

# 不同熟期玉米品种的籽粒灌浆特性及其与温度关系研究

钱春荣<sup>1,2§</sup>, 王荣焕<sup>1§</sup>, 赵久然<sup>1\*</sup>, 于洋<sup>2</sup>, 郝玉波<sup>2</sup>,  
徐田军<sup>1</sup>, 姜宇博<sup>2</sup>, 宫秀杰<sup>2</sup>, 李梁<sup>2</sup>, 葛选良<sup>2</sup>

(1.北京市农林科学院玉米研究中心, 玉米DNA指纹及分子育种北京市重点实验室, 北京100097;  
2.黑龙江省农业科学院耕作栽培研究所, 农业部东北地区作物栽培科学观测实验站, 哈尔滨150086)

**摘要:**玉米籽粒成熟度与吐丝至成熟阶段热量条件显著相关,明确不同熟期玉米品种籽粒灌浆特性及其与灌浆阶段温度的关系,可为玉米籽粒发育调控和熟期选择提供理论依据。研究以极早熟、中早熟和中晚熟3种熟期类型的9个玉米品种为试验材料,于2014年和2015年在哈尔滨实施田间试验,研究不同熟期玉米品种的籽粒灌浆特性及其与温度的关系。结果表明:3种熟期类型品种相比,中早熟品种的最大灌浆速率( $G_{max}$ )、达到最大灌浆速率时的生长量( $W_{max}$ )和平均灌浆速率( $G_{mean}$ )最大,极早熟品种次之,中晚熟品种最小;灌浆活跃期( $P$ )和有效灌浆时间( $t_3$ )随品种熟期延长而增加,增加部分主要在灌浆缓增期。活跃灌浆期、有效灌浆期与快增期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温显著正相关,与灌浆期日平均气温显著负相关;最大灌浆速率和平均灌浆速率与渐增期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温、灌浆期日平均气温显著正相关,与快增期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温和渐增期日平均气温显著负相关。在热量资源有限的生态区,中晚熟品种进入灌浆缓增期后日平均气温较低,不利于籽粒灌浆,导致中晚熟品种粒重低于中早熟和极早熟品种;因此,在热量资源有限生态区,一味地延长熟期并不利于粒重增加,中早熟品种具有明显的灌浆优势,从而获得较高的产量。

**关键词:**玉米;熟期;灌浆;温度

**doi:**10.13304/j.nykjdb.2016.766

中图分类号:S513 文献标识码:A 文章编号:1008-0864(2017)08-0105-10

## Study on the Grain Filling Characteristics and Their Relationship with Temperature of Maize Hybrids Differing in Maturities

QIAN Chunrong<sup>1,2§</sup>, WANG Ronghuan<sup>1§</sup>, ZHAO Jiuran<sup>1\*</sup>, YU Yang<sup>2</sup>, HAO Yubo<sup>2</sup>,  
XU Tianjun<sup>1</sup>, JIANG Yubo<sup>2</sup>, GONG Xiujie<sup>2</sup>, LI Liang<sup>2</sup>, GE Xuanliang<sup>2</sup>

(1.Beijing Key Laboratory of Maize DNA Fingerprinting and Molecular Breeding, Maize Research Center, Beijing Academy of Agriculture & Forestry Sciences, Beijing 100097; 2.Scientific Observing and Experimental Station of Crop Cultivation in Northeast China, Ministry of Agriculture; Institute of Crop Cultivation and Farming, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China)

**Abstract:**Maize grain maturity was significantly correlated with the heat condition during silking to mature stage. Clarifying the grain filling characteristics of different maize hybrids and their relationship with the temperature of grain filling stage could provide theoretical basis for maize grain development regulation and maturity selection. Field experiments were conducted in Harbin in 2014 and 2015 with 9 maize hybrids to study the grain filling characteristics of different maturity maize hybrids, and the relationship with temperature. The results showed that the maximum grain filling rate( $G_{max}$ ), grain weight at the time of maximum grain filling rate( $W_{max}$ ) and average grain filling rate( $G_{mean}$ )

收稿日期:2016-12-19; 接受日期:2017-03-21

基金项目:北京市农林科学院博士后科研基金项目;北京市博士后科研活动经费项目(2015ZZ-67);国家自然科学基金项目(31301279);公益性行业(农业)科研专项(201303125-7);“十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD12B01-2)资助。

作者简介:§ 钱春荣与王荣焕为本文共同第一作者。钱春荣,副研究员,博士,主要从事玉米高产栽培与生理生态研究。E-mail: qcr3906@163.com。王荣焕,副研究员,博士,主要从事玉米高产栽培与生理生态研究。E-mail: ronghuanwang@126.com。

\* 通信作者:赵久然,研究员,博士,主要从事玉米高产栽培与生理生态研究。E-mail: maizezhao@126.com

of middle-early maturity hybrids were the highest among the 3 maturity hybrids, while those of super-early maturing hybrids were the second. The active filling stage ( $P$ ) and effective filling time ( $t_3$ ) increased with the extension of ripening period, and the increase was mainly in the period of late grain filling stage. The active filling stage ( $P$ ) and effective filling time ( $t_3$ ) was significantly positive correlated with the effective accumulated temperature during middle stage of grain filling period, and significantly negative correlated with the daily average temperature during grain filling stage. The maximum and average grain filling rate were positively correlated with the effective accumulated temperature  $\geq 10^\circ\text{C}$  during the early stage of grain filling period and daily average temperature during the filling period, which was significantly negative correlated with the effective accumulated temperature  $\geq 10^\circ\text{C}$  during the middle stage of grain filling period and daily mean temperature during the early stage of grain filling period. In the ecological area with limited caloric resources, the average daily temperature during the late stage of grain filling period of the middle-late maturing hybrids was lower, which was not conducive to grain filling, leading to the grain weight of middle-late maturing hybrids was less than that of the middle-early and super-early maturing hybrids. The prolonged maturity was not conducive to grain weight increase under the condition with limited caloric resources. The middle-early maturing hybrids had obvious advantage in grain filling, and then could obtain higher yield.

