文章编号：1005-0906(2026)01-0001-07 DOI: 10.13597/j.cnki.maize.science.20260101

正反交效应对玉米子粒蛋白质含量的影响

王瑞齐[1,2],汤泽洋[3],吴金丽[3],周志强[2],李新海[1,2]

(1.东北农业大学农学院,哈尔滨 150030；2.中国农业科学院作物科学研究所/作物基因资源与育种全国重点实验室,北京 100081；3.哈尔滨师范大学生命科学与技术学院,哈尔滨 150025)

摘 要：在4个不同杂种优势类群中挑选子粒蛋白质含量差异显著的8份自交系,采用Griffing双列杂交Ⅲ设计配制56个正反交组合,测定亲本、F_1和F_2蛋白质含量及产量相关性状。通过方差、相关性和一般配合力分析,揭示玉米蛋白质含量的遗传特性。结果表明,蛋白质含量受遗传与环境共同影响,F_1存在显著母本效应,F_2效应减弱。F_1蛋白质含量与母本呈极显著正相关,F_2与双亲均呈极显著正相关,且F_1与F_2蛋白质含量也呈极显著相关。F_2蛋白质含量与穗行数、行粒数、出籽率及玉米产量呈极显著负相关,与百粒重呈极显著正相关。GCA效应分析显示,承系53、HP434、CA590的蛋白质GCA效应为正,昌7-2、PH6WC、CA590和PH4CV的产量GCA效应为正。组合CA590×PH6WC在蛋白质含量与产量上均表现突出,表明玉米产量与品质性状协同改良具备可行性。

关键词：玉米;子粒蛋白质含量;正反交效应;遗传效应;品质改良

中图分类号：S513.035.1 **文献标识码**：A

Impact of Reciprocal Cross Effects on Protein Content in Maize Kernels

WANG Rui-qi[1,2], TANG Ze-yang[3], WU Jin-li[3], ZHOU Zhi-qiang[2], LI Xin-hai[1,2]

(1. *College of Agriculture*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030; 2. *Institute of Crop Science*, *Chinese Academy of Agricultural Sciences/State Key Laboratory of Crop Gene Resources and Breeding*, *Beijing* 100081; 3. *College of Life Science and Technology*, *Harbin Normal University*, *Harbin* 150025, China)

Abstract: Eight inbred lines with significant differences in kernel protein content were selected from four heterotic groups. Using the Griffing diallel cross Design III, 56 reciprocal cross combinations were developed. The protein content and yield-related traits of the parental lines, F_1, and F_2 generations were determined. The genetic characteristics of maize kernel protein content were investigated via variance analysis, correlation analysis, and general combining ability(GCA) analysis. The results indicated that kernel protein content was affected by both genetic and environmental factors. A significant maternal effect was observed in the F_1 generation, which weakened in the F_2 generation. The protein content of F_1 showed a highly significant positive correlation with the maternal parent, while that of F_2 was highly significantly correlated with both parents. Additionally, the protein content between the F_1 and F_2 generations was also highly significantly positively correlated. In the F_2 generation, protein content showed highly significant negative correlations with kernel rows per ear, kernels per row, seed percentage, and maize yield, but a highly significant positive correlation with hundred- kernel weight. GCA analysis revealed that inbred lines Chengxi53, HP434, and CA590 had positive GCA effects for protein content, while Chang 7-2, PH6WC, CA590, and PH4CV had positive GCA effects for yield. The cross combination CA590×PH6WC showed high levels of both protein content and yield, which demonstrated the feasibility of simultaneous improvement of yield and quality traits in maize.

