



梁星伟,叶清,王志伟,等.江西红壤旱地不同播期对玉米生长发育及产量的影响[J].江西农业大学学报,2024,46(5):1099–1108.

LIANG X W, YE Q, WANG Z W, et al. Influence of sowing dates on yield and growth of maize in red soil drought-prone areas of Jiangxi Province[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2024, 46(5): 1099–1108.

# 江西红壤旱地不同播期对玉米生长发育及产量的影响

梁星伟<sup>1</sup>, 叶清<sup>1</sup>, 王志伟<sup>2</sup>, 陈淑艳<sup>1</sup>, 黄海强<sup>1</sup>, 杨文亭<sup>1</sup>, 梁效贵<sup>1\*</sup>, 黄国勤<sup>1\*</sup>

(1. 江西农业大学 农学院/作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室/生态科学研究中心, 江西 南昌 330045; 2. 中国农业大学 农学院, 北京 100193)

**摘要:**【目的】旨在明确江西红壤旱地玉米栽培的适宜播种时期。【方法】以郑单958和先玉335为试验材料,于2021—2022年5—7月设置播期处理,研究了不同播期玉米产量及构成因素变化,以期为江西玉米高产栽培提供理论参考。【结果】播期调整显著影响玉米的生育进程、花前花后物质积累和最终产量。玉米产量以5月初播种为最高(5 529.99 kg/hm<sup>2</sup>),并随播期推迟整体呈下降趋势。穗粒数是随播期变化影响产量的主要因素。此外,粒重也受到播期调整的影响,且与最大灌浆速率时的粒重呈显著正相关。品种比较而言,郑单958产量整体高于先玉335。【结论】在不影响冬季作物(如油菜)的前提下,江西红壤旱地普通玉米应在品种选择的基础上,适时早播,时间不宜晚于5月上/中旬。

**关键词:**江西;红壤旱地;播期;玉米产量;籽粒灌浆;气象因素;干物质积累

中图分类号:S513 文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2286(2024)05-1099-10



## Influence of sowing dates on yield and growth of maize in red soil drought-prone areas of Jiangxi Province

LIANG Xingwei<sup>1</sup>, YE Qing<sup>1</sup>, WANG Zhiwei<sup>2</sup>, CHEN Shuyan<sup>1</sup>, HUANG Haiqiang<sup>1</sup>,  
YANG Wenting<sup>1</sup>, LIANG Xiaogui<sup>1\*</sup>, HUANG Guoqin<sup>1\*</sