

玉米杂交当代籽粒含水率遗传效应研究

陈明¹ 陈琛¹ 刘晨旭¹ 李伟¹ 李金龙¹ 焦炎炎¹ 张焱^{1,2}
程德荷¹ 刘文欣¹ 陈绍江^{1*}

(1. 中国农业大学 农学院/国家玉米改良中心,北京 100193;

2. 四川省农业科学院 水稻高粱研究所,四川 德阳 618000)

摘要 为研究不同父本自交系对杂交当代籽粒含水率的影响,以籽粒脱水速率较慢的5个杂交种和5个自交系为母本,以脱水性能较好的5个早熟自交系为父本,10个母本分别人工授粉进行自交及与父本杂交,并对授粉后52天(DAP,d)的杂交当代籽粒及所有亲本材料的自交籽粒含水率进行了测试分析。结果表明:在早熟自交系授粉后,母本杂交授粉当代的籽粒含水率均值下降3.04个百分点,单粒干重比自交增加5.63%;母本自交系籽粒含水率均值下降2.85个百分点,单粒干重增加7.18%;当代杂交籽粒的含水率与父本呈正相关,表明玉米籽粒脱水性能具有父本效应,早熟父本可降低杂交当代籽粒的含水率。本研究可为玉米种质脱水性能的改良和选育快速脱水适宜机收的玉米品种提供参考。

关键词 玉米;籽粒;含水率;核磁共振;遗传效应

中图分类号 S512.1;S311

文章编号 1007-4333(2021)10-0001-07

文献标志码 A

Current generation genetic effect of the kernel moisture content in maize

CHEN Ming¹, CHEN Chen¹, LIU Chenxu¹, LI Wei¹, LI Jinlong¹, JIAO Yanyan¹, ZHANG Yao^{1,2},
CHENG Dehe¹, LIU Wenxin¹, CHEN Shaojiang^{1*}

(1. College of Agronomy and Biotechnology/National Maize Improvement Center, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Rice and Sorghum Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Deyang 618000, China)

Abstract To study the paternal effect of maize kernel moisture, five hybrids and five inbred lines with low dehydration rate were used as female parents, and five early-maturing inbred lines with good dehydration performance were used as male parents. Pollinations were made between male and female parents, meanwhile, control groups were obtained by self-pollinating of parental lines. Kernels derived from both crossing- and selfing-pollination was sampled at 52 days after pollination (DAP, d), and then used for single-kernel moisture quantification. The result showed that the moisture of kernels derived from hybrids × early-maturing male parents decreased by 3.04 percentage point, and was accompanied by 5.63% increase in single-kernel weight compared with the selfing kernels of female hybrids; Similarly, the moisture of kernels derived from inbred lines × early-maturing male parents was reduced by 2.85 percentage point, and was accompanied by 7.18% increase in single-kernel weight compared with the selfing kernels of female inbred lines. In conclusion, strong positive correlation of moisture exists between crossed kernels and selfing kernels of male parents, and early-maturing male parents could reduce moisture of kernels when pollinating to female parents with low dehydration rate. This research provides a reference to develop methods and germplasms suitable for kernel mechanized harvesting of maize.

Keywords maize; kernel; moisture; nuclear magnetic resonance; genetic effect

收稿日期: 2021-04-01

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0101201);国家玉米产业技术体系项目(CARS-02-04)

