

# 玉米种质资源子粒容重和品质性状差异性分析

张 静<sup>1</sup>, 王彩红<sup>2</sup>, 赵永锋<sup>1</sup>, 祝丽英<sup>1</sup>, 黄亚群<sup>1</sup>, 郭晋杰<sup>1</sup>, 陈景堂<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>河北农业大学农学院/国家玉米改良中心河北分中心/河北省作物种质资源实验室, 保定 071001;

<sup>2</sup>石家庄以岭药业股份有限公司, 石家庄 050035)

**摘要:**以 290 份遗传多样性丰富的玉米自交系为研究材料, 探究子粒容重和营养品质的关系, 对不同杂种优势群的玉米子粒容重进行多重比较, 筛选各杂种优势群中容重较高的自交系。研究结果表明: 不同自交系的容重差异达到极显著水平, 子粒容重与脂肪含量、淀粉含量分别呈极显著、显著正相关关系, 与水分含量和赖氨酸含量呈极显著负相关关系, 与蛋白质含量呈显著负相关关系。通径分析表明, 脂肪含量、淀粉含量、蛋白质含量、赖氨酸含量和水分含量对容重的直接作用系数分别为 0.2821、0.1289、-0.0558、-0.1825 和 -0.3376。P 群、旅大红骨、唐四平头群与兰卡斯特的子粒容重在 0.05 显著性水平上有统计学意义。另外, 瑞德群中高容重自交系包括 W222、掖 8112 等, 兰卡斯特中高容重自交系包括 W64a、P167、吉 63 等, P 群中高容重自交系包括黄昌 b、R136、陕 89 等, 旅大红骨中高容重自交系包括农系 5678、Lo415、B100 等, 唐四平头中高容重自交系包括黄昌 a、D33A、浚 926 等。

**关键词:** 玉米; 子粒容重; 营养品质性状; 杂种优势类群

## Difference Analysis of Kernel Test Weight and Nutritional Quality Traits in Maize (*Zea mays* L.) Germplasm Resources

ZHANG Jing<sup>1</sup>, WANG Cai-hong<sup>2</sup>, ZHAO Yong-feng<sup>1</sup>, ZHU Li-ying<sup>1</sup>,

HUANG Ya-qun<sup>1</sup>, GUO Jin-jie<sup>1</sup>, CHEN Jing-tang<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Department of Agronomy, Agricultural University of Hebei/Hebei Sub-center of National Maize Improvement Center/Key Laboratory for Crop Germplasm Resources of Hebei, Baoding 071001; <sup>2</sup> Shijiazhuang Yiling Pharmaceutical Company, Shijiazhuang 050035)

**Abstract:** A set of 290 maize inbred lines with abundant genetic diversity were employed to make an exploration of relationship between kernel test weight and nutritional quality traits, after which, multiple comparison was performed to learn about the difference of kernel test weight among different heterosis groups, and excellent lines were screened from every heterosis group. The results were as followed. Significant difference was found for different lines, in addition, significantly positive correlation was observed between kernel test weight and fat content, while positive correlation was observed between test weight and starch content, conversely, test weight showed significantly negative correlation with moisture content and lysine content and showed negative correlation with protein content. The path analysis also indicated that direct decision coefficients of fat content, starch content, protein content, lysine content and moisture content on test weight were -0.3376, 0.2821, 0.1289, -0.0558 and -0.1825. At the significant level of 0.05, there were differences of test weight between P group, LRC, TangSPT and Lancaster. Different heterosis groups had their excellent lines which partly were W222 and ye8112 in Reid, W64a, P167 and ji63 in Lancaster, huangchang b, R136 and shan89 in P group, nongxi5678, Lo415, B100 in LRC, and huangchang a, D33A, xun926 in TangSPT.

**Key words:** maize; kernel test weight; nutritional quality traits; heterosis group

收稿日期: 2015-11-25 修回日期: 2016-03-15 网络出版日期: 2016-08-12

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20160812.1316.008.html>

**基金项目:** 教育部博士点青年教师基金 (20131302120001); 国家重点研发计划 (2016YFD0101204-3); 河北省现代农业技术体系玉米创新团队项目 (HBCT2013020204)

第一作者研究方向为作物遗传育种。E-mail: 18731228630@163.com

通信作者: 郭晋杰, 研究方向为作物遗传育种, E-mail: guojinjie512@163.com; 陈景堂为共同通信作者

容重可以真实的反映玉米的成熟度、完整度<sup>[1]</sup>和使用价值,因此,容重是国际上玉米商品品质的评价指标,是对玉米进行等级划分的标准。为提高我国玉米总体质量,增强我国出口玉米国际竞争力,从丰富的自交系资源中筛选出容重表现良好的家系应用于培育高容重且综合表现良好的杂交种是育种工作者必须引以为重的工作。雍洪军等<sup>[2]</sup>以 8 个玉米合成群体为供体,以郑单 958 亲本为受体组配了 16 个测交组合,通过研究得出其中两个群体具有同时改良杂交种产量和容重的潜力。因此,通过优良自交系对杂交种容重进行改良是可行的,对多样性丰富的自交系进行容重分析,明确其容重表现特点有重要的意义。子粒的营养品质直接与人的生活息息相关,决定着其在食用、饲用、化工和医药方面的价值大小。在饲用方面,L. W. Hsu 等<sup>[3]</sup>的研究表明,容重较低的玉米粗蛋白含量低于正常容重玉米的粗蛋白含量,使用两种玉米对 1~7 d 的幼禽进行喂养后,食用正常容重玉米的幼禽生长速率高于低容重玉米。因此,探究子粒商品品质与营养品质之间的关系,尽可能的将经济价值和使用价值最优化具有重要的意义。

