作物学报 ACTA AGRONOMICA SINICA 2021, 47(11): 2199–2207 http://zwxb.chinacrops.org/
ISSN 0496-3490; CN 11-1809/S; CODEN TSHPA9 E-mail: zwxb301@caas.cn

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2021.03049

适宜机械粒收玉米品种的熟期评价指标

李璐璐[1] 明 博[1] 初振东[2] 张万旭[2] 高 尚[1] 王浥州[1] 侯梁宇[1]
周先林[1] 谢瑞芝[1] 王克如[1] 侯 鹏[1] 李少昆[1,*]

[1] 中国农业科学院作物科学研究所 / 农业农村部作物生理生态重点实验室, 北京 100081; [2] 石河子大学农学院, 新疆石河子 832003

摘 要: 玉米收获期籽粒含水率偏高制约了机械粒收技术的应用, 选育和筛选快速脱水的品种是解决这一问题的关键, 然而我国尚缺乏评价籽粒脱水速率的指标。本研究于 2014—2018 年进行, 在不同产区调查了先玉 335 和郑单 958 的生育和脱水进程, 探讨玉米籽粒脱水速率的评价指标。结果表明, 播种–生理成熟积温、播种–25%含水率积温和生理成熟–25%含水率积温在品种之间均差异显著。其中播种–生理成熟积温先玉 335 和郑单 958 平均为 3039ºC d (2752~3249ºC d)和 3090ºC d (2750~3546ºC d), 差值 51ºC d, 变异系数为 4%和 6%。播种–25%含水率积温在这 2 个品种之间差异更大, 先玉 335 和郑单 958 平均为 3097ºC d (2920~3392ºC d)和 3309ºC d (2980~3613ºC d), 差值达 212ºC d, 变异系数为 4%和 5%。生理成熟–25%含水率积温先玉 335 和郑单 958 平均为 66ºC d (0~287ºC d)和 166ºC d (36~338ºC d), 变异系数为 131%和 54%。播种–25%含水率积温更能体现品种之间籽粒脱水速率, 可以作为现阶段机械粒收品种选育和筛选的熟期指标, 但是该指标在区域、年份和播期之间有一定差异, 在测量时建议统一田块和播种日期。本文提出用播种–25%含水率的积温作为评价籽粒脱水速率的熟期指标, 用于当前品种选育和筛选, 推动玉米机械粒收技术在国内的发展。

关键词: 玉米; 籽粒含水率; 脱水速率; 积温; 机械粒收

An growing-period indicator of maize cultivars for mechanical kernel harvest

LI Lu-Lu[1], MING Bo[1], CHU Zhen-Dong[2], ZHANG Wan-Xu[2], GAO Shang[1], WANG Yi-Zhou[1], HOU Liang-Yu[1], ZHOU Xian-Lin[1], XIE Rui-Zhi[1], WANG Ke-Ru[1], HOU Peng[1], and LI Shao-Kun[1,*]

[1] Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Crop Physiology and Ecology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China; [2] Agricultural College, Shihezi University, Shihezi 832003, Xinjiang, China

Abstract: The high kernel moisture of maize (*Zea mays* L.) at harvest stage limits the field-application of mechanical kernel harvesting. The breeding and selection of fast dry-down cultivars is the key to solve this problem. However, there is still a lack of such indicators for evaluating the kernel dry-down rate in China. To explore the indicators, the crop growth and the kernel dry-down of two cultivars, Xianyu 335 and Zhengdan 958, were investigated across various maize belts in China from 2014 to 2018. Between the two cultivars, there were significant varietal differences in thermal times (TT) at the stages of planting–maturity (P–M), planting–25% moisture (P–25%), and maturity–25% moisture (M–25%), respectively. The $TT_{P–M}$ on average were 3039°C d (2752–3249°C d) for Xianyu 335 and 3090°C d (2750–3546°C d) for Zhengdan 958, with a difference value of 51°C d, and the corresponding coefficient of variations (CV) of $TT_{P–M}$ were 4% and 6%, respectively. The $TT_{P–25\%}$ on average was 3097°C d (2920–3392°C d) for Xianyu 335 and 3309°C d (2980–3613°C d) for Zhengdan 958, with a larger difference value of 212°C d, while their CV were 4% and 5%. In several, the $TT_{M–25\%}$ for Xianyu 335 and Zhengdan 958 were 66°C d (0–287°C d) and 166°C d (36–338°C d) with the CV of 131% and 54%. On account of its better reflection of kernel dry-down rate among cul-

本研究由国家重点研发计划项目(2016YFD0300110), 国家自然科学基金项目(31971849), 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-02-25)和中国农业科学院农业科技创新工程项目资助。

This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFD0300110), the National Natural Science Foundation of China (31971849), the China Agriculture Research System (CARS-02-25), and the Agricultural Science and Technology Innovation Project of Chinese Academy of Agricultural Sciences.

* 通信作者(Corresponding author): 李少昆, E-mail: lishaokun@caas.cn, Tel: 010-82108891

第一作者联系方式: E-mail: lilulu19910818@163.com

Received (收稿日期): 2020-08-24; Accepted (接受日期): 2021-03-19; Published online (网络出版日期): 2021-04-06.

URL: https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20210406.1551.002.html

tivars, the $TT_{P-25\%}$ could be considered as the growing period indicator for the breeding and selection of cultivars fitting to present mechanical kernel harvesting. In addition, this indicator might vary with region, year, or planting date, the same field and year were recommended to ensure a consistent environmental condition for measuring it. Conclusively, a new indicator ($TT_{P-25\%}$) for breeding and selection of fast dry-down hybrids was proposed, which potentially prompting maize kernel harvesting in China.
Keywords: maize; kernel moisture; dry-down rate; thermal time; mechanical kernel harvest

籽粒含水率是一个重要的经济指标，收获期玉米籽粒含水率不仅影响机械粒收质量，还影响后续的晾晒、烘干和销售等环节。在欧美国家，收获期籽粒含水率通常低于 20% [1]，保障粒收作业顺利开展。在我国，收获期玉米籽粒含水率普遍偏高，制约了机械粒收技术的推广应用[2-5]，降低籽粒含水率成为当务之急。