第一作者: 陈明,博士研究生,E-mail: acm2638@163.com

通讯作者: 陈绍江,教授,主要从事玉米育种原理与方法研究,E-mail: shaoj@cau.edu.cn

收获期玉米籽粒含水率偏高是影响中国玉米机械化收获的重要因素之一,籽粒含水率18%~23%时机械粒收为最佳^[1]。玉米品种生育期、生理成熟期籽粒含水率及生理成熟后籽粒脱水速率对收获时籽粒含水率具有重要影响^[2-4]。生理成熟期较早的种质籽粒脱水速率较快,其生理成熟后可脱水周期也较长^[5]。收获时的籽粒含水率过高,会导致机械收获过程籽粒破碎率和后期霉烂比例升高^[6],商品玉米品质下降。因而选育适当早熟、生理成熟期籽粒含水率低、生理成熟后脱水速率快的品种是实现玉米机械化粒收的关键^[7]。已有研究表明,籽粒的含水率或脱水速率是受遗传控制的,其程度通常使用广义遗传力表示,即单个性状的遗传变异占表型总变异的比例^[8]。玉米籽粒生理成熟后籽粒脱水速率相关性状的广义遗传力为0.75和0.82^[9-10]。鉴于籽粒含水率在机收环节中的重要性,在籽粒脱水的遗传基础研究方面有较大进展,已定位了相关QTL位点^[11-15],并克隆了候选基因。此外,基于全基因组选择的玉米籽粒脱水速率研究也有较大进展,在丰富的群体遗传背景下,定位了更多的籽粒脱水相关QTL位点^[16-19]。

玉米籽粒脱水速率的研究多集中在含水率测试方法研究及相关基因的定位克隆等方面,关于杂交当代籽粒生理成熟时含水率与父本是否有直接关系的研究较少。因此,本研究拟以不同生育期的父本和母本及其杂交当代籽粒为研究对象,利用核磁共振快速测定籽粒含水率,探究父本对杂交当代籽粒含水率的影响以及早熟种质为父本的杂交组合籽粒当代遗传效应,分析杂交当代籽粒含水率的变化规律及其在宜机收种质遗传改良上的应用价值,以期为玉米种质脱水性能的改良和选育快速脱水适宜机收的玉米品种提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

母本材料选用成熟期含水率较高的中晚熟杂交种和自交系各5个,杂交种包括郑单958(ZD958)、浚单20(XD20)、中农大678(ND678)、中农大616(ND616)和中农大高油5580(ND5580);自交系包括B73、郑58(Z58)、昌7-2(C7-2)、Mo17、丹598(D598)。上述材料适宜活动积温2800℃以上的区域。杂交种播种到吐丝时间55~60d,自交系播种到吐丝的时间60~65d。

父本材料选用生育期较短、成熟期籽粒含水率低的早熟自交系材料5个,分别为C898、EH1892、UH306、CC13、CC15。早熟自交系从播种到吐丝的时间为45d~50d。

1.2 试验方法

2018年冬,将上述材料种植于中国农业大学三亚试验站。种植密度为4500株/667m²,播种顺序依次为中晚熟杂交种、中晚熟自交系、早熟自交系。同一熟期内按株高由高到低的顺序排列,每个材料播种6行。所有母本材料同期播种,早熟父本分别在母本播种后的第5、第10、第15天播种,每期播种2行,确保父母本花期相遇。吐丝前对母本雌穗严格套袋。待花丝出齐后严格自交作为对照,并同日分别取用5个早熟父本的花粉进行杂交。考虑父本和母本材料在生育期上的差异,在授粉后第52天选取结实良好、发育均匀的自交和杂交果穗各3个。上述果穗分别标记后用自封袋密封置于冰盒,带回实验室测定籽粒含水率。选取果穗中部30粒并分别编号,使用天平和核磁共振单粒含水率测定系统分别对单个籽粒的鲜重和含水率进行测定^[28],而后将籽粒置于鼓风干燥箱(130℃)烘干至恒重,再次称重获得籽粒干重。

试验设备包括低场核磁共振仪(NMI20-015V-I;磁体类型:永磁体,磁场强度:(0.5±0.08)T,磁体温度:32℃,射频脉冲频率:21.3MHz,上海纽迈电子科技有限公司)、电子天平(型号:FA1004,测量范围0.01g~100g,测量精度:0.1mg,上海舜宇恒科学仪器有限公司)、电热鼓风干燥箱(型号:DHG-9030A,上海一恒科学仪器有限公司)、冰箱、塑料托盘、100深孔盒、玻璃试管、铁筛。