**Key words:** maize; maturity; grain filling; temperature

玉米产量的高低决定于库容的大小和灌浆充实的程度。灌浆特性是玉米生长后期影响产量的关键因素之一,灌浆期和灌浆活跃期的长短、灌浆强度的高低决定了玉米籽粒干物质积累的多少<sup>[1~4]</sup>;前人从生态条件、施肥水平以及种植密度等方面对玉米籽粒灌浆特性开展了大量研究<sup>[2,4~11]</sup>,比较一致的观点是粒重由灌浆时间和灌浆速率共同决定<sup>[12,13]</sup>。

温度是影响玉米生长发育的重要生态因子,通过影响生育期,进而影响光有效辐射截获率和生长发育,最终影响产量<sup>[14]</sup>。玉米籽粒成熟度与种植区热量条件显著相关,以吐丝至成熟阶段地区间差异对成熟度影响最大<sup>[15,16]</sup>。董桂芳等<sup>[17]</sup>研究指出,即使在同一生态区内,玉米品种因其自身基因型的差异,决定了各自对气象条件反应有所不同。王晓慧等<sup>[18]</sup>研究表明,中熟品种灌浆启动快,灌浆活跃期和有效灌浆时间短,中晚熟、晚熟和超晚熟品种灌浆启动慢,灌浆活跃期和有效灌浆时间长。黑龙江省是我国最大的玉米主产区,国家统计局数据显示,2015 年黑龙江省玉米播种面积 582 万  $\text{hm}^2$ ,玉米产量 3 544 万 t,分别占全国玉米面积与总产的 15.27% 和 15.78%。该区域无霜期短,热量资源有限,随着玉米全程机械化种植方式的转变,生育期长、熟期晚的品种越来越不适应生产要求,需要选择相对早熟的品种加以替代。但针对该区域不同熟期玉米品种灌浆规律研究较少,不同熟期玉米品种籽粒灌浆过程有何差异,灌浆参数与灌浆阶段温度关系如何,上述科学问题的研究尚未见相关报道。

本研究选用极早熟、中早熟、中晚熟三个熟期段 9 个玉米品种,于 2014 年和 2015 年两个生长

季在哈尔滨生态区种植,运用 Richard 生长模型对其籽粒灌浆特性进行解析,探明黑龙江省不同熟期玉米品种籽粒灌浆特性及其与灌浆阶段温度的关系,以期为黑龙江省玉米生产合理选用相应熟期品种提供理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2014 年和 2015 年在黑龙江省哈尔滨市民主乡黑龙江省农业科学院农业科技园区进行 ( $N 45^\circ 50'$ ,  $E 126^\circ 50'$ )。黑龙江省哈尔滨市属于黑龙江省第一积温带,年均气温  $3.5 \sim 4.5^\circ\text{C}$ ,年降雨量 400~600 mm,年无霜期 135~145 d。试验地土壤为碳酸盐黑钙土,试验区碱解氮 160.40 mg/kg,速效磷 19.22 mg/kg,速效钾 675.90 mg/kg,有机质 19.6 g/kg, pH 5.95。

2014 年生长季节(5 月 8 日播种,9 月 30 日初霜),平均气温  $19.72^\circ\text{C}$ ,活动积温  $2\,908^\circ\text{C}$ ,  $\geq 10^\circ\text{C}$  有效积温  $1\,459.4^\circ\text{C}$ ,降雨量 294.2 mm;2015 年本试验生长季节(5 月 10 日播种,10 月 4 日初霜)平均气温  $19.78^\circ\text{C}$ ,活动积温  $2\,915^\circ\text{C}$ ,  $\geq 10^\circ\text{C}$  有效积温  $1\,444.13^\circ\text{C}$ ,降雨量 390.75 mm。

### 1.2 试验设计

试验选用黑龙江省目前大面积推广、新审定或新育成的表现突出的 9 个玉米品种为试验材料,供试品种见表 1,其中德美亚 1 号和 3 号种子由黑龙江垦丰种业提供,克单 14 由黑龙江省龙科种业提供,其余 6 个试验品种由北京市农林科学院玉米研究中心提供。试验采取随机区组设计,

表 1 供试品种及生育期  
Table 1 Maize hybrids and growth stages.

熟期类型 Maturity	品种 Maize hybrids	生育期(d) Growth stage(d)
极早熟 Supper-early maturity	德美亚 1 号 Demeiya 1	108
	克单 14 Kedan 14	108
	德美亚 3 号 Demeiya 3	117
中早熟 Middle-early maturity	吉单 27 Jidan 27	126
	京农科 728 Jingnongke 728	126
	京单 28 Jingdan 28	130
中晚熟 Middle-late maturity	先玉 335 Xianyu 335	>130
	郑单 958 Zhengdan 958	>130
	京科 968 Jingke 968	>130

三次重复,每个小区 6 行,行长 5 m,行距 0.65 m,小区面积 19.5 m<sup>2</sup>。

1.3 田间管理

试验于 2013 年和 2014 年秋季耕翻整地,秋施肥,每公顷施入控释掺混肥料(N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=26:10:12)600 kg。2014 年和 2015 年分别于 5 月 8 日和 5 月 10 日人工播种,每穴 3 粒,种植密度每公顷 52 500 株,出苗后于三叶期按设计密度定苗,2014 年和 2015 年分别于 10 月 11 日和 10 月 13 日人工收获,其他管理措施与当地大田高产栽培技术措施一致。

1.4 测定项目与方法

产量和产量构成:每小区收获中间 2 行,按每小区平均鲜穗重从中随机选取 10 个样本果穗,用于考察产量构成及穗部性状。实际籽粒产量:各小区所收获的果穗全部脱粒后称重,测定籽粒含水量,按 14%的含水量进行折算。

于玉米吐丝期选择生长一致且同一天吐丝的植株挂牌标记,自吐丝 14 d 起,每 7 d 取果穗一次,每次每个小区取 3 个挂牌标记的果穗,取其中下部(自穗底部第 8~20 环)籽粒 100 粒,分别称其鲜重,于 80℃ 烘干至恒重后称籽粒干重。

