

# 谷子重组自交系主要农艺性状和品质性状相关分析

陈慢慢<sup>1</sup>, 田翔<sup>2</sup>, 陈凌<sup>2</sup>, 王海岗<sup>2</sup>, 刘思辰<sup>2</sup>, 李志江<sup>3</sup>, 马金丰<sup>3</sup>, 乔治军<sup>1,4</sup>, 刁现民<sup>4,5</sup>

(<sup>1</sup>山西农业大学农学院, 晋中 030801; <sup>2</sup>山西农业大学农业基因资源研究中心, 太原 030031; <sup>3</sup>黑龙江农业科学院作物品种资源研究所, 哈尔滨 150086; <sup>4</sup>农业部黄土高原作物基因资源与种质创制重点实验室, 山西太原 030031; <sup>5</sup>中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081)

**摘要:**通过对谷子主要农艺性状遗传变异分析, 探讨影响谷子直链淀粉和黄色素含量的主要因素, 筛选出综合性状优良的株系, 为谷子遗传改良和创造新种质提出理论参考。本研究以嫩选15和黄金苗杂交获得的重组自交系群体为材料, 于2020年和2021年种植于山西农业大学东阳示范基地, 对籽粒直链淀粉、黄色素2个品质性状和株高、穗长、叶面积、茎粗、穗粗、茎节数、单穗重、穗粒重8个主要农艺性状进行了遗传变异分析、相关性分析和回归分析。综合两年试验结果表明: 亲本之间黄色素含量、直链淀粉含量、叶面积和穗粗存在显著差异; RIL群体所调查性状变异丰富, 分布近似符合正态分布, 表现双向超亲分离。各个性状的变异系数范围为8.05%~35.32%, 综合分析两年数据可知, 单穗重和穗粒重变异系数较高, 株高和直链淀粉含量的变异系数较低。黄色素含量与直链淀粉、株高、茎节数呈极显著正相关, 与穗粒重呈显著正相关, 与叶面积呈极显著负相关。直链淀粉含量与叶面积、茎粗、穗长呈极显著负相关, 和茎节数呈极显著正相关。进一步回归分析可知, 叶面积、株高和穗长是影响黄色素含量的最主要因素, 叶面积、穗长对直链淀粉含量存在负向的影响作用, 单穗重、穗粗、茎节数对直链淀粉含量存在正向的影响作用。

**关键词:** 谷子; RIL群体; 遗传变异; 相关分析; 回归分析

## Correlation Analysis of Key Agronomic Traits and Food Quality Using a Foxtail Millet Recombinant Inbred Lines

CHEN Man-man<sup>1</sup>, TIAN Xiang<sup>2</sup>, CHEN Ling<sup>2</sup>, WANG Hai-gang<sup>2</sup>, LIU Si-chen<sup>2</sup>, LI Zhi-jiang<sup>3</sup>, MA Jin-feng<sup>3</sup>, QIAO Zhi-jun<sup>1,4</sup>, DIAO Xian-min<sup>4,5</sup>

(<sup>1</sup>College of Agriculture, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801; <sup>2</sup>Center for Agricultural Genetic Resources Research, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031; <sup>3</sup>Institute of Crop Variety Resources, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086; <sup>4</sup>Key Laboratory of Crop Gene Resources and Germplasm Enhancement on Loess Plateau of Ministry of Agriculture, Shanxi Taiyuan 030031; <sup>5</sup>Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

**Abstract:** To provide the theoretical basis for germplasm innovation and breeding in foxtail millet, disclosing the genetic variation of the key agronomic traits, exploration of the genetic factors affecting the content of amylose and yellow pigment in grain, and identification of the new lines with excellent performances become of significant interest. In this study, the recombinant inbred lines derived from 'Nenxuan 15' crossed with 'Huangjinmiao' were planted in the experimental field located in Dongyang county of Shanxi province, P. R. China (2020 and 2021). Genetic variation analysis, correlation analysis, and regression analysis were carried out on two food quality traits (amylose and yellow pigment in grain), and eight quantitative traits including plant height, panicle length, leaf area, stem diameter, panicle diameter, stem pitch number, single panicle weight and panicle grain weight. The significant differences on yellow pigment content, amylose content, leaf area, and

收稿日期: 2022-08-21 修回日期: 2022-09-09 网络出版日期: 2022-10-21

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20220821001>

第一作者研究方向为旱作栽培与作物生理, E-mail: 1765907334@qq.com

通信作者: 乔治军, 研究方向为旱作栽培与作物生理, E-mail: qiaozhijun@sxau.edu.cn

刁现民, 研究方向为品种资源和谷子遗传育种, Email: diaoxianmin@caas.cn

基金项目: 国家现代农业产业技术体系(CARS-06-14.5-A16)

Foundation project: China Modern Agricultural Industrial Technology System (CARS-06-14.5-A16)

panicle diameter between parents were observed. The RIL population lines showed comprehensive variations with (close to) normal distributions at these traits, showing two-way super parental separation. The coefficient of variation in each character ranged from 8.05% to 35.32%. According to the comprehensive analysis of the two-year data, the coefficient of variation on single panicle weight and grain weight per panicle were high, whereas the coefficient of variation on plant height and amylose content were low. The content of yellow pigment was positively correlated with amylose, plant height, stem pitch number and grain weight, whereas it was negatively correlated with leaf area. Amylose content was negatively correlated with leaf area, stem diameter, and panicle length, whereas positively correlated with the stem pitch number. Furthermore, regression analysis showed that leaf area, plant height, and panicle length were the most important factors affecting yellow pigment content. Leaf area and panicle length had a negative effect on amylose content, whilst single panicle weight, panicle diameter, and stem pitch number had a positive effect on amylose content.