Key words: Maize; Grain protein content; Reciprocal cross effect; Genetic effects; Quality improvement

玉米(*Zea Mays* L.)作为重要的粮饲兼用作物,2024年我国玉米总产量达2.949 1亿t[1]。我国饲用玉米消费量约占年总产量的70%左右,随着社会经济的发展,饲用玉米的需求量也将长期保持增长态势[2]。为满足市场需求,长期以来育种家对玉米的改良主要集中在产量性状,忽视对品质的改良[3],使

录用日期：2025-02-18

基金项目：国家玉米产业技术体系项目(CARS-02-02)、作物基因资源与育种全国重点实验室项目

作者简介：王瑞齐(1997-),佳木斯市人,硕士,主要从事玉米遗传育种研究。Tel:18846076130 E-mail:1285891637@qq.com 李新海为本文通信作者。E-mail:lixinhai@caas.cn

得我国主栽玉米品种的蛋白质含量随年代呈逐渐下降趋势[4]。目前，我国主栽玉米品种的子粒平均蛋白质含量介于7%～9%，难以满足饲料生产对原料蛋白质含量的要求，豆粕等蛋白质补充剂存在进口依赖严重以及价格波动大等问题[5]。我国玉米平均蛋白质含量每提高1%，每年将多生产270万t蛋白质，相当于700万t大豆提供的蛋白质，且玉米价格也将提高50～80元/t[6]。因此，培育高蛋白玉米品种，能够在保障畜禽营养需求的同时降低饲料生产成本，提高农民收入，减少环境污染，对维护我国粮食安全具有重要意义。

玉米作为雄雌同株作物，两个亲本在杂交时能够互做父母本，这使得正交和反交后代间不受细胞质遗传调控的性状差异不大，而使受到细胞质遗传调控的性状产生较大差异[7]。大量试验表明，玉米正反交间子粒产量基本不存在显著差异，仅少数正反交间子粒产量差异较大，说明子粒产量主要受细胞核遗传，而细胞质遗传影响较小[8]。在穗部性状方面，唐海涛等[9]研究认为，正反交组合间穗粗、百粒重和单穗产量存在显著差异，穗长、穗行数和行粒数等性状差异不大。卢华兵等[10]发现，甜糯玉米的穗粗、穗行数在正反交间存在显著差异。在子粒性状方面，张红伟等[11]认为，玉米的粒长、粒宽和粒厚同样存在正反交效应。同时，玉米正交和反交后代在收获期含水量[12]、种子活力[13]和种子耐寒性[14]等性状方面也存在较大差异。在品质性状方面，魏良明等[15]研究认为，玉米子粒油分、蛋白质和淀粉含量均不同程度受到种子(胚乳或胚)效应、母体效应和细胞质效应的共同作用。

本研究以子粒蛋白质含量不同的8份自交系，按照Griffing双列杂交法Ⅲ组配56个正反杂交组合，利用近红外光谱分析技术，对不同世代子粒蛋白质含量进行测定分析，探究正反交效应对玉米蛋白质含量的影响，结合产量数据对玉米品质性状和产量性状间的关系进行分析，为玉米蛋白质改良和培育高产高蛋白玉米提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本研究以课题组收集的我国东华北区常用玉米自交系的子粒蛋白质含量为基础，从SPT、SS、PB和Lancaster共4个杂种优势类群中分别挑选两份自交系，每份自交系按照蛋白质含量的相对差异划分为高和低，共8份亲本材料进行正反交试验(表1)。2022年在海南南繁基地采用Griffing完全双列杂交法Ⅲ组配56份正反交组合。供试材料均由中国农业科学院作物科学研究所提供。

表1 正反交亲本自交系子粒蛋白质含量

Table 1 Grain protein content of reciprocal cross parent inbred lines

自交系 Inbred line	序 号 Number	类 群 Group	系 谱 Pedigree	蛋白质含量(%) Protein	蛋白质含量评价 Protein content evaluation
承系53	P1	SPT	H21×502二环系	13.04	高
昌7-2	P2	SPT	昌单7号×S901	11.58	低
HP434	P3	SS	466×桦94	17.81	高
PH6WC	P4	SS	PH01N×PH09B	11.53	低
CA590	P5	PB	CA193×PH4CV	14.97	高
PH4CV	P6	PB	PH7VO×PHBE2	12.37	低
LH123ht	P7	Lancaster	先锋杂交种	13.46	高
HM12111	P8	Lancaster	系谱不明确	11.71	低