1.3 数据处理

本研究对10个母本材料、5个父本材料各90个自交籽粒,50个杂交组合各90个籽粒,合计5850个籽粒的核磁测水数据、单粒鲜重数据和烘干验证数据的统计分析。

当代遗传效应估计,根据丛滋金^[29]的计算方法:

$$F_0 = mP_1 + (1 - m)P_2$$

采用最小二乘估计,可知 m 的计算公式为:

$$m = \frac{\sum(F_0 - P_2)(P_1 - P_2)}{\sum(P_1 - P_2)^2}$$

式中: P_1 和 P_2 分别为母本和父本的含水率; F_0 为

杂交当代的含水率; m 为母本效应; $1-m$ 为父本效应。

2 结果与分析

2.1 亲本材料的籽粒含水率

早熟父本的籽粒平均值为 $23.06\% \pm 0.70\%$, 变异范围为 $24.91\% \sim 21.55\%$ 。杂交种自交籽粒的含水率平均值为 40.98% , 变异范围为 $42.58\% \sim$

39.25% (表 1), 杂交种材料使用早熟父本授粉后得到的籽粒含水率均有所降低, 平均值为 $(37.66\% \pm 1.57\%) \sim (38.05\% \pm 1.75\%)$ 。自交系自交的籽粒含水率平均值为 39.52% , 变异范围为 $42.30\% \sim 36.19\%$ (表 2)。中晚熟杂交种自交籽粒平均含水率比早熟父本高 17.92 个百分点, 中晚熟自交系自交籽粒的平均含水率比早熟父本高 16.46 个百分点。

表 1 杂交种自交及杂交当代籽粒含水率

Table 1 Moisture content of selfing and crossing kernels of hybrids

母本 Female	自交 Selfing	父本 Male					平均 Mean
		C898	EH1892	UH306	CC13	CC15	
自交 Selfing		21.55 ± 1.14	24.91 ± 0.84	22.54 ± 0.51	23.09 ± 0.52	23.21 ± 0.47	23.06 ± 0.70
ZD958	42.58 ± 1.24	$37.74 \pm 1.32^*$	$36.06 \pm 1.68^*$	$38.59 \pm 1.66^*$	$39.30 \pm 1.24^*$	$37.80 \pm 1.69^*$	37.90 ± 1.52
XD20	39.25 ± 1.32	$36.43 \pm 1.38^*$	$38.04 \pm 2.28^*$	$38.34 \pm 2.00^*$	$36.33 \pm 1.60^*$	$35.27 \pm 1.18^*$	36.88 ± 1.69
ND678	39.37 ± 1.98	$36.74 \pm 1.60^*$	$37.61 \pm 1.71^*$	$36.29 \pm 1.67^*$	$36.00 \pm 1.69^*$	$37.58 \pm 1.51^*$	36.84 ± 1.64
ND616	42.16 ± 2.05	$40.12 \pm 1.59^*$	$39.09 \pm 1.48^*$	$38.33 \pm 1.81^*$	$39.69 \pm 1.63^*$	$39.21 \pm 1.60^*$	39.29 ± 1.62
ND5580	41.56 ± 1.75	$37.28 \pm 1.94^*$	$39.44 \pm 1.61^*$	$38.79 \pm 1.92^*$	$38.61 \pm 1.73^*$	$39.76 \pm 1.56^*$	38.78 ± 1.75
平均 Mean	40.98 ± 1.67	37.66 ± 1.57	38.05 ± 1.75	38.07 ± 1.81	37.99 ± 1.58	37.92 ± 1.51	37.94 ± 1.64

注: 表中数据为含水率均值 \pm SD。* 表示杂交当代籽粒含水率与对应母本自交籽粒含水率之间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: Data shown are mean \pm SD. * signifies significant difference ($P < 0.05$) between crossing kernels and corresponding selfing kernels of female parent. The same bellow.