选育籽粒快速脱水的品种是降低收获期含水率的重要举措，目前尚缺乏适宜的评价指标。在过去的几十年里，我国玉米育种始终以高产为目标，对籽粒脱水性状鲜有关注，晚熟高产品种被广泛种植，导致收获期籽粒含水率普遍偏高。由于主推品种生育期较长，在黄淮海夏玉米区，即使在“双晚”模式[6-9]指导下，也不能提供足够的时间给这些品种站秆脱水[10]。收获期过高的籽粒含水率成为影响机械粒收质量的主要因素，籽粒破碎率、杂质率和损失率均与含水率显著正相关[2,4-5,11-15]。过高的含水率增加了收获后的晾晒难度，也增加了烘干成本。因此，品种选育和筛选时应该将籽粒脱水纳入评价体系。以往产量是第一目标，品种的生育期常用于指导高产品种的选择，各地农民根据当地热量资源条件选择正好能生理成熟的品种，实现产量最大化。当前转变玉米生产方式，不仅要稳定产量，还要降低成本，提高生产效益，机械粒收是最为有效的技术途径。机械粒收需要品种在田间站秆脱水，降低到一定含水率后才能高质量的收获。农民选择品种时，如果仍然以生育期为参考，那么籽粒难以有充足的时间进行田间脱水，影响机械粒收技术的质量和应用推广。因此，需要建立一个适应当前收获技术要求的新的品种熟期描述指标。

近几年，各地玉米机收组品种审定时强调了收获期籽粒含水率，但是由于籽粒脱水受到各种气象因子影响，该指标并不能体现所审品种在其他生长环境下的脱水速率。考虑到积温常用来指示生育进程[16-20]，且温度是影响籽粒脱水的主要气象因素[21-22]，因此参考生育期的定义(播种至生理成熟的积温/天数)，本文建议将播种至某一含水率的积温作为评价品种脱水速率的熟期指标。当前破碎率高是机械粒收的主要问题，破碎率与籽粒含水率呈二次曲线关系，当含水率在 20%左右，破碎率最低；含水率在 15%~25%之间，破碎率可控制在 5%以内[14-15,23]。发达国家玉米机械粒收时籽粒含水率一般低于 20%，但在国内由于现阶段主推品种生育期长，收获期籽粒含水率高，在各个产区实现 20%的低含水率收获有一定难度，特别是在黄淮海夏玉米区难度更大。因此，建议用播种至 25%含水率的积温作为现阶段品种选育和筛选的指标。

本文调查了不同品种在不同生长环境下播种至 25%含水率的积温，探讨这一指标在不同环境条件下的变化情况，以及这一指标能否作为籽粒脱水速率的参考标准，为适合玉米机械粒收的品种选育和筛选提供指导。

1 材料与方法

1.1 试验设计

于 2014—2018 年，在京津冀早熟夏玉米区的北京(116°30'E, 39°95'N)、黄淮海夏玉米区的河南新乡(113°54'E, 35°18'N)、东北春玉米区的黑龙江大庆(124°52'E, 46°38'N)、西北春玉米区的新疆奇台农场(89°46'E, 43°50'N)和昌吉(87°80'E, 44°29'N)进行，其中新乡试验点在 2015—2016 年分别设置播期试验，奇台农场设置 4 个试验点，所选玉米品种为推广面积较大的郑单 958 和先玉 335。各个试验点的田间管理均与当地情况一致。

试验期间调查并记录品种的播种、吐丝、生理成熟和含水率降至 25%的日期(表 1)。生理成熟日期以果穗中部籽粒的黑层完全形成为依据[24]；含水率降至 25%的日期从动态数据中获取。吐丝后连续测定籽粒含水率，直至收获，取样间隔大约为 7 d。每次测定时取 5 个果穗，将果穗中部 100 粒手工脱下，随即称取鲜重，然后放置在 85℃的烘箱中，干燥 48 h，称取干重，计算籽粒含水率(%):

含水率(%) = (鲜重–干重)/鲜重×100

由于含水率的测定具有取样间隔，无法精准获取含水率降至 25%的日期，因此，将时间序列的含水率数据进行线性插值，以数值最接近 25%的一天

表 1　各试验点品种的播种、吐丝、生理成熟、25%含水率和取样结束日期(月/日)

Table 1　Dates of planting, silking, physiological maturity, 25% moisture content, and the last sampling at various experimental sites (month/day)

地点 Site	年份 Year	播种日期 Planting date	先玉 335 Xianyu 335			郑单 958 Zhengdan 958			取样结束日期 Last sampling date
			吐丝 Silking	生理成熟 Maturity	25%含水率 25% moisture	吐丝 Silking	生理成熟 Maturity	25%含水率 25% moisture	
北京	2014	6/1	7/27	9/24	9/26	8/1	9/27	10/12	11/2
Beijing	2017	6/18				8/10	10/20	11/2	11/22
	2018	5/15	7/10	9/3	9/13	7/12	9/11	9/25	10/22
	2018	6/7	8/3	10/13	10/7	7/31	10/10	10/17	10/22
河南新乡	2015	5/31	7/28	10/2	10/3	7/28	10/3	10/12	11/14
Xinxiang, Henan	2015	6/11	8/5	10/9	10/10	8/4	10/9	10/19	11/14
	2015	6/16	8/9	10/14	10/12	8/9	10/14	10/18	11/14
	2015	6/20	8/13	10/18	10/17	8/12	10/18	10/20	11/14
	2015	6/30	8/22	10/24	11/11	8/23	10/21	#	11/14
	2016	5/29	7/27	9/21	9/22	7/28	9/26	10/3	10/17
	2016	6/4	7/30	9/26	9/27	7/31	9/28	10/13	10/17
	2016	6/11	8/3	9/30	9/28	8/3	10/2	10/20	10/25
	2016	6/18	8/9	10/6	10/8	8/8	10/6	#	10/25
	2016	6/25	8/15	10/21	#	8/13	10/18	#	10/25
	2017	6/18	8/8	10/15	10/24	8/10	10/26	11/6	12/7
黑龙江大庆	2016	4/28	8/2	10/21	10/20	8/2	11/6	#	12/4
Daqing, Heilongjiang	2017	5/8	7/28	10/17	10/27	8/2	10/29	#	12/10
新疆昌吉	2017	5/5	7/8	9/12	9/27	7/12	9/15	9/23	10/11
Changji, Xinjiang	2018	5/1	7/13	9/10	9/11	7/17	10/8	10/13	10/15
新疆奇台农场 Qitai farm, Xinjiang									
一分厂 First farm	2016	4/18	7/12	9/24	9/20	7/17	9/21	#	10/8
二分厂 Second farm	2016	4/13				7/17	9/29	#	10/2
	2017	5/9	7/26	10/9	10/22	7/26	10/2	#	11/25
三分厂 Third farm	2017	5/7	7/25	10/9	11/4	7/24	10/9	#	11/24
108 团 108 Regiment	2017	4/23	7/11	9/14	9/18	7/13	9/23	10/3	11/10