注：本试验以13%为标准对自交系子粒蛋白质含量进行评价，蛋白质含量高于13%称为高蛋白自交系，低于13%称为低蛋白自交系

Note: In this experiment, the protein content of inbred line seeds was evaluated using 13% as the standard. Inbred lines with protein content higher than 13% were used as high-protein inbred lines, and those with protein content lower than 13% were used as low-protein inbred lines

1.2 试验方法

2023年将亲本自交系和正反交组合种植于中国农业科学院作物科学研究所昌平试验基地和中国农业科学院作物科学研究所公主岭试验基地进行田间表型鉴定。其中，8份亲本自交系用于自交并按照Griffing完全双列杂交法Ⅲ复配正反交F_1当代种子，以获得亲本代和F_1当代蛋白质含量数据。56份正反交组合采用随机区组设计，两行区，行长4 m，

株距20 cm，行距65 cm，每行21株，每个小区选取中部长势相近的两株套袋自交获得F_2代种子，其余植株开放授粉，成熟后收获每个小区全部果穗，自交果穗用于子粒蛋白质含量测定，开放授粉果穗用于产量性状测定。每个试验点设置两次重复试验，田间管理方法与当地大田生产方式一致。

1.3　性状测定方法

玉米子粒蛋白质含量的测定：将自然风干的亲本、F_1和F_2代子粒去除杂质后置于烘箱中36 ℃烘干48 h后，使用近红外反射光谱仪对样品的光谱数据进行采集分析，实现子粒蛋白质含量的测定，每份样品测量3次，结果取平均值。

玉米产量性状的测定：收获每个小区全部开放授粉果穗，每个小区选取10穗长势均匀的果穗，分别对穗长、穗行数、行粒数进行测定，结果取平均值。待全部果穗自然风干后，进行脱粒测定子粒含水量后按含水量14%折算出籽率、百粒重和玉米产量。

1.4　数据处理与分析

采用软件Microsoft Excel对各项数据进行整理汇总；采用IBM SPSS Statistics 26进行统计描述、方差分析和相关性分析；采用SAS 9.1.3和R 4.2.2进行配合力计算。

2　结果与分析

2.1　不同世代玉米子粒蛋白质含量的表现

测定两个试验点56个组合不同世代的子粒蛋白质含量(表2)。结果表明，F_1世代蛋白质含量在两个试验点存在显著差异，昌平和公主岭的蛋白质含量的变幅分别为10.56%～17.02%和10.77%～19.95%，平均值分别为12.84%和13.92%。两个试验点的F_2世代蛋白质含量差异较小，昌平和公主岭的蛋白质含量变幅分别为10.58%～14.24%和9.80%～14.63%，平均值分别为12.45%和12.69%。

表2　不同世代子粒蛋白质含量

Table 2　Grain protein content in different generations of reciprocal crosses　%

世 代 Generation	环 境 Environment	平均值 Mean	最小值 Min.	最大值 Max.	标准偏差 SD	变异系数 CV	峰 度 Kurtosis	偏 度 Skewness
F_1世代	公主岭	12.84	10.56	17.02	1.54	11.98	1.10	1.27
	昌　平	13.92	10.77	19.95	2.33	16.74	1.04	1.35
F_2世代	公主岭	12.45	10.58	14.24	0.93	7.45	−0.48	0.04
	昌　平	12.69	9.80	14.63	1.27	9.98	−0.74	−0.26

2.2　正反交组合间子粒蛋白质含量的表现

对比56个组合正交和反交的子粒蛋白质含量。结果表明，F_1世代蛋白质含量的正反交效应显著，且亲本间蛋白质含量差异越大的组合F_1世代差异也越大。在F_2世代，仅P1×P2、P4×P7和P2×P4等少数组合的正交和反交之间蛋白质含量差异较大。此外，结合亲本、F_1和F_2世代的蛋白质数据可以得出，F_1世代蛋白质含量与母本自交系蛋白质含量相近，母本效应显著；F_2世代蛋白质含量的母本效应减弱(表3)。