**Key words:** foxtail millet; RIL group; genetic variation; correlation analysis; regression analysis

谷子(*Setaria italica*)是起源于中国的作物,被驯化成为农耕文化的主栽作物,目前的种植面积和产量占世界80%以上<sup>[1-3]</sup>。谷子脱壳后为小米,是公认的营养食品。与小麦粉和稻米等主粮相比,小米不仅富含蛋白质、脂肪、膳食纤维、维生素等营养物质<sup>[4]</sup>,而且含有丰富的活性成分,如酚类、活性肽、类胡萝卜素等,具有降血糖、降血脂、降血压等多种保健功能<sup>[5-6]</sup>。小米味美好吃,易消化,营养丰富配比均衡,在中国北方备受农民喜爱,也是城镇居民主要的杂粮选择之一<sup>[7]</sup>。它是一种很好的营养品,体弱多病和产妇食用具有较好的滋补、强身作用。小米除焖饭、煮粥等直接食用外,还可加工成煎饼、发糕、小米酥等系列产品 and 营养调味食品。谷子作为食用作物,营养丰富的同时,优质的外观和良好的口感也非常重要。小米的米色直接反映品质,是消费者选购小米的直观标准。王玉文等<sup>[8]</sup>研究表明,不同米色谷子品种,其营养品质差异明显,小米的米色与其蒸煮后米饭的色泽、香味、适口性呈极显著正相关,即米色越黄越亮,米饭的色泽、香味、适口性越好。多数谷子品种的籽粒为黄色,黄色的主要来源为黄色素。小米黄色素主要组分为天然类胡萝卜素,主要含有叶黄素、玉米黄素以及少量的隐黄质、 $\beta$ -胡萝卜素等,这些类胡萝卜类素不仅具有保护视觉与上皮细胞的作用,而且可以提高人体免疫力,淬灭体内过多自由基,预防多种癌症,同时对口腔溃疡、皮肤病等都有很好的疗效<sup>[9]</sup>。淀粉是植物界最主要的储能物质,也是为人类提供机体能量的生物聚合物。淀粉作为一种来源丰富、生物可降解、生物相容性好和易被修饰的生物基材料,已被广泛应用于食品、医药、纺织、石油和造纸等行

业<sup>[10-13]</sup>。天然淀粉一般由直链淀粉和支链淀粉组成,而直链淀粉含量是衡量淀粉的糊化、流变、老化和消化等功能性质的重要指标之一<sup>[14-15]</sup>。例如,稻米中的直链淀粉含量影响着稻米的晶体结构、热力学性能、糊化程度、老化(回生)特性等淀粉功能特征,对稻米品质起着决定性的作用。直链淀粉含量越高,淀粉越容易发生老化,淀粉消化率也越低,从而提高了其抗消化能力<sup>[16]</sup>。一般中到低含量的直链淀粉制成的米饭较软,适口性更好,饭粒光泽度较好,而高直链淀粉的米饭较硬,适口性较差,但有预防糖尿病和肥胖症等方面的作用<sup>[17-19]</sup>。直链淀粉含量是影响品种食味品质最关键的因素。因此,直链淀粉含量的测定对谷子副食品的精深加工和产业化具有重要的意义。但黄色素和直链淀粉含量在生产和育种中不能直观的观测到,通过分析其与易观测的农艺性状之间的相关关系,从侧面反映黄色素和直链淀粉含量的高低,对田间目标品质性状株系的快速选择具有重要的参考意义。重组自交系(RIL)群体是两个亲本杂交后获得的纯系后代,具有相对一致的遗传背景和丰富的自然变异,是研究性状表型遗传变异规律及其与环境间互作的理想材料<sup>[20]</sup>。本研究利用嫩选15和黄金苗进行杂交获得的RIL群体,连续两年对籽粒黄色素、直链淀粉含量和株高、穗长、叶面积等8个主要农艺性状进行鉴定,分析重组后代主要农艺性状和目标品质性状的遗传变异,并通过相关性分析和进一步回归分析挖掘影响籽粒品质的农艺性状,筛选后代株系的有利变异,为优质谷子的选育提供参考依据,也为开展谷子重要籽粒品质性状的QTL定位奠定基础。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

以嫩选15为母本,黄金苗为父本杂交后,得到杂种 $F_1$ , $F_1$ 单株自交获得 $F_2$ ,通过 $F_2$ 单粒传法获得含有400个株系的重组自交系群体(RILs)为供试材料。嫩选15是黑龙江齐齐哈尔育成的优质品种,具有高产、抗倒伏、中矮秆、中熟、抗病等特点,但同时也具有适口性不好和色泽差等缺点。黄金苗是市场上的优质品种之一,产于内蒙古赤峰,米色鲜黄、适口性好、不回生、适宜煮粥和焖饭,但是具有晚熟、不抗倒伏、秆高不高产、区域适应性差等缺点。两个亲本不仅生态类型不同,而且株高、穗型等多个农艺性状的差异也较大<sup>[20]</sup>。

### 1.2 试验设计

供试材料分别于2020年和2021年的5月播种于山西农业大学东阳示范基地(37.6°N, 112.7°E),供试土壤为黄色土,中等肥力。田间试验按照随机区组设计,2次重复,小区面积6 m×2 m,行距33 cm,每个小区种植6行。于8月中旬进行田间性状调查,9月下旬收获并考种。

### 1.3 测定指标及方法

**1.3.1 农艺性状** 测定株高、叶面积、茎粗、穗长、穗粗、茎节数、单穗重、穗粒重8个主要农艺性状,均参照《谷子种质资源描述规范和数据标准》<sup>[21]</sup>。每个株系取外观相似的3株测量相应农艺性状,数据取平均值。

**1.3.2 黄色素** 参照杨延兵等<sup>[22]</sup>方法测定谷子籽粒黄色素含量。每个株系3次重复,取平均值。

**1.3.3 直链淀粉** 参照高嘉安<sup>[23]</sup>碘比色法测定直链淀粉含量。每个株系3次重复,取平均值。

### 1.4 数据处理

用Excel2019统计分析数据,用SPSS26进行方差分析及回归分析,用Origin2022进行正态分布检验和相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 亲本及后代群体主要性状变异分析

亲本主要性状方差分析可知(表1),2020年父本(黄金苗)的黄色素、叶面积显著高于母本(嫩选15),株高、茎粗、穗粗、单穗重、穗粒重均显著高于母本,直链淀粉含量显著低于母本,穗长高于母本,但差异不明显;2021年父本的叶面积显著高于母本,黄色素、穗长、穗粗显著高于母本,直链淀