表 2 杂交种自交及杂交当代单粒干重

Table 2 Dry weight of selfing and crossing kernels of hybrids

母本 Female	自交 Selfing	父本 Male					平均 Mean
		C898	EH1892	UH306	CC13	CC15	
自交 Selfing		0.18	0.21	0.23	0.21	0.21	0.21
ZD958	0.34	0.36	0.36	0.31	0.35	0.35	0.35
XD20	0.30	0.32	0.31	0.34	0.32	0.33	0.32
ND678	0.35	0.37	0.36	0.36	0.37	0.35	0.36
ND616	0.34	0.37	0.37	0.36	0.37	0.35	0.36
ND5580	0.25	0.28	0.28	0.29	0.26	0.26	0.27
平均 Mean	0.32	0.34	0.34	0.33	0.33	0.33	0.33

2.2 杂交种杂交当代籽粒含水率及单粒干重

杂交种接受早熟自交系授粉后的籽粒含水率均值为 $37.94\% \pm 1.64\%$, 较自交对照籽粒含水率均

值下降 3.04 个百分点(表 1)。其中: ZD958 含水率为 $37.90\% \pm 1.52\%$, 较对照降幅达 4.68 个百分点; XD20 的含水率为 $36.88\% \pm 1.69\%$, 较对照降

幅为 2.37 个百分点;其他组合平均含水率降幅为 2.37~4.68 个百分点。不同早熟父本授粉杂交种后的籽粒含水率均值存在差异:以 C898 为父本得到的籽粒平均含水率最低,为 37.66%±1.57%;以 UH306 为父本所得籽粒平均含水率最高,为 38.07%±1.81%。不同早熟父本授粉后,同一母本杂交种的当代籽粒含水率均值存在显著差异,将不同组合比较发现:ZD958×EH1892 当代籽粒含水率降低幅度最大,平均值为 36.06%±1.68%,较自交籽粒降幅达 6.52 个百分点;XD20×UH306 当代籽粒含水率降幅最小,平均值为 38.34%±2.00%,较自交籽粒降幅为 0.91 个百分点;其余组合降幅为 0.91~6.52 个百分点。说明早熟父本可以提高中晚熟材料当代籽粒脱水速度,具有较为普遍的当代遗传效应。

在单粒干重方面,杂交籽粒较其自交对照籽粒有所增加(表 2)。自交单粒干重最高为 0.35 g、最低为 0.25 g,平均单粒干重为 0.32 g,早熟父本杂交籽粒的单粒干重最高为 0.37 g、最低为 0.26 g、平均值为 0.33 g,较自交籽粒平均干重增加 0.01 g,增幅为 5.63%,可见单粒干重有超父本优势,具有一定的当代遗传效应。

2.3 自交系杂交当代籽粒的含水率及单粒干重

自交系接受早熟父本授粉的籽粒含水率均值为 36.67%±1.11%,较自交系自交籽粒含水率均值下

降 2.85 个百分点(表 3)。早熟父本与代表性母本自交系 B73 和 Mo17 杂交当代籽粒的含水率分别为 37.98%±1.28%和 36.88%±1.05%,较自交籽粒分别降低 4.32 个百分点和 1.89 个百分点;其它材料降幅为 1.89~4.32 个百分点。不同早熟父本授粉自交系后的籽粒含水率均值存在差异:以 C898 为父本得到的籽粒平均含水率最低,为 35.87%±1.12%;以 CC15 为父本得到的籽粒平均含水率最高,为 37.17%±0.76%。不同早熟父本授粉后,同一母本自交系的当代籽粒含水率均值存在显著差异,不同组合比较,B73×CC13 当代籽粒含水率降低幅度最大,平均值为 37.56%±1.33%,较自交籽粒降幅达 4.74 个百分点;D598×CC13 当代籽粒含水率降幅最小,平均值为 40.43%±0.74%,较自交籽粒降幅为 0.55 个百分点;其余组合降幅为 0.55~4.74 个百分点。亦说明早熟父本可以加快中晚熟材料当代籽粒脱水速度,具有较为普遍的当代遗传效应。

在早熟父本与自交系的杂交组合中,当代籽粒含水率降幅最大为 B73×CC13,下降 4.74 个百分点;Mo17×CC13 降幅最小,为 1.21 个百分点。其余组合的籽粒含水率降幅为 1.21~4.74 个百分点。说明早熟父本授粉自交系后,能够显著降低籽粒的含水率,亦表明籽粒含水率和脱水速度受父本影响,表现较强的当代遗传效应。

