

429份玉米种质籽粒物理 及品质性状综合评价

郭益洋^{1,2}, 郭书磊^{1,2}, 张君², 史喜飞¹, 赵海军¹, 陈盛¹, 韩赞平¹

(1. 河南科技大学农学院, 河南 洛阳 471023; 2. 河南省农业科学院粮食作物研究所, 河南 郑州 450002)

摘要:为科学评价不同玉米自交系的育种应用潜力,测定了429份玉米自交系的10个籽粒农艺性状表型值,并采用相关性分析、主成分分析、聚类分析和逐步回归分析构建不同玉米自交系综合评价模型,筛选优异种质材料。结果表明:10个农艺性状的变异系数范围为3.6%~40.4%。籽粒质量和淀粉含量与籽粒营养含量呈负相关。主成分分析将10个农艺性状转化为4个主成分,累计贡献率为79.8%,第1主成分为籽粒大小因子、第2主成分为营养因子、第3主成分为质量因子、第4主成分为赖氨酸因子。聚类分析将429份玉米自交系划分为5类,其中自交系W284被单独聚为一类,其物理性状为5个类群中的最高值,在籽粒大小方面表现突出;类群3具有油脂、蛋白质、赖氨酸含量高的特点。将综合得分排名前50位的玉米自交系再次聚类划分成具有不同种质特性的5个类群,得到在品质质量方面有较大遗传优势的DY358F自交系和6个质量好、丰产性高的优质玉米种质(PHV53、DK625F、HM2F、P267-4、Hong 2、B1M-6-PMO/4CV-31-1)。逐步回归分析表明,粒面积、百粒重、容重3个性状可作为玉米籽粒质量综合评价的关键指标。

关键词:玉米;种质资源;物理性状;品质性状;综合评价

中图分类号:S513; S32 **文献标志码:**A

Identification and comprehensive evaluation of seed physical and quality traits of 429 maize germplasm

GUO Yiyang^{1,2}, GUO Shulei^{1,2}, ZHANG Jun², SHI Xifei¹, ZHAO Haijun¹, CHEN Sheng¹, HAN Zanping¹

(1. College of Agronomy, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China;

2. Cereal Institute, Henan Academy of Agricultural Science, Zhengzhou, Henan 450002, China)

Abstract: The objective of this study was to scientifically evaluate the breeding application potential of maize inbred lines. Phenotypic values of 10 agronomic traits of 429 maize inbred lines were measured for correlation analysis, principal component analysis, cluster analysis and stepwise regression analysis. The comprehensive evaluation model for different maize inbred lines was established to screen the quality germplasm materials. The results showed that the coefficient of variation for the 10 agronomic traits ranged from 3.6% to 40.4%. Seed quality and starch content were negatively correlated with seed nutrient content. Principal component analysis simplified the ten agronomic traits into four principal components, showing the cumulative contribution rate of 79.8%. The first principal component was kernel size factor, the second principal component was nutrient factor, the third principal component was quality factor, and the fourth principal component was lysine content factor. 429 inbred lines were divided into five groups by cluster analysis. Group 1 (W284) exhibited the most prominent physical traits among the five groups and demonstrated exceptional performance in grain size. Group 3 had the characteristics of high oil content, high protein content and high lysine content. The top 50 maize inbred lines were clustered again and divided into five groups with different germplasm characteristics. The DY358F inbred line was obtained, which has a large genetic advantage in terms of quality and quantity. Six high-quality maize germplasm with good quality and high productivity, namely PHV53, DK625F, HM2F, P267-4, Hong 2, and B1M-6-PMO/4CV-31-1, were discovered. Step-

wise regression analysis identified grain area, 100-kernel weight, and volumetric weight as key indicators for the comprehensive evaluation of maize kernel quality.

Keywords: maize; germplasm resources; physical properties; quality traits; comprehensive evaluation

玉米(*Zea mays* L.)是世界上重要的粮食作物、饲料作物和工业原料,提高玉米产量对于确保粮食安全和工业发展至关重要^[1]。种质资源承载着作物的优良基因,是作物育种的前提与基础,作为极其珍贵的农业遗产与自然资源,对于未来农业的发展意义重大^[2]。玉米的物理性状由粒长、粒宽、百粒重、容重等指标组成,在多数情况下幼苗鲜质量与籽粒大小呈正相关^[3]。玉米品质指玉米籽粒中营养成分对人和动物的营养价值以及工业加工价值^[4],是复杂的数量性状。张正等^[5]通过相关性分析来探究穗部性状对产量的影响,发现提升单穗产量是增加产量最有效的途径;赵海燕等^[6]结合聚类分析和灰色关联度分析对 25 个玉米品种的主要农艺性状和产量关系进行综合评价,认为 MC670、MC618、京科 627、延科 288 和 MC703 等品种综合表现较好;张中伟等^[7]选取 33 个参试品种的 14 项农艺性状利用主成分分析和聚类分析进行综合评价,筛选出‘金园 23’和‘吉农玉 1898’两个优质玉米品种。Chaves 等^[8]利用主成分分析来评估不同水分条件下青贮玉米杂交种的形态发生特征和产量,结果显示 AGRI340 和 AGRI360 是表现最好的杂交品种;Tang 等^[9]以华北地区寒地典型玉米品种的千粒重、含水率等加工性状为对象,采用聚类 and 主成分分析,确定了玉米种子加工特性评价的分类标准,并进行了相应的评价,为食品加工原料的筛选和分类提供了新方法。

玉米籽粒性状的各项指标所代表的内涵不同,利用单一指标或单一分析手段的评鉴具有片面性,无法全面系统地对其进行综合评价^[10]。为筛选不同用途的玉米种质,增强对玉米自交系综合评价的可靠性,本研究基于相关性分析、聚类分析、主成分分析、逐步回归分析,将模糊数学理论与降维思想应用到材料数量庞大的 429 份玉米自交系 10 个农艺性状的评估中,建立更清晰明确、有针对性的综合评价体系,在鉴定玉米自交系评价方法的同时筛选优异玉米种质,为培育高产优质的玉米品种和自交系提供依据。

1 材料与amp;方法

1.1 材料

选择 429 份来源广泛的玉米自交系作为参试材料,其中 250 份自交系来源于国内引进和选育的优

良自交系和杂交种的亲本,24 份自交系来源于 CIM-MYT,139 份来源于美国玉米解禁商业自交系,4 份德国自交系和 12 份未知来源。所有试验材料于 2021 年和 2022 年种植于河南科技大学农学院试验田,试验田地势平坦,土壤肥力均匀,每个自交系种植 1 行,行长 5 m,行距 0.5 m,株距 0.3 m,每穴播 1 粒,常规田间管理。在成熟后收集外观良好、颗粒饱满的玉米籽粒。

1.2 指标测定

对 429 份玉米自交系的 6 个数量性状、4 个品质性状进行测量。物理性状包括粒长(grain length, *GL*)、粒宽(grain width, *GW*)、粒长宽比(grain aspect ratio, *GAR*)、粒面积(grain area, *GA*)、百粒重(100-kernel weight, *HKW*)、容重(unit weight, *UW*);品质性状包括蛋白质含量(protein content, *PC*)、淀粉含量(starch content, *SC*)、油脂含量(oil content, *OC*)、赖氨酸含量(lysine content, *LC*)。粒长、粒宽、粒长宽比、粒面积、百粒重由万深 SC-G 自动种子考种分析及千粒重仪(杭州万深检测科技有限公司)测定收集;油脂含量、蛋白质含量、赖氨酸含量、淀粉含量、容重通过 DA7250 近红外分析仪(瑞典波通仪器公司)测定,为减小误差每份材料重复测定 3 次,取平均值。

1.3 数据处理

利用 Excel 进行初步数据整理与分析,筛出玉米各个自交系 10 个主要性状的最大值和最小值,计算出极差、平均值、标准差、变异系数;利用软件 DPS 7.05 对数据进行聚类分析,基于聚类分析遗传距离结果使用 R 语言进行作图;利用 SPSS 软件进行相关性分析、主成分分析和逐步回归分析,根据特征值大于 1 且方差贡献率 $\geq 10\%$ 的原则提取主成分,计算各主成分得分和综合得分 *F* 值并对其进行排序。所有结果均为两年数据平均值。

2 结果与分析

2.1 429 份玉米自交系籽粒物理与品质性状的分析结果

2.1.1 429 份玉米自交系籽粒物理与品质性状的相关性分析 相关性分析可以确定 2 个或多个变量之间的关联程度。对 429 份玉米自交系的 10 个主要农艺性状进行相关性分析(表 1),可看出各性状之

间表现出高度复杂的相关性。粒长、粒宽均与容重和油脂含量无显著相关关系,其中粒长与粒面积(0.975)的相关系数最大,说明粒长对粒面积的正向影响最强,其次是粒宽(0.935)、百粒重(0.291)和淀粉含量(0.197),粒长与蛋白质含量(-0.127)、赖氨酸含量(-0.141)呈极显著负相关关系;粒宽与粒面积(0.983)、百粒重(0.348)呈极显著正相关,与粒长宽比(-0.227)、赖氨酸含量(-0.141)呈极显著负相关,与蛋白质含量(-0.103)呈显著负相关关系。粒长宽比与淀粉含量(0.232)呈极显著正相关,与粒面积(-0.096)和容重(-0.107)呈显著负相关,与百粒重(-0.267)呈极显著负相关关系。粒面积与百粒重(0.366)、淀粉含量(0.135)呈极显著正相关,与蛋白质含量(-0.106)呈显著负相关,与赖氨酸含量(-0.134)呈极显著负相关关系。百粒重与容重(0.350)呈极显著正相关,与油脂含量(-0.305)呈极显著负相关关系。油脂含量和蛋白质含量均与淀粉含量呈极显著负相关关系,相关系数分别为-0.480和-0.559;与赖氨酸含量呈极显著正相关关系,相关系数分别为0.433和0.226;油脂含量还与蛋白质含量呈显著正相关(0.104)。赖氨酸含量与淀粉含量呈极显著负相关(-0.264),与容重呈极显著正相关(0.464)关系。容重与淀粉含量(-0.109)呈显著负相关关系。由此可知,粒长、粒宽与籽粒面积大小、粒重密切相关,粒长越长或粒宽越宽则

面积越大,籽粒越重,容重越大,淀粉含量越高,但是籽粒油脂、蛋白质、赖氨酸含量随籽粒增大而降低,可见籽粒的物理性状与营养性状呈负相关关系。

2.1.2 429 份玉米自交系的主成分分析 主成分分析可以降低数据的维度,将原始变量转换为新的有效主成分,使少数主成分中尽可能多地保留数据的总变化,并依据所含信息量的大小依次成为第一主成分、第二主成分等^[11]。将测得的 429 份玉米自交系籽粒与品质性状指标,即粒长、粒宽、粒长宽比值、粒面积、百粒重、容重、油脂含量、蛋白质含量、淀粉含量、赖氨酸含量,分别用 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 、 X_7 、 X_8 、 X_9 、 X_{10} 来表示,通过主成分分析提取到 4 个主成分,特征值分别为 3.246、2.074、1.442、1.217,累计贡献率达到 79.8%,表明这 4 个主成分能够较为准确地反映原 10 个指标的大部分信息,从而可以对玉米籽粒物理和品质性状进行综合评价分析(表 2)。

以特征向量值大于 0.5 为标准提取各个成分中的主要特征值。第一主成分贡献率达 32.462%,其中 X_1 、 X_2 和 X_4 特征向量值较高,分别对应粒长(0.934)、粒宽(0.94)和粒面积(0.957),其特征向量所凝聚的生物学信息主要是玉米籽粒大小因素,系数越大,粒长越长,粒宽越宽,籽粒面积越大,故将第一主成分总结为籽粒大小因子;第二主成分贡献率达 20.742%,其性状特征根中油脂含量(0.536)、蛋白质含量(0.521)、赖氨酸含量(0.631)的贡献最大,