由于玉米子粒容重是一个复杂的数量性状,很多因素可以影响玉米子粒容重,包括玉米的形状、吐丝期、抽雄期、灌浆期等。E. Johansson 等<sup>[4]</sup>和 B. H. Lee 等<sup>[5]</sup>的研究结果表明,环境和天气是影响作物子粒容重的重要因素。但是,作物品种的多样性是导致容重差异的根本因素<sup>[6]</sup>。对作物不同品种<sup>[7-8]</sup>和重组自交系群体<sup>[9]</sup>的容重进行研究,表明品种的遗传特性是造成不同基因型玉米容重差异的主要原因。不同基因型的玉米子粒内含物含量也有较大差异。B. Massimo 等<sup>[10]</sup>通过对 33 个玉米杂交种的子粒内含物含量进行比较,结果表明淀粉含量、蛋白质含量、油脂含量和直链淀粉与支链淀粉的相对含量均有较大的变化;李建奇<sup>[8]</sup>对不同类型玉米品种的子粒品质和产量差异进行了研究,结果表明不同类型玉米品种的粗蛋白、粗脂肪、粗淀粉、赖氨酸含量、子粒容重及其产量差异均达到显著水平。

玉米子粒容重与玉米子粒硬度是反映玉米品质的 2 个重要指标,二者之间也紧密相关。容重可以作为子粒硬度的评价指标,对于玉米和大豆而言,子粒容重和硬度均达到极显著正相关<sup>[11]</sup>。并且,淀粉含量、支链淀粉/直链淀粉和蛋白质含量都与子粒硬

度息息相关。B. Massimo 等<sup>[10]</sup>的研究结果表明,子粒硬度值 H/S(子粒的横切面总面积和质地较软胚乳面积比值)与蛋白质含量、支链淀粉/直链淀粉呈显著正相关,与淀粉含量呈显著负相关,并且,玉米子粒容重与蛋白质含量、支链淀粉/直链淀粉和淀粉含量体现了相同的相关趋势。关于玉米子粒容重与淀粉含量和蛋白质含量的相关关系已多次报道。郭淑春等<sup>[12]</sup>和张丽等<sup>[13]</sup>的研究表明,不同品种和粒型的玉米容重都与蛋白质含量呈正相关关系。关于淀粉总含量和容重关系的研究结果不尽相同。C. L. Weller 等<sup>[14]</sup>和 S. R. Fox 等<sup>[15]</sup>的研究结果都表明容重与淀粉含量呈正相关关系,C. Dorsey-Redding 等<sup>[16]</sup>的研究结果表明容重与淀粉含量呈负相关关系。M. D. Rumbaugh<sup>[17]</sup>研究表明,容重可作为有限生育期与子粒含水量之间的有利连结点,更好地评价杂交种的品质。张丽等<sup>[13]</sup>的研究结果指出赖氨酸含量对玉米容重起负作用,且由于决定系数最小,成为影响容重的主要限制因素。

目前,一些研究基于家系群体,对控制玉米容重的相关位点进行了挖掘<sup>[18-20]</sup>,这为进一步进行分子育种提供了基础。而对自然群体进行杂种优势群的划分,也会为传统育种提供借鉴和指导。合理准确的划分杂种优势群,构建杂种优势模式,可以有效地指导选育自交系、选配杂交组合和育种管理等技术<sup>[21]</sup>。对所研究的自然群体进行类群划分,筛选各类群中目标性状优良的自交系,以其遗传背景为参考,可以减少以后工作的盲目性,达到减少人力、物力和财力的目的。

以往对于玉米子粒容重与营养品质相关关系的研究多倾向于以玉米杂交种为试验材料<sup>[10,12-16]</sup>,这虽可以探究其相关规律,但不能为组配或改良玉米杂交种的品质提供有效的指导。本试验以多样性丰富的自交系群体为研究材料,并对不同杂种优势群的高容重自交系进行筛选,不仅可以为组配高容重玉米杂交种提供资源,并且可以依据类群划分结果为组配计划提供指导,从而使自交系的优良性状在杂交种中有更有利的展现。

本研究以 290 份多样性丰富的自交系组建的自然群体为研究对象,对群体内容重进行描述性统计分析,对容重与子粒营养品质性状进行简单相关分析,对不同杂种优势群容重进行差异性分析,并对容重高的自交系进行筛选,以期培育品质优异的杂交种提供指导。

# 1 材料与方法

## 1.1 试验材料与田间种植

本研究利用遗传多样性丰富、来源广泛的 290 份国内外自交系,其中包括 220 份中国玉米自交系

(核心种质及其衍生系,包括本课题组选育的自交系)以及 70 份美国玉米自交系(包括美国核心种质和品种保护权过期自交系)。这些自交系涉及到了中国主要玉米自交系的杂种优势群,较广泛的代表了中国玉米主产区的种质资源基础(表 1)。