表 3 自交系自交及杂交当代籽粒含水率

Table 3 Moisture of selfing and crossing kernels of inbred lines

%

母本 Female	自交 Selfing	父本 Male					平均 Mean
		C898	EH1892	UH306	CC13	CC15	
自交 Selfing		21.55±1.14	24.91±0.84	22.54±0.51	23.09±0.52	23.21±0.47	23.06±0.70
B73	42.30±1.11	37.69±1.61 *	38.70±1.61 *	37.69±1.12 *	37.56±1.33 *	38.24±0.75 *	37.98±1.28
Z58	39.36±0.81	36.51±1.07 *	35.32±1.93 *	36.41±1.47 *	36.20±1.51 *	37.55±1.11 *	36.40±1.42
C7-2	36.19±0.68	32.30±0.86 *	34.59±1.52 *	33.44±0.83 *	33.53±0.95 *	33.34±0.46 *	33.44±0.92
Mo17	38.77±1.50	35.46±0.80 *	37.31±1.34 *	36.76±0.96 *	37.56±1.47 *	37.30±0.67 *	36.88±1.05
D598	40.98±1.11	37.37±1.25 *	39.50±0.84 *	36.60±0.71 *	40.43±0.74 *	39.42±0.79 *	38.66±0.87
平均 Mean	39.52±1.04	35.87±1.12	37.08±1.45	36.18±1.02	37.06±1.20	37.17±0.76	36.67±1.11

自交系当代杂交籽粒较其自交对照增加(表 4),自交系的单粒干重最高为 0.30 g、最低为 0.15 g,平均单粒干重为 0.23 g;早熟父本授粉后单粒干重最

高为 0.32 g,最低为 0.16 g,平均值为 0.25 g,较对照增加 0.02 g,增幅为 7.18%,亦表明单粒干重有超母本优势,具有一定的当代遗传效应。

表 4 自交系自交及杂交当代单粒干重

Table 4 Dry weight of selfing and crossing kernels of inbred lines

母本 Female	自交 Selfing	父本 Male					平均 Mean
		C898	EH1892	UH306	CC13	CC15	
自交 selfing		0.18	0.21	0.23	0.21	0.21	0.21
B73	0.15	0.16	0.17	0.16	0.18	0.17	0.17
Z58	0.30	0.32	0.31	0.31	0.32	0.32	0.32
C7-2	0.24	0.26	0.27	0.27	0.26	0.25	0.26
Mo17	0.25	0.27	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
D598	0.23	0.25	0.26	0.24	0.24	0.24	0.25
平均 Mean	0.23	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25

2.4 玉米籽粒含水率的当代遗传效应

对父本在杂交当代籽粒含水率遗传效应分析结果见表 5。以杂交种为母本时,杂交当代籽粒含水率的父本效应平均值为 0.172, UH306 的当代遗传效应平均值最低,为 0.161; EH1892 的当代遗传效应最高,为 0.189。以自交系为母本时,杂交当代籽粒含水率的父本效应平均值为 0.173, C898 的当代遗传效应最大,效应值为 0.202; CC15 的当代遗传

效应最小,为 0.144。比较自交系与杂交种 2 种母本类型的当代遗传效应发现,早熟父本在不同母本类型上的效应存在一定差异, EH1892 在杂交种上表现出的当代遗传效应最高,但其在自交系上较低,为 0.168。UH306 授粉杂交种得到的籽粒含水率遗传效应最低,但授粉自交系得到的籽粒含水率遗传效应则较高,达到 0.199,说明籽粒含水率当代遗传效应受父母本遗传背景及其互作效应的影响。

表 5 玉米籽粒含水率的当代遗传效应

Table 5 Genetic effects of maize kernel moisture upon pollination by early-maturing male parents