表 1 429 份玉米自交系籽粒物理及品质性状的相关性分析

Table 1 Correlation analysis of 429 maize inbred lines for grain physical and quality traits

性状 Trait	粒长 GL	粒宽 GW	粒长宽比 GAR	粒面积 GA	百粒重 HKW	容重 UW	油脂含量 OC	蛋白质含量 PC	淀粉含量 SC	赖氨酸含量 LC
粒长 GL	1.000									
粒宽 GW	0.935**	1.000								
粒长宽比 GAR	0.095*	-0.227**	1.000							
粒面积 GA	0.975**	0.983**	-0.096*	1.000						
百粒重 HKW	0.291**	0.348**	-0.267**	0.366**	1.000					
容重 UW	-0.045	-0.043	-0.107*	-0.03	0.350**	1.000				
油脂含量 OC	-0.071	-0.034	-0.016	-0.07	-0.305**	0.009	1.000			
蛋白质含量 PC	-0.127**	-0.103*	-0.044	-0.106*	0.037	-0.051	0.104*	1.000		
淀粉含量 SC	0.197**	0.092	0.232**	0.135**	-0.022	-0.109*	-0.480**	-0.559**	1	
赖氨酸含量 LC	-0.141**	-0.141**	-0.055	-0.134**	-0.058	0.464**	0.433**	0.226**	-0.264**	1.000

注: *、** 分别表示相关性显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$)。

Note: * and ** mean significant correlations at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

表 2 各综合指标的系数及贡献率

Table 2 Coefficients and contribution of each composite indicator

分量 Component	性状 Trait	第 1 主 成分 Prin. 1	第 2 主 成分 Prin. 2	第 3 主 成分 Prin. 3	第 4 主 成分 Prin. 4
X_1	粒长 <i>GL</i>	0.934	0.121	-0.233	0.162
X_2	粒宽 <i>GW</i>	0.940	0.254	-0.169	0.002
X_3	粒长宽比 <i>GAR</i>	-0.112	-0.418	-0.310	0.423
X_4	粒面积 <i>GA</i>	0.957	0.210	-0.169	0.062
X_5	百粒重 <i>HKW</i>	0.468	0.282	0.626	-0.247
X_6	容重 <i>UW</i>	-0.046	0.442	0.678	0.438
X_7	油脂含量 <i>OC</i>	-0.276	0.536	-0.531	0.350
X_8	蛋白质含量 <i>PC</i>	-0.252	0.521	-0.203	-0.500
X_9	淀粉含量 <i>SC</i>	0.321	-0.738	0.226	0.325
X_{10}	赖氨酸含量 <i>LC</i>	-0.310	0.631	0.092	0.527
特征值 Eigen value		3.246	2.074	1.442	1.217
贡献率/% Contributive ratio		32.462	20.742	14.421	12.171
累计贡献率/% Cumulative contributive ratio		32.462	53.204	67.625	79.796

它们反映了玉米籽粒的营养价值,系数越大,油脂含量越高、蛋白质含量和赖氨酸含量也越高,籽粒的营养成分就越高,因而称第二主成分为营养因子;在第三主成分中, X_5 百粒重(0.626)和 X_6 容重(0.678)的特征向量值最高,表明籽粒的百粒重越大容重越高,这与相关性分析中百粒重与容重呈正相关的结果一致。第三主成分反映了籽粒的饱满程度和质量高低,所以将其总结为质量因子;第四主成分贡献率占比最少,仅赖氨酸含量(0.527)特征向量值大于 0.5,其中粒长宽比(0.423)特征值虽未达到 0.5,但在第四主成分中占比相对较大,此主成分特征向量表征的生物学信息主要是赖氨酸含量,系数越大,粒长宽比值越大,说明粒长越长粒宽越窄,籽粒中赖氨酸含量越高,因此可将第四主成分总结为赖氨酸因子。

将玉米籽粒的 10 个性状进行主成分抽取后得到籽粒大小因子、营养因子、质量因子、赖氨酸因子这 4 种主成分,较好地保留了玉米籽粒物理和品质性状信息,可以用这 4 个主成分来替代之前测得的 10 项性状指标,根据各性状指标的特征向量可得到如下 4 个主成分得分函数表达式:

$$F_1 = 0.934X_1 + 0.940X_2 - 0.112X_3 + 0.957X_4 +$$

$$0.468X_5 - 0.046X_6 - 0.276X_7 - 0.252X_8 + 0.321X_9 - 0.310X_{10}$$

$$F_2 = 0.121X_1 + 0.254X_2 - 0.418X_3 + 0.210X_4 + 0.282X_5 + 0.442X_6 + 0.536X_7 + 0.521X_8 - 0.738X_9 + 0.631X_{10}$$

$$F_3 = -0.233X_1 - 0.169X_2 - 0.310X_3 - 0.169X_4 + 0.626X_5 + 0.678X_6 - 0.531X_7 - 0.203X_8 + 0.226X_9 + 0.092X_{10}$$

$$F_4 = 0.162X_1 + 0.002X_2 + 0.423X_3 + 0.062X_4 - 0.247X_5 + 0.438X_6 + 0.350X_7 - 0.500X_8 + 0.325X_9 + 0.527X_{10}$$

以 4 个主成分的方差贡献率为权重,分别是 0.3246、0.2074、0.1442、0.1217,构建出不同玉米自交系的主成分分析综合评价模型公式: $F = 0.3246F_1 + 0.2074F_2 + 0.1442F_3 + 0.1217F_4$,通过该模型公式计算出 429 个玉米自交系各自综合得分情况并进行排序得出综合评价前 50 份玉米自交系(表 3)。