2.3　子粒蛋白质含量的方差分析

对正反交不同世代子粒蛋白质含量进行方差分析(表4)。结果表明，F_1和F_2世代蛋白质含量的地点间、杂交组合间、基因型间和地点×杂交组合互作效应的差异均达到显著或极显著水平，说明玉米子粒蛋白质含量受到遗传因素和环境因素的共同作用。F_1世代蛋白质含量的母本间差异达到极显著水平，父本间差异未达到显著水平，说明F_1世代蛋白质含量主要受到母本作用，父本作用较小。F_2世代蛋白质含量的母本间和父本间的差异均达到显著或极显著水平，说明F_2世代蛋白质含量受到母本和父本的共同作用。

2.4　不同世代子粒蛋白质含量的相关性分析

分析亲本、F_1和F_2世代子粒蛋白质含量的相关性(表5)。结果表明，F_1世代蛋白质含量与母本蛋白质含量呈极显著正相关，与父本蛋白质含量的相关性未达到显著水平。F_1世代蛋白质含量与高亲值、中亲值和低亲值均呈极显著正相关，相关系数从大到小依次为中亲值>高亲值>低亲值。F_2世代蛋白质含量与双亲值、高亲值、中亲值和低亲值均呈极显著正相关，相关系数由大到小依次为中亲值>高亲值>低亲值>父本值>母本值。此外，F_2世代与F_1世代蛋白质含量也呈极显著正相关(r=0.477，P<0.01)，说明通过F_1世代蛋白质含量能够对F_2世代蛋白质含量进行预测，但也要考虑母本效应对F_1世代蛋白质含量的影响。

表3 正反杂交组合间子粒蛋白质含量

Table 3 Grain protein content between reciprocal cross combinations %

组合 Cross	F_1世代 F_1 generation		F_2世代 F_2 generation		组合 Cross	F_1世代 F_1 generation		F_2世代 F_2 generation	
	正交 Positive cross	反交 Negative cross	正交 Positive cross	反交 Negative cross		正交 Positive cross	反交 Negative cross	正交 Positive cross	反交 Negative cross
P1×P2	13.37	12.23	13.28	12.13	P3×P5	17.85	14.97	13.47	14.25
P1×P3	13.11	17.17	13.71	14.11	P3×P6	17.49	12.46	12.76	12.73
P1×P4	13.21	11.76	12.70	12.33	P3×P7	17.37	12.84	14.34	14.26
P1×P5	13.44	14.20	14.06	13.53	P3×P8	17.89	11.46	13.41	13.39
P1×P6	13.20	12.51	12.67	12.49	P4×P5	12.06	14.48	12.92	13.12
P1×P7	13.13	13.06	13.00	12.79	P4×P6	12.23	12.50	11.76	11.80
P1×P8	13.58	11.77	12.01	12.29	P4×P7	11.94	13.35	12.73	11.80
P2×P3	11.14	17.53	13.63	13.57	P4×P8	12.19	11.94	11.84	11.96
P2×P4	12.41	11.28	12.11	10.80	P5×P6	14.72	12.56	12.19	12.41
P2×P5	12.21	14.57	11.69	11.82	P5×P7	14.51	12.55	13.58	13.21
P2×P6	12.29	12.05	11.10	11.20	P5×P8	14.62	12.24	13.13	13.63
P2×P7	12.55	13.18	11.38	11.94	P6×P7	12.62	13.51	11.69	11.46
P2×P8	11.86	12.58	10.95	10.24	P6×P8	12.58	12.01	11.69	12.03
P3×P4	18.29	11.50	13.68	13.63	P7×P8	12.87	12.37	11.96	11.24

表4 正反交不同世代蛋白质含量的方差分析

Table 4 Variance analysis of grain protein content in different generations of reciprocal crosses

变异来源 Source of variation	自由度 DF	F_1世代 F_1 generation		F_2世代 F_2 generation	
		平方和 SS	*F*值 *F*-value	平方和 SS	*F*值 *F*-value
地 点	1	69.123	17.379**	3.079	5.659*
重 复	1	0.174	0.041	0.325	0.218
杂交组合	55	733.700	12.194**	212.689	5.601**
基因型	27	274.519	2.970**	198.194	11.033**
母 本	7	711.653	107.622**	74.569	9.003**
父 本	7	31.657	1.057	73.577	8.848**
地点×杂交组合	55	76.620	4.506**	123.299	4.121**
地点×基因型	27	41.055	0.455	79.076	3.345**
母本×父本	41	18.186	0.405	42.276	1.494*