表 1 本研究中 290 份自交系材料目录

Table 1 List of the 290 inbred lines used in this study

编号 ID	材料 名称 Germplasm identity	系谱 来源 Pedigree/ Origin	编号 ID	材料 名称 Germplasm identity	系谱 来源 Pedigree/ Origin	编号 ID	材料 名称 Germplasm identity	系谱 来源 Pedigree/ Origin
1	Mo17	系 187-2 × C103 的二环系	44	昌 D	美国衍生系	87	郑 32	美国杂交种 3382
2	R31	美国衍生系	45	M14	美国早期核心种质	88	C8605-2	铁 7922 × 沈 5003
3	698-3	美国杂交种	46	M101	美国早期核心种质	89	7922	美国杂交种 3382
4	琼 51	不详	47	Apr-05	不详	90	掖 832	美国单交种
5	757	不详	48	陈 322	不详	91	长 72	地方品种改良系
6	DH138	美国衍生系	49	H601	综合种	92	武 109	不详
7	R08	美国杂交种 P78599	50	H588	综合种	93	旅 28	旅大红骨
8	78599	美国杂交种 78599	51	昌 K	不详	94	沿 812	U8112 改良系
9	807D	不详	52	黄昌 a	不详	95	齐 205	(V 矮 141/中系 017) × 群体 70
10	802	不详	53	953	美国衍生系	96	DH854	美国衍生系
11	GY1145	美国杂交种 78599	54	黄昌 b	不详	97	DH857	美国衍生系
12	E600	综合种	55	w499	美国杂交种	98	DH856	美国衍生系
13	E200	综合种	56	SC30-1	不详	99	DH864	美国衍生系
14	L061F	利马格兰自交系	57	468-3	不详	100	DH869	美国衍生系
15	DM101B	不详	58	XF117	美国衍生系	101	DH881	美国衍生系
16	D88	综合种	59	XF223	美国衍生系	102	DH883	美国衍生系
17	DM07	美国衍生系	60	XF134	美国衍生系	103	DH886	美国衍生系
18	SC24-1	不详	61	M131-5	美国早期核心种质	104	DH1049	美国衍生系
19	D1139	美国衍生系	62	XOP2	美国早期核心种质	105	DH1051	美国衍生系
20	W222	获白 × L1029	63	R1656	不详	106	3H2	(WeiDa202 × 自 330) × H84
21	Y223	美国杂交种	64	鉴 1496b	不详	107	豫 87-1	美国杂交种
22	C521	不详	65	Max	不详	108	南 21-3	前南斯拉夫杂交种
23	LM-2	利马格兰杂交种选系	66	CN104	美国衍生系	109	K14	不详
24	B97	BSCB1 ® C9	67	La2-4	美国衍生系	110	掖 478	U8112 × 沈 5003
25	B100	美国早期核心种质	68	T24	不详	111	掖 52106	(掖 1075 × 掖 106) × 矮金 525
26	B98	美国早期核心种质	69	Lo415	美国衍生系	112	掖 8001	5003 × 8112
27	B95	美国早期核心种质	70	D20	美国衍生系	113	苏湾 1611	苏湾 2
28	SC-9	不详	71	Lo5-6	不详	114	丹 599	美国杂交种 78599
29	KP3130	韩国杂交种	72	ys06	不详	115	D892	不详
30	L-1	法国自交系	73	L473	不详	116	1205A	美国早期核心种质
31	W172	法国自交系	74	e 群 3	综合种	117	苏 75	7BU9 × 511
32	综 3	综合种	75	e 群 4	综合种	118	R136	美国衍生系
33	W238	不详	76	18-599	美国杂交种 78599	119	200B	自 330 × 187-2
34	D33A	美国衍生系	77	697	美国衍生系	120	3489a	美国衍生系
35	G966	美国杂交种	78	K10	(长 3 × 沈 5003) × 长 3	121	Z31B	美国衍生系
36	G668	美国杂交种	79	海 014	不详	122	N68a	美国早期核心种质
37	G967	美国杂交种	80	长 3	地方品种改良系	123	619	美国衍生系
38	G969	美国杂交种	81	吉 444	A619 × 黄早四	124	沈 137	美国杂交种 6JK611
39	G968	美国杂交种	82	黄野四 3	(野鸡红 × 黄早四) × 黄早四	125	3335	美国衍生系
40	18	不详	83	杂 C546	C103 变异株	126	Beck	美国衍生系
41	1614	不详	84	吉 63	(127-32 × 铁 84) × (潍 24 × 潍 20)	127	98F1	不详
42	1610	不详	85	鲁原 92	原齐 123 × 1137	128	Maxa	美国衍生系
43	郑 58	掖 478 变异株	86	掖 8112	美国杂交种 3382	129	N42	不详

表 1(续)

