为株高、叶片数、穗长、穗粗和穗码数, 范围在 0.3087~0.4263 之间, 相对较低的是穗重、穗粒重和码粒数 3 个性状, 单株遗传力均低于 0.3000; 平均遗传力相对较高的是株高、叶片数和穗粗, 范围在 0.8356~0.8483 之间, 穗长和穗码数平均

遗传力接近 0.8000, 穗重、穗粒重和码粒数 3 个性状的平均遗传力较低, 在 0.7266~0.7501 之间。综合单株遗传力和平均遗传力数据, 株高、叶片数和穗粗 3 个性状遗传力较高, 受外部环境和基因型影响较小, 其次是穗长和穗码数, 穗重、穗粒重和码粒数 3 个性状遗传力较低, 受外部环境和基因型影响较大。

表 4 年份、环境、基因型三因素组合条件下谷子 8 个农艺性状的遗传力  
Table 4 Estimation of heritabilities of eight agronomic traits in millet under combination of three factors including year, environment and genotype

性状 Trait	自由度 DF	平方和 SS	均方 Mean square	方差值 MS	单株遗传力 Individual heritability	平均遗传力 Average heritability	F
株高 PH	224	2475887.7500	11053.0703	230.6437	0.4067	0.8356	150.5732
叶片数 NL	224	24256.6992	108.2888	2.2632	0.4263	0.8411	196.8737
穗长 PL	224	89493.5156	399.5246	8.2853	0.3140	0.7847	78.1986
穗粗 PD	224	11003.6094	49.1233	1.0192	0.3856	0.8483	90.9646
穗重 SW	224	110465.3828	493.1490	10.0767	0.2401	0.7501	36.6578
穗粒重 GW	224	73228.2656	326.9119	6.6731	0.2292	0.7360	35.3733
穗码数 SN	224	2598793.7500	11601.7578	239.9407	0.3087	0.7909	64.6293
码粒数 GN	224	2874143.2500	12830.9971	262.9079	0.2322	0.7266	40.6800

2.4 2015-2016 年间单一环境与年份、环境、基因型三因素环境中谷子抽穗期的遗传力分析

谷子 2015-2016 年间单一环境与年份、环境、基因型三因素环境下抽穗期的遗传力分析表明(表 5),单一环境与三因素环境条件下谷子抽穗期的单株遗传力都低于平均遗传力( $P<0.01$ )。在单一环境下,谷子抽穗期于洛阳地区的单株遗传力和

平均遗传力分别为 0.7133 和 0.8187,遗传力最高,其次是公主岭,而梅东的遗传力相对较低;三因素环境下,谷子抽穗期平均遗传力为 0.7886,单株遗传力为 0.4806。综合数据表明,谷子抽穗期遗传力在不同地区表现出一定差异,但在年份、环境、基因型三因素环境下遗传力较高,受复杂环境影响较小。

表 5 2015-2016 年间单一环境与年份、环境、基因型三因素环境中抽穗期的遗传力  
Table 5 Estimation of heritability of heading date in single environment and three factors including year, environment and genotype during 2015-2016

环境 Environment	自由度 DF	平方和 SS	均方 Mean square	方差值 MS	单株遗传力 Individual heritability	平均遗传力 Average heritability	F
洛阳 Luoyang	161	21338.7363	132.5387	59.8021	0.7133	0.8187	5.5143
梅东 Meidong	162	5413.0542	33.4139	9.4499	0.3461	0.4657	1.8716
公主岭 Gongzhuling	158	28707.0506	181.6902	79.9623	0.6041	0.7115	3.4667
三因素环境 Three-factor environments	166	42373.2930	255.2608	44.3690	0.4806	0.7886	8.5195

2.5 年份、环境、基因型三因素组合条件下 8 个农艺性状的遗传相关性分析

在三因素组合条件下 8 个农艺性状遗传相关分析见表 6。株高和叶片数 2 个遗传力较高的性状与穗长、穗粗、穗重、穗粒重和穗码数呈极显著正相关( $P<0.01$  或  $P<0.001$ ),穗粗与穗重、穗粒重和码粒数