注:“*”表示在0.05水平上差异显著;“**”表示在0.01水平上差异显著。下表同

Note: * means significant at 0.05 level; ** means significant at 0.01 level. The same below

表5 不同世代子粒蛋白质含量的相关性

Table 5 Correlation of grain protein content in different generations

世 代 Generation	母本值 Female value	父本值 Male value	高亲值 HP value	中亲值 MP value	低亲值 LP value	F_1世代 F_1 generation	广义遗传力(%) H^2
F_1世代	0.965**	−0.184	0.580**	0.596**	0.392**	1	86.03
F_2世代	0.538**	0.542**	0.779**	0.825**	0.602**	0.477**	75.96

2.5 子粒蛋白质含量与产量性状的相关性分析

分析F_2世代子粒蛋白质含量与主要产量性状间的相关性(表6)。结果表明,F_2世代蛋白质含量与穗行数(r=−0.597)、行粒数(r=−0.402)、出籽率(r=−0.451)和子粒产量(r=−0.405)等性状均呈极显著负相关;仅与百粒重(r=0.329)呈显著正相关;与穗长呈较弱正

相关性,且未达到显著水平,说明玉米F_2世代过高的蛋白质含量将导致产量降低。

2.6　子粒蛋白质含量和产量性状的GCA效应值分析

对F_2世代子粒蛋白质含量和产量性状进行GCA效应分析(表7)。在蛋白质含量方面,P1、P3和P5均为高蛋白自交系且GCA为正效应,效应值分别为0.412、1.154和0.530,采用这3份自交系创制出高蛋白玉米种质的可能性更高。P7同为高蛋白自交系但其GCA为负效应,说明组配高蛋白品种时亲本需同时考虑蛋白质含量及其配合力效应。在产量性状方面,同一自交系的不同性状之间、同一性状的不同自交系表现不同。P3和P4的穗长GCA效应值较高,P2、P4和P6的穗行数GCA效应值较高,P6和P8的行粒数GCA效应值较高,P2和P8的出籽率GCA效应值较高,P4和P5具有较高的百粒重GCA效应值,P4、P5和P6的子粒产量GCA效应值较高。仅P5(CA590)的蛋白质和子粒产量的GCA均为正效应,说明使用P5创制出蛋白质含量和产量双高种质的可能性更高。

表6　子粒蛋白质含量与产量性状的相关性

Table 6　Correlation between grain protein content and yield traits

性状 Trait	穗长 Ear length	穗行数 Ear row number	行粒数 Kernels per row	出籽率 Shelling percentage	百粒重 100-grain weight	产量 Yield	F_2世代蛋白质 F_2 protein
穗　长	1						
穗行数	−0.089	1					
行粒数	0.298*	0.170	1				
出籽率	−0.289*	0.346**	0.138	1			
百粒重	0.370**	−0.274*	−0.103	−0.196	1		
产　量	0.123	0.492**	0.199	0.400**	0.156	1	
F_2世代蛋白质	0.249	−0.597**	−0.402**	−0.451**	0.329*	−0.405**	1

表7　F_2世代子粒蛋白质含量和产量性状的GCA效应值

Table 7　GCA effect value of grain protein content and yield traits in F_2 generation

自交系 Inbred line	蛋白质 Protein	穗长 Ear length	穗行数 Ear row number	行粒数 Kernels per row	出籽率 Shelling percentage	百粒重 100-grain weight	产量 Yield
P1	0.412	−0.592	−0.262	−0.215	−0.012	−0.492	−0.402
P2	−0.771	−0.936	0.939	0.140	0.014	−1.797	0.081
P3	1.154	1.004	−0.930	−0.448	−0.012	0.393	−0.445
P4	−0.209	1.051	0.499	0.028	−0.005	1.749	0.490
P5	0.530	−0.710	−0.210	−0.357	0.010	0.922	0.324
P6	−0.605	0.138	0.828	0.692	0.005	−1.209	0.331
P7	−0.034	0.230	−0.256	−0.061	−0.014	0.237	−0.133
P8	−0.476	−0.185	−0.607	0.223	0.013	0.196	−0.247