以授粉后天数(*t*)为自变量,授粉后每隔 7 d 测得的籽粒干重为因变量(*W*),参照顾世梁等<sup>[19]</sup>的方法,利用 Richards 方程  $W=A(1+Be^{-Ct})^{-1/D}$  模拟籽粒灌浆过程。

籽粒灌浆速率  $G = ACBe^{-Ct}/D(1 + Be^{-Ct})^{(D+1)/D}$

式中:*W* 为百粒重(g),*A* 为最终百粒重(g),*t* 为授粉后天数(d),*B*、*C*、*D* 为回归方程所确定的参数。

由方程一阶导数和二阶导数推导出灌浆参数。

积累起始势  $R_0=C/D$

达最大灌浆速率时的天数:  $T_{max} = (\ln B - \ln D)/C$

灌浆速率最大时的生长量  $W_{max}=A(D+1)^{-1/D}$

最大灌浆速率  $G_{max} = (CW_{max}/D)[1 - (W_{max}/A)D]$

灌浆活跃期(约完成总积累量的 90%)  $P = 2(D+2)/C$

平均灌浆速率  $G_{mean} = AC/2(D+2)$

灌浆高峰开始日期  $t_1 = -\ln\{[D^2+3D+D(D^2+6D+5)^{1/2}]/2B\}/C$ ,对应此时粒重为  $W_1 = A(1 + Be^{-Ct_1})^{-1/D}$

灌浆高峰结束日期  $t_2 = -\ln\{[D^2+3D-D(D^2+6D+5)^{1/2}]/2B\}/C$ ,对应此时粒重为  $W_2 = A(1 + Be^{-Ct_2})^{-1/D}$

花后粒重 *W* 达 99%时为有效灌浆期,  $t_3 = -\ln\{[(100A/99)^D-1]/B\}/C$ ,对应此时粒重为  $W_3$ 。

1.5 数据分析

采用 Microsoft Excel 2013 进行数据计算,用 CurveExpert1.4 软件进行方程拟合,SAS 9.0 进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 不同熟期玉米品种的产量及其产量构成

不同熟期类型品种间的产量差异,以及年际间的产量差异均达到极显著水平(表 2)。中晚熟品种较中早熟和极早熟品种分别增产 13.98%和

59.46%,中早熟品种较极早熟品种增产 39.91%,2015 年中晚熟和中早熟品种产量差异不显著;不同熟期品种的百粒重差异达极显著水平,年际间百粒重差异不显著,中早熟品种百粒重最高,极早熟品种次之,中晚熟品种百粒重最低。不同熟期类型品种穗粒数差异,以及年际间穗粒数的差异均达到极显著水平,中晚熟品种穗粒数最多,其次是中早熟品种,极早熟品种穗粒数最少。同一熟

期内的不同品种百粒重与穗粒数也存在差异,其中极早熟品种“德美亚 3”和中早熟品种“京单 28”属于大粒型品种,其百粒重明显高于同熟期内的其他品种,而穗粒数却显著低于其它品种。极早熟品种虽然百粒重显著高于中晚熟品种,但其穗粒数却显著低于中晚熟品种,从而导致极早熟品种产量显著低于中晚熟品种,由此可见,不同熟期类型品种产量差异主要来源于穗粒数(表 3)。

表 2 不同熟期类型玉米品种产量性状统计分析 F 值

Table 2 F values of ANOVA for yield traits in maize hybrids differing in maturities.

差异来源 Source	自由度 <i>f</i>	穗粒数 Kernel number per ear	百粒重 100-kernel weight	产量 Yield
年际 Year	1	28.51 **	0.56	33.65 **
熟期 Maturity	2	412.22 **	28.78 **	200.62 **
年际×熟期 Year × maturity	2	54.98 **	1.5	26.59 **

注: \*\* 表示  $P<0.01$  水平差异显著。  
Note: \*\* represents significant difference at  $P<0.01$  level.

表 3 不同熟期类型玉米产量性状

Table 3 The yield traits of maize hybrids differing in maturities.

熟期类型 Maturity	品种 Maize hybrid	穗粒数		百粒重(g)		产量(kg/hm <sup>2</sup> )	
		Kernel number per ear		100-kernel weight(g)		Yield(kg/hm <sup>2</sup> )	
		2014	2015	2014	2015	2014	2015
极早熟 Super-early maturity	德美亚 1 号 Demeiya 1	527	493	34.70	33.23	8 415.04	7 890.32
	克单 14 Kedan 14	447	491	35.82	35.50	8 355.37	7 500.58
	德美亚 3 号 Demeiya 3	389	537	43.86	41.61	7 910.49	10 498.92
	均值 Mean	454 Cc	507 Cc	38.13 Aa	36.78 Bb	8 226.97 Cc	8 629.94 Bb
中早熟 Middle-early maturity	吉单 27 Jidan 27	675	595	37.12	36.85	12 794.01	11 158.55
	京农科 728 Jingnongke 728	657	569	35.97	38.92	12 878.93	12 096.42
	京单 28 Jingdan 28	572	510	44.70	45.07	11 527.58	10 296.48
	均值 Mean	635 Bb	558 Bb	39.29 Aa	40.28 Aa	12 400.18 Bb	11 183.82 Aa
中晚熟 Middle-late maturity	先玉 335 Xianyu 335	772	719	35.86	35.60	15 126.05	13 571.60
	郑单 958 Zhengdan 958	726	618	31.37	35.12	14 085.41	11 092.24
	京科 968 Jingke 968	768	677	33.78	34.46	15 480.07	11 284.86
	均值 Mean	755 Aa	671 Aa	33.67 Bb	35.06 Bb	14 897.17 Aa	11 982.90 Aa

注:数据后不同大小写字母分别表示同一指标同一年度间差异达  $P<0.05$  和  $P<0.01$  显著水平。  
Note: For the same item, capital and small letters within the same column indicate significant difference between hybrids in the same year at  $P<0.05$  and  $P<0.01$  level, respectively.