#表示籽粒含水率在取样结束前未降至 25%。

represents that the moisture content of kernel has not dropped to 25% during sampling.

作为含水率降至 25%日期。按照各地的常规收获日期, 玉米籽粒含水率不能降至 25%, 为了确保籽粒有充足的时间在田间站秆脱水, 各个试验点的取样结束日期均不早于当地常规收获期。

各试验点的气象资料从气象数据共享服务网(http://www.nmic.cn/)下载。

1.2　积温的计算

计算各生育阶段的积温, 包括播种–吐丝、吐丝–生理成熟、生理成熟–25%含水率、播种–生理成熟和播种–25%含水率。计算公式为[25-26]:

$$TT_i = T_{mean} - T_{base}$$

$$TT = \sum TT_i$$

式中, TT_i 为第 i 天的积温(thermal time), T_{mean} 为日平均气温(daily mean temperature), T_{base} 为下限温度(base temperature), TT 为某一阶段的积温。玉米的下限温度报道中有 6~10℃ [16,27-29], 但是 0℃曾被用于灌浆期积温的计算[26,30-31], 且更适合用于籽粒灌浆和脱水阶段[19-20]。为了确定最优的 T_{base}, 参考前人的方法[20,27,32], 设置 T_{base} 从 0~10℃以 1℃为单位递增, 在此基础上计算新乡 2015—2017 年参试品种各个阶段的积温, 以最小变异系数(coefficient of variation, CV)对应的 T_{base} 作为该阶段的最优值。

1.3　数据处理

数据计算和绘图在 Microsoft Excel 2010 中完成, 箱线图用 Graphpad Prism 5.0 绘制, 配对法 t 检验(paired samples t-test)、相关分析(correlation analysis)

和通径分析(path analysis)在 SPSS Statistics 17.0 中进行。

2 结果与分析

2.1 各生育阶段下限温度的确定

新乡 2015—2017 年, 郑单 958 和先玉 335 各 11 组试验数据用于确定各个生育阶段的最佳下限温度(T_{base})。在 T_{base} 从 0℃增加至 10℃过程中, 播种至吐丝积温(Planting–Silking)的变异系数(CV)逐渐减小, 先玉 335 从 3.31%降至 2.92%, 郑单 958 从 4.83%降至 4.74% (图 1), 表明播种至吐丝阶段的积温计算应选择 10℃作为 T_{base}。而吐丝至生理成熟(Silking–Maturity)、播种至生理成熟(Planting–Maturity)和播种至 25%含水率(Planting–25% moisture)这 3 个阶段, CV 随着 T_{base} 的增加而增加, 2 个品种表现一致, 表明当涉及到籽粒灌浆和脱水过程时, 积温的计算应该选择 0℃作为 T_{base}。该结果应用于下文中不同阶段积温的计算。

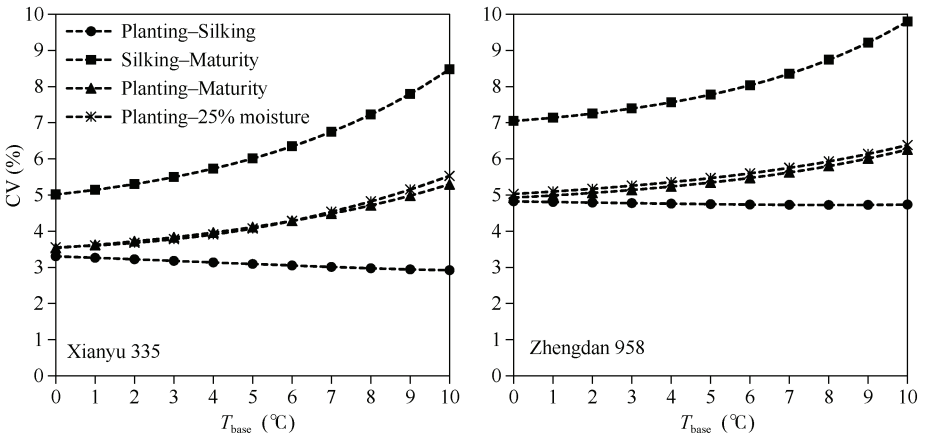


图 1 不同下限温度计算各生育阶段积温时变异系数的变化

Fig. 1 Coefficient of variation (CV) as a function of T_{base} when estimating thermal time duration

2.2 品种脱水差异评价指标

不同品种播种至生理成熟、播种至 25%含水率和生理成熟至 25%含水率的积温具有显著差异。图 2 中数据包括所有年份和地点, 配对法 t 检验显示先玉 335 和郑单 958 播种至生理成熟积温在 0.05 水平上差异显著, 先玉 335 平均为 3039°C d, 变幅为 2752~3249°C d, 变异系数为 4%; 郑单 958 平均为 3090°C d, 较先玉 335 高 51°C d, 变幅为 2750~3546°C d, 变异系数为 6%。播种至 25%含水率积温在这 2 个品种之间差异更大, 显著性水平为 0.001, 先玉 335 平均为 3097°C d, 变幅为 2920~3392°C d, 变异系数为 4%; 郑单 958 平均为 3309°C d, 较先玉 335 高 212°C d, 变幅为 2980~3613°C d, 变异系数为 5%。可见, 相较播种至生理成熟积温, 播种至 25%含水率积温更能体现品种之间籽粒脱水速率, 可以作为品种脱水差异的评价指标。