粉含量显著低于母本,株高、茎粗、单穗重、穗粒重都高于母本,但不显著;两年的茎节数在父母本中差异都不显著。综合两年数据可知,除直链淀粉含量外,试验所测数据父本(黄金苗)均高于母本(嫩选15)。RIL群体中各个性状存在较大差异(表1)。2020年穗粒重的变异系数最大,为32.15%,其次是单穗重,为29.11%,茎节数的变异系数最小,为8.05%;2021年所测性状的变异系数均高于10%,叶面积超过20%,为23.64%,单穗重和穗粒重超过30%,分别为35.32%和33.47%;两年的黄色素、直链淀粉、株高、茎粗、穗长、穗粗、单穗重、穗粒重变异系数差异不大,2021年叶面积、茎节数的变异系数明显高于2020年。2020年所有性状的偏度和峰度绝对值均小于1,2021年株高峰度绝对值大于1,其余性状的偏度和峰度绝对值均小于1,根据图1和图2所示,所有性状基本呈现出正态分布规律,表明所有调查性状均为数量性状,且均出现超亲分离现象(后代出现高于高值亲本和低于低值亲本的个体)。根据表2可知,2020年黄色素含量高于高值亲本的株系有7个,最高的是第261个株系,为35.72 μg/g,2021年黄色素含量高于高值亲本的有79个株系,最高的是第13个株系,为40.33 μg/g,第261个株系含量排第二,为39.88 μg/g。2020年直链淀粉含量高于高值亲本的株系有9个,含量最高的是第21个株系,为11.54 mg/g,2021年直链淀粉含量高于高值亲本的株系有37个,最高的是第94个株系,为12.04 mg/g。综合两年数据分析,叶面积、茎粗这2个农艺性状2021年均值低于2020年。黄色素含量、直链淀粉含量、株高、茎节数、穗长、穗粗、单穗重、穗粒重这8个性状2021年均值均高于2020年。结合两年所测性状的平均值可以看出,黄色素含量、直链淀粉含量、叶面积、茎节数年度间变化大,株高、茎粗、穗长、穗粗、单穗重、穗粒重受年度影响较小。

### 2.2 RIL群体品质性状与主要农艺性状的相关性分析

由RIL群体品质性状和主要农艺性状相关性分析可知(图3),黄色素含量和直链淀粉含量、株高、茎节数极显著正相关,和穗粒重显著正相关,和叶面积极显著负相关。直链淀粉含量和叶面积、茎粗、穗长均呈极显著负相关,和茎节数极显著正相关。主要农艺性状之间几乎都呈现出正向的相关关系。

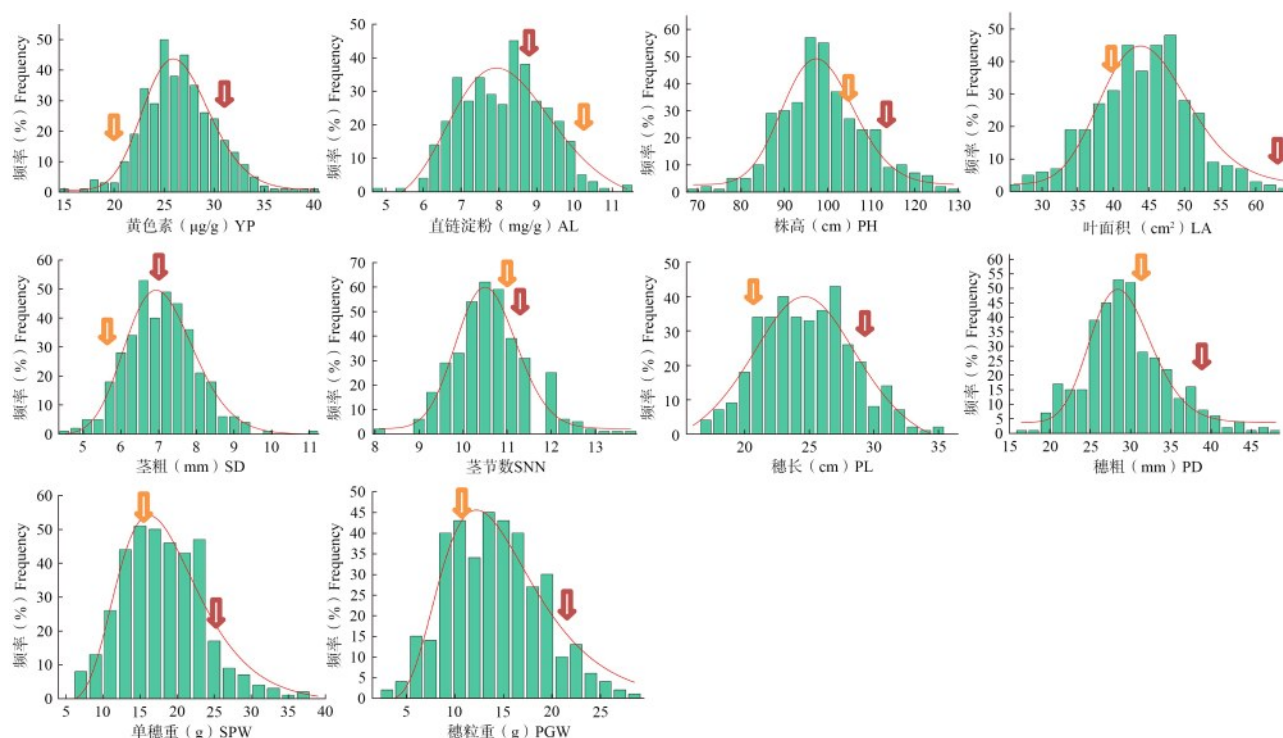
表 1 亲本和重组自交系主要性状变异分析

Table 1 Variation analysis of main characters of parents and recombinant inbred lines