2.1.3 429 份玉米自交系的聚类分析 将 10 个性状指标的数据进行标准化处理,利用聚类分析将材料分为 5 个类群(图 1),显示出 429 份材料间的遗传差异。其中类群 1 仅包含 1 份自交系 W284,性状特征是:籽粒的物理性状表现上等,品质性状构成中等,由表 4 可知,类群 1 的粒长、粒宽、粒面积、百粒重 4 个物理性状均为 5 个类群中的最高值,但赖氨酸含量为最低值,主成分得分排名第 69,是综合性状比较优良的自交系;类群 2 包含 314 份自交系,该类群各项性状表现中等,但蛋白质含量为 5 个类群最低值,均值综合排名为 199;类群 3 包含 8 份自交系 X1141P、Gy237、Gy220、Hua83-2、Gy386、By855、647、Gy923,主要性状特征是高油脂、高蛋白质含量、高粒长宽比,籽粒营养品质性状表现中上,均值综合排名为 349;类群 4 包含 105 份自交系,其容重指标明显优于其他 4 类,均值符合一等玉米容重标准,为 5 类中最高,均值综合排名为 302;类群 5 仅含 1 份自交系 T65,其赖氨酸与淀粉含量为 5 个类群最高,其余性状除蛋白质含量之外所有性状指标均为 5 个类群最低,主成分得分排名第 428,物理性状上表现较差。这些自交系是宝贵的种质资源,在玉米的遗传改良上有重要利用价值。

2.1.4 429 份玉米自交系的逐步回归分析 为进一步明确各单项指标与玉米综合评价得分的关系,筛选鉴定玉米自交系综合评价指标,以 $X_1 \sim X_{10}$ 为自变量,综合得分 F 值为因变量,进行逐步回归分析,建立 429 份玉米自交系综合评价的最优线性回归方程: $F_{429} = 2.906 + 0.402X_4 + 0.261X_5 + 0.228X_6$,方程的

表 3 综合评价前 50 份玉米自交系得分及排名

Table 3 Scores and ranking of top 50 maize inbred lines

自交系 Inbred line	来源 Origin	得分 Score	排名 Rank	自交系 Inbred line	来源 Origin	得分 Score	排名 Rank
PHV53	USA	218.65	1	XY027M	USA	208.62	26
DK625F	USA	218.16	2	32P75	USA	208.61	27
TY4	China	216.51	3	6M502A	USA	208.49	28
023/027F	USA	215.49	4	R3528-1	Unknown	208.42	29
B1M-6-PMO/4CV-31-1	China	215.37	5	LH181	USA	208.39	30
HM2F	China	214.50	6	XYM2	USA	208.38	31
XY1140M	USA	213.63	7	78599-211	China	208.29	32
XYM5	USA	213.09	8	Ji1037	China	208.27	33
P267-4	USA	212.86	9	ICI740	USA	208.13	34
Hong 2	China	212.06	10	YS0	Unknown	207.79	35
177	China	211.55	11	CML285	CIMMYT	207.66	36
DK516F/PHRKB	China	211.54	12	CIMBL38	CIMMYT	207.60	37
P291-4	Unknown	211.26	13	ZM28	China	207.32	38
045M/046M	USA	211.24	14	Nan202	China	207.22	39
XYM4	USA	211.00	15	DY358F	China	207.21	40
XY045M	USA	210.32	16	KWS7164M	Germany	207.02	41
PHR58	USA	210.30	17	CIMBL111	CIMMYT	206.77	42
045M/808M//6WC/046M	China	210.12	18	HZ127-7	USA	206.77	43
XYMI	USA	210.02	19	WY2M	China	206.71	44
6WC	USA	209.94	20	PHT60	USA	206.67	45
PH6WC/Z58/S10	China	209.77	21	LH196	USA	206.48	46
Jun5872	China	209.60	22	045M/045M/A88	China	206.35	47
XY987M	USA	209.40	23	4cv/rkb//rkb	China	206.17	48
XY1111F	USA	209.19	24	Xun971	China	205.91	49
Z58/6WC-Hun-14-22212	China	208.85	25	605M	China	205.87	50

表 4 429 份玉米自交系聚类分析所划分 5 个类群的性状表现

Table 4 Performance of traits in five groups classified by cluster analysis of 429 maize inbred lines

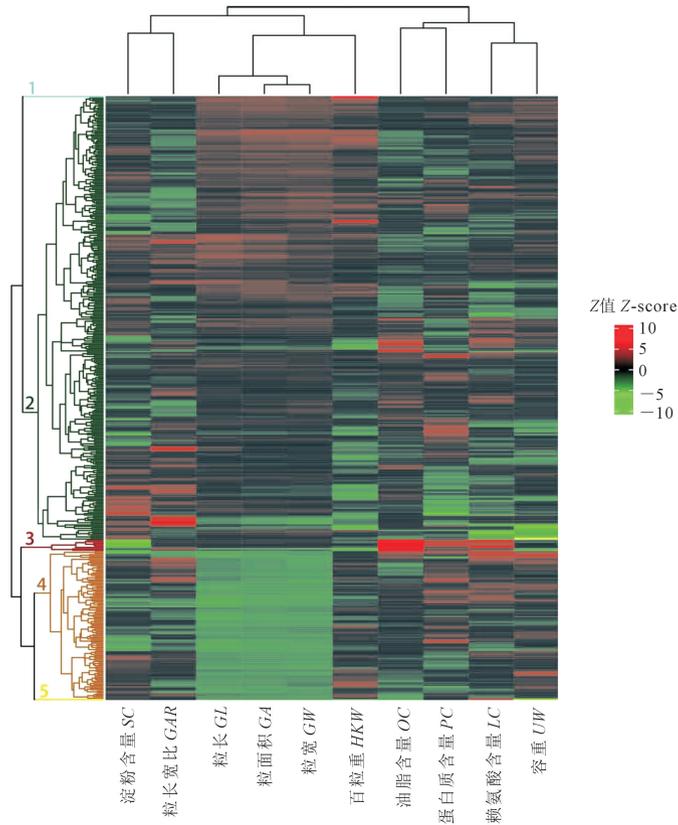
类群 Group	物理性状 Physical properties					品质性状 Quality traits/%				
	粒长 GL/mm	粒宽 GW/mm	粒长宽比 GAR	粒面积 GA/mm ²	百粒重 HKW/g	容重 UW /(g · L ⁻¹)	油脂含量 OC	蛋白质含量 PC	淀粉含量 SC	赖氨酸含量 LC
1	10.615	7.715	1.412	61.253	66.727	698.277	5.230	10.717	72.183	0.370
2	9.433	7.176	1.374	51.757	24.756	718.042	5.560	10.453	70.950	0.403
3	8.420	6.381	1.431	42.405	18.691	687.456	9.788	12.632	64.409	0.597
4	5.631	4.212	1.350	17.902	25.742	742.493	5.423	10.873	70.044	0.439
5	4.405	3.316	1.346	11.002	13.259	466.420	3.620	11.203	72.297	0.763