呈极显著正相关( $P<0.001$ )。研究结果说明株高、叶片数和穗粗 3 个较高遗传力的性状与其他产量相关性状如穗重和穗粒重均存在极显著的遗传正相关,不受外部环境和基因型影响,因此对谷子株高、叶片数和穗粗进行有针对性地选择,有望获得广适应性、稳产或高产的谷子新品种。

表 6 谷子 8 个农艺性状在年份、环境、基因型三因素组合条件下的遗传相关系数

Table 6 Genetic correlation coefficient of eight agronomic traits of millet under three-factor combination of year, environment and genotype

性状 Trait	叶片数 NL	穗长 PL	穗粗 PD	穗重 PW	穗粒重 GW	穗码数 SN	码粒数 GN
株高 PH	0.5909***	0.5805***	0.1950**	0.2972***	0.2277***	0.3326***	0.0891
叶片数 NL		0.3930***	0.5813***	0.5173***	0.4573***	0.3761***	0.2926***
穗长 PL			0.1631*	0.2794***	0.1699*	0.4547***	0.0914
穗粗 PD				0.7298***	0.6696***	0.1689*	0.5314***
穗重 PW					0.9743***	0.3137***	0.5142***
穗粒重 GW						0.2206***	0.5447***
穗码数 GN							0.1878**

\*: 在  $P<0.05$  水平上显著相关; \*\*: 在  $P<0.01$  水平上显著相关; \*\*\*: 在  $P<0.001$  水平上显著相关\*: Significant correlation at the level of  $P<0.05$ ; \*\*: Significant correlation at the level of  $P<0.01$ ; \*\*\*, Significant correlation at the level of  $P<0.001$ 

### 3 讨论

#### 3.1 谷子农艺性状的遗传力

在育种过程中对后代群体进行数量性状选择时,遗传力是一个可靠的指标,它的优点在于具有预见性,可依据上代表现预测下代结果,遗传力越大,则群体的变异主要由遗传造成,而受环境影响较小,在下一代会有相应的表现,这个性状遗传的可能性就比较大<sup>[22]</sup>。闫锋等<sup>[23]</sup>调查结果表明,千粒重、株高和穗长的遗传力较高,可用于早世代进行选择;穗粒重的遗传力较小,宜在较高世代进行直接或综合选择。本研究结果表明,单因素分析谷子 8 个农艺性状的平均遗传力均超过 0.9000,且不受年份和纬度环境影响,单株遗传力受年份和纬度环境影响具体表现为海南梅东低纬度环境单株遗传力几乎不受年份影响,而河南洛阳中纬度环境、吉林公主岭高纬度环境穗长、码粒数和穗重、穗码数受年份影响较大。为了更充分了解年份、纬度环境、基因型对性状遗传力的互作效应,分析了 8 个性状在 3 个因素组合条件下的遗传力,结果表明相比单因素条件,所有性状的平均遗传力和单株遗传力均有所下降,但平均遗传力仍远高于单株遗传力。在同时考虑年份、纬度环境、基因型三因素条件下,株高、叶片数、穗粗 3 个性状单株遗传力和平均遗传力相对较高,受外部环境条件和基因型影响相对较小,适合作为谷子广生态适应性育种的选择指标。

抽穗期是决定作物结实粒数的关键时期,也是反映资源光温敏感性的第一要素<sup>[24]</sup>。抽穗期的遗传力估算结果显示,抽穗期在洛阳地区遗传力最高,梅东地区最低,这可能与谷子对光温较为敏感的特