2.2 不同熟期玉米品种灌浆过程粒重的变化

粒重变化动态呈 S 型增长曲线(图 1),在籽粒灌浆粒重渐增期,年际间不同熟期品种表现不同,2014 年极早熟和中早熟品种籽粒增重快,2015 年中晚熟品种籽粒增重快,可见粒重渐增期容易受环境条件影响,年际间变化较大;粒重快增期和缓增期,2 个年度都表现为中晚熟品种粒重

增长落后于中早熟和极早熟品种;由此说明,不同熟期品种灌浆动态的差异主要取决于灌浆快增期与缓增期。

2.3 不同熟期玉米品种灌浆过程中灌浆速率的变化

3 类熟期品种籽粒灌浆速率均呈单峰曲线变化(图2),随着灌浆日数增加,3种熟期类型品种



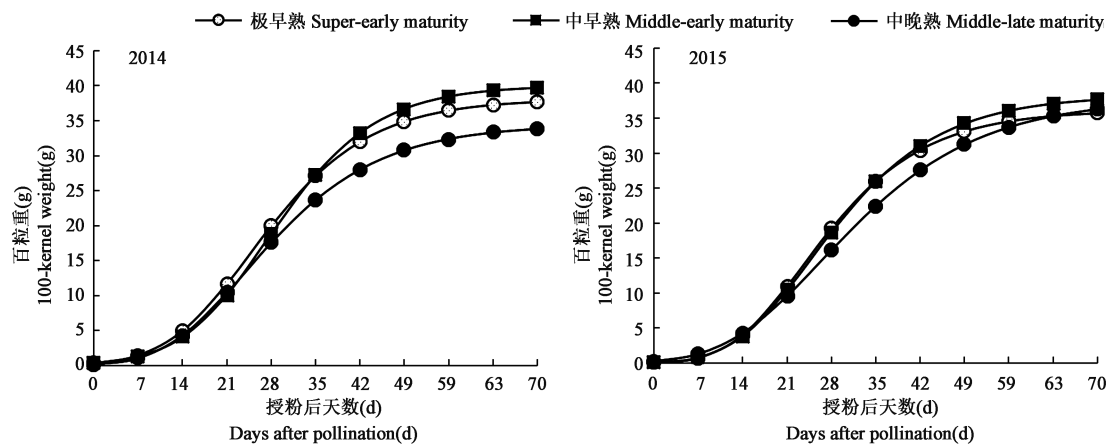


图 1 不同熟期玉米粒重的变化

Fig.1 Grain weight of maize hybrids differing in maturities.

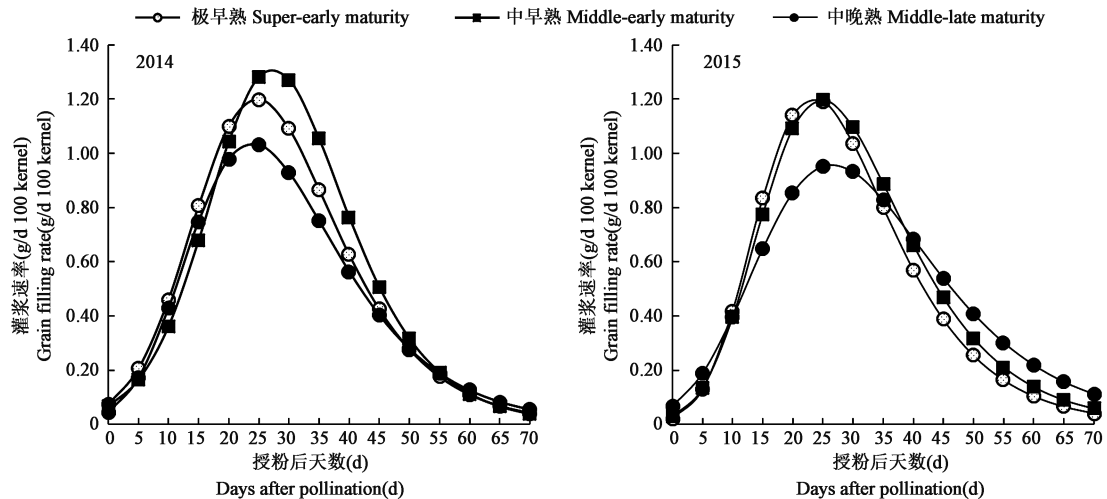


图 2 不同熟期玉米灌浆速率的变化

Fig.2 Grain filling rate of maize hybrids differing in maturities.

灌浆速率的差异逐渐增大,3 种熟期类型品种均在授粉后 25 d 左右达到灌浆高峰,至灌浆高峰时品种间的差异达到最大,中早熟品种灌浆速率峰值最大,其次是极早熟品种,中晚熟品种峰值最小。灌浆高峰后,各熟期品种灌浆速率逐渐下降,极早熟品种下降幅度较快,中晚熟品种下降最慢。

2.4 不同熟期玉米品种的籽粒灌浆参数

以授粉后天数( $t$ )为自变量,粒重( $W$ )为因变量,运用 Richard 方程对籽粒灌浆过程进行模拟,获得灌浆参数(表 4)。极早熟和中早熟品种的积累起始势( $R_0$ )年度间变化较大,中晚熟品种相对稳定,两年平均积累起始势( $R_0$ )中晚熟品种>极早熟>中早熟;最大灌浆速率( $G_{\max}$ )、达到最大灌浆速率时的生长量( $W_{\max}$ )和平均灌浆速率

( $G_{\text{mean}}$ ) 3 个灌浆参数表现为中早熟品种最大,极早熟品种次之,中晚熟品种最小;灌浆活跃期( $P$ )和有效灌浆时间( $t_3$ )则以中晚熟品种最长,中早熟品种次之,极早熟品种最短。

2.5 不同熟期玉米品种的籽粒灌浆阶段特征

依据 Richard 曲线将玉米灌浆时期划分为三个阶段,分别为灌浆渐增期、快增期和缓增期。灌浆各阶段的持续时间为缓增期最长,其次是快增期,渐增期最短(表 5);各阶段籽粒累积量高低依次为快增期、缓增期和渐增期;各阶段平均灌浆速率大小依次为快增期、渐增期和缓增期。3 类熟期品种中,中晚熟品种的渐增期持续时间最短,但其快增期和缓增期持续时间却最长;中早熟品种的渐增期和缓增期持续时间均比极早熟品种长,

快增期持续时间 2 类品种相近。各个灌浆阶段的平均灌浆速率都表现为中早熟品种>极早熟品种>中晚熟品种。渐增期和快增期籽粒积累量为中早熟品种>极早熟品种>中晚熟品种,缓增期籽粒积累量为中晚熟品种>中早熟品种>极早熟品种。

2.6 不同熟期玉米品种籽粒灌浆阶段的温度变化

不同熟期品种各自灌浆阶段所经历的日平均气温不同,其完成灌浆所需求的 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温也不同(表 6 和表 7),极早熟品种灌浆期日平均气温和 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温需求最高,中早熟品种次

表 4 不同熟期玉米品种的灌浆特征参数  
Table 4 The parameters of grain-filling characteristics in maize hybrids differing in maturities.

参数 Parameter	极早熟 Super-early maturity		中早熟 Middle-early maturity		中晚熟 Middle-late maturity	
	2014	2015	2014	2015	2014	2015
	2014	2015	2014	2015	2014	2015
$A$	38.11	36.15	40.06	38.29	34.48	37.87
$B$	1.29	-0.16	2.35	0.06	-0.13	-0.26
$C$	0.10	0.09	0.11	0.09	0.09	0.07
$D$	0.32	0.09	0.51	0.12	0.11	0.11
$R_0$	0.31	1.02	0.22	0.78	0.77	0.64
$G_{\max}$	1.20	1.20	1.31	1.20	1.04	0.96
$T_{\max}$	24.66	23.46	27.26	24.77	23.89	26.50
$W_{\max}$	15.99	13.90	17.86	14.86	13.36	14.68
$G_{\text{mean}}$	0.81	0.82	0.88	0.81	0.70	0.65
$P(\text{d})$	46.88	44.26	45.35	47.12	49.05	58.27
$t_3(\text{d})$	71.17	72.08	68.78	76.01	77.30	89.93

$R_0$ : 积累起始势; $G_{\max}$ :最大灌浆速率; $T_{\max}$ :灌浆速率最大时时间; $W_{\max}$ :灌浆速率最大时生长量; $G_{\text{mean}}$ :平均灌浆速率; $P$ :灌浆活跃期; $t_3$ :有效灌浆时间。  
 $R_0$ : Initial grain-filling potential;  $G_{\max}$ : Maximum grain-filling rate;  $T_{\max}$ : The time reaching the maximum grain-filling rate;  $W_{\max}$ : Grain weight at the time of maximum grain-filling rate;  $G_{\text{mean}}$ : Mean grain-filling rate;  $P$ : Active grain-filling period;  $t_3$ : Effective grain-filling time.

表 5 不同熟期玉米品种灌浆 3 个时期的特征参数  
Table 5 The parameters characteristics of the three grain-filling phases in maize hybrids differing in maturities.

灌浆阶段 Grain filling stage	参数 Parameter	极早熟 Super-early maturity		中早熟 Middle-early maturity		中晚熟 Middle-late maturity	
		2014	2015	2014	2015	2014	2015
		2014	2015	2014	2015	2014	2015
渐增期 Early stage	$T_1(\text{d})$	13.61	12.85	16.76	13.50	12.15	12.55
	$v_1(\text{g/d} \cdot 100\text{-kernel})$	0.34	0.25	0.36	0.26	0.26	0.28
	$w_1(\text{g}/100\text{-kernel})$	4.67	3.18	6.02	3.51	3.14	3.45
快增期 Middle stage	$T_2(\text{d})$	22.10	21.21	21.00	22.55	23.48	27.89
	$v_2(\text{g/d} \cdot 100\text{-kernel})$	1.04	1.04	1.14	1.03	0.89	0.83
	$w_2(\text{g}/100\text{-kernel})$	23.04	22.02	23.96	23.31	21.00	23.06
缓增期 Late stage	$T_3(\text{d})$	35.46	38.03	31.02	39.96	41.67	49.48
	$v_3(\text{g/d} \cdot 100\text{-kernel})$	0.28	0.28	0.31	0.28	0.24	0.22
	$w_3(\text{g}/100\text{-kernel})$	10.02	10.58	9.69	11.09	10.00	10.98

$T_1$ :灌浆渐增期持续时间; $v_1$ :渐增期平均灌浆速率; $w_1$ :渐增期粒重增量; $T_2$ :灌浆快增期持续时间; $v_2$ :快增期平均灌浆速率; $w_2$ :快增期粒重增量; $T_3$ :灌浆缓增期持续时间; $v_3$ :缓增期平均灌浆速率; $w_3$ :缓增期粒重增量。  
 $T_1$ : Grain-filling duration of early stage;  $v_1$ : Mean grain-filling rate of early stage;  $w_1$ : Increased grain weight of early stage;  $T_2$ : Grain-filling duration of middle stage;  $v_2$ : Mean grain-filling rate of middle stage;  $w_2$ : Increased grain weight of middle stage;  $T_3$ : Grain-filling duration of late stage;  $v_3$ : Mean grain-filling rate of late stage;  $w_3$ : Increased grain weight of late stage.

之,中晚熟品种最低;不同熟期品种灌浆期有效积温需求在灌浆各阶段的分配比例不同,极早熟品种在渐增期、快增期和缓增期的积温需求比例分别为 24%、38%和 39%,中早熟品种在各阶段的分配比例分别为 30%、39%和 31%,中晚熟品种在各阶段的分配比例分别为 26%、45%和 28%。

2.7 玉米籽粒灌浆参数与灌浆期温度的相关分析

对不同熟期玉米品种籽粒灌浆参数和灌浆期、灌浆不同阶段≥10℃有效积温和日平均气温进行相关分析。活跃灌浆期、有效灌浆期、快增期和缓增期持续时间与快增期≥10℃有效积温、渐

表 6 籽粒灌浆阶段日平均气温(℃)  
Table 6 Average daily temperature (℃) in each filling stage.