2.7　不同组配模式的子粒蛋白质含量与产量差异

根据亲本子粒蛋白质含量水平(高和低),可将56个正反交组合划分为“低×低”“低×高”“高×低”和“高×高”共4种组配模式(表8)。在子粒蛋白质含量方面,F_1世代在母本效应的作用下“高×低”和“高×高”两种组配模式的平均蛋白质含量表现较好,“低×低”和“低×高”的平均蛋白质含量较低;F_2世代,“高×高”的平均蛋白质含量表现较好,“高×低”和“低×高”次之,“低×低”再次之。在玉米产量方面,“低×低”最高,“高×低”“低×高”和“高×高”次之。将56个组合按照玉米产量的高低进行排序,选取高产组合和低产组合各10个进行对比(表9),在高产组合中P4和P5出现次数较多,且P5×P4(产量10 529.25 kg/hm^2,蛋白质含量13.12%)和P5×P2(产量10 377.75 kg/hm^2,蛋白质含量11.82%)的产量和蛋白质含量均处于较高水平。因此,通过优异玉米种质的遗传改良,组配出高产高蛋白含量新品种具备可行性。

表8 不同组配模式子粒蛋白质含量和玉米产量的表现

Table 8 Performance of grain protein content and maize yield in different combinations

世 代 Generation	组配模式 Matching mode	组合数量 Cross number	蛋白质含量(%) Protein	产量(kg/hm²) Yield
F_1世代	低×低	12	12.09 b	–
	低×高	16	12.16 b	–
	高×低	16	14.74 a	–
	高×高	12	14.52 a	–
F_2世代	低×低	12	11.46 c	8 484.00 a
	低×高	16	12.52 b	7 006.95 b
	高×低	16	12.59 b	7 499.25 ab
	高×高	12	13.69 a	6 779.70 b

表9 不同基因型组合玉米产量的比较

Table 9 Comparison of maize yield of different genotype combinations kg/hm²

高产组合 High yield cross	组配模式 Matching mode	产 量 Yield	低产组合 High yield cross	组配模式 Matching mode	产 量 Yield
P5×P4	高×低	10 529.25	P7×P8	高×低	5 624.40
P5×P2	高×低	10 377.75	P8×P3	低×高	5 624.40
P4×P2	低×低	9 885.45	P8×P5	低×高	5 435.10
P4×P6	低×低	9 847.50	P7×P1	高×高	5 378.25
P6×P4	低×低	9 733.95	P8×P7	低×高	5 359.35
P2×P6	低×低	9 355.20	P3×P4	高×低	5 359.35
P2×P5	低×高	9 108.90	P3×P1	高×高	5 037.45
P6×P2	低×低	8 995.35	P2×P3	低×高	5 037.45
P4×P5	低×高	8 995.35	P1×P2	高×低	4 885.95
P7×P4	高×低	8 787.00	P2×P1	低×高	3 730.65

3 结论与讨论

玉米子粒蛋白质含量是由多基因共同调控的数量性状。前人研究认为,玉米母本能够通过基因型直感、细胞质直感和物质交换效应等方式对子粒蛋白质含量产生调控作用,这种作用主要体现在杂交F_1世代,而在F_2世代及后续世代的作用不显著[16-17]。本研究表明,玉米正反交F_1世代蛋白质含量的母本效应显著,F_2世代的母本效应不显著。此外,我国玉米品质改良以提高子粒赖氨酸含量为目标的优质蛋白玉米(Quality Protein Maize,QPM)育种为主,其主要通过将*Opaque*2导入普通自交系再经筛选获得优质蛋白自交系,并以此为基础培育QPM品种,但也存在子粒蛋白质含量提升不显著、容重低和抗病性较差等问题[18-19]。因此,生产上亟需开发不依赖于*Opaque*2种质的新型玉米蛋白改良模式。