性状 Trait	年份 Year	亲本 Parent			重组自交系 RIL				
		嫩选 15 Nenxuan15	黄金苗 Huangjinmiao	F	变异范围 Range	平均值±标准差 Mean±SD	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	变异系数 (%) CV
黄色素 (μg/g)	2020	20.03	30.13	8.954**	15.27~35.72	23.04±3.17	0.416	0.598	13.76
YP	2021	22.48	29.70	3.274*	15.82~40.33	27.10±3.61	0.354	0.854	13.32
直链淀粉 (mg/g)	2020	10.36	8.95	6.027*	5.01~11.54	8.27±1.10	0.066	-0.451	13.30
AL	2021	10.75	8.56	3.457*	6.66~12.04	9.27±1.09	-0.032	-0.807	11.76
株高 (cm)	2020	137.83	143.3	3.546*	70.24~129.93	100.47±10.06	0.083	0.491	10.01
PH	2021	101.30	112.17	0.761	69.27~133.03	102.98±10.79	0.293	-1.150	10.48
叶面积 (cm <sup>2</sup> )	2020	40.37	62.33	10.65**	27.63~65.48	45.03±6.74	-0.073	-0.06	14.97
LA	2021	31.62	50.13	5.45**	15.80~65.41	34.81±8.23	0.306	0.359	23.64
茎粗 (mm)	2020	5.85	7.00	3.45*	4.71~11.12	7.21±0.90	0.309	0.667	12.50
SD	2021	7.66	8.14	2.43	4.72~9.81	7.17±0.72	0.147	0.449	10.04
茎节数	2020	11	11	0.22	8.33~14	10.77±0.867	0.263	0.455	8.05
SPN	2021	11	12	2.19	8~14	11.29±1.86	-0.165	0.460	16.47
穗长 (cm)	2020	21.83	28.13	2.44	17.00~35.87	25.29±3.52	0.233	-0.341	13.92
PL	2021	23	21.8	4.66*	17.00~41.00	26.05±4.23	0.414	-0.07	16.25
穗粗 (mm)	2020	30.84	38.54	3.62*	17.41~48.25	30.34±5.30	0.532	0.531	17.47
PD	2021	32.48	38.07	3.18*	21.07~50.65	30.42±5.46	0.941	0.847	17.95
单穗重 (g)	2020	15.11	25.95	3.08*	7.18~38.30	19.11±5.54	0.46	0.404	29.11
SPW	2021	25.50	30.25	2.52	8.09~52.03	22.11±7.81	0.799	0.933	35.32
穗粒重 (g)	2020	11.18	20.67	3.12*	4.46~41.07	14.87±4.78	0.261	-0.215	32.15
PGW	2021	21.01	22.54	2.50	14.87~4.78	16.73±5.60	0.639	0.864	33.47

\*和\*\*分别表示两亲本间同一性状差异达到 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 显著水平;下同

\*and\*\* respectively indicate that the difference of the same trait between the two parents reaches  $P<0.05$  and  $P<0.01$  significant levels; YP: Yellow pigment; AL: Amylose; PH: Plant height; LA: Leaf area; SD: Stem diameter; SPN: Stem pitch number; PL: Panicle length; PD: Panicle diameter; SPW: Single panicle weight; PGW: Panicle grain weight; The same as below



↓:代表母本嫩选15; ↓:代表父本黄金苗;下同

↓:Represents female parent Nenxuan 15; ↓:Represents male parent Huangjinmiao; The same as below

图 1 2020年调查性状频率分布

Fig.1 Frequency distribution of investigated characters in 2020

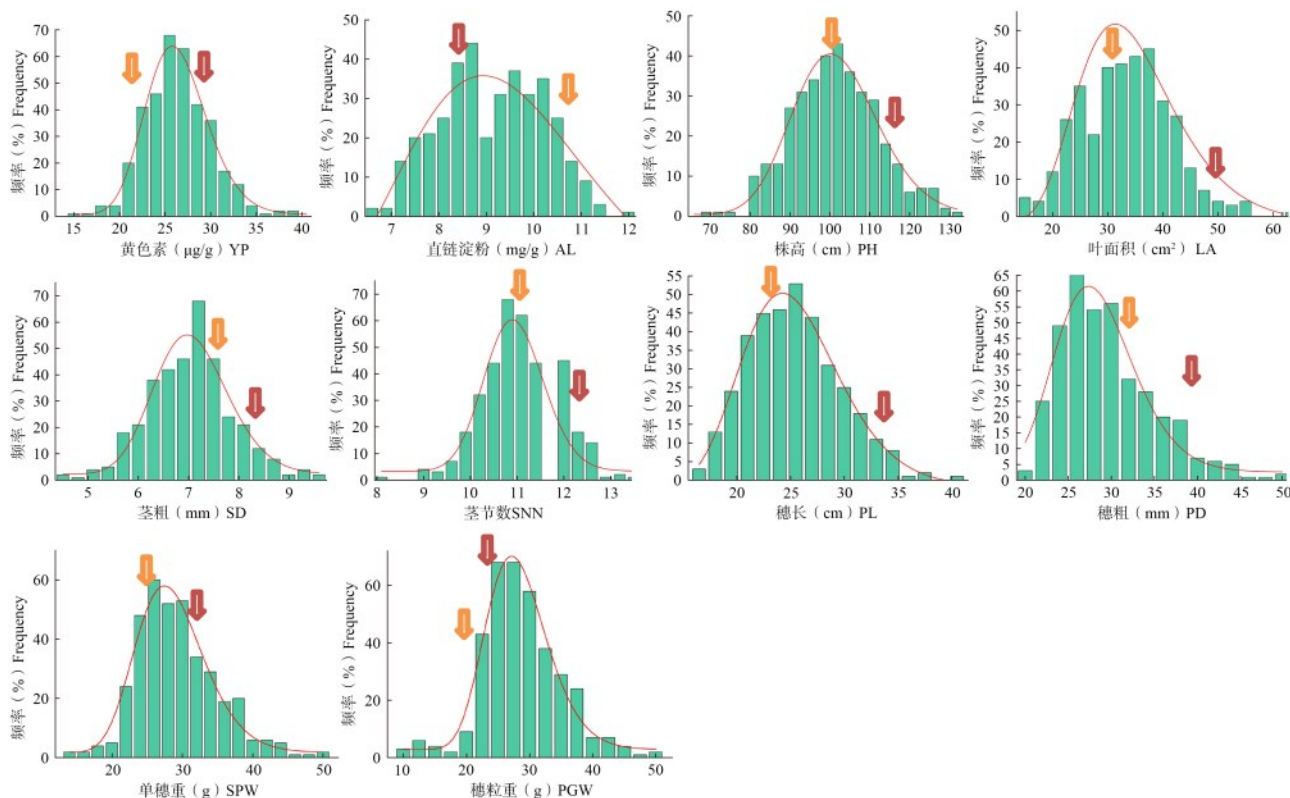


图2 2021年调查性状频率分布

Fig.2 Frequency distribution of investigated characters in 2021

表2 2020年和2021年调查性状超亲分离统计

Table 2 Statistics of super parent segregation of investigated characters in 2020 and 2021

指标 Index	年份 Year	黄色素 YP	直链淀粉 AL	株高 PH	叶面积 LA	茎粗 SD	节数 SPN	穗长 PL	穗粗 PD	单穗重 SPW	穗粒重 PGW
高于高值亲本个数 The number of higher than the high parents	2020	7	9	59	1	211	111	77	27	36	41
	2021	79	37	72	12	45	36	24	34	39	49
低于低值亲本个数 The number of lower than the low parents	2020	65	272	267	90	22	260	65	220	96	88
	2021	29	106	166	125	274	176	95	256	268	293

### 2.3 籽粒品质性状对农艺性状的逐步回归分析

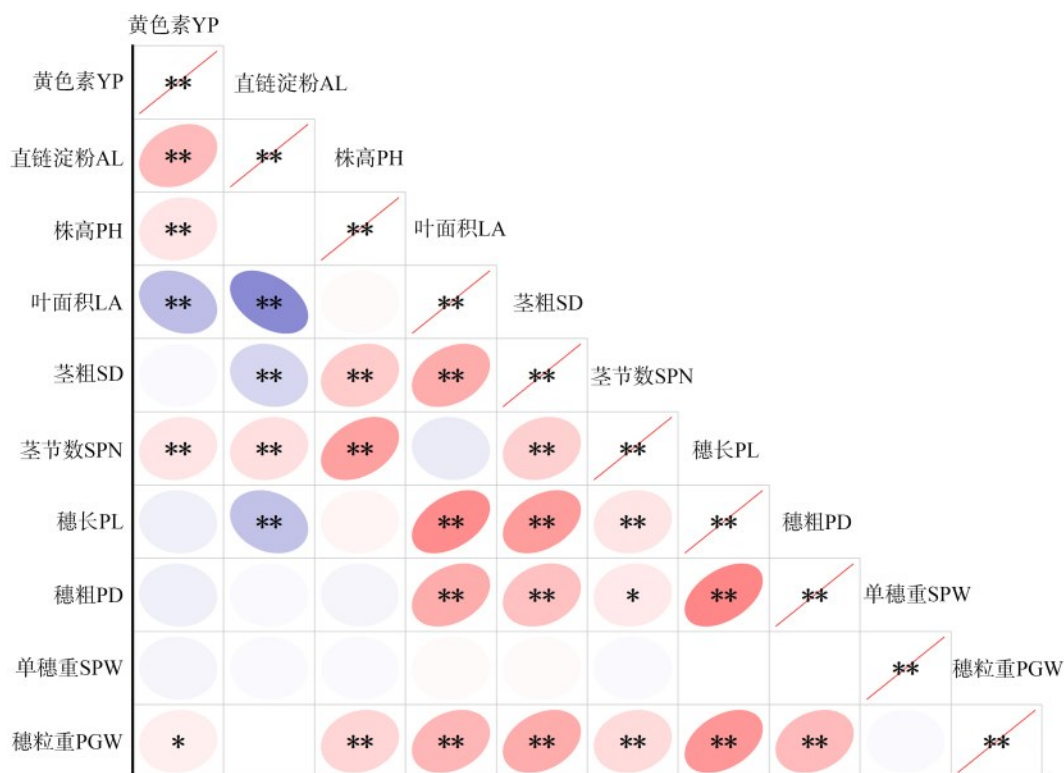
为验证上述结果,分别以黄色素含量( $X$ )、直链淀粉含量( $Y$ )为因变量,以株高( $Z_1$ )、叶面积( $Z_2$ )、茎粗( $Z_3$ )、穗长( $Z_4$ )、穗粗( $Z_5$ )、茎节数( $Z_6$ )、单穗重( $Z_7$ )、穗粒重( $Z_8$ )8个农艺性状为自变量进行多元逐步回归分析,去除回归参数不显著的农艺性状,根据回归分析输出结果(表3)可得到,VIF值全部小于5,意味着运算结果准确可靠。 $P$ 值均小于0.01,说明株高、叶面积、穗长和黄色素之间存在极显著的影响关系。基于以上分析可得出黄色素含量的线性回归方程:

黄色素含量方程: $X=25.398+0.042Z_1+0.058Z_2-0.178Z_4$ 。说明株高、叶面积每增加一单位,黄色素

含量分别增加0.042  $\mu\text{g/g}$ 和0.058 $\mu\text{g/g}$ ,穗长每增加一单位,黄色素含量减少0.178  $\mu\text{g/g}$ 。

根据表4可知,VIF值全部小于5,表明叶面积、单穗重、穗长、穗粗、茎节数这5个农艺性状之间不存在混杂干扰, $P$ 值均小于0.05,表明与直链淀粉含量均存在显著的影响关系。其最优线性回归方程为:

直链淀粉含量方程: $Y=9.699-0.039Z_2+0.023Z_7-0.086Z_4+0.052Z_5+0.097Z_6$ 。说明叶面积、穗长每增加一个单位,直链淀粉含量分别减少0.039、0.086 mg/g,单穗重、穗粗、茎节数每增加一个单位,直链淀粉含量分别增加0.023、0.052、0.097 mg/g。



蓝色表示负相关, 红色表示正相关; 椭圆越扁颜色越深表示相关系数越大

Blue indicates negative correlation, red indicates positive correlation;

The flatter the ellipse and the darker the color, the greater the correlation coefficient

图3 RIL群体品质性状和主要农艺性状相关性分析

Fig.3 Correlation analysis of quality traits and main agronomic traits in RIL population

表3 黄色素对农艺性状的多元回归分析

Table 3 Multiple regression analysis of yellow pigment on agronomic characters

自变量 IV	偏回归系数 PRC	标准误差 SE	t	P	方差膨胀 系数 VIF
常量CQ	25.398	1.528	16.620	0.000	
株高PH	0.042	0.012	3.426	0.001	1.015
叶面积LA	0.058	0.021	2.804	0.005	1.687
穗长PL	-0.178	0.040	-4.417	0.000	1.691

IV: Independent variable; CQ: Constant quantity; PRC: Partial regression coefficient; SE: Standard error; VIF: Variance inflation factor; The same as below

表4 直链淀粉对农艺性状的多元回归分析

Table 4 Multiple regression analysis of amylose on agronomic characters

自变量 IV	偏回归系数 PRC	标准误差 SE	t	P	方差膨胀 系数 VIF
常量CQ	9.699	0.563	17.243	0.000	
叶面积LA	-0.039	0.006	-6.452	0.000	1.951
单穗重SPW	0.023	0.007	3.384	0.001	1.749
穗长PL	-0.086	0.012	-7.243	0.000	1.951
穗粗PD	0.052	0.008	6.725	0.000	1.386
茎节数SPN	0.097	0.045	2.141	0.033	1.004

### 3 讨论

遗传分离群体后代极易产生双向超亲现象, 成为具有良好综合性状的个体, 是育种过程中筛选优质和目标种质的有效资源。谷子的表型之间存在极其复杂的相关关系, 所以在生产实践中, 选择单一的性状作为目标育种性状十分困难, 需要结合实际, 对多个相关性状进行综合考虑, 既对主要的目的性状选择严格把关, 又要兼顾其他优良性状。

育种工作者为了满足生产需求而创造遗传变异, 遗传参数的变异系数可以在一定程度上反映性状的多样性, 一般来说, 变异系数越大, 多样性程度就越高。通常变异系数大于10%时, 说明该性状遗传多样性丰富<sup>[24]</sup>。育种进程中, 农艺性状和品质性状是种质资源鉴定评价的重要依据。赵芳等<sup>[25]</sup>在对224个谷子品种的农艺性状分析中表明, 单穗重、穗粒重、茎粗、穗粗、穗长、颈长等变异系数均大于20%, 表明这些性状的变异程度大。任芹勇等<sup>[26]</sup>对65份谷子品种的农艺性状进行了变异分析, 农艺性状的变异范围为11.66%~49.79%, 各农艺性状的变

异程度由大到小依次分别为单穗粒重、单穗重、千粒重、穗长、穗粗、株高、节数。刘晓辉<sup>[27]</sup>对谷子8个组合F<sub>2</sub>的6个性状遗传变异进行分析,F<sub>2</sub>群体普遍存在超亲遗传现象,其单穗重、千粒重和株高等性状分离均呈单峰曲线,近似于正态分布。本研究中谷子RILs群体的亲本黄色素含量、直链淀粉含量、叶面积和穗粗存在显著差异。重组后代8个主要农艺性状和2个品质性状变异丰富,分布规律均近似符合正态分布,后代也都表现出双向超亲分离现象,表明所调查性状均是受微效多基因控制的数量性状。后代主要农艺性状和目标品质性状的变异幅度为8.05%~35.32%。变异系数较大的是单穗重和穗粒重,较小的是茎节数,与刘思辰等<sup>[28]</sup>调查的212份山西谷子资源的单穗重变异系数(24.74%)和穗粒重的变异系数(26.87%)存在一定差异,其他性状近似。与赵利蓉等<sup>[29]</sup>在对不同生态区谷子品种农艺性状和品质分析中测得的单穗重变异系数为32.61%、穗粒重的为31.79%、穗长的为16.06%、穗粗的为14.48%也都近似,但直链淀粉的为7.63%与本研究中的13.3%和11.76%存在差异,可能是供试材料本身存在差异。

目前科研工作者对黄色素和直链淀粉含量的研究颇多,Wx基因是控制稻米直链淀粉含量合成的关键基因<sup>[30]</sup>,近年来,也有很多研究者利用基因编辑创制新的Wx等位变异来改变稻米的淀粉含量,从而改良稻米品质<sup>[31-33]</sup>。小麦第7同源染色体组上存在控制黄色素含量的主效基因位点<sup>[34]</sup>,He等<sup>[35]</sup>开发了分子功能标记YP7A和YP7A-2用来检测Psy-Ala、Psy-Alb和Psy-A1c等位基因,其中等位基因Psy-Ala控制高黄色素含量,等位基因Psy-Alb控制低黄色素含量,等位基因Psy-A1c控制高黄色素含量。株高、穗长等主要农艺性状也由相应的基因控制。表型主要由基因和环境两个因素决定,但数量性状由多个基因控制,基因之间也会存在连锁关系,所以各个表型之间也可能存在相应的相关关系。李猛等<sup>[36]</sup>研究表明倒3节间长与整精米率、直链淀粉含量呈极显著正相关。凡迪等<sup>[37]</sup>所测小麦籽粒的营养性状和农艺性状之间均存在显著的负相关关系。本研究测定的黄色素含量和直链淀粉含量、株高、茎节数极显著正相关,和穗粒重显著正相关,和叶面积极显著负相关;直链淀粉含量和叶面积、茎粗、穗长均呈现极显著负相关,和茎节数极显著正相关。

黄色素和直链淀粉含量作为评价小米品质的

重要标准,与农艺性状之间的遗传关系极其复杂,不能单凭相关系数的大小来判断他们之间的影响。本研究中分析的主要农艺性状与品质性状的相关关系不能直接说明他们之间的相关关系,但农艺性状可以作为田间目标品质性状初步选择的参考,为后续检测试验节省大量的成本和时间。也为后续定位控制黄色素、直链淀粉含量和主要农艺性状的QTL位点奠定基础。