品种 Maize hybrid	渐增期 Early stage		快增期 Middle stage		缓增期 Late stage		灌浆期 Grain filling stage	
	2014	2015	2014	2015	2014	2015	2014	2015
德美亚 1 号 Demeiya 1	22.35	22.59	22.52	24.09	18.92	18.85	20.56	21.09
克单 14 Kedan 14	22.54	22.63	22.05	24.12	20.33	18.61	21.48	21.23
德美亚 3 号 Demeiya 3	23.16	23.47	22.16	23.68	15.19	16.86	18.71	19.88
均值 Mean	22.68	22.90	22.24	23.96	18.15	18.11	20.25	20.73
吉单 27 Jidan 27	22.19	23.97	22.26	23.14	17.39	17.58	20.27	20.44
京农科 728 Jingnongke 728	22.74	24.61	21.87	22.27	17.36	15.57	20.03	23.75
吉单 28 Jidan 28	22.3	24.66	22.12	21.16	13.89	13.66	18.37	18.07
均值 Mean	22.41	24.41	22.08	22.19	16.21	15.60	19.56	20.75
先玉 335 Xianyu335	23.04	24.55	21.96	21.65	14.73	13.68	18.01	18.14
郑单 958 Zhengdan 958	22.38	24.66	22.24	20.53	14.12	13.57	18.24	18.07
京科 968 Jingke 968	23.34	24.68	21.78	21.45	13.41	14.38	17.49	17.96
平均值 Mean	22.92	24.63	21.99	21.21	14.09	13.88	17.91	18.06

表 7 籽粒灌浆阶段≥10℃有效积温(℃)  
Table 7 Effective accumulated temperature (℃) above 10℃ in each filling stage.

品种 Maize hybrid	渐增期 Early stage		快增期 Middle stage		缓增期 Late stage		灌浆期 Grain filling stage	
	2014	2015	2014	2015	2014	2015	2014	2015
德美亚 1 号 Demeiya 1	148.19	163.65	262.84	295.98	338.89	327.5	749.92	787.13
克单 14 Kedan 14	200.69	189.48	241.04	268.2	258.34	249.7	700.07	707.38
德美亚 3 号 Demeiya 3	185.88	161.64	301.43	301.04	244.25	291.25	731.56	753.93
均值 Mean	178.25	171.59	268.44	288.41	280.49	289.48	727.18	749.48
吉单 27 Jidan 27	219.38	181.65	232.89	262.73	184.7	265.35	636.97	709.73
京农科 728 Jingnongke 728	178.38	189.88	237.34	245.3	206.09	225.75	621.81	660.93
吉单 28 Jidan 28	233.73	190.58	266.69	312.45	162.25	168.45	662.67	671.48
均值 Mean	210.50	187.37	245.64	273.49	184.35	219.85	640.48	680.71
先玉 335 Xianyu335	130.38	174.58	274.99	337.75	231.7	172.9	637.07	685.23
郑单 958 Zhengdan 958	184.14	190.58	268.94	326.35	174.35	154.55	627.43	671.48
京科 968 Jingke 968	146.79	190.58	294.39	263.25	174.35	192.6	615.53	646.43
平均值 Mean	153.77	185.25	279.44	309.12	193.47	173.35	626.68	667.71

增期日平均气温极显著正相关,与快增期、缓增期、灌浆期日平均气温显著或极显著负相关;最大灌浆速率、平均灌浆速率、快增期和缓增期平均灌浆速率与渐增期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温、缓增期和灌浆期日平均气温显著正相关,与快增期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温和渐增期日平均气温显著负相关(表8)。

表 8 灌浆参数与灌浆期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温和日平均气温的相关系数

Table 8 Correlation of filling parameters and effective accumulated temperature  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  and average daily temperature.

因子 Factor	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$
$P$	-0.13	0.01	0.82**	-0.56*	-0.67**	0.58**	-0.68**	-0.72**
$t_3$	-0.04	-0.14	0.89**	-0.45	-0.63**	0.67**	-0.57*	-0.77**
$T_1$	-0.19	0.88**	-0.49*	-0.29	0.16	-0.50*	0.02	0.19
$T_2$	-0.08	-0.09	0.87**	-0.51*	-0.67**	0.63**	-0.64**	-0.75**
$T_3$	0.04	-0.36	0.89**	-0.29	-0.55*	0.71**	-0.46*	-0.70**
$G_{\max}$	0.14	0.50*	-0.60**	0.22	0.54*	-0.48*	0.41	0.48*
$G_{\text{mean}}$	0.15	0.48*	-0.59**	0.24	0.53*	-0.47*	0.43	0.47*
$v_1$	-0.18	0.59**	-0.4	-0.21	0.07	-0.43	-0.15	0.3
$v_2$	0.11	0.52*	-0.63**	0.2	0.53*	-0.49*	0.39	0.48*
$v_3$	0.07	0.59**	-0.65**	0.16	0.50*	-0.53*	0.35	0.49*

$x_1$ : 灌浆期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温;  $x_2$ : 渐增期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温;  $x_3$ : 快增期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温;  $x_4$ : 缓增期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温;  $x_5$ : 灌浆期日平均气温;  $x_6$ : 渐增期日平均气温;  $x_7$ : 快增期日平均气温;  $x_8$ : 缓增期日平均气温。  $P$ : 灌浆活跃期;  $t_3$ : 有效灌浆时间;  $T_1$ : 灌浆渐增期持续时间;  $T_2$ : 灌浆快增期持续时间;  $T_3$ : 灌浆缓增期持续时间;  $v_1$ : 渐增期平均灌浆速率;  $v_2$ : 快增期平均灌浆速率;  $v_3$ : 缓增期平均灌浆速率。  
\* 和 \*\* 分别表示  $P<0.05$  和  $P<0.01$  水平显著相关。  
 $x_1$ : Effective accumulated temperature  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  in grain filling stage;  $x_2$ : Effective accumulated temperature  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  in grain filling early stage;  $x_3$ : Effective accumulated temperature  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  in grain filling middle stage;  $x_4$ : Effective accumulated temperature  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  in grain filling late stage;  $x_5$ : Average daily temperature in grain filling stage;  $x_6$ : Average daily temperature in grain filling early stage;  $x_7$ : Average daily temperature in grain filling middle stage;  $x_8$ : Average daily temperature in grain filling late stage;  $P$ : Active grain-filling period;  $t_3$ : Effective grain-filling time;  $T_1$ : Grain-filling duration of early stage;  $T_2$ : Grain-filling duration of middle stage;  $T_3$ : Grain-filling duration of late stage;  $v_1$ : Mean grain-filling rate of early stage;  $v_2$ : Mean grain-filling rate of middle stage;  $v_3$ : Mean grain-filling rate of late stage. \* and \*\* indicate significant correlation at  $P<0.05$  and  $P<0.01$  levels, respectively.