父本 Male	父本效应 Male effect			母本效应 Female effect		
	杂交种 Hybrid	自交系 Inbred line	平均值 Mean	杂交种 Hybrid	自交系 Inbred line	平均 Mean
C898	0.171	0.202	0.186	0.829	0.798	0.814
EH1892	0.189	0.168	0.179	0.811	0.832	0.821
UH306	0.161	0.199	0.179	0.839	0.801	0.821
CC13	0.166	0.150	0.158	0.834	0.850	0.842
CC15	0.173	0.144	0.160	0.827	0.856	0.840
平均值 Mean	0.172	0.173		0.828	0.827	

2.5 杂交当代籽粒与亲本籽粒间含水率的相关性

为进一步剖析父母本对杂交当代籽粒含水率的影响,本研究对早熟父本的自交籽粒含水率与其对应的杂交种和自交系杂交当代籽粒含水率均值进行了相关性分析,结果表明,杂交种和自交系的当代籽粒含水率与父母本均存在正相关关系,决定系数 R^2

分别为 0.815 9 和 0.692 9(图 1)。通过分别比较父本、母本自交籽粒的含水率与其相应杂交籽粒的含水率相关性发现,在相关系数上及回归方程的斜率上,母本籽粒含水率与杂交籽粒的含水率指标上均高于父本。说明母本自身的脱水性能对杂交当代籽粒含水率的影响更大。

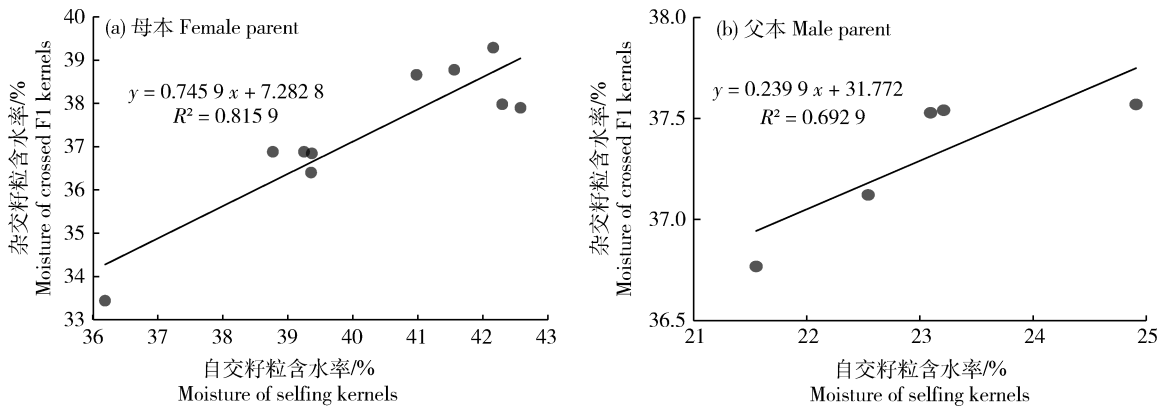


图1 杂交当代籽粒含水率与亲本自交籽粒含水率的关系

Fig.1 Correlations of moisture contents between crossing kernels and selfing kernels of bi-parents

3 讨论与结论

本研究探讨了玉米杂交当代籽粒含水率的遗传效应,发现以早熟父本授粉后能显著降低当代籽粒的含水率。玉米籽粒含水率表现出较为明显的父本遗传效应,说明存在花粉直感现象,且在不同遗传背景的材料之间具有普遍性。同时,母本自身的脱水性能对杂交当代籽粒的脱水性能影响较大,这可能与当代籽粒胚乳基因组的倍性有关。胚乳细胞中含有两套母本染色体和一套父本染色体,且胚乳占据的比重最大,而胚乳中的淀粉等主要成分的水合状态能够影响籽粒的脱水性能。另外,玉米籽粒含水率影响因素较多^[30],杂交当代籽粒含水率降低的效应是由于籽粒发育速度加快还是由于籽粒脱水速率加快所致或者是二者共同作用的结果,尚需进一步的研究。

杂交当代籽粒干重则较母本自交粒重显著提高,对玉米种子生产有应用价值。利用籽粒含水率和粒重的当代遗传效应,使用早熟父本可降低制种田种子收获时的籽粒含水率,有利于节约烘干成本,提高种子发芽率、发芽势和产量,进而提高大田玉米的生产水平。