性有关。三因素条件下谷子抽穗期遗传力较高,说明谷子抽穗期性状受复杂环境影响较小,适合作为育种指标。

#### 3.2 谷子农艺性状间的遗传参数

遗传群体内不同性状之间往往存在着遗传关联,而性状间的遗传关联在育种中具有重要意义。通过对谷子主要农艺性状的相关参数进行分析,探讨谷子性状之间的遗传,可以为谷子新品种改良和选育提供理论指导<sup>[25]</sup>。谷子农艺性状间表型相关分析的研究有很多<sup>[26-29]</sup>,但多数研究存在调查环境少、环境差异特别是光温条件差异小、未充分考虑基因型、调查年份的影响等问题,因此难以全面、客观揭示谷子农艺性状间的关系。本研究在 2 个年份、高、中、低 3 个纬度环境,160 份谷子基因型多因素组合条件下分析了 8 个农艺性状间的遗传相关性,发现株高、叶片数、穗粗几个受外部环境和基因型影响相对较小、遗传力相对较高的性状与其他产量相关性状如穗重、穗粒重均存在极显著的遗传正相关,且这种相关性也不受外部环境和基因型互作影响,而在前期的研究中发现除千粒重外,在多个不同环境株高、叶片数、穗粗、穗重、穗粒重等性状间均存在显著或极显著表型正相关<sup>[30]</sup>,与本研究得出的性状间遗传正相关相一致。在谷子广生态适应性育种中,根据性状间的遗传相关性有针对性地选择株高、叶片数、穗粗 3 个性状可以同时产量性状穗重、穗粒重进行选择,选育出广适应性、稳产或高产的品种。

#### 参考文献

- [1] Yang X Y, Wan Z W, Perry L, Lu H Y, Wang Q, Zhao C H, Li J, Xie F, Yu J C, Cui T X, Wang T, Li M Q, Ge Q S. Early millet use in northern China. *Proceedings of the National*

- Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(10): 3726-3730
- [2] 刘敬科,刁现民. 我国谷子产业现状与加工发展方向. 农业工程技术:农产品加工业, 2013(12): 15-17
- Liu J K, Diao X M. The present situation and processing development direction of millet industry in China. Agriculture Engineering Technology: Agricultural Product Processing Industry, 2013(12): 15-17
- [3] 李荫梅. 谷子育种学. 北京: 中国农业出版社, 1997: 22-31
- Li Y M. Millet breeding. Beijing: China Agriculture Press, 1997: 22-31
- [4] 薛延桃,陆平,史梦莎,孙昊月,刘敏轩,王瑞云. 新疆、甘肃黍稷资源的遗传多样性与群体遗传结构研究. 作物学报, 2019, 45(10): 1511-1521
- Xue Y T, Lu P, Shi M S, Sun H Y, Liu M X, Wang R Y. Genetic diversity and population genetic structure of broomcorn millet accessions in Xinjiang and Gansu. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(10): 1511-1521
- [5] 贾小平,袁玺垒,李剑峰,张博,张小梅,郭秀璞,陈春燕. 不同光温条件谷子资源主要农艺性状的综合评价. 中国农业科学, 2018, 51(13): 2429-2441
- Jia X P, Yuan X L, Li J F, Zhang B, Zhang X M, Guo X P, Chen C Y. Comprehensive evaluation of main agronomic characters of millet resources under different light and temperature conditions. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(13): 2429-2441
- [6] 马艳明,冯智宇,王威,张胜军,郭营,倪中福,刘杰. 新疆冬小麦品种农艺及产量性状遗传多样性分析. 作物学报, 2020, 46(12): 1997-2007
- Ma Y M, Feng Z Y, Wang W, Zhang S J, Guo Y, Ni Z F, Liu J. Genetic diversity analysis of winter wheat landraces and modern bred varieties in Xinjiang based on agronomic traits. Acta Agronomica Sinica, 2020, 46(12): 1997-2007
- [7] 林志清,巢元金,曹希之. 新疆粳稻品种主要经济性状遗传参数的探讨. 作物杂志, 1993(S1): 27-30
- Lin Z Q, Chao Y J, Cao X Z. Study on genetic parameters of main economic characters of japonica rice varieties in Xinjiang. Crops, 1993(S1): 27-30
- [8] 史春辉,张爱,马麒,谢晓宇,刘娟娟,李美丽,李朝周,王彩香,宿俊吉. 陆地棉纤维长度和强度的优异位点挖掘及其候选基因预测. 植物遗传资源学报, 2021, 22(4): 1133-1144
- Shi C H, Zhang A, Ma Q, Xie X Y, Liu J J, Li M L, Li Z Z, Wang C X, Su J J. Exploration of elite loci for fiber length and strength in upland cotton and prediction of their candidate genes. Journal of Plant Genetic Resources, 2021, 22(4): 1133-1144
- [9] 王舒婷,何杰丽,石甜甜,陈凌,王海岗,王瑞云,乔治军. 利用微卫星标记分析山西糜子的遗传多样性. 植物遗传资源学报, 2019, 20(1): 69-78
- Wang S T, He J L, Shi T T, Chen L, Wang H G, Wang R Y, Qiao Z J. Genetic diversity analysis of broomcorn millet (*Panicum miliaceum* L.) of Shanxi province using microsatellite markers. Journal of Plant Genetic Resources, 2019, 20(1): 69-78
- [10] 李双,唐显岩,王春雷,孙玥,周大虎,贺晓鹏,傅军如,欧阳林娟,贺浩华,彭小松. 8个籼型恢复系相关农艺性状的配合力分析. 植物遗传资源学报, 2019, 20(5): 1178-1185
- Li S, Tang X Y, Wang C L, Sun Y, Zhou D H, He X P, Fu J R, Ouyang L J, He H H, Peng X S. Combining ability analysis of the agronomic characters in eight indica restorer lines. Journal of Plant Genetic Resources, 2019, 20(5): 1178-1185
- [11] 杨延兵,秦岭,王润丰,陈二影,尹秀波,刘玉芹,张素梅,丛新军,李国瑜,王乐政,管延安. 山东省不同生态条件气候因素对谷子产量的影响. 中国农业科学, 2020, 53(7): 1348-1358
- Yang Y B, Qin L, Wang R F, Chen E Y, Yin X B, Liu Y Q, Zhang S M, Cong X J, Li G Y, Wang L Z, Guan Y A. Effects of climatic factors under diverse ecological conditions on foxtail millet (*Setaria italica*) yield in Shandong. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(7): 1348-1358
- [12] Zhi H, He Q, Tang S, Yang J J, Zhang W, Liu H F, Jia Y C, Jia G Q, Zhang A Y, Li Y H, Guo E H, Gao M, Li J X, Qin N, Zhu C C, Ma C Y, Zhang H J, Chen G Q, Zhang W F, Wang H G, Qiao Z J, Li S G, Cheng R H, Xing L, Wang S Y, Liu J R, Diao X M. Genetic control and phenotypic characterization of panicle architecture and grain yield-related traits in foxtail millet (*Setaria italica*). Theoretical and Applied Genetics, 2021, 134(9): 3023-3036
- [13] 史关燕,王啸旗,韩渊怀,杨成元,麻慧芳,赵雄伟,乔治军. 谷子产量和品质相关性状的杂种优势及遗传特性分析. 热带亚热带植物学报, 2021, 29(4): 349-359
- Shi G Y, Wang X Q, Han Y H, Yang C Y, Ma H F, Zhao X W, Qiao Z J. Heterosis and genetic characteristics analysis for yield and quality related characters in *Setaria Italica*. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2021, 29(4): 349-359
- [14] Anuradha N, Patro T, Divya M, Rani Y S, Triveni U. Genetic variability, heritability and correlation of quantitative traits in little millet genotypes. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry, 2017, 6(6): 489-492
- [15] 刘斌,李书田,王显瑞,柴晓娇. 谷子主要农艺性状的分析. 种子, 2014, 33(5): 88-90
- Liu B, Li S T, Wang X R, Chai X J. Analysis of main agronomic characters of foxtail millet. Seed, 2014, 33(5): 88-90
- [16] 王瑞,李中青,郭二虎,李齐霞,祁丽婷,王敏,孙万荣,邹志远,米鹏伟,张艾英,任先忠. 谷子主要农艺性状与产量的相关分析及通径分析. 安徽农业科学, 2019, 47(11): 28-30
- Wang R, Li Z Q, Guo E H, Li Q X, Qi L T, Wang M, Sun W R, Wu Z Y, Mi P W, Zhang A Y, Ren X Z. Correlation analysis and path analysis of main agronomic traits and yield of foxtail millet. Anhui Agricultural Sciences, 2019, 47(11): 28-30
- [17] Eric M O, Pangirayi T, Paul S, Mwangi G, Abhishek R. Correlations, path coefficient analysis and heritability for quantitative traits in finger millet landraces. Philippine Journal of Science, 2016, 145(2): 197-208
- [18] Govindaraj M, Selvi B, Rajarathinam S, Sumathi P. Genetic variability and heritability of grain yield components and grain mineral concentration in India's pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L) R. Br.) accessions. The African Journal of Food Agriculture, Nutrition and Development, 2013, 11(3): 4758-4771
- [19] Govindaraj M, Shanmugasundaram P, Muthiah A R. Estimates of genetic parameters for yield and yield attributes in elite lines and popular cultivars of India's pearl millet. African Journal of Agricultural Research, 2010, 5(22): 3060-3064