编号 ID	材料 名称 Germplasm identity	系谱 来源 Pedigree/ Origin	编号 ID	材料 名称 Germplasm identity	系谱 来源 Pedigree/ Origin	编号 ID	材料 名称 Germplasm identity	系谱 来源 Pedigree/ Origin
130	方引	不详	184	M7	美国早期核心种质	238	IB02	美国第三批过品保期自交系
131	GY3	不详	185	9702	不详	239	2369	美国第三批过品保期自交系
132	P167	美国杂交种	186	9710	不详	240	6M502	美国第三批过品保期自交系
133	5032	美国衍生系	187	y9961	不详	241	NS501	美国第三批过品保期自交系
134	郑 22	丹 340 × E28	188	7026B	美国衍生系	242	S8324	美国第三批过品保期自交系
135	DF32	不详	189	196	不详	243	WIL900	美国第三批过品保期自交系
136	FAP1360A	欧洲自交系	190	LD61	不详	244	WIL901	美国第三批过品保期自交系
137	7903E	美国衍生系	191	W344	不详	245	WIL500	美国第三批过品保期自交系
138	丹 340	旅 9 改良系	192	68122	不详	246	L127	美国第三批过品保期自交系
139	冲 72	美国衍生系	193	M22	美国早期核心种质	247	L135	美国第三批过品保期自交系
140	M1016	美国杂交种	194	陕 89	不详	248	L139	美国第三批过品保期自交系
141	丹 9046	沈 5003 × 铁 7922	195	吉 853	(黄早四 × 自 330) × 自 330	249	W8555	美国第三批过品保期自交系
142	P25	美国衍生系	196	自 330	OH43 × 可利 67	250	PHJ33	美国第三批过品保期自交系
143	SS99	美国衍生系	197	Q1261	K12 改良系	251	PHM10	美国第三批过品保期自交系
144	BM	美国衍生系	198	H99	美国早期核心种质	252	PHN82	美国第三批过品保期自交系
145	d140	不详	199	F7	美国第三批过品保号自交系	253	PHP55	美国第三批过品保期自交系
146	W9706	美国早期核心种质	200	丹黄 02	旅系综合种	254	PHR62	美国第三批过品保期自交系
147	R25	美国衍生系	201	浚 971	不详	255	PHT22	美国第三批过品保期自交系
148	R150	不详	202	丹 598	OH43H3 改良系	256	PHW20	美国第三批过品保期自交系
149	R98	美国衍生系	203	7884	美国杂交种 C17 × L289	257	2FACC	美国第三批过品保期自交系
150	齐 319	美国衍生系	204	W64a	美国早期核心种质	258	浚 928	塘四平头
151	20762	不详	205	A619	美国早期核心种质	259	浚 926	塘四平头
152	20837	不详	206	A554	美国早期核心种质	260	AHU1	秀清 73-1 母本改良系
153	20564	不详	207	Ms71	美国早期核心种质	261	浚 248	塘四平头
154	XF77	美国衍生系	208	B76	美国早期核心种质	262	AHU24	101314
155	Los-6	不详	209	B37	美国早期核心种质	263	AHU2	0522(白粒)
156	XF27	美国衍生系	210	Pa91	美国早期核心种质	264	AHU3	T-Hz4
157	获塘黄	HTB42 × 海 1917 × Mo17Ht	211	A679	美国早期核心种质	265	AHU4	2105(大 38)
158	SC11-1	美国衍生系	212	Co109	美国早期核心种质	266	AHU5	(5237 × 陕 811-1) × 5237
159	SC14	美国衍生系	213	Sg1533	美国早期核心种质	267	AHU6	212 × 97-1
160	811A	S1147 × 1112	214	Va102	美国早期核心种质	268	AHU7	郑 58 × 92-8
161	806A	1688 × 黄 C	215	W182bn	美国早期核心种质	269	AHU8	73-1 × 212
162	9058	美国杂交种 6JK × 8085Tai	216	Va26	美国早期核心种质	270	AHU9	衡单 11 父本改良系
163	PH6WC	先锋杂交种	217	HP301	美国早期核心种质	271	AHU10	三北 8 母本改良系
164	PH4CV	先锋杂交种	218	4722	不详	272	AHU11	(P53 × ETO) × P53
165	海 9-21	美国杂交种	219	P39	美国早期核心种质	273	AHU12	永研 4 × 35-1
166	DH40	不详	220	木 6	QLWSB × C103	274	AHU13	三北 8 × 永 4-1
167	928	塘四平头	221	W2H03	美国早期核心种质	275	AHU14	良玉 88 父本改良系
168	926	塘四平头	222	S311	美国早期核心种质	276	AHU15	AP13
169	A801	丹 9042 × (丹 9046 × 墨黄 9)	223	Jul-01	美国早期核心种质	277	AHU16	邢 K36 × 郑 58
170	8982	美国衍生系	224	LH127	美国第三批过品保期自交系	278	AHU17	178 × 郑 58
171	DF20	不详	225	LH162	美国第三批过品保期自交系	279	H21	黄早四 × H84
172	DF27	不详	226	LH194	美国第三批过品保期自交系	280	AHU18	H004-2
173	DF43	不详	227	RS710	美国第三批过品保期自交系	281	R548	美国第三批过品保号自交系
174	DF24	不详	228	NQ508	美国第三批过品保期自交系	282	AHU19	Zh907039
175	7236	不详	229	SG17	美国第三批过品保期自交系	283	昌 7-2	塘四平头
176	433-7	不详	230	MDF-13D	美国第三批过品保期自交系	284	AHU20	河玉 2 父本
177	沈 977	美国衍生系	231	207	美国第三批过品保期自交系	285	黄早四	塘四平头
178	牛 2-1	地方品种改良系	232	CRIHT	美国第三批过品保期自交系	286	AHU21	农单 118 母本
179	68139	美国衍生系	233	6103	美国第三批过品保期自交系	287	AHU22	农系 5678
180	68202	美国衍生系	234	IB014	美国第三批过品保期自交系	288	AHU23	永研 4 母本改良系
181	17564	美国衍生系	235	LH150	美国第三批过品保期自交系	289	B394	美国早期核心种质
182	黄 C	(黄小 162 × 自 33002) × Tuxpenno	236	4676A	美国第三批过品保期自交系	290	B73	美国早期核心种质
183	P007	美国杂交种	237	PHG86	美国第三批过品保期自交系			



于 2013 年和 2014 年 5 月中旬,分别将所有材料种植于河北农业大学玉米改良中心河北分中心试验基地。田间种植采用随机区组试验设计,设置 2 次重复;行长 3 m,株距 0.24 m,行距 0.6 m,种植密度为 67500 株/hm<sup>2</sup>。试验区域周围种植保护行,田间管理采用常规的水肥管理。