一般情况下, 生理成熟后仍需要一段时间至含水率降为 25%。如图 2 所示, 先玉 335 生理成熟至 25%含水率积温平均为 66°C d, 变幅为 0~287°C d, 郑单 958 平均为 166°C d, 变幅为 36~338°C d, 2 个品种在 0.01 水平上差异极显著, 但是二者的变异系数高达 131%和 54%。

综上, 播种至 25%含水率积温, 既能体现品种熟期长短, 又能代表品种脱水速率, 更适合作为机械粒收品种的评价指标。从播种至籽粒含水率降至 25%, 包括 3 个阶段: 播种至吐丝、吐丝至生理成熟和生理成熟至 25%含水率, 这 3 个阶段的积温(x_1、x_2 和 x_3)与播种至 25%含水率积温(y)的关系如表 2。简单相关分析显示 x_1、x_2 和 x_3 均与 y 显著或极显著正相关; 但是偏相关分析显示 x_1 与 y 相关不显著, 而 x_2 和 x_3 均与 y 极显著正相关; 通径分析剔除掉 x_1, 剩下的 x_2 和 x_3 对 y 的直接通径系数分别为 0.597 和 0.484, 间接通径系数分别为 0.028 和 0.035。以上结果表明, 影响播种至 25%含水率积温的因素主要是吐丝至生理成熟积温和生理成熟–25%含水率积温, 与播种至吐丝积温关系不大。

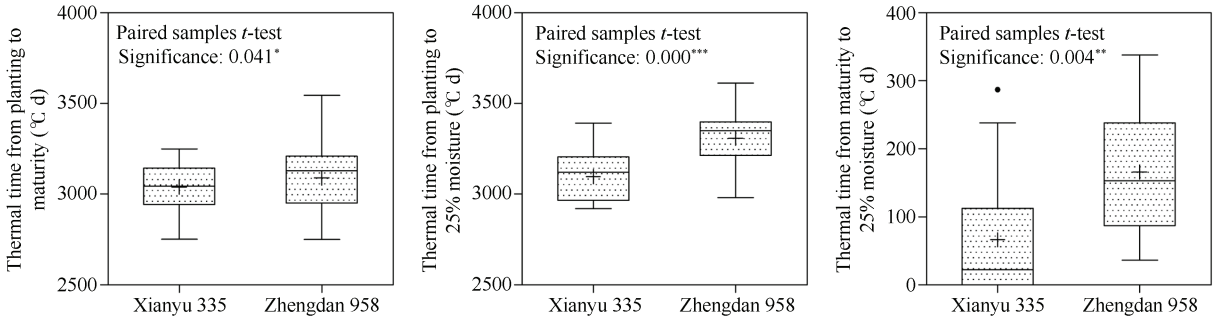


图 2　先玉 335 和郑单 958 播种至生理成熟、播种至 25%含水率和生理成熟至 25%含水率的积温

Fig. 2　Thermal times of the planting–maturity, the planting–25% moisture, and the maturity–25% moisture for hybrids Xianyu 335 and Zhengdan 958

*、**和***分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 水平差异显著; 箱形图中箱体部分代表 50%样本的分布区域, 即四分位区间(IQR)。两端线为 Tukey 法判定的合理观测样本边界。箱体中实线为样本中位数, •为异常值点, +为样本均值。

*, **, and *** indicate significantly different at the 0.05, 0.01, and 0.001 probability levels, respectively. The box represents the inter-quartile range (IQR), containing the middle 50% of samples in the Box-whisker plot (from the lower quartile to the upper quartile). The whiskers are drawn according to the Tukey method, extending to the data point that is the closest to 1.5 times the IQR below the lower quartile and above the upper quartile. The solid lines in the box denote the sample medians. • stands for outliers more than 1.5 times below or above the 1st or 3rd quartiles. + represents the sample mean.

表 2　播种至 25%含水率积温的影响因素

Table 2　Factors of the thermal time from planting to 25% moisture content

变量 Variable	简单相关系数 Correlation coefficient	偏相关系数 Partial correlation coefficient	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient
x_1	0.367*	0.264ns		
x_2	0.625**	0.657**	0.597	0.028
x_3	0.518**	0.627**	0.484	0.035

x_1、x_2 和 x_3 分别为播种至吐丝积温、吐丝至生理成熟积温和生理成熟至 25%含水率积温; *和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平差异显著; ns 表示没有显著差异。

x_1, x_2, and x_3 represent the thermal times of planting–silking, silking–maturity, and maturity–25% moisture, respectively. * and ** indicate significantly different at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively. ns indicates no significance at the 0.05 probability level.

2.3　播种至 25%含水率积温在不同环境条件下的变化

播种至 25%含水率积温在区域之间具有一定差异。如表 3 所示, 先玉 335 播种至 25%含水率积温在各个试验点之间变化范围为 2920~3285°C d, 极差为 365°C d; 吐丝至生理成熟积温在 1221~1634°C d 之间, 极差为 413°C d; 生理成熟至 25%含水率积温在 0~168°C d 之间, 极差为 168°C d; 其中, 这 3 个阶段积温的最大值和最小值均出现在奇台的不同试验点之间。郑单 958 在各个试验点均能实现生理成熟, 吐丝至生理成熟积温在 1244~1654°C d 之间, 极差为 410°C d; 但是籽粒含水率只能在北京、新乡、昌吉和奇台 108 团降至 25%, 在大庆、奇台一分厂、二分厂和三分厂试验测定结束之前均不能降至 25%。

表 3　各试验点吐丝至生理成熟、生理成熟至 25%含水率和播种至 25%含水率积温的差异

Table 3　Thermal time durations for the silking–maturity, the maturity–25% moisture, and the planting–25% moisture at each experimental sites (°C d)