- [ 20 ] 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. 中国种业, 2011( 8 ): 21-22  
Zhang Y Z, Zhang Y G, Liu Q S. The role and position of millet in dry farming in Shanxi province. China Seed Industry, 2011( 8 ): 21-22
- [ 21 ] 李志华,穆婷婷,李会霞,田岗,刘鑫,景小兰. 谷子种质遗传多样性研究进展. 中国种业, 2017( 6 ): 21-24  
Li Z H, Mu T T, Li H X, Tian G, Liu X, Jing X L. Research progress on genetic diversity of millet germplasm. China Seed Industry, 2017( 6 ): 21-24
- [ 22 ] 夏雪岩,刘正理,程汝宏,张婷,任晓利,王颜霞,田彩娟. 两个谷子新不育系几个性状的配合力评价和遗传力分析. 中国农业科技导报, 2013, 15( 1 ): 116-122  
Xia X Y, Liu Z L, Cheng R H, Zhang T, Ren X L, Wang Y X, Tian C J. Combining ability evaluation and heritability analysis of several characters of two new millet male sterile lines. China Agricultural Science and Technology Guide, 2013, 15( 1 ): 116-122
- [ 23 ] 闫锋,崔秀辉,李清泉,王成,曾玲玲,刘峰,王立达,王宇先,于运凯. 谷子主要农艺性状的遗传参数分析. 黑龙江农业科学, 2010( 3 ): 28-30  
Yan F, Cui X H, Li Q Q, Wang C, Zeng L L, Liu F, Wang L D, Wang Y X, Yu Y K. Genetic parameter analysis of main agronomic traits of foxtail millet. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2010( 3 ): 28-30
- [ 24 ] Kalih R, Maurer H P, Hackauf B, Miedaner T. Effect of a rye dwarfing gene on plant height, heading stage, and Fusarium head blight in triticale (  $\times$  *Triticosecale* Wittmack ). Theoretical Applied Genetics, 2014, 127( 7 ): 1527-1536
- [ 25 ] 杨慧卿,王根全,郝晓芬,王晓宇,程乔林,秦玉忠. 山西谷子品种主要农艺性状的相关和主成分分析. 农学学报, 2020, 10( 10 ): 19-23  
Yang H Q, Wang G Q, Hao X F, Wang X Y, Cheng Q L, Qin Y Z. Correlation and principal component analysis of main agronomic characters of Shanxi millet varieties. Journal of Agronomy, 2020, 10( 10 ): 19-23
- [ 26 ] 赵芳,张晓磊,魏玮,赵治海,王晓明,宋国亮. 杂交谷子重组自交系群体农艺性状分析. 种子, 2021, 40( 8 ): 30-38  
Zhao F, Zhang X L, Wei W, Zhao Z H, Wang X M, Song G L. Analysis of agronomic traits of recombinant inbred lines of hybrid millet. Seed, 2021, 40( 8 ): 30-38
- [ 27 ] 杨延兵,张会笛,陈桂玲,张晗,王雪梅,王润丰,秦岭,管延安. 不同生态区骨干谷子品种表型鉴定与遗传分析. 核农学报, 2021, 35( 5 ): 1020-1029  
Yang Y B, Zhang H D, Chen G L, Zhang H, Wang X M, Wang R F, Qin L, Guan Y A. Phenotypic evaluation and genetic analysis of elite foxtail millet [ *Setaria italic* ( L. ) P. Beauv. ] cultivars from different eco-regions. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021, 35( 5 ): 1020-1029
- [ 28 ] 吕建珍,马建萍,独俊娥,赵凯,刘晓东. 春播谷子品种( 系 ) 生态适应性鉴定及主成分分析. 作物杂志, 2015( 6 ): 44-47  
Lv J Z, Ma J P, Du J E, Zhao K, Liu X D. Ecological adaptability identification and principal component analysis of spring sowing millet varieties. Crops, 2015( 6 ): 44-47
- [ 29 ] 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
- [ 30 ] 李剑峰,张博,全建章,王永芳,张小梅,赵渊,袁玺垒,贾小平,董志平. 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. 中国农业科学, 2019, 52( 24 ): 4453-4469  
Li J F, Zhang B, Quan J Z, Wang Y F, Zhang X M, Zhao Y, Yuan X L, Jia X P, Dong Z P. Associated loci detection and elite allelic variations analysis of main agronomic traits in foxtail millet ( *Setaria italica* L. ) based on SSR markers. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52( 24 ): 4453-4469