#### 参考文献

- [1] 刁现民. 禾谷类杂粮作物耐逆和栽培技术研究新进展. 中国农业科学, 2019, 52(22):3943-3949  
Diao X M. Progresses in stress tolerance and field cultivation studies of orphan cereals in China. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(22):3943-3949
- [2] 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
- [3] 李会霞, 田岗, 王玉文, 刘鑫, 刘红. 谷子杂交种与亲本性状的遗传相关性. 中国农业科学, 2020, 53(2):239-246  
Li H X, Tian G, Wang Y W, Liu X, Liu H. Genetic correlation between millet hybrids and their parents. Scientia Agricultural Sinica, 2020, 53(2):239-246
- [4] Nithiyantham S, Kalaiselvi P, Mahomoodally M F, Zengin G, Abirami A, Srinivasan G. Nutritional and functional roles of millets-A review. Food Biochem, 2019, 43:e12859
- [5] 刘建奎, 常柳, 段晓亮, 王文娟, 孙辉. 谷子的生产概况及其保健功能与机理研究进展. 食品工业科技, 2022, 43(5), 389-395  
Liu J L, Chang L, Duan X L, Wang W J, Sun H. Foxtail millet: Production status, advances on health benefits and its mechanism. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(5):389-395
- [6] Kaur P, Purewal S S, Sandhu K M, Salar R K. Millets: A cereal grain with potent antioxidants and health benefits. Food Measure, 2019, 13:793-806
- [7] 郑楠楠, 蔡文涛, 王春玲, 负婷婷, 么杨, 任贵兴. 不同品种谷子营养成分及功能活性成分差异化分析. 粮油食品科技, 2018, 26(2):34-39  
Zheng N N, Qi W T, Wang C L, Yu T T, Yao Y, Ren G X. Differential analysis of nutritional components and functional active components of different varieties of millet. grain, Oil and Food Science and Technology, 2018, 26(2):34-39
- [8] 王玉文, 李会霞, 田岗, 孙美荣, 史琴香, 郭二虎. 小米外观品质及淀粉RVA谱特征与米饭适口性的关系. 山西农业科学, 2008(7):34-39  
Wang Y W, Li H X, Tian G, Sun M R, Shi Q X, Guo E H. Relationship between appearance quality of millet and RVA

- spectrum characteristics of starch and palatability of rice. *Shanxi Agricultural Science*, 2008(7): 34-39
- [9] 杨延兵, 陈二影, 王润丰, 秦岭, 尹秀波, 张会迪, 黎飞飞, 管延安. 不同生态条件对小米黄色素含量的影响. *中国农业科学*, 2019, 52(18): 3232-3241  
Yang Y B, Chen R Y, Wang R F, Qin L, Yin X B, Zhang H D, Li F F, Guan Y A. Effects of different ecological conditions on yellow pigment content in millet. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(18): 3232-3241
- [10] 丁振, 冯朵, 曹盼盼, 李恩鹏, 李松南. 淀粉中直链淀粉含量检测技术的研究进展. *美食研究*, 2022, 39(1): 87-94  
Ding Z, Feng D, Cao P P, Li E P, Li S N. Research progress of amylose content detection technology in starch. *Food Research*, 2022, 39(1): 87-94
- [11] 陈严双. 天然淀粉改性机制及应用概述. *化工设计通讯*, 2021, 47(7): 165-166  
Chen Y S. Overview of modification mechanism and application of natural starch. *Chemical Engineering Design Communication*, 2021, 47(7): 165-166
- [12] 龚波. 水稻淀粉精细结构决定其热力学性质和消化特性. 扬州: 扬州大学, 2020  
Gong B. The fine structure of rice starch determines its thermodynamic and digestive properties. Yangzhou: Yangzhou University, 2020
- [13] 易拓, 黄娟, 雷雅杰, 宋勇. 木薯食品研究进展. *美食研究*, 2019, 36(2): 23-27  
Yi T, Huang J, Lei Y J, Song Y. Research progress of cassava food. *Food Research*, 2019, 36(2): 23-27
- [14] 胡桂仙, 王建军, 王小骊, 董秀金, 朱加虹. 稻米食味品质检测评价技术的研究现状及展望. *中国农学通报*, 2010, 26(19): 62-65  
Hu G X, Wang J J, Wang X L, Dong X J, Zhu J H. Research status and prospect of rice taste quality detection and evaluation technology. *Chinese Agronomy Bulletin*, 2010, 26(19): 62-65
- [15] 钱建亚, 吴秋艳, 张良. 脉冲电场对甘薯淀粉理化性质的影响. *美食研究*, 2017, 34(4): 55-59  
Qian J Y, Wu Q Y, Zhang L. Effect of pulsed electric field on physical and chemical properties of sweet potato starch. *Food Research*, 2017, 34(4): 55-59
- [16] Li L, Liu Z, Zhang W, Xue B, Luo Z. Production and applications of Amylose-Lipid complexes as resistant starch: Recent approaches. *Starch-Stärke*, 2021, 73: 2000249
- [17] 徐妙云, 邢利娟, 杨明雨, 张凌莹, 王磊, 刘悦萍. 高直链淀粉禾谷类作物种质创新与利用研究进展. *生物技术通报*, 2022, 38(4): 20-28  
Xu M Y, Xing L J, Yang M Y, Zhang L X, Wang L, Liu Y P. Research progress on germplasm innovation and utilization of high amylose cereal crops. *Biotechnology Bulletin*, 2022, 38(4): 20-28
- [18] 李部, 潘立旭, 杨勇, 朱霁晖, 陈飞, 李钱峰, 刘巧泉, 张昌泉. 高直链淀粉含量水稻品种间淀粉消化特性的差异分析. *扬州大学学报: 农业与生命科学版*, 2021, 42(2): 18-25  
Li B, Pan L X, Yang Y, Zhu J H, Chen F, Li Q F, Liu Q Q, Zhang C Q. Analysis of differences in starch digestion characteristics among rice varieties with high amylose content. *Journal of Yangzhou University: Agricultural and Life Sciences Edition*, 2021, 42(2): 18-25
- [19] 梁雪, 吴春红, 宫晓平, 郭营, 李斯深, 李絮花, 孔凡美. 不同钾处理下小麦重组自交系群体主要农艺性状的表型变异及其相关分析. *中国生态农业学报*, 2012, 20(5): 520-528  
Liang X, Wu C H, Gong X P, Guo Y, Li S S, Li X H, Kong F M. Phenotypic variation and correlation analysis of main agronomic characters of wheat recombinant inbred lines under different potassium treatments. *Chinese Journal of Ecological Agriculture*, 2012, 20(5): 520-528
- [20] 马金丰, 李志江, 李延东. 谷子嫩选 15×大金苗 F-2 群体农艺性状评价. *黑龙江农业科学*, 2019(9): 4-8  
Ma J F, Li Z J, Li Y D. MilletNenxuan 15 × Dajinmiao of agronomic characters of dajinmiao F-2 population. *Heilongjiang Agricultural Science*, 2019(9): 4-8
- [21] 陆平. 谷子种质资源描述规范和数据标准. 北京: 中国农业出版社, 2006  
Lu P. Description specification and data standard of millet germplasm resources. Beijing: China Agricultural Press, 2006
- [22] 杨延兵, 张涵, 王润丰, 邓立刚, 秦岭, 陈二影, 管延安. 谷子籽粒小米黄色素含量的测定. *中国粮油学报*, 2019, 34(3): 121-125  
Yang Y B, Zhang H, Wang R F, Deng L G, Qin L, Chen E Y, Guan Y A. Determination of millet yellow pigment content in millet. *Chinese Journal of Grain and Oil*, 2019, 34(3): 121-125
- [23] 高嘉安. 淀粉与淀粉制品工艺学. 北京: 中国农业出版社, 2001: 339  
Gao J A. Starch and starch product technology. Beijing: China Agricultural Press, 2001: 339
- [24] 杜荣骞. 生物统计学. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2014  
Du R Q. Biostatistics. 4th edition. Beijing: Higher Education Press, 2014
- [25] 赵芳, 魏玮, 张晓磊, 宋国亮, 王晓明, 赵治海, 赵春慧. 224个谷子品种农艺性状聚类和相关性分析. *种子*, 2022, 41(1): 74-83  
Zhao F, Wei W, Zhang X L, Song G L, Wang X M, Zhao Z H, Zhao C H. Clustering and correlation analysis of 224 millet varieties' agronomic characters. *Seed*, 2022, 41(1): 74-83
- [26] 任芹勇, 樊巧利, 李涛, 郭世华. 65份谷子品种农艺性状聚类和相关性. *分子植物育种*, 2017, 15(12): 5178-5188  
Ren Q Y, Fan Q L, Li T, Guo S H. Clustering and correlation of agronomic traits of 65 millet varieties. *Molecular Plant Breeding*, 2017, 15(12): 5178-5188
- [27] 刘晓辉. 谷子杂交育种研究II, F<sub>2</sub>代遗传及选择效果的研究. *吉林农业科学*, 1991(3): 12-16  
Liu X H. Studies on millet cross breeding II. Studies on the inheritance and selection effect of F<sub>2</sub> generation. *Jilin Agricultural Science*, 1991(3): 12-16
- [28] 刘思辰, 曹晓宁, 温琪汾, 王海岗, 田翔, 王君杰, 陈凌, 秦慧



- 彬,王纶,乔治军. 山西谷子地方品种农艺性状和品质性状的综合评价. 中国农业科学, 2020, 53(11): 2137-2148
- Liu S C, Cao X N, Wen Q F, Wang H G, Tian X, Wang J J, Chen L, Qin H B, Wang L, Qiao Z J. Comprehensive evaluation of agronomic and quality characteristics of Shanxi millet local varieties. *Scientia Agricultural Sinica*, 2020, 53(11): 2137-2148
- [29] 赵利蓉, 马珂, 张丽光, 汤沙, 原向阳, 刁现民. 不同生态区谷子品种农艺性状和品质分析. 作物杂志, 2022(2): 44-53
- Zhao L R, Ma K, Zhang L G, Tang S, Yuan X Y, Diao X M. Analysis of agronomic characteristics and quality of millet varieties in different ecological areas. *Crops*, 2022(2): 44-53
- [30] Wang Z Y, Zheng F Q, Shen G Z, Gao J P, Snustad D P, Li M G, Zhang J L, Hong M M. The amylose content in rice endosperm is related to the post-transcriptional regulation of the waxy gene. *The Plant Journal: For Cell and Molecular Biology*, 1995, 7(4): 613-622
- [31] Zhang J S, Zhang H, Botella J R, Zhu J K. Generation of new glutinous rice by CRISPR/Cas<sub>9</sub>-targeted mutagenesis of the *Waxy* gene in elite rice varieties. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2018, 60(5): 369-375
- [32] Huang L C, Li Q F, Zhang C C, Chu R, Gu Z W, Tan H Y, Zhao D S, Fan X L, Liu Q Q. Creating novel Wx alleles with fine-tuned amylose levels and improved grain quality in rice by promoter editing using CRISPR/Cas9 system. *Plant Biotechnol Journal*, 2020, 18(11): 2164-2166
- [33] Zeng D C, Liu T L, Ma X L, Wang B, Zheng Z Y, Zhang Y L, Xie X R, Yang B W, Zhao Z, Zhu Q L, Liu Y G. Quantitative regulation of Waxy expression by CRISPR/Cas9-based promoter and 5'UTR-intron editing improves grain quality in rice. *Plant Biotechnology Journal*, 2020, 18(12): 2385-2387
- [34] Catherine R, Mireille D, Fanny L, Jacques B, Jean L J, Marie R P, Florence E, Charles P, François B, Elisabeth C, Gilles C. Improving the yellow pigment content of bread wheat flour by selecting the three homoeologous copies of *Psy1*. *Molecular Breeding*, 2013, 31(1): 87-99
- [35] He X Y, Zhang Y L, He Z H, Wu Y P, Xiao Y G, Ma C X, Xia X C. Characterization of phytoene synthase 1 gene (*Psy1*) located on common wheat chromosome 7A and development of a functional marker. *Theoretical and Applied Genetics*, 2008, 116: 213-221
- [36] 李猛, 郭晓红, 周健, 胡月, 姜红芳, 吕艳东, 姜凯铭, 解宁宁. 寒地早粳稻农艺性状与品质性状的相关性分析. 中国稻米, 2018, 24(6): 83-86
- Li M, Guo X H, Zhou J, Hu Y, Jiang H F, Lv Y D, Jiang K M, Xie N N. Correlation analysis between agronomic traits and quality traits of early japonica rice in cold regions. *Chinese Rice*, 2018, 24(6): 83-86
- [37] 凡迪, 薛文韬, 严俊, 赵钢, FAHIMA Tzion, 程剑平. 四倍体小麦籽粒多组分营养物质含量的QTL定位及相关性分析. 麦类作物学报, 2014, 34(12): 1611-1618
- Fan D, Xue W T, Yan J, Zhao G, Fahima T, Cheng J P. QTL mapping and correlation analysis of multicomponent nutrient content in grain of tetraploid wheat. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(12): 1611-1618