## 1.2 表型测定

选取苗和结实均正常的玉米自交系获取表型,待子粒成熟后,收获除首尾 2 棵玉米外的其他植株果穗。GB 1353—2009<sup>[22]</sup> 规定,含水量不超过 18.0% 时,容重测定结果即为最终结果,因此,充分自然晾晒果穗至子粒含水量不超过 18.0%,然后将收获果穗脱粒后混匀,运用 LDS-1G 子粒容重测定仪测定子粒容重,测定过程中,按照 GB 1353—2009<sup>[22]</sup> 要求,以 2 次测量不超过 3 g/L 的结果为容重测定值。运用 Perten DA7200 型近红外谷物分析仪获得玉米子粒营养品质性状—水分含量、蛋白质含量、脂肪含量、淀粉含量和赖氨酸含量。

## 1.3 表型数据分析

运用 SPSS 19.0 对不同环境及基因型的子粒容重进行方差分析;对子粒容重和各营养性状进行描述性统计分析,并对不符合正态分布的性状进行正态化处理;对容重与水分含量、蛋白质含量、脂肪含量、淀粉含量、赖氨酸含量的 Person 相关关系及通径关系进行分析;依据运用相同群体获得的分群结果对不同杂种优势群的容重进行多重比较。

# 2 结果与分析

## 2.1 容重的方差分析、K-S 检验及遗传力

对试验群体的子粒容重进行方差分析(表 2)结果显示,在不同年份、不同自交系和年份与自交系互作情况下,子粒容重在 0.01 显著性水平时存在差异,

差异达到极显著水平;在不同重复下,子粒容重不存在显著性差异。通过对 2 年的表型数据进行分析获得容重的广义遗传力为 59.89%。对玉米子粒容重进行单样本 K-S 检验,其 P 值大于 0.05,由此可见子粒容重服从正态分布。

表 2 玉米子粒容重的方差分析结果

Table 2 Analysis of variance for kernel test weight of corn

变异来源 Source of variation	均方 Mean square	F 值 F value	P 值 P value
自交系 Lines	3405.258	3.340	0
年份 Year	10891.233	11.919	0.001
重复 Repeat	85.624	2.386	0.469
自交系 × 年份 Lines × Year	946.544	28.721	0
自交系 × 重复 Lines × Repeat	37.633	1.142	0.259
年份 × 重复 Year × Repeat	31.909	0.968	0.328

## 2.2 容重表型描述统计分析

对试验群体的子粒容重进行描述性统计分析(表 3)可知,除赖氨酸峰度大于 1 外,其他 5 个性状的偏度和峰度均值均小于 1,符合正态分布。因此,对赖氨酸含量数据进行平方根变换,使其符合正态分布,数据转变后其偏度和峰度分别为 0.43 和 0.94。对于容重和各营养性状而言,变异范围最广的为水分含量,其变异范围为 4.24% ~ 13.61%,变异系数为 18.29%;另外,脂肪含量和蛋白质含量的变异系数居中,分别为 12.33% 和 9.73%;变异系数最小的性状为淀粉含量,其值为 3.09%。国家玉米新标准中(GB 1353—2009)<sup>[22]</sup> 玉米的标准容重为 660 ~ 735 g/L,在本试验中,容重大于 735 g/L 的比例为 22.45%,最大值达到 792.50 g/L;容重小于 660 g/L 的比例为 10.88%,最小值为 621.83 g/L。

表 3 子粒容重的描述性统计分析

Table 3 Description statistical analysis of kernel test weight

性状 Trait	均值 Average	标准差 SD	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	极小值 Minus value	极大值 Max value	变异系数 CV(%)
容重(g/L) Test weight	712.74	33.35	-0.45	0.02	621.83	792.50	4.68
水分(%) Moisture	8.33	1.52	0.28	0.49	4.24	13.61	18.29
蛋白质(%) Protein	11.52	1.12	0.28	-0.28	8.95	15.07	9.73
脂肪(%) Fat	4.36	0.54	0.23	0.79	2.79	6.01	12.33
淀粉(%) Starch	69.28	2.14	-0.46	0.80	61.03	74.37	3.09
赖氨酸(%) Lys	0.26	0.01	0.43	0.94	0.23	0.32	5.55

2.3 容重与各营养品质的相关性分析

对子粒容重与营养品质进行简单相关性分析(表4)所示,子粒容重与5个营养品质性状以及5个营养性状彼此之间都具有极显著或显著性相关关

系。其中,子粒容重与脂肪含量呈极显著正相关关系,与水分含量和赖氨酸含量呈极显著负相关关系,与淀粉含量呈显著性正相关关系,与蛋白质含量呈显著负相关关系。

表4 玉米子粒容重与子粒营养品质简单相关关系

Table 4 Pearson correlations between kernel test weight and quality traits of nutrition concentration

性状 Trait	容重 Test weight	水分 Moisture	蛋白质 Protein	脂肪 Fat	淀粉 Starch	赖氨酸 Lys
容重 Test weight	1					
水分 Moisture	-0.378 **	1				
蛋白质 Protein	-0.150 *	-0.174 *	1			
脂肪 Fat	0.237 **	-0.340 **	0.217 **	1		
淀粉 Starch	0.138 *	0.199 **	-0.754 **	-0.529 **	1	
赖氨酸 Lys	-0.385 **	0.425 **	0.139 **	0.209 **	-0.700 **	1

\* :显著相关性, $P = 0.05$ ; \*\* :极显著相关性, $P = 0.01$   
\* :significant correlation, $P = 0.05$ ; \*\* :highly significant correlation, $P = 0.01$

2.4 容重与各营养品质之间的通径分析

对试验群体的子粒容重与各营养品质含量进行通径分析(表5)所示。脂肪含量和淀粉含量对容重起正向直接效应,直接通径系数分别为0.2821和0.1289。脂肪含量通过其他性状对容重的间接效应有正向也有负向,但正、负效应接近持平状态。淀粉

含量通过其他性状对容重的间接效应为负,因此,使淀粉含量的总效应有所降低。水分含量、蛋白质含量和赖氨酸含量对容重起负向直接效应,通径系数分别为-0.3376、-0.0558和-0.1825。并且,水分含量、蛋白质含量、赖氨酸含量通过其他性状对容重的间接效应总体为负向。

表5 子粒营养品质与子粒容重之间的通径关系

Table 5 Path analyses between test weight and quality traits of nutrition concentration

性状 Trait	直接效应 Direct effect	间接效应 Indirect effect				
		水分 Moisture	蛋白 Protein	脂肪 Fat	淀粉 Starch	赖氨酸 Lys
水分 Moisture	-0.3376		0.0089	-0.0937	0.0274	-0.0482
蛋白质 Protein	-0.0558	0.0540		0.0751	-0.1045	-0.0724
脂肪 Fat	0.2821	0.1121	-0.0149		-0.0664	-0.0257
淀粉 Starch	0.1289	-0.0718	0.0453	-0.1453		0.1246
赖氨酸 Lys	-0.1825	-0.0892	-0.0221	0.0398	-0.0880	

2.5 不同杂种优势群容重的多重比较

Y. Liu等<sup>[23]</sup>应用多种类群划分方法,将本试验所用群体进行了类群划分,本群体被划分为5个杂种优势群和1个混合群,依据其划分结果,对不同类群子粒容重进行了多重比较(表6)。由表6可知,P群子粒容重整体偏高,其次依次是混合群、旅大红骨、唐四平头、瑞德和兰卡斯特。然而,P群、混合群、旅大红骨、唐四平头和瑞德彼此之间在0.05显著性水平上差异均不显著;P群、混合群、旅大红骨和唐四平头4个杂种优势群与兰卡斯特的子粒容重在0.05水平上的差异有统计学意义;瑞德和兰卡斯特的子粒容重差异不具有显著性。以容重720 g/L

为分割点<sup>[22]</sup>,对整个群体和各类群中容重大于720 g/L的自交系数所占比例进行统计,最终得到如下结果:整个群体中子粒容重大于720 g/L的比例为46.62%。P群、旅大红骨、唐四平头、瑞德和兰卡斯特5个类群中容重大于720 g/L的比例依次为62.50%、58.33%、53.85%、45.65%和35.90%。各个类群中容重大于720 g/L的部分自交系名称见表7,其中,瑞德群中包含PH6WC、W499、W222、掖8112等,兰卡斯特中包含W64a、P167、吉63等,P群中包含黄昌b、R136、陕89等,旅大红骨中包含Lo415、B100等,唐四平头中包含黄昌a、D33A、浚926等。

表 6 不同杂种优势群子粒容重多重比较

Table 6 Analysis of variance of the average kernel test weight in different heterotic groups

杂种优势群	均值	差异显著性
Heterosis groups	Average	0. 05
P 群 P group	721. 77	a
混合群 Mix group	720. 86	a
旅大红骨 LRC	720. 42	a
唐四平头 Tang SPT	714. 86	a
瑞德 Reid	712. 00	ab
兰卡斯特 Lancaster	695. 08	b

数据后不同字母表示在 0. 05 水平差异显著

Different letters in the last column represent significantly difference at  $P=0. 05$

表 7 不同杂种优势群中子粒容重大于 720 g/L 的自交系

Table 7 Lines with kernel test weight higher than 720 g/L in different heterotic groups

杂种优势群	自交系
Heterosis groups	Lines
瑞德 Reid	掖 832、W222、掖 8112、PH6WC、W499、98F1、ys06、7922、Los-6、AHU23、DF24、Lo5-6、沿 812、2369、AHU12、1205A、W172
兰卡斯特 Lancaster	W64a、P167、吉 63、KP3130、B97、MDF-13D、6103、Z31B、1B014、WIL900、DM101B、DM07
P 群 P group	D1139、黄昌 b、R136、陕 89、619、M131-5、P25、陈 322、68122、宋 1145、18-599、E600、XF27、AHU17、豫 87-1
旅大红骨 LRC	丹 9046、AHU21、XF223、AHU22、Lo415、B100、Pa91、掖 52106、R1656、E200、R98、SC14、H004-2(穗大)
唐四平头 Tang SPT	黄昌 a、D33A、浚 926、A801、926、AHU1、R548

### 3 讨论

玉米子粒容重是受多基因控制的数量性状,在影响容重的众多因素中,不同基因型玉米的特定子粒遗传特性是影响容重的根本因素。在本试验中,不同自交系的玉米子粒容重差异达到了极显著的水平,国外的研究也证明了燕麦<sup>[24]</sup>的容重皆是由基因型控制。并且,赵延明等<sup>[25]</sup>进一步对玉米子粒容重不同遗传效应进行了分析研究,结果表明胚乳遗传效应和胚的遗传效应均控制子粒容重的遗传表达,其中胚乳遗传效应占主要地位。鉴于玉米子粒容重的遗传特性,在高容重玉米杂交种的培育过程中,选择子粒容重较高的自交系是一种行之有效的手段。