附表 1 本研究所用的 160 份谷子资源

Table S1 160 foxtail millet resources used in this study

序号 Serial number	品种名 Variety name	来源地 Origin region	序号 Serial number	品种名 Variety name	来源地 Origin region
1	郑谷 2	中国河南	40	坝谷 210	中国河北
2	豫谷 6	中国河南	41	坝 91-0130	中国河北
3	郑 06-6	中国河南	42	坝谷 139	中国河北
4	豫谷 3	中国河南	43	坝 91-0053	中国河北
5	郑 05-2	中国河南	44	坝 91-0079	中国河北
6	郑州 12	中国河南	45	毛毛谷	中国河北
7	郑 315	中国河南	46	沙粒滚	中国河北
8	郑 8041	中国河南	47	大九根齐	中国河北
9	安 5424	中国河南	48	矮 41	中国河北
10	豫谷 15	中国河南	49	衡谷 9 号	中国河北
11	豫谷 11	中国河南	50	毛谷 2 号	中国河北
12	豫谷 16	中国河南	51	南育 3 号	中国河北
13	安 4117	中国河南	52	承谷 11	中国河北
14	豫谷 13 号	中国河南	53	矮 88	中国河北
15	豫谷 18 号	中国河南	54	小青谷	中国河北
16	安 04-5014	中国河南	55	黄毛谷	中国河北
17	豫谷 2 号	中国河南	56	齐头白	中国河北
18	十里香	中国河南	57	老绳头	中国河北
19	毛毛亮	中国河南	58	龙爪谷	中国河北
20	大黄糯谷	中国河南	59	小白苗	中国河北
21	冀谷 27	中国河北	60	黑色腰	中国河北
22	冀谷 28	中国河北	61	济叶冲 4	中国山东
23	冀谷 17	中国河北	62	鲁谷 3 号	中国山东
24	金谷 1 号	中国河北	63	早白糯	中国山东
25	冀特 5 号	中国河北	64	钱串子	中国山东
26	冀谷 24	中国河北	65	拔谷	中国山东
27	冀谷 22	中国河北	66	红根子谷	中国山东
28	冀谷 18	中国河北	67	早谷	中国山东
29	冀谷 31	中国河北	68	晋汾 13	中国山西
30	复 12	中国河北	69	晋谷 35 号	中国山西
31	冀谷 15	中国河北	70	汾选 5 号	中国山西
32	冀谷 29	中国河北	71	皇龙谷	中国山西
33	冀谷 26	中国河北	72	红腿谷	中国山西
34	冀谷 30	中国河北	73	大同黄	中国山西
35	谷丰 1	中国河北	74	龙谷 26	中国黑龙江
36	532	未知	75	白谷 9 号	中国吉林
37	张农 8	中国河北	76	公谷 66 号	中国吉林
38	坝谷 6	中国河北	77	公谷 69 号	中国吉林
39	坝谷 81	中国河北	78	公矮 3 号	中国吉林
79	白杆白沙	中国吉林	113	ISE770	国际半干旱研究所 (ICRISAT)
80	糟皮一把奇	中国黑龙江	114	ISE775	国际半干旱研究所 (ICRISAT)
81	龙爪粘	中国黑龙江	115	岛原	日本
82	安丰	中国黑龙江	116	六十日	日本
83	老来变	中国黑龙江	117	金德	美国