决定系数 $R^2 = 0.999$, $P < 0.0001$, 表明构建的回归方程存在极显著线性关系。根据方程可知, 各性状指标对自交系综合评价直接贡献效应由大到小依次是: X_4 (粒面积) $> X_5$ (百粒重) $> X_6$ (容重)。

2.2 综合评价前 50 份玉米自交系的聚类与逐步回归分析结果

2.2.1 综合评价前 50 份玉米自交系的聚类分析
将主成分分析中综合得分排名前 50 份玉米自交系数据标准化处理后再次进行聚类分析得到 5 个类群 (图 2), 对这 5 个类群的籽粒物理和品质性状进行系统分析得到表 5。结果显示, DY358F 和 ZM28 都是由单一自交系自成体系的个类; 类群 3 由 8 份自交系组成, 分别是 CIMBL111、WY2M、LH181、6M502A、

PHT60、177、78599-211、CIMBL38; 类群 4 含有 11 份自交系分别是 HZ127-7、32P75、Hong 2、HM2F、XYM4、PHV53、DK625F、P291-4、P267-4、B1M-6-PMO/4CV-31-1、4cv/rkb//rkb; 类群 5 含有 29 份自交系, 如 Ji1037、Jun5872、605M 等。结果表明, DY358F 性状特征为籽粒小, 蛋白质、赖氨酸含量高, 容重高, 籽粒营养性状明显优于其他自交系, 差异显著, 是营养价值高且质量好的优异种质, 综合得分排名 40; 类群 2 中的 ZM28 在百粒重和粒形方面表现突出, 品质性状表现一般, 综合排名 38; 类群 3 在油脂含量方面表现突出, 说明这类自交系在油脂方面的利用上有较大的遗传优势, 均值综合排名为 35; 第 4 类群在粒宽、粒长、粒面积方面表现优异,

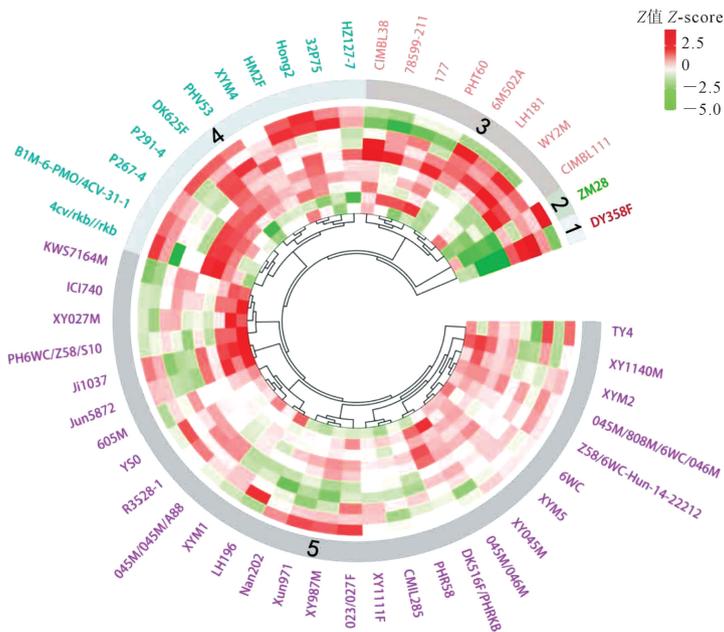


注:类群 1(蓝色)含 1 份自交系 W284,类群 2(绿色)含 314 份自交系,类群 3(红色)含 8 份自交系,类群 4(橙色)含 105 份自交系,类群 5(黄色)含 1 份自交系 T65。

Note: Group 1 (blue) contains 1 maize inbred line W284, group 2 (green) contains 314 maize inbred lines, group 3 (red) contains 8 maize inbred lines, group 4 (orange) contains 105 maize inbred lines, and group 5 (yellow) contains 1 maize inbred line T65.

图 1 429 份玉米自交系的聚类分析

Fig.1 Cluster analysis of 429 maize inbred lines



注:类群 1 含 1 份自交系 DY358F,类群 2 含 1 份自交系 ZM28,类群 3 含 8 份自交系,类群 4 含 11 份自交系,类群 5 含 29 份自交系;图中指标由内到外依次是粒长宽比、淀粉含量、粒长、粒宽、粒面积、油脂含量、赖氨酸含量、容重、蛋白质含量和百粒重。

Note: Group 1 contains 1 maize inbred line DY358F, group 2 contains 1 maize inbred line ZM28, group 3 contains 8 maize inbred lines, group 4 contains 11 maize inbred lines, and group 5 contains 29 maize inbred lines. The indicators in the graph from inner circle to outer circle are GAR, SC, GL, GW, GA, OC, LC, UW, PC and HKW, respectively.