容重是国际玉米质量等级的定等标准,是直接衡量玉米子粒商品品质的指标,子粒的水分含量是

玉米子粒仓储难易的直接影响因素,子粒的蛋白质含量、脂肪含量、淀粉含量和赖氨酸含量等营养品质性状是与生活最紧密相连的性状,因此,探究容重与此 5 个性状之间的关系至关重要。本试验结果表明,子粒容重与子粒淀粉含量呈显著正相关关系,这与张丽等<sup>[13]</sup>、C. L. Weller 等<sup>[14]</sup>和 S. R. Fox 等<sup>[15]</sup>的研究结果一致,与 C. Dorsey-Redding 等<sup>[16]</sup>的研究结果相反,产生不同结果可能与所选试验材料和环境及栽培条件控制有关。赵延明等<sup>[25]</sup>的研究结果显示子粒容重的遗传主要受胚乳遗传的影响,并且,在禾谷类作物的胚乳中,淀粉含量占 90% 左右。亦有研究指出,不同类型玉米的子粒容重排序为爆裂型>硬粒型>马齿型<sup>[13]</sup>,容重与淀粉角质率呈极显著正相关,爆裂型玉米的角质率为 100%,硬粒型玉米的角质率大于马齿型玉米<sup>[26]</sup>,由此,也可推测子粒容重与子粒淀粉之间的紧密关系。在本试验中,子粒容重与蛋白质含量呈极显著负相关关系,这与郭淑春<sup>[12]</sup>的研究结果相反。造成这种差异的原因可能与子粒内蛋白质积累的时期有关。有研究表明,在子粒灌浆的前期,过高的蛋白质含量会影响淀粉的积累,而成熟期蛋白质含量对淀粉积累影响不大<sup>[27]</sup>。因此,若灌浆前期蛋白质大量合成,淀粉的积累受到影响,导致胚乳不够充实饱满,从而降低了子粒的容重;若蛋白质大量合成的时期在成熟期,淀粉的积累基本完成,则蛋白质的积累会填充胚乳空隙使容重升高。在对高容重玉米自交系进行选择时,应选择淀粉含量较高,并且蛋白质在灌浆前期积累较慢,后期积累较快的自交系,从而获得容重较高且蛋白质含量也较高的品种。

在子粒的营养物质形成过程中,淀粉、蛋白质、脂肪和赖氨酸存在竞争关系,并且,水分是参与营养物质形成不可缺少的成分,五者之间相互影响。本试验中,5 个子粒的内含物之间均存在显著或极显著的正相关或负相关关系,而且通径分析也表明子粒营养品质性状可以通过其他的任意一个性状对容重产生或大或小的影响。刘开昌等<sup>[28]</sup>的研究结果表明,对同一材料来说,淀粉与油分或蛋白质不能同步提高,但油分与蛋白质可以同步提高,并可能会降低淀粉含量。本试验中,通径分析结果表明,脂肪含量和淀粉含量对容重的直接效应均为正向,且淀粉含量通过蛋白质和赖氨酸的间接效应也为正,这也说明选择淀粉含量较高,且平衡好其与蛋白质含量、赖氨酸含量的关系,可获得品质优良的自交系。

玉米子粒的营养成分是子粒形成的物质基础,其

与子粒容重具有紧密的内在联系毋庸置疑。但本研究结果中营养品质含量虽对子粒容重有或大或小的影响,但其决定系数并不显著。这可能与子粒的其他性状的影响有关,如淀粉粒的排列紧密程度、子粒大小、子粒形状等。研究结果表明,玉米子粒的容重和玉米子粒的硬度呈显著正相关<sup>[29]</sup>。并且,玉米子粒的淀粉粒结构和淀粉粒排列紧密程度对硬度具有显著的影响<sup>[30]</sup>,因此,淀粉粒的排列状态在很大程度上影响着玉米子粒的容重。子粒的盛装效率是影响子粒容重的又一关键因素,而适当的子粒大小和较圆滑的子粒形状可以使内部空间得到较好的利用,进而提高盛装效率。因此,在进行高容重玉米育种时,除了考虑子粒的营养成分含量外,还应选择淀粉粒排列紧密、大小适中且外部轮廓较为平滑的玉米自交系作为组配对象。

对不同杂种优势群的容重进行差异性分析,P群、旅大红骨和唐四平头群与兰卡斯特在 0.05 显著性水平上差异有统计学意义,子粒容重的平均值由大到小依次为 P 群、旅大红骨、唐四平头、瑞德和兰卡斯特。张冬梅等<sup>[31]</sup>利用同样的自然群体对不同杂种优势群的灌浆速率进行了分析,只有兰卡斯特、唐四平头群与瑞德、P 群、旅大红骨群间在 0.05 显著性水平上差异有统计学意义,灌浆速率的平均值由大到小依次为唐四平头群、兰卡斯特、旅大红骨、瑞德和 P 群,由此可见,在不同杂种优势群中,灌浆速率的快慢并不能决定子粒容重的大小。

本研究探究了我国主要玉米种质资源中子粒容重和营养品质的关系,并对各杂种优势群内的容重和品质优良的玉米自交系进行了鉴定和筛选,以期减少育种盲目性,提高育种效率,并为组配出品质优良的强优势杂交种提供借鉴。