改良玉米蛋白质性状不应以牺牲产量为代价,实现品质和产量的协同改良是长期追求的目标。不同研究者因所选试验材料和栽培环境的差异对玉米品质和产量关系的研究结果有所不同。孙琦等[20]以我国1950-2000年生产上大面积推广的品种为材料,发现子粒蛋白质含量与产量呈负相关。侯建华等[21]研究表明,玉米自交系的单株产量与蛋白质含量具有负相关性。许海涛等[22]认为,玉米蛋白质含量与产量具有一定程度的正相关性。本研究认为,蛋白质含量与产量呈极显著负相关。筛选出高产高蛋白优质种质P5(CA590),其所配组合P5×P4和P5×P2的蛋白质含量和子粒产量均较高,这显示培育兼顾品质和产量的玉米新品种具有可行性。对品质和产量性状的协同改良较单一性状更难,仍需开展更多研究。

参考文献:

[1] 国家统计局 . 中国统计年鉴[M] . 北京:中国统计出版社,2024:29-32 .

[2] 曹炎,杨艳涛,王国刚 . 我国玉米生产与消费时空格局演变及匹配性分析[J] . 中国农业科技导报,2024,26(5):1-10 .
CAO Y, YANG Y T, WANG G G, Spatial-temporal pattern evolu-

tion and matching analysis of maize production and consumption in China[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2024, 26(5): 1-10. (in Chinese)

[3] DUVICK D N, SMITH J S C, COOPER M. Long-term selection in a commercial hybrid maize breeding program[J]. Plant Breeding Reviews, 2004, 24(2): 109-152.

[4] 王晓东,傅迎军,孙殿会,等 . 北方玉米品种更替过程中品质的演变[J] . 玉米科学,2015,23(4):10-14 .
WANG X D, FU Y J, SUN Y H, et al. Quality evolution in process of substitution of northern maize cultivars[J]. Journal of Maize Sciences, 2015, 23(4): 10-14. (in Chinese)

[5] 李浩川,刘义宝,程荣霞,等 . 玉米子粒蛋白质含量的遗传效应及其与产量的关系[J] . 作物学报,2009,35(4):755-760 .
LI H C, LIU Y B, CHENG R X, et al. Inheritance effect of protein content in maize kernels and its relation to yield[J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(4): 755-760. (in Chinese)

[6] 何红卫,乐明凯 . 发展高蛋白玉米实现大豆进口替代[N] . 农民日报,2023-03-09(005) .

[7] 慕平,柴继宽,苏玮娟,等 . 燕麦不同组合正、反交杂种后代的表型及遗传参数分析[J] . 草业学报,2024,33(4):73-86 .
MU P, CHAI J K, SU W J, et al. Phenotype and genetic variation analysis of forward and reverse hybrid progeny from different oat crosses acta[J]. Prataculturae Sinica, 2024, 33(4): 73-86. (in Chinese)

[8] 丰光,刘志芳,吴宇锦,等 . 玉米正反交对主要性状和产量影响的研究[J] . 作物杂志,2009(2):70-72 .
FENG G, LIU Z F, WU Y J, et al. Effect of reciprocal crosses on main characters and yield of maize hybrids[J]. Crops, 2009(2): 70-72. (in Chinese)

[9] 唐海涛,张彪,梅碧蓉,等 . 西南骨干玉米自交系主要农艺性状和产量正反交杂优效应分析[J] . 中国农学通报,2014,30(15):207-215 .
TANG H T, ZHANG B, MEI B R, et al. Effects of reciprocal crosses on main agronomic characters and yield of maize hybrids crossed by main maize inbred lines in Southwest[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(15): 207-215. (in Chinese)

[10] 卢华兵,石丽敏,胡贤女,等 . 甜糯玉米正反交F_1代产量和主要农艺性状的差异性分析[J] . 浙江农业科学,2015,56(5):633-634 .
LU H B, SHI L M, HU X N, et al. Difference analysis of yield and main agronomic traits in F_1 generation of sweet waxy maize[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2015, 56(5): 633-634. (in Chinese)

[11] 张红伟,孔繁玲 . 玉米子粒性状的遗传模型研究[J] . 遗传学报,2000,27(1):56-64 .
ZHANG H W, KONG F L. Study on genetic model of maize kernel traits[J]. Journal of Genetics and Genomics, 2000, 27(1): 56-64. (in Chinese)

[12] 张林,王振华,金益,等 . 玉米收获期含水量的配合力分析[J] . 西南农业学报,2005,18(5):32-35 .
ZHANG L, WANG Z H, JIN Y, et al. Combining ability analysis of water content in harvest stage in corn[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2005, 18(5): 32-35. (in Chinese)

[13] 李玉玲,吴凤兰,江洪勋,等 . 玉米自交系及单交种不同子粒灌浆期种子萌发特性研究[J] . 河南农业大学学报,2000,34(1):13-16 .
LI Y L, WU F L, JIANG H X, et al. Seed germination characteristics of maize inbred lines and single crosses at different grain filling stages[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2000, 34(1): 13-16. (in Chinese)

[14] GOMES M D S, PINHO É V R, PINHO R G V, et al. Heterosis effect on the physiological quality of corn seeds[J]. Revista Brasileira De Sementes, 2000, 22(2): 7-17.

[15] 魏良明,戴景瑞,刘占先,等 . 普通玉米蛋白质、淀粉和油分含量的遗传效应分析[J] . 中国农业科学,2008,41(11):3845-3850 .
WEI L M, DAI J R, LIU Z X, et al. Genetic effects of protein, starch and oil contents in maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(11): 3845-3850. (in Chinese)

[16] 李浩川,刘宗华,王琳,等 . 杂交当代玉米子粒蛋白质含量的正反交效应及杂种优势分析[J] . 河南农业大学学报,2007,41(1):1-4,11 .
LI H C, LIU Z H, WANG L, et al. Analysis on the effect of reciprocal crosses and heterosis about protein content of F_1 seeds in maize grain[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2007, 41(1): 1-4, 11. (in Chinese)

[17] PIXLEY K V, BJARNASON M S. Pollen-parent effects on protein quality and endosperm modification of quality protein maize[J]. Crop Science, 1994, 34(2): 404-409.

[18] 杨晓辉,韩晓清,崔书会 . 中国优质蛋白玉米育种研究进展[J] . 北京农学院学报,2005,20(3):71-75 .
YANG X H, HAN X Q, CUI S H. Current situation of QPM breeding in China and forecast for the development and utilization[J]. Journal of Beijing University of Agriculture, 2005, 20(3): 71-75. (in Chinese)

[19] 谭华,邹成林,郑德波,等 . 12个优质蛋白玉米(QPM)近等基因系配合力效应及杂种优势探讨[J] . 安徽农业科学,2015,43(6):57-60 .
TAN H, ZOU C L, ZHENG D B, et al. Study on combining ability and heterosis of 12 NILs of QPM[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(6): 57-60. (in Chinese)

[20] 孙琦,张世煌,李新海,等 . 中国不同年代主推玉米品种品质性状的变化趋势[J] . 中国农业科学,2014,47(14):2723-2730 .
SUN Q, ZHANG S H, LI X H, et al. The trend of quality traits of maize varieties released extensively in different eras in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(14): 2723-2730. (in Chinese)

[21] 侯建华,郑红丽,杨丽君,等 . 玉米种质资源品质性状与主要农艺性状相关性分析[J] . 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2001,22(2):71-74 .
HOU J H, ZHENG H L, YANG L J, et al. Correlation analysis between quality characters and agronomic traits of maize germplasm resources[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University(Natural Science Edition), 2001, 22(2): 71-74. (in Chinese)

[22] 许海涛,许波,王成业,等 . 夏玉米品质性状与产量的相关及通径分析[J] . 湖南农业科学,2007(6):30-31,33 .
XU H T, XU B, WANG C Y, et al. Correlation and path analysis between quality traits and yield of summer maize[J]. Hunan Agricultural Science, 2007(6): 30-31, 33. (in Chinese)

(责任编辑:李万良)