3 讨论

籽粒灌浆特性是玉米品种自身的固有特征,与产量形成密切相关。李绍长等<sup>[20,21]</sup>研究认为不同品种的粒重主要受灌浆持续期影响,而同一个品种的粒重则主要受灌浆速度的影响。张丽等<sup>[22]</sup>研究表明,灌浆后期保持相对较高的灌浆速率是粒重较大的主要原因,同时较长的灌浆持续期有利于粒重提高。本研究表明,中晚熟品种灌浆持续期比中早熟和极早熟品种长,主要体现在灌浆缓增期比较长;而缓增期平均灌浆速率与缓增期日平均气温显著正相关。在哈尔滨生态区,中晚熟品种灌浆缓增期内日平均气温不足  $14^{\circ}\text{C}$ ,致使中晚熟品种灌浆速率比较低,因此,中晚熟品种尽管灌浆持续时间比较长。但其间籽粒干物质积累量却不高,最终导致中晚熟品种的粒重较中

早熟和极早熟品种低。由此可见,在热量资源有限的生态区,一味地延长品种熟期并不利于粒重增长。王晓慧等<sup>[18]</sup>研究认为,提高渐增期的灌浆速率,可以缩短渐增期库容建成时间,相对延长快增期和缓增期持续日数,从而增加玉米产量。本研究表明,中早熟品种在灌浆各个阶段的灌浆速率均高于中晚熟和极早熟品种,渐增期和快增期籽粒累积量也高于中晚熟和极早熟品种,缓增期籽粒累积量高于极早熟品种。由此说明,在哈尔滨这种热量资源有限的地区,中早熟品种比中晚熟和极早熟品种表现更多的灌浆优势,从而获得较高的产量。  
理论上,作物产量和生育期在一定范围内成正相关关系,适当延长生育期可增加光能利用时间,从而获得较高产量<sup>[18,23]</sup>。所以,长期以来,在生产上为了获得高产,越区种植中晚熟和晚熟品种在黑龙江省大部分地区很普遍。本研究表明,



在黑龙江省哈尔滨地区,3种熟期类型品种。在同等种植密度下,中晚熟和中早熟品种产量显著高于极早熟品种,但中晚熟和中早熟品种产量差异并不显著。已有研究也表明,东北地区玉米品种在130~140 d时间段对产量贡献不大,通过延长品种生育期来提高产量的潜力有限<sup>[18,24,25]</sup>。本研究表明,中早熟品种的最大灌浆速率、平均灌浆速率和达到最大灌浆速率时的粒重生长量都高于中晚熟品种。黑龙江省是全国农业机械化水平最高的省份,随着玉米全程机械化技术的推广,生产上需要熟期相对早,脱水快的品种。因此,在新的技术推动生产需求下,晚熟品种不宜再占主导地位,应以中早熟品种为主,既可充分利用当地热量资源,又可加速籽粒脱水利于机械化收获。本试验中的中早熟品种京农科728年际间产量变异系数只有3%,稳产性很好,且生理成熟后脱水速率快,是一个适于哈尔滨区域种植,且有利于实施机械化收获的高产品种。