#### 参考文献

- [1] 高春霞. 玉米容重检测方法的初步探讨[J]. 浙江农业科学, 2001(5):44-45
- [2] 雍洪军,李明顺,张德贵,等. 8 个合成群体改良玉米杂交种郑单 958 的育种潜力分析[J]. 遗传, 2013, 35(8):1007-1013
- [3] Hsu L W, Sell G L. Nutritional Value for growing turkeys o corn of light test weight[J]. Poultry Sci, 1995, 74(10):1703-1707
- [4] Johansson E, Prietolinde M L, Gissen C. Influences of weather, cultivar and fertilizer rate on grain protein polymer accumulation in field-grown winter wheat, and relations to grain water content and falling number[J]. J Sci Food Agric, 2008, 88(11):2011-2018
- [5] Lee B H, Kenkelb P, Brorsen B W. Pre-harvest forecasting of county wheat yield and wheat quality using weather information [J]. Agr Forest Meteorol, 168(2013):26-35
- [6] Lauer J. Corn hybrid and planting date influence rate of kernel dry down[J]. Field Crops, 1999, 28:47-52
- [7] Patil R M, Patil S A, Tamhankar M D. Durum wheat quality in Mediterranean environments I. Quality expression under different zones, latitude sand water regimes across Spain[J]. Field Crop , 2003, 80:123-131
- [8] 李建奇. 不同类型品种对春玉米产量、品质的影响[J]. 种子, 2006, 25(12):58-60
- [9] Patil R M, Tamhankar S A, Oak M D. Mapping of QTL for agroeconomic traits and kernel characters in durum wheat (*Triticum durum* Desf) [J]. Euphytica , 2013, 190:117-129
- [10] Massimo B, Mattia C, Alessandro P, et al. Determination of maize kernel hardness: comparison of different laboratory tests to predict dry-milling performance[J]. J Sci Food Agric, 2010, 90(11):1870-1878
- [11] Chiremba C, Rooney L W, Taylor J R N. Relationships between simple grain quality parameters for the estimation of sorghum and maize hardness in commercial hybrid cultivars[J]. Cereal Chem, 2011, 88(6):570-575
- [12] 郭淑春, 吴月红, 钱丽燕. 用容重评定玉米质量方法的研究[J]. 粮食储藏, 1996(5):33-34
- [13] 张丽, 董树亭, 刘存辉. 玉米子粒容重与产量和品质的相关分析[J]. 中国农业科学, 2007, 40(2):405-411
- [14] Weller C L, Paulsen M R, Steinberg M P. Correlation of starch recovery with assorted quality factor of four corn hybrid[J]. Cereal Chem, 1988, 65:392-397
- [15] Fox S R, Johnson L A, Hurburgh C R, et al. Relations of grain proximate composition and physical properties to wet-milling characteristics of maize[J]. Cereal Chem, 1992, 69:191-197
- [16] Dorsey-Redding C, Hurburgh C R, Johnson L A, et al. Relationships among maize quality factors [J]. Cereal Chem, 1991, 68(6):602-605
- [17] Rumbaugh M D. Test weight and maturity of corn[J]. Agron J, 1959, 51:307
- [18] Ding J Q, Ma J L, Zhang C R, et al. QTL mapping for test weight by using F<sub>2,3</sub> population in maize [J]. J Genet, 2011, 90(1):75-80
- [19] Marsan P A, Gorni C, Chittò A, et al. Identification of QTLs for grain yield and grain-related traits of maize (*Zea mays* L.) using an AFLP map, different testers, and cofactor analysis [J]. Theor Appl Genet, 2001, 102:230-243
- [20] Ajmone-Marsan P, Monfredini G, Ludwig W F, et al. In an elite cross of maize a major quantitative trait locus controls one-fourth of the genetic variation for grain yield [J]. Theor Appl Genet, 1995, 90:415-424
- [21] 姚文华, 谭静, 陈洪梅. 玉米杂种优势类群的研究进展[J]. 玉米科学, 2006, 14(5):30-34
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 1353—2009, 玉米容重的测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009
- [23] Liu Y, Guo J J, Zhang D M, et al. Genetic diversity and linkage disequilibrium estimation among the maize breeding germplasm for association mapping[J]. Int J Agric Biol, 2014, 16(5):851-861
- [24] Pixey K V, Frey K J. Combining ability for test weight and agroeconomic traits of oat [J]. Crop Science, 1991, 31:1448-1451
- [25] 赵延明, 姜敏. 玉米容重的遗传分析[J]. 玉米科学, 2004, 12(3):40-42
- [26] 张海艳, 董树亭, 高荣岐. 玉米子粒品质性状及其相互关系分析[J]. 中国粮油学报, 2005, 20(6):19-24
- [27] 张军杰. 玉米自交系淀粉合成及其关键酶活性变化与玉米 sbe 的克隆与表达[D]. 雅安: 四川农业大学, 2007
- [28] 刘开昌, 胡昌浩, 董树亭, 等. 高油、高淀粉玉米子粒主要品质成分积累及其生理生化特性[J]. 作物学报, 2002, 28(4):492-498
- [29] Lee K M, Herrman T J, Lingenfelser J, et al. Classification and prediction of maize hardness-associated properties using multivariate statistical analyses[J]. J Cereal Sci, 2005, 41:85-93
- [30] Gaytán-Martínez M, Figueroa-Cárdenas J D, Reyes-Vega M L, et al. Microstructure of starch granules related to kernel hardness in corn[J]. Rev Fitotec Mex, 2006, 29:135-139
- [31] 张冬梅, 刘 洋, 赵永锋, 等. 不同杂种优势群玉米子粒灌浆速率分析[J]. 中国农业科学, 2014, 47(17):3323-3335