生育期是影响玉米籽粒脱水的重要因素之一,成熟时籽粒含水率与出苗至吐丝散粉时间呈显著正相关^[33-34],花期早的材料脱水快,不同熟期玉米籽粒脱水速率差异显著^[5]。灌浆速率增大会加快成熟后籽粒脱水速率,降低收获时籽粒含水率^[35]。早熟种质材料的育种改良实践证实了早熟材料脱水快的特点,即以欧洲早熟种质材料对黄旅系种质进行改良可提高脱水速度,脱水速度改良后的“黄欧系”抽雄

期、吐丝期提早,生育期缩短,表现出良好的早熟性^[36]。可见早熟种质在玉米籽粒脱水性能改良方面具有重要价值。生育期、成熟期含水率、成熟后脱水速度以及当代遗传效应表现的有机结合将可能成为玉米种质脱水性能改良的重要手段。同时,本研究采用的低场核磁共振单粒无损精准测试技术,也有助于加快籽粒宜机收种质材料的筛选及品种选育,促进玉米生产的全程机械化。

参考文献 References

- [1] 李少昆. 我国玉米机械粒收质量影响因素及粒收技术的发展方向[J]. 石河子大学学报:自然科学版, 2017, 35(3): 265-272
- Li S K. Factors affecting the quality of maize grain mechanical harvest and the development trend of grain harvest technology [J]. *Journal of Shihezi University: Natural Science*, 2017, 35(3): 265-272 (in Chinese)
- [2] Cross H Z, Chyle J R, Hammond J J. Divergent selecting for ear moisture in early maize[J]. *Crop Science*, 1987, 27(5): 914-918
- [3] Cross H Z. A selection procedure for ear drying-rates in maize [J]. *Euphytica*, 1985, 34(2): 409-418
- [4] Purdy J L, Crane P L. Inheritance of drying rate in "mature" corn (*Zea mays* L)[J]. *Crop Science*, 1967, 7(4): 294-297
- [5] Widdicombe W D, Thelen K D. Row width and plant density effects on corn grain production in the northern corn belt[J]. *Agronomy Journal*, 2002, 94(5): 1020-1023
- [6] Xiang K, Reid L M, Zhang Z M, Zhu X Y, Pan G T. Characterization of correlation between grain moisture and ear rot resistance in maize by QTL meta-analysis[J]. *Euphytica*, 2012, 183(2): 185-195
- [7] 王克如, 李少昆. 玉米籽粒脱水速率影响因素分析[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 2027-2035