品种 Hybrids	地点 Sites	吐丝至生理成熟 Silking–Maturity	生理成熟至 25%含水率 Maturity–25% moisture	播种至 25%含水率 Planting–25% moisture
先玉 335 Xianyu 335	北京 Beijing	1538	92	3110
	新乡 Xinxiang	1507	45	3043
	大庆 Daqing	1336	20	3188
	昌吉 Changji	1508	152	3267
	奇台 108 团 108 regiment, Qitai	1555	63	3285
	奇台一分厂 First farm, Qitai	1634	0	3124
	奇台二分厂 Second farm, Qitai	1283	90	3032
	奇台三分厂 Third farm, Qitai	1221	168	2920
	极差 Range	413	168	365

(续表 3)

品种 Hybrids	地点 Sites	吐丝至生理成熟 Silking–Maturity	生理成熟至 25%含水率 Maturity–25% moisture	播种至 25%含水率 Planting–25% moisture
郑单 958 Zhengdan 958	北京 Beijing	1561	191	3273
	新乡 Xinxiang	1533	173	3264
	大庆 Daqing	1311	#	#
	昌吉 Changji	1642	120	3479
	奇台 108 团 108 regiment, Qitai	1654	102	3475
	奇台一分厂 First farm, Qitai	1449	#	#
	奇台二分厂 Second farm, Qitai	1388	#	#
	奇台三分厂 Third farm, Qitai	1244	#	#
	极差 Range	410		

#表示籽粒含水率在结束测定前未降至 25%。

represents that the moisture content of kernel has not dropped to 25% during sampling.

播种至 25%含水率积温在年份之间也具有一定差异。如表 4 所示, 同一地点相近播期的不同年份之间, 先玉 335 播种至 25%含水率积温在昌吉 2017 年为 3392°C d, 2018 年为 3142°C d, 差值达到 250°C d, 主要是生理成熟至 25%含水率积温在年份之间差异较大; 郑单 958 播种至 25%含水率积温在昌吉 2017 年为 3346°C d, 2018 年为 3613°C d, 差值达到 267°C d, 主要是吐丝至生理成熟积温在年份之间差异较大。

表 4 不同年份吐丝至生理成熟、生理成熟至 **25%**含水率和播种至 **25%**含水率积温的差异

Table 4 Thermal time durations for the silking–maturity, the maturity–25% moisture, and the planting–25% moisture among years

品种 Hybrids	地点 Sites	播期 Planting dates	吐丝至生理成熟 Silking–maturity (°C d)	生理成熟至 25%含水率 Maturity–25% moisture (°C d)	播种至 25%含水率 Planting–25% moisture (°C d)
先玉 335 Xianyu 335	北京 Beijing	2014/6/1	1455	38	2976
		2018/6/7	1625	0	3127
	新疆昌吉 Changji, Xinjiang	2017/5/5	1570	287	3392
		2018/5/1	1445	18	3142
	河南新乡 Xinxiang, Henan	2015/6/11	1535	17	3049
		2016/6/11	1488	0	2946
郑单 958 Zhengdan 958	北京 Beijing	2014/6/1	1374	238	3234
		2018/6/7	1688	87	3255
	新疆昌吉 Changji, Xinjiang	2017/5/5	1524	173	3346
		2018/5/1	1761	66	3613
	河南新乡 Xinxiang, Henan	2015/6/11	1561	181	3213
		2016/6/11	1527	338	3357

播种至 25%含水率积温在播期之间表现不同。在新乡 2015 年和 2016 年的播期试验中(图 3), 随着播期的推迟, 播种至 25%含水率积温整体上呈下降趋势, 但是并不完全一致。其中, 先玉 335 在 2015 年最后一个播期积温明显上升, 郑单 958 在 2016 年前 3 个播期积温基本持平。此外播期过晚时, 籽粒含水率在试验期间未能降至 25%。

3 讨论

在我国收获期籽粒含水率偏高的问题限制了玉米机械粒收技术的推广应用, 选育和筛选籽粒脱水快的品种是解决这一问题的关键。本文提出用播种至 25%含水率的积温作为评价籽粒脱水速率的指标, 用于品种选育和筛选, 这对玉米机械粒收技术在国内的发展至关重要。

3.1 播种至 25%含水率积温评价籽粒脱水速率

播种至 25%含水率积温能够评价籽粒脱水速率, 为机械粒收品种的选育和筛选提供参考。众所周知, 同一播种日期和收获日期下先玉 335 籽粒含水率低于郑单 958, 籽粒脱水速率相对较快[33-34]。本文调查显示, 先玉 335 播种至 25%含水率积温显著低于郑单 958, 表明这一指标能够体现品种之间脱水差异。通

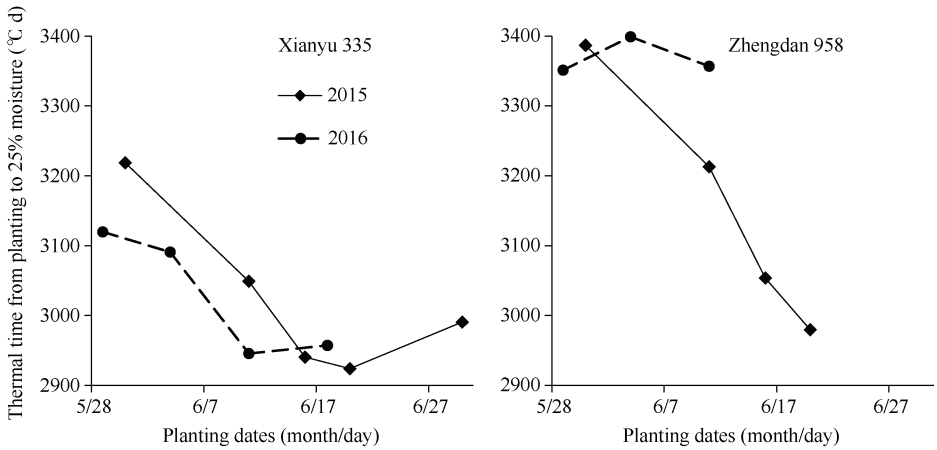


图 3　不同播期播种至 25%含水率积温

Fig. 3　Thermal times from planting to 25% moisture as a function of planting dates

常情况下, 玉米在成熟后需要在田间站秆一段时间, 籽粒含水率才能降至 25%, 本文也分析了生理成熟至 25%含水率的积温, 虽然这一指标也能体现品种差异, 但是其变异系数非常大, 且这一指标的计算需要先确定生理成熟期。虽然乳线和黑层在判断生理成熟期时非常便于观测, 但是黑层的形成有一定过程, Rench 和 Shaw[35]将其划分为 5 个阶段, 需要在田间连续观测才能准确把握黑层完全形成的日期, 且黑层的颜色在品种之间不尽相同, 黑层的形成过程容易受到环境条件影响[24,35-38]。前人报道的生理成熟期籽粒含水率在 15%~42%之间[24,35,39-41], 这一范围除了受品种和环境影响外, 与黑层的判断也有关。

与播种至 25%含水率积温相比, 生育期为人熟知并被广泛应用, 在审定公告上通常会注明该品种播种至生理成熟的天数或者积温。生育期在一定程度上也能够体现籽粒脱水速率, 熟期早的品种成熟后脱水时间更充足, 在收获时籽粒含水率相应较低。但是生育期相近的品种, 籽粒脱水速率可能差异较大, 此时并不能依据生育期长短来评判品种脱水速率; 而且可能存在生育期有差异但是籽粒脱水速率却相近的品种, 因此, 单纯依据生育期并不能很好地反映品种脱水特性。前人曾报道当籽粒含水率降至 35%左右时, 籽粒干重已达到最大, 不再增加[42-43]。由此可见, 在含水率降至 25%之前, 籽粒已经完成灌浆过程, 且脱水也进行了一段时间, 播种至 25%含水率积温既能体现品种熟期又能代表籽粒脱水速率, 建议将其作为评价指标, 应用于现阶段籽粒快速脱水的品种选育和筛选。

此外, 收获时籽粒含水率越低, 收获后的烘干、仓储成本越低, 但是随着玉米植株田间站秆脱水时间延长, 倒伏率升高[44], 制约了机械操作, 收获难度增大, 田间自然落穗损失和机收落穗损失均增加[15]。针对当前国内主栽玉米生育期偏长、收获期含水率高、机械粒收破碎率高的生产实际, 我们建议将 25%含水率作为现阶段机械粒收可以实施的收获标准, 将播种至 25%含水率积温作为适宜粒收品种的选育和筛选指标之一, 为机械粒收技术的推广应用奠定基础。机械粒收的最佳含水率应该综合考虑收获质量(包括破碎率、损失率和杂质率)、收获过程中的能耗和收获后籽粒烘干成本等指标, 实现生产效率和经济效益的最大化。发达国家玉米机械粒收时籽粒含水率大多在 20%以下, 我国通过品种选育、栽培技术进步等措施, 未来同样能够逐步实现 20%的低含水率收获, 甚至在含水率 15%时收获。

3.2　播种至 25%含水率积温受环境条件影响

播种至 25%含水率积温在区域、年份和播期之间均有一定差异。分析认为播种至 25%含水率积温主要与吐丝至生理成熟积温和生理成熟至 25%含水率积温有关, 涉及到籽粒灌浆和脱水 2 个过程, 温度、降水、相对湿度、风速等环境因素均影响这 2 个过程[21-22,45]。本文用积温来量化播种至 25%含水率的持续期长度, 虽然用积温衡量较用天数更准确[17,46], 但是温度不是驱动作物生长发育的唯一因素[17,27,47]。因此, 在测量品种播种至 25%含水率积温时, 建议统一田块和播种日期, 确保充足的肥水供应。

此外, 在新乡试验点的较晚播期下, 郑单 958 和先玉 335 的籽粒含水率未能降至 25%, 这与测试结束日期偏早有关, 该试验点进入 11 月份籽粒脱水缓慢, 但是仍能降至较低水平。在奇台和大庆试验点, 当测试日期分别延长至 11 月下旬和 12 月上旬

的时候, 郑单 958 的籽粒含水率仍然不能降至 25%, 这与当地低温、降雪等田间环境因素有关, 非常不利于晚熟品种脱水。

4 结论

本研究利用多年多点试验, 在不同产区调查了先玉 335 和郑单 958 的生育和脱水进程。结果表明, 先玉 335 和郑单 958 播种至生理成熟积温平均为 3039°C d 和 3090°C d, 播种至 25%含水率积温平均为 3097°C d 和 3309°C d, 生理成熟至 25%含水率积温平均为 66°C d 和 166°C d。这 3 个阶段的积温在品种之间均差异显著, 其中播种至 25%含水率积温差异最大, 更能体现品种之间籽粒脱水速率, 可以作为现阶段机械粒收品种选育和筛选的熟期指标, 但是该指标在不同环境条件下有一定差异, 在测量时建议统一田块和播种日期。

References

[1] 李少昆. 美国玉米生产技术特点与启示. 玉米科学, 2013, 21(3): 1–5.
Li S K. Characteristics and enlightenment of corn production technologies in the U.S. *J Maize Sci*, 2013, 21(3): 1–5 (in Chinese with English abstract).

[2] 谢瑞芝, 雷晓鹏, 王克如, 郭银巧, 柴宗文, 侯鹏, 李少昆. 黄淮海夏玉米籽粒机械收获研究初报. 作物杂志, 2014, (2): 76−79.
Xie R Z, Lei X P, Wang K R, Guo Y Q, Chai Z W, Hou P, Li S K. Research on corn mechanically harvesting grain quality in Huang-Huai-Hai Plain. *Crops*, 2014, (2): 76–79 (in Chinese with English abstract).

[3] 王克如, 李少昆. 玉米籽粒脱水速率影响因素分析. 中国农业科学, 2017, 50: 2027–2035.
Wang K R, Li S K. Analysis of influencing factors on kernel dehydration rate of maize hybrids. *Sci Agric Sin*, 2017, 50: 2027–2035 (in Chinese with English abstract).