### 参 考 文 献

- [1] 张海艳,董树亭,高荣岐.不同类型玉米籽粒灌浆特性分析[J].玉米科学,2007,15(3):67-70.  
Zhang H Y, Dong S T, Gao R Q. Analysis on kernel filling characteristics for different maize types [J]. J. Maize Sci., 2007, 15(3):67-70.
- [2] 王同朝,卫丽,马超,等.不同生态区夏玉米两类熟期品种籽粒灌浆动态和产量分析[J].玉米科学,2010,18(3):84-89.  
Wang T C, Wei L, Ma C, *et al.*. Dynamic process of grain-filling and yield factors analysis of late-matured and middle-matured varieties of summer maize after flowering [J]. J. Maize Sci., 2010, 18(3):84-89.
- [3] 刘霞,王庆成,刘开昌,等.粒重对氮素的响应及其与籽粒灌浆参数的相关与通径分析[J].玉米科学,2010,18(1):90-95.  
Liu X, Wang Q C, Liu K C, *et al.*. Response of grain weight to nitrogen and correlation and path analysis on grain filling parameters [J]. J. Maize Sci., 2010, 18(1):90-95.
- [4] 王荣焕,赵久然,陈传永,等.京单38不同播期籽粒灌浆特性研究[J].玉米科学,2013,21(6):59-63.  
Wang R H, Zhao J R, Chen C Y, *et al.*. Grain filling characters of maize hybrid Jingdan 38 [J]. J. Maize Sci., 2013, 21(6):59-63.
- [5] Muchow R C, Sinclair T R, Bennett J M. Temperature and solar radiation effects on potential maize yield across locations [J]. Agron. J., 1990, 82(2):338-343.
- [6] Lafitte H R, Edmeades G O. Improvement for tolerance to low soil nitrogen in tropical maize II. Grain yield, biomass production, and N accumulation [J]. Field Crop Res., 1994, 39(1):15-25.
- [7] Uhart S A, Andrade F H. Nitrogen and carbon accumulation and remobilization during grain filling in maize under different source/sink ratios [J]. Crop Sci., 1995, 35(1):183-190.
- [8] 李绍长,周锦瑶,盛茜,等.五种基因型玉米籽粒灌浆特性的研究[J].石河子大学学报(自然科学版),1997,1(3):190-193.  
Li S C, Zhou J Y, Sheng Q, *et al.*. Studies on the trait of grain filling in five genotypes maize kernel [J]. J. Shihezi Univ. (Nat. Sci.), 1997, 1(3):190-193.
- [9] 申丽霞,王璞,张红芳,等.施氮对夏玉米不同部位籽粒灌浆的影响[J].作物学报,2005,31(4):532-535.  
Shen L X, Wang P, Zhang H F, *et al.*. Effect of nitrogen supply on grain filling at different ear position in summer maize [J]. Acta Agron. Sin., 2005, 31(4):532-534.
- [10] 杨升辉,杨恒山,李洪杰,等.不同氮肥运筹下春玉米籽粒灌浆特性的分析[J].玉米科学,2014,22(1):91-95,102.  
Yang S H, Yang H S, Li H J, *et al.*. Analysis on kernel filling characteristics for spring maize in different nitrogen fertilizer strategies [J]. J. Maize Sci., 2014, 22(1):91-95.
- [11] 张倩,宋希云,姜雯.种植方式和密度对夏玉米籽粒灌浆特征的影响[J].玉米科学,2014,22(3):91-97.  
Zhang Q, Song X Y, Jiang W. Effect of different planting patterns and densities on kernel filling characteristics of summer maize [J]. J. Maize Sci., 2014, 22(3):91-97.
- [12] Johnson D R, Tanner L W. Calculation of the rate and duration of grain filling in corn (*Zea mays* L.) [J]. Crop Sci., 1972, 12(4):485-486.
- [13] 马冲,邹仁峰,苏波,等.不同熟期玉米籽粒灌浆特性的研究[J].作物研究,2000(4):17-19.  
Ma C, Zou R F, Su B, *et al.*. Studies on grain filling characteristics of hybrid corn with different growth durations [J]. Crop Res., 2000(4):17-19.
- [14] Allison J C S, Daynard T B. Effect of change in time of flowering induced by altering photoperiod or temperature, on attributes related to yield in maize [J]. Crop Sci., 1979, 19(1):1-4.
- [15] 白彩云,李少昆,柏军华,等.我国东北地区不同生态条件下玉米品种积温需求及利用特性[J].应用生态学报,2011,22(9):2337-2342.  
Bai C Y, Li S K, Bai J H, *et al.*. Characteristics of accumulated temperature demand and its utilization of maize under different ecological conditions in northeast China [J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2011, 22(9):2337-2342.
- [16] 戴明宏,赵久然,杨国航,等.不同生态区和不同品种玉米的源库关系及碳氮代谢[J].中国农业科学,2011,44(8):1585-1595.  
Dai M H, Zhao J R, Yang G H, *et al.*. Source-sink relationship and carbon-nitrogen metabolism of maize in different ecological regions and varieties [J]. Sci. Agric. Sin., 2011, 44(8):1585-1595.
- [17] 董桂芳,邓崇辉.不同熟期玉米品种产量与气象因素的统计学分析[J].吉林农业科学,1993(3):73-77.  
Dong G F, Deng C H. Analysis of correlation between yield and meteorological factors for different maturity hybrids of maize [J]. Jilin Agric. Sci., 1993(3):73-77.

- [18] 王晓慧, 张磊, 刘双利, 等. 不同熟期春玉米品种的籽粒灌浆特性[J]. 中国农业科学, 2014, 47(18): 3557-3565.  
Wang X H, Zhang L, Liu S L, *et al.* Grain filling characteristics of maize hybrids differing in maturities [J]. Sci. Agric. Sin., 2014, 47(18): 3557-3565.
- [19] 顾世梁, 朱庆森, 杨建昌, 等. 不同水稻材料籽粒灌浆特性的分析[J]. 作物学报, 2001, 27(1): 7-14.  
Gu S L, Zhu Q S, Yang J C, *et al.* Analysis on grain filling characteristics for different rice types [J]. Acta Agron. Sin., 2001, 27(1): 7-14.
- [20] 李绍长, 白萍, 吕新, 等. 不同生态区及播期对玉米籽粒灌浆的影响[J]. 作物学报, 2003, 29(5): 775-778.  
Li S C, Bai P, Lv X, *et al.* Ecological and sowing date effects on maize grain filling [J]. Acta Agron. Sin., 2003, 29(5): 775-778.
- [21] 李绍长, 陆嘉惠, 孟宝民, 等. 玉米籽粒胚乳细胞增殖与库容充实的关系[J]. 玉米科学, 2000, 8(4): 45-47.  
Li S C, Lu J H, Meng B M, *et al.* The relationship between endosperm cell differentiating and grain filling [J]. J. Maize Sci., 2000, 8(4): 45-47.
- [22] 张丽, 张吉旺, 樊昕, 等. 玉米籽粒比重与灌浆特性的关系[J]. 中国农业科学, 2015, 48(12): 2327-2334.  
Zhang L, Zhang J W, Fan X, *et al.* Study on correlation between specific gravity of maize grains and grain filling characteristics [J]. Sci. Agric. Sin., 2015, 48(12): 2327-2334.
- [23] 霍仕平, 晏庆九, 黄文章. 纬度和海拔对西南春玉米区中熟玉米品种生育期的效应[J]. 作物学报, 1995, 21(3): 380-384.  
Huo S P, Yan Q J, Huang W Z. Effects of latitude and altitude on growth period of middle maturity maize varieties in west-south area [J]. Acta Agron. Sin., 1995, 21(3): 380-384.
- [24] 冷志杰, 贝丽霞, 徐中儒, 等. 不同熟期大豆、玉米间作的产量产值数学模型的建立[J]. 吉林农业大学学报, 1998, 20(1): 16-19.  
Leng Z J, Bei L X, Xu Z R, *et al.* The mathematical models of yield and output value of intercrop corn and soybean [J]. J. Jilin Agric. Univ., 1998, 20(1): 16-19.
- [25] 史振声, 张世煌, 李凤海, 等. 辽宁中熟、中晚熟与晚熟玉米品种的产量性能比较与分析[J]. 玉米科学, 2008, 16(6): 6-10.  
Shi Z S, Zhang S H, Li F H, *et al.* Comparison and analysis on maize yield performance of mid-maturing, mid-late maturing and late-maturing varieties in Liaoning areas [J]. J. Maize Sci., 2008, 16(6): 6-10.

(责任编辑:李艳华,温小杰)