图 2 综合评价前 50 份玉米自交系的聚类分析

Fig.2 Cluster analysis of the top 50 maize inbred lines

主要性状特征为籽粒大、容重低,均值综合排名为10,该类群囊括了PHV53、DK625F、B1M-6-PMO/4CV-31-1、HM2F、P267-4、Hong 2这6个综合得分排名前10位的玉米自交系,属于高产优质的自交系类群;类群5具有高淀粉含量低油脂含量的特点,物理性状表现中等偏上,均值综合排名23,包含了4个综合得分排名前10的玉米自交系,表明这类自交系在油脂营养的利用上有较大的遗传优势。以上结果证明这些自交系在玉米的遗传改良上有重要利用价值,是宝贵的种质资源。

2.2.2 综合评价前50份玉米自交系的逐步回归分析 以 $X_1 \sim X_{10}$ 为自变量,综合得分 F 值为因变量,对综合评价排名前50份玉米自交系进行逐步回归分析,构建前50份玉米自交系的最优线性回归方程: $F_{50} = 0.298X_1 + 0.354X_2 + 0.338X_4 + 0.270X_5 - 0.012X_7 - 0.063X_8 + 0.023X_9 + 0.228X_6 + 0.104X_{10} - 0.213$,方程的决定系数 $R^2 = 0.999, P < 0.0001$,表明构建的回归方程存在极显著线性关系。根据方程可知,各性状指标对排名前50份玉米自交系综合评价直接贡献效应从大到小依次为: X_2 (粒宽) $>X_4$ (粒面积) $>X_1$ (粒长) $>X_5$ (百粒重) $>X_6$ (容重) $>X_{10}$ (赖氨酸) $>X_9$ (淀粉) $>X_7$ (蛋白质) $>X_8$ (油脂)。方程中淀粉含量系数为正值,蛋白质、油脂含量系数为负值,说明籽粒增大,籽粒中淀粉含量提高,会导致蛋白质与油脂含量减少。

2.3 综合评价前后玉米自交系各性状的差异性分析

将综合评价前后的玉米自交系性状进行比较分析(表6),结果表明,429份玉米自交系各性状的变异系数范围为3.6%~40.4%,其中粒面积变异系数最大,淀粉含量变异系数最小。各个性状变异程度由大到小依次是:粒面积 $>$ 百粒重 $>$ 粒宽 $>$ 赖氨酸含量 $>$ 粒长 $>$ 油脂含量 $>$ 蛋白质含量 $>$ 粒长宽比 $>$ 容重 $>$ 淀粉含量,表明429份玉米自交系之间10种性状差异较大。将429份自交系与综合评价得分前50份自交系比较,发现变异范围从3.6%~40.4%缩减至2.2%~15.4%,标准差全部降低,粒长、粒宽、粒面积、百粒重、淀粉含量、容重、赖氨酸含量的平均值有所提升。由此可知,通过本研究综合评价体系筛选出的优良自交系,各性状均值明显提升,可为优异种质资源筛选鉴定和选育提供依据。

3 讨论与结论

农作物种质资源是我国农业发展的基石,现存种质资源中蕴含丰富的优异遗传基因^[12-13],发掘优异种质资源有利于品种的改良和新品种培育,因此对玉米品种资源的科学系统评价有助于将种质资源优势转化为育种和生产优势^[14-15]。按物理性状将种子分级更有利于农业生产实际。相关性分析结果表明,粒长、粒宽、粒面积、百粒重之间呈极显著

表5 综合评价前50份玉米自交所划分5个类群的性状表现

Table 5 Performance of traits in five groups classified by cluster analysis of the top 50 maize inbreds

类群 Group	粒长 GL/mm	粒宽 GW/mm	粒长宽比 GAR	粒面积 GA/mm ²	百粒重 HKW/g	容重 UW/(g·L ⁻¹)	油脂含量 OC/%	蛋白质含量 PC/%	淀粉含量 SC/%	赖氨酸含量 LC/%
1	4.791	3.982	1.209	14.504	24.269	843.54	6.167	11.08	68.983	0.58
2	7.901	6.328	1.353	39.336	44.884	775.283	5.603	10.727	67.033	0.397
3	9.647	7.732	1.256	55.529	26.983	770.747	6.434	10.322	70.964	0.54
4	10.576	8.513	1.252	67.386	34.084	761.336	5.393	11.021	69.236	0.458
5	10.401	7.843	1.349	61.534	30.23	763.063	5.033	10.41	71.422	0.435

表6 综合评价前后玉米自交系的描述性统计

Table 6 Descriptive statistics before and after comprehensive evaluation of maize inbred lines

指标 Index	429份自交系 429 inbred lines				综合排名前50份自交系 Top 50 inbred lines			
	极差 Range	平均值 Average	标准差 SD	变异系数 CV	极差 Range	平均值 Average	标准差 SD	变异系数 CV
粒长 GL	7.77	8.47	1.92	0.227	7.03	10.16	1.06	0.105
粒宽 GW	5.97	6.43	1.51	0.235	5.30	7.86	0.77	0.098
粒长宽比 GAR	0.76	1.37	0.13	0.094	0.46	1.31	0.10	0.079
粒面积 GA	64.16	43.22	17.46	0.404	60.66	60.48	9.33	0.154
百粒重 HKW	60.16	24.96	6.01	0.241	20.61	30.73	4.05	0.132
容重 UW	449.23	722.82	46.08	0.064	125.23	765.77	17.22	0.022
油脂含量 OC	7.12	5.60	0.95	0.170	3.85	5.37	0.75	0.139
蛋白质含量 PC	8.11	10.60	1.24	0.117	3.92	10.55	0.90	0.085
淀粉含量 SC	14.97	70.61	2.56	0.036	7.19	70.73	1.71	0.024
赖氨酸含量 LC	0.71	0.42	0.10	0.232	0.29	0.46	0.07	0.142

正相关,粒形相关性状直接影响粒重,进而影响产量,这与前人研究结果一致^[16-18];粒长、粒长宽比、粒面积均与淀粉含量呈极显著正相关,说明籽粒越深的大籽粒淀粉含量相对更高;蛋白质和赖氨酸含量呈极显著正相关,表明二者在玉米籽粒中相互促进,协同提高;蛋白质和淀粉是光合作用的共同产物,在籽粒中存储于不同的胚乳区域,胚乳内层的淀粉含量占比增加时,胚乳外层的蛋白质含量相应减少^[19],与本研究中蛋白质含量与淀粉含量呈极显著负相关,且在逐步回归分析中淀粉含量系数为正值,蛋白质系数为负值的结果一致;油脂含量与淀粉含量呈极显著负相关,可能是玉米胚芽中的脂肪增加,使胚芽体积增大、胚乳体积减少,导致淀粉含量减少。粒长、粒宽、粒面积、淀粉含量均与蛋白质、赖氨酸含量呈显著负相关,这与赵海军等^[20]研究结果一致,即蛋白质、油脂和赖氨酸含量高的籽粒,其粒质量会降低,且籽粒的淀粉含量与蛋白质、油脂含量在有限的籽粒容量中存在一定的拮抗关系。可见籽粒质量和淀粉含量与籽粒其他营养含量往往呈负相关,今后种质改良过程中在提高籽粒质量的同时应重点提升籽粒的营养含量。

429 份玉米自交系主成分分析结果表明,提取的 4 个主成分均有相互独立的性状因子构成,载荷较高的分别是籽粒大小因子、营养因子、质量因子和赖氨酸因子,其构成因素合理,比较客观地揭示了玉米优异自交系 4 个主成分的向量特性。除此之外,发现粒长宽比越高则籽粒中赖氨酸含量越高,推测窄长型籽粒中赖氨酸含量更高。通过建立统一综合评价模型,筛选出排名前 10 份综合性状表现优异的玉米种质:PHV53、DK625F、TY 4、023\027F、B1M-6-PMO/4CV-31-1、HM2F、XY1140M、XYM5、P267-4、Hong 2,按照 GB1353-2018《玉米》判定均符合一级玉米品质^[21]。根据表 6 可知,综合评价排名前 50 份玉米自交系与 429 份玉米自交系相比各项性状指标离散程度减小,分析 10 个性状均值,发现二者籽粒营养含量相差无几,但综合评价排名前 50 份玉米自交系籽粒物理性状均值更高,所以本研究表明籽粒品质性状均值不变的情况下,物理性状表现越好,玉米自交系种质优势潜力越大。

聚类分析是根据供试材料的指标差异,明确区分不同品系间的遗传差异和遗传相似性并进行分类,精确揭示类群内存在的亲缘关系的一种多元统计方法^[22]。本研究利用聚类分析将 429 份玉米材料划分为 5 类,各类群性状差别较为明显。其中两个单一自交系自成体系的个类 W284 和 T65 特异性

极强;W284 籽粒的物理性状表现突出,可作为培育高质量玉米品种的资源材料;T65 淀粉、赖氨酸含量高,可为工业生产或饲用等特种玉米品种的培育提供优异种质资源。将综合评价模型筛选出的 50 份玉米自交系再次聚类划分为 5 类,依然有两个单一自交系自成体系的个类(DY358F、ZM28),其中各项性状数据表明 DY358F 是营养品质性状表现优异的种质;ZM28 在百粒重和容重方面表现较好,丰产性高;第 4 类群是综合表现最好的类群,包括了 6 个综合得分排名前 10 位的玉米自交系(PHV53、DK625F、B1M-6-PMO/4CV-31-1、HM2F、P267-4、Hong 2),是一类高产优质的自交系。二次聚类可以在全部聚类的基础上进一步细化和分类籽粒性状数据,筛选出不同特性的优异种质,为不同用途专用的玉米优良品种提供种质资源和参考。在聚类中结合主成分进行分析能更好地用少量关键主成分因子解释更多的生物学信息,提高综合评价的可靠性。

在逐步回归分析中,2 个最优线性回归方程均含粒面积、百粒重、容重指标,说明这 3 项指标不仅适用于评判玉米自交系籽粒质量,也可作为评价不同玉米种质资源潜力的鉴定指标。而逐步回归最优线性模型中权重系数较大的 6 项指标值(粒宽、粒面积、粒长、百粒重、容重、淀粉)经综合评价筛选后明显提高,表明该评价体系科学有效,准确度较高,可筛选出优质种质资源。今后可根据玉米的食用、饲用、工业用等不同用途所关注指标的不同,对不同指标赋以相应的权重,形成综合评价体系,更有助于不同需求、不同用途玉米种质资源的筛选和利用。

参 考 文 献:

- [1] 金云倩,王彬,郭书磊,等.赤霉素调控玉米种子活力的研究进展[J].生物技术通报,2023,39(1):84-94.
JIN Y Q, WANG B, GUO S L, et al. Research progress in gibberellin regulation on maize seed vigor[J]. Biotechnology bulletin, 2023, 39(1): 84-94.
- [2] 赵久然,王帅,李明,等.玉米育种行业创新现状与发展趋势[J].植物遗传资源学报,2018,19(3):435-446.
ZHAO J R, WANG S, LI M, et al. Current status and perspective of maize breeding[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2018, 19(3): 435-446.
- [3] 王威,胡海银.玉米籽粒大小与其植株内源保护酶活性及单株种子产量的关系[J].甘肃农业大学学报,2013,48(4):44-48.
WANG W, HU H Y. Relationship between seed size and protective endoenzyme activity and yield per plant in maize[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2013, 48(4): 44-48.
- [4] 李建秀,赵国彬,杨国虎,等.21 个新育玉米自交系品质性状应用