[4] 王克如, 李少昆. 玉米机械粒收破碎率研究进展. 中国农业科学, 2017, 50: 2018–2026.
Wang K R, Li S K. Progresses in research on grain broken rate by mechanical grain harvesting. *Sci Agric Sin*, 2017, 50: 2018–2026 (in Chinese with English abstract).

[5] 李璐璐, 雷晓鹏, 谢瑞芝, 王克如, 侯鹏, 张凤路, 李少昆. 夏玉米机械粒收质量影响因素分析. 中国农业科学, 2017, 50: 2044–2051.
Li L L, Lei X P, Xie R Z, Wang K R, Hou P, Zhang F L, Li S K. Analysis of influential factors on mechanical grain harvest quality of summer maize. *Sci Agric Sin*, 2017, 50: 2044–2051 (in Chinese with English abstract).

[6] Sun H Y, Zhang X Y, Chen S Y, Pei D, Liu C M. Effects of harvest and sowing time on the performance of the rotation of winter wheat-summer maize in the North China Plain. *Ind Crops Prod*, 2007, 25: 239–247.

[7] 付雪丽, 张惠, 贾继增, 杜立丰, 付金东, 赵明. 冬小麦–夏玉米“双晚”种植模式的产量形成及资源效率研究. 作物学报, 2009, 35: 1708–1714.
Fu X L, Zhang H, Jia J Z, Du L F, Fu J D, Zhao M. Yield performance and resources use efficiency of winter wheat and summer maize in double late-cropping system. *Acta Agron Sin*, 2009, 35: 1708–1714 (in Chinese with English abstract).

[8] 刘月娥, 谢瑞芝, 张厚宝, 李少昆, 高世菊. 不同生态区玉米适时晚收增产效果. 中国农业科学, 2010, 43: 2820–2828.
Liu Y E, Xie R Z, Zhang H B, Li S K, Gao S J. Study on increasing rate of maize yield after putting off harvest time in different ecoregions. *Sci Agric Sin*, 2010, 43: 2820–2828 (in Chinese with English abstract).

[9] 徐彩龙. 华北地区冬小麦–夏玉米双晚模式的优化及其水肥高效调控. 中国农业大学博士学位论文, 北京, 2017.
Xu C L. Optimal Double-delay in Winter Wheat–summer Maize Double Cropping System in North China Plain and its Efficient Regulation of Water and Fertilizer. PhD Dissertation of China Agricultural University, Beijing, China, 2017 (in Chinese with English abstract).

[10] 任佰朝, 高飞, 魏玉君, 董树亭, 赵斌, 刘鹏, 张吉旺. 冬小麦–夏玉米周年生产条件下夏玉米的适宜熟期与积温需求特性. 作物学报, 2018, 44: 137–143.
Ren B Z, Gao F, Wei Y J, Dong S T, Zhao B, Liu P, Zhang J W. Suitable maturity period and accumulated temperature of summer maize in wheat–maize double cropping system. *Acta Agron Sin*, 2018, 44: 137–143 (in Chinese with English abstract).

[11] Jennings M V. Genotypic Variability in Grain Quality of Corn *Zea mays* L. PhD Dissertation of Iowa State University, Iowa, USA, 1974.

[12] Cloninger F D, Horrocks R D, Zuber M S. Effects of harvest date, plant density, and hybrid on corn grain quality. *Agron J*, 1975, 67: 693–695.

[13] Plett S. Corn kernel breakage as a function of grain moisture at harvest in a prairie environment. *Can J Plant Sci*, 1994, 74: 543–544.

[14] 柴宗文, 王克如, 郭银巧, 谢瑞芝, 李璐璐, 明博, 侯鹏, 刘朝巍, 初振东, 张万旭, 张国强, 刘广周, 李少昆. 玉米机械粒收质量现状及其与含水率的关系. 中国农业科学, 2017, 50: 2036–2043.
Chai Z W, Wang K R, Guo Y Q, Xie R Z, Li L L, Ming B, Hou P, Liu C W, Chu Z D, Zhang W X, Zhang G Q, Liu G Z, Li S K. Current status of maize mechanical grain harvesting and its relationship with grain moisture content. *Sci Agric Sin*, 2017, 50: 2036–2043 (in Chinese with English abstract).

[15] 李璐璐, 薛军, 谢瑞芝, 王克如, 明博, 侯鹏, 高尚, 李少昆. 夏玉米籽粒含水率对机械粒收质量的影响. 作物学报, 2018, 44: 1747–1754.
Li L L, Xue J, Xie R Z, Wang K R, Ming B, Hou P, Gao S, Li S K. Effects of grain moisture content on mechanical grain harvesting quality of summer maize. *Acta Agron Sin*, 2018, 44: 1747–1754 (in Chinese with English abstract).

[16] Cross H Z, Zuber M S. Prediction of flowering dates in maize based on different methods of estimating thermal units. *Agron J*, 1972, 64: 351–355.

[17] Russelle M P, Wilhelm W W, Olson R A, Power J F. Growth

analysis based on degree days. *Crop Sci*, 1984, 24: 28–32.

[18] Mcmaster G S, Wilhelm W W. Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agric For Meteorol*, 1997, 87: 291–300.

[19] Stewart D W, Dwyer L M, Carrigan L L. Phenological temperature response of maize. *Agron J*, 1998, 90: 73–79.

[20] Tsimba R, Edmeades G O, Millner J P, Kemp P D. The effect of planting date on maize: phenology, thermal time durations and growth rates in a cool temperate climate. *Field Crops Res*, 2013, 150: 145–155.

[21] Hallauer A R, Russell W A. Effects of selected weather factors on grain moisture reduction from silking to physiologic maturity in corn. *Agron J*, 1961, 53: 225–229.

[22] Schmidt J L, Hallauer A R. Estimating harvest date of corn in the field. *Crop Sci*, 1966, 6: 227–231.

[23] 李少昆, 王克如, 谢瑞芝, 李璐璐, 明博, 侯鹏, 初振东, 张万旭, 刘朝巍. 玉米子粒机械收获破碎率研究. 作物杂志, 2017, (2): 76–80.
Li S K, Wang K R, Xie R Z, Li L L, Ming B, Hou P, Chu Z D, Zhang W X, Liu C W. Grain breakage rate of maize by mechanical harvesting in china. *Crops*, 2017, (2): 76–80 (in Chinese with English abstract).