84	06-766	中国北京	118	Red	南非
85	小早谷	中国北京	119	Red	俄罗斯
86	红杆谷	中国陕西	120	K-3606	美国
87	呼和浩特大毛谷	中国陕西	121	Ise-455	德国
88	延谷 11 号	中国陕西	122	Set64/82	未知
89	11 鄰 1071	未知	123	8322-14	中国辽宁
90	米泉谷	中国新疆	124	白米 1 号	未知
91	沙湾谷子	中国新疆	125	2013	中国河北
92	谷子	中国新疆	126	谷丰 2 号	未知
93	谷子	中国新疆	127	芝麻粟	中国湖南
94	谷上谷	中国甘肃	128	大头糯	中国四川
95	陇谷 11 号	中国甘肃	129	乐山白糯	中国西藏
96	塞外香谷子	中国宁夏	130	黄谷	中国广西
97	红燃谷	中国宁夏	131	黄粟	中国青海
98	小苗谷	中国宁夏	132	黄谷子	中国青海
99	大青苗鱼刺	中国甘肃	133	喇叭黄	中国河北
100	朶红谷	中国甘肃	134	15HN-206	中国河北
101	黄玉 3	中国内蒙古	135	15HN-138	中国河北
102	粳紫灰谷	中国内蒙古	136	15HN-79	中国吉林
103	二白谷	中国内蒙古	137	六十天还家	中国青海
104	蒜皮白	中国内蒙古	138	谷子	中国宁夏
105	金香玉	中国内蒙古	139	红糯谷	中国甘肃
106	朝鲜谷子	朝鲜	140	小明谷子	未知
107	SET3/80	德国	141	粘子糯	未知
108	ISE-430	美国	142	毛粟	中国甘肃
109	大王国	日本	143	茄谷	中国陕西
110	ISE-245	印度迈索尔邦	145	然谷	中国吉林
111	法谷 28-81	法国	146	红苗 2	中国吉林
112	骨绿早 1	朝鲜	147	叩根	中国辽宁
144	铁谷 4 号	中国辽宁	148	小金苗	中国吉林
149	嫩选十号	中国黑龙江	155	黑谷子	中国河北
150	陇谷 10 号	中国甘肃	156	赤谷 6 号	中国内蒙古
151	辽谷 1 号	中国辽宁	157	二不黄	中国山西
152	嫩选十六	中国黑龙江	158	白罗砂	中国河北
153	蒙早谷 9 号	中国内蒙古	159	竹叶青	中国河北
154	红钙谷	中国天津	160	压塌车	中国河北