- 潜力分析[J]. 宁夏农林科技, 2018, 59(8): 1-4.
- LI J X, ZHAO G B, YANG G H, et al. Utilization potentiality analysis on quality traits of 21 newly bred maize inbred lines[J]. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2018, 59(8): 1-4.
- [5] 张正, 董春林, 杨睿, 等. 不同类型玉米品种产量与穗部性状的相关性分析[J]. 中国种业, 2022, (2): 80-84.
- ZHANG Z, DONG C L, YANG R, et al. Correlation analysis between yield and ear traits in different types of maize varieties[J]. *China Seed Industry*, 2022, (2): 80-84.
- [6] 赵海燕, 王腾飞, 续创业, 等. 西北旱塬区玉米品种表型聚类分析及适应性评价[J]. 玉米科学, 2023, 31(5): 56-63.
- ZHAO H Y, WANG T F, XU C Y, et al. Discussion on phenotype analysis and adaptability evaluation of maize varieties in northwest dry area[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2023, 31(5): 56-63.
- [7] 张中伟, 杨海龙, 付俊, 等. 基于主成分分析和聚类分析的玉米品种的综合评价[J]. 农业科技通讯, 2022, (6): 30-35.
- ZHANG Z W, YANG H L, FU J, et al. Comprehensive evaluation of maize varieties based on principal component analysis and cluster analysis[J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2022, (6): 30-35.
- [8] CHAVES A, MORAES L G, MONTAÑO A S, et al. Analysis of principal components for the assessment of silage corn hybrid performance under water deficit [J]. *Agriculture (Nitra, Slovakia)*, 2023, 13(7): 1335.
- [9] TANG H, XU C, JIANG Y, et al. Evaluation of physical characteristics of typical maize seeds in a cold area of North China based on principal component analysis [J]. *PROCESSES*, 2021, 9(7): 1167.
- [10] 陈雅坤, 杨鹏标, 闫威明, 等. 基于主成分、隶属函数和全株玉米青贮质量评分指数综合评价我国不同规模奶牛场的全株玉米青贮质量[J]. 动物营养学报, 2023, 35(12): 8122-8132.
- CHEN Y K, YANG P B, YAN W M, et al. Whole-plant corn silage quality in different scale dairy farms was evaluated based on principal component, subordinate function and whole-plant corn silage quality score index[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2023, 35(12): 8122-8132.
- [11] 徐梦婷, 王强, 郝艳宾, 等. 基于主成分分析的核桃品种油用性状综合评价[J]. 食品工业科技, 2024, 45(2): 235-242.
- XU M T, WANG Q, HAO Y B, et al. Comprehensive evaluation of oil-use traits of walnut varieties based on principal component analysis [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(2): 235-242.
- [12] 黎裕, 李英慧, 杨庆文, 等. 基于基因组学的作物种质资源研究: 现状与展望[J]. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3333-3353.
- LI Y, LI Y H, YANG Q W, et al. Genomics-based crop germplasm research: advances and perspectives[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(17): 3333-3353.
- [13] 张茗起, 王蕊, 张春宵, 等. 吉林省玉米种质资源 SSR 和 SNP 分子身份证的构建及应用[J]. 中国农业科学, 2024, 57(2): 236-249.
- ZHANG M Q, WANG R, ZHANG C X, et al. The construction and application of SSR and SNP molecular ID for maize germplasm resources of Jilin Province [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(2): 236-249.
- [14] 从春生, 李永祥, 李春辉, 等. 分子标记辅助选择玉米杂种后代创新种质方法研究[J]. 中国农业科学, 2016, 49(20): 3874-3885.
- CONG C S, LI Y X, LI C H, et al. Research on methodology of maize germplasm development with source of hybrids by using marker-assisted selection [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(20): 3874-3885.
- [15] 韩飞, 诸葛玉平, 娄燕宏, 等. 63份谷子种质的耐盐综合评价及耐盐品种筛选[J]. 植物遗传资源学报, 2018, 19(4): 685-693.
- HAN F, ZHU GE Y P, LOU Y H, et al. Evaluation of salt tolerance and screening for salt tolerant accessions of 63 foxtail millet germplasm [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2018, 19(4): 685-693.
- [16] AUSTIN D F, LEE M. Comparative mapping in F2:3 and F6:7 generations of quantitative trait loci for grain yield and yield components in maize [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 1996, 92(7): 817-826.
- [17] PENG B, LI Y, WANG Y, et al. QTL analysis for yield components and kernel-related traits in maize across multi-environments [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2011, 122(7): 1305-1320.
- [18] LI C H, LI Y X, SUN B C, et al. Quantitative trait loci mapping for yield components and kernel-related traits in multiple connected RIL populations in maize [J]. *Euphytica*, 2013, 193(3): 303-316.
- [19] 崔丽娜, 张红, 孟佳佳, 等. 不同胚乳类型玉米籽粒淀粉粒的粒度分布特征[J]. 作物学报, 2012, 38(9): 1723-1727.
- CUI L N, ZHANG H, MENG J J, et al. Starch granule size distribution in maize kernel with different endosperm types [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(9): 1723-1727.
- [20] 赵海军, 史佳晴, 王彬, 等. 150份玉米自交系籽粒及其品质性状的综合评价[J]. 河南农业科学, 2023, 52(5): 33-39.
- ZHAO H J, SHI J Q, WANG B, et al. Comprehensive evaluation of grain and its quality traits of 150 maize inbred lines [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2023, 52(5): 33-39.
- [21] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 玉米: GB 1353-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China: GB 1353-2018 [S]. Beijing: China Standard Press, 2018.
- [22] 蔡晓洋, 张思获, 曾俊, 等. 基于主成分分析和聚类分析的椴子种质资源评价[J]. 中国实验方剂学杂志, 2017, 23(14): 30-37.
- CAI X Y, ZHANG S H, ZENG J, et al. Evaluation of germplasm resources of *Gardeniae Fructus* based on principal component and hierarchical cluster analysis [J]. *Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae*, 2017, 23(14): 30-37.