- Wang K R, Li S K. Analysis of influencing factors on kernel dehydration rate of maize hybrids[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(11): 2027-2035 (in Chinese)
- [8] Piepho H P, Mohring J. Computing heritability and selection response from unbalanced plant breeding trials[J]. *Genetics*, 2007, 177(3): 1881-1888
- [9] Liu J J, Yu H, Liu Y L, Deng S N, Xu M L. Genetic dissection of grain water content and dehydration rate related to mechanical harvest in maize[J]. *BMC Plant Biology*, 2020, 20(1): 118
- [10] Yan J B, Tan B C. Maize biology: From functional genomics to breeding application [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2019, 61(6): 654-657
- [11] Yang Y D. QTL Detection for grain water relations and genetic correlations with grain matter accumulation at four stages after pollination in maize [J]. *Journal of Plant Biochemistry & Physiology*, 2014, 2(1): 1-9
- [12] Wang Z H, Wang X, Zhang L, Liu X J, Di H, Li T F, Jin X C. QTL underlying field grain drying rate after physiological maturity in maize (*Zea Mays* L)[J]. *Euphytica*, 2012, 185(3): 521-528
- [13] Zhang J, Zhang F Q, Tang B J, Ding Y, Xia L K, Qi J S, Mu X Y, Gu L M, Lu D W, Chen Y H. Molecular mapping of quantitative trait loci for grain moisture at harvest and field grain drying rate in maize (*Zea mays* L)[J]. *Physiologia Plantarum*, 2020, 169(1): 64-72
- [14] Qian Y L, Zhang X Q, Wang L F, Chen J, Chen B R, Lv G H, Wu Z C, Guo J, Wang J, Qi Y C, Li T C, Zhang W, Ruan L, Zuo X L. Detection of QTLs controlling fast kernel dehydration in maize (*Zea mays* L)[J]. *Genetics and Molecular Research*, 2016, 15(3)
- [15] Sala R G, Andrade F H, Camadro E L, Ceroni J C. Quantitative trait loci for grain moisture at harvest and field grain drying rate in maize (*Zea mays*, L)[J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2006, 112(3): 462-471
- [16] Zhou G F, Hao D R, Xue L, Chen G Q, Lu H H, Zhang Z L, Shi M L, Huang X L, Mao Y X. Genome-wide association study of kernel moisture content at harvest stage in maize[J]. *Breeding Science*, 2018, 68(5): 622-628
- [17] Dai L Q, Wu L, Dong Q S, Zhang Z, Wu N, Song Y, Lu S, Wang P W. Genome-wide association study of field grain drying rate after physiological maturity based on a resequencing approach in elite maize germplasm [J]. *Euphytica*, 2017, 213(8): 1-12
- [18] Sala R G, Andrade F H, Ceroni J C. Quantitative trait loci associated with grain moisture at harvest for line per se and testcross performance in maize: A meta-analysis [J]. *Euphytica*, 2012, 185(3): 429-440
- [19] Jia T J, Wang L F, Li J J, Ma J, Cao Y Y, Lübberstedt T, Li H Y. Integrating a genome-wide association study with transcriptomic analysis to detect genes controlling grain drying rate in maize (*Zea may* L)[J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2020, 133(2): 623-634
- [20] 张垚, 陈琛, 陈明, 刘金, 李伟, 刘晨旭, 陈宝建, 张俊稳, 陈绍江. 基于低场核磁共振技术的玉米单子粒含水率测定方法研究[J]. *玉米科学*, 2018, 26(3): 89-94
- Zhang Y, Chen C, Chen M, Liu J, Li W, Liu C X, Chen B J, Zhang J W, Chen S J. Single kernel moisture content evaluation based on low field nuclear magnetic resonance in maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2018, 26(3): 89-94 (in Chinese)
- [21] 丛滋金. 杂交当代玉米油分基因的遗传效应及应用研究[D]. 北京: 中国农业大学, 1996
- Cong Z J. Study on the effect of maize kernel oil gene at the F₁ embryo and its application[D]. *Beijing: China Agricultural University*, 1996 (in Chinese)
- [22] Borrás L, Westgate M E, Otegui M E. Control of kernel weight and kernel water relations by post-flowering source-sink ratio in maize[J]. *Annals of Botany*, 2003, 91(7): 857-867
- [23] Eyherabide G H, Hallauer A R. Reciprocal full-sib recurrent selection in maize: I. Direct and indirect responses[J]. *Crop Science*, 1991, 31(4): 952-959
- [24] Eyherabide G H, Hallauer A R. Reciprocal full-sib recurrent selection in maize: II. contributions of additive, dominance, and genetic drift effects[J]. *Crop Science*, 1991, 31(6): 1442-1448
- [25] Kang M S, Zuber M S, Colbert T R, Horrocks R D. Effects of certain agronomic traits on and relationship between rates of grain-moisture reduction and grain fill during the filling period in maize[J]. *Field Crops Research*, 1986, 14: 339-347
- [26] 王元东, 赵久然, 张华生, 陈传永, 吴珊珊, 张春原, 刘新香, 郭成恩, 陈明, 陈绍江. “黄欧”系列玉米自交系宜机械粒收特征特性研究[J]. *植物遗传资源学报*, 2019, 20(6): 1554-1565
- Wang Y D, Zhao J R, Zhang H S, Chen C Y, Wu S S, Zhang C Y, Liu X X, Guo C E, Chen M, Chen S J. Characteristics of the “Huanglv-European Lines” maize inbred lines for mechanical grain harvesting[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2019, 20(6): 1554-1565 (in Chinese)