[24] Daynard T B. Relationships among black layer formation, grain moisture percentage, and heat unit accumulation in corn. *Agron J*, 1972, 64: 716–719.

[25] Baker D G. Effect of observation time on mean temperature estimation. *J Appl Meteorol*, 1975, 14: 471–476.

[26] Muchow R C. Effect of high temperature on grain-growth in field-grown maize. *Field Crops Res*, 1990, 23: 145–158.

[27] Bonhomme R, Derieux M, Edmeades G O. Flowering of diverse maize cultivars in relation to temperature and photoperiod in multilocation field trials. *Crop Sci*, 1994, 34: 156–164.

[28] Warrington I J, Kanemasu E T. Corn growth response to temperature and photoperiod I. seedling emergence, tassel initiation, and anthesis. *Agron J*, 1983, 75: 749–754.

[29] Hou P, Liu Y E, Xie R Z, Ming B, Ma D L, Li S K. Temporal and spatial variation in accumulated temperature requirements of maize. *Field Crops Res*, 2014, 158: 55–64.

[30] Borrás L, Westgate M E, Otegui M E. Control of kernel weight and kernel water relations by post-flowering source-sink ratio in maize. *Ann Bot*, 2003, 91: 857–867.

[31] Gambín B L, Borrás L, Otegui M E. Kernel water relations and duration of grain filling in maize temperate hybrids. *Field Crops Res*, 2007, 101: 1–9.

[32] Major D J, Brown D M, Bootsma A, Dupuis G, Fairey N A, Grant E A, Green D G, Hamilton R I, Langille J, Sonmor L G, Smeltzer G C, White R P. An evaluation of the corn heat unit system for the short-season growing regions across Canada. *Can J Plant Sci*, 1983, 63: 121–130.

[33] 李璐璐, 谢瑞芝, 范盼盼, 雷晓鹏, 王克如, 侯鹏, 李少昆. 郑单 958 与先玉 335 籽粒脱水特征研究. 玉米科学, 2016, 24(2): 57–61.
Li L L, Xie R Z, Fan P P, Lei X P, Wang K R, Hou P, Li S K. Study on dehydration in kernel between Zhengdan 958 and Xianyu 335. *J Maize Sci*, 2016, 24(2): 57–61 (in Chinese with English abstract).

[34] 秦营营, 董树亭. 夏玉米子粒乳线比例与含水量、粒重及营养物质积累的关系. 玉米科学, 2014, 22(2): 81–86.
Qin Y Y, Dong S T. Relationship among kernel milk line formation, water content, grain weight and nutrients accumulation of summer maize. *J Maize Sci*, 2014, 22(2): 81–86 (in Chinese with English abstract).

[35] Rench W E, Shaw R H. Black layer development in corn. *Agron J*, 1971, 63: 303–305.

[36] Afuakwa J J, Crookston R K. Using the kernel milk line to visually monitor grain maturity in maize. *Crop Sci*, 1984, 24: 687–691.

[37] Ma B L, Dwyer L M. Maize kernel moisture, carbon and nitrogen concentrations from silking to physiological maturity. *Can J Plant Sci*, 2001, 81: 225–232.

[38] Tollenaar M, Daynard T B. Effect of defoliation on kernel development in maize. *Can J Plant Sci*, 1978, 58: 207–212.

[39] Carter M W, Poneleit C G. Black layer maturity and filling period variation among inbred lines of corn (*Zea mays* L.). *Crop Sci*, 1973, 13: 436–439.

[40] Tremblay G J, Filion P, Tremblay M, Berard M, Durand J, Goulet J, Montpetit J M. Evolution of kernels moisture content and physiological maturity determination of corn (*Zea mays* L.). *Can J Plant Sci*, 2008, 88: 679–685.

[41] 李璐璐, 谢瑞芝, 王克如, 明博, 侯鹏, 李少昆. 黄淮海夏玉米生理成熟期子粒含水率研究. 作物杂志, 2017, (2): 88–92.
Li L L, Xie R Z, Wang K R, Ming B, Hou P, Li S K. Kernel moisture content of summer maize at physiological maturity stage in Huanghuaihai region. *Crops*, 2017, (2): 88–92 (in Chinese with English abstract).

[42] Borrás L, Westgate M E. Predicting maize kernel sink capacity early in development. *Field Crops Res*, 2006, 95: 223–233.

[43] Sala R G, Andrade F H, Westgate M E. Maize kernel moisture at physiological maturity as affected by the source-sink relationship during grain filling. *Crop Sci*, 2007, 47: 711–716.

[44] 薛军, 王群, 李璐璐, 张万旭, 谢瑞芝, 王克如, 明博, 侯鹏, 李少昆. 玉米生理成熟后倒伏变化及其影响因素. 作物学报, 2018, 44: 1782–1792.
Xue J, Wang Q, Li L L, Zhang W X, Xie R Z, Wang K R, Ming B, Hou P, Li S K. Changes of maize lodging after physiological maturity and its influencing factors. *Acta Agron Sin*, 2018, 44: 1782–1792 (in Chinese with English abstract).

[45] 高尚, 明博, 李璐璐, 谢瑞芝, 薛军, 侯鹏, 王克如, 李少昆. 黄淮海夏玉米籽粒脱水与气象因子的关系. 作物学报, 2018, 44: 1755–1763.
Gao S, Ming B, Li L L, Xie R Z, Xue J, Hou P, Wang K R, Li S K. Relationship between grain dehydration and meteorological factors in the Yellow-Huai-Hai rivers summer maize. *Acta Agron Sin*, 2018, 44: 1755–1763 (in Chinese with English abstract).

[46] Cutforth H W, Shaykewich C F. Relationship of development rates of corn from planting to silking to air and soil temperature and to accumulated thermal units in a prairie environment. *Can J Plant Sci*, 1989, 69: 121–132.

[47] Mcmaster G S, Smika D E. Estimation and evaluation of winter wheat phenology in the central Great Plains. *Agric For Meteorol*, 1988, 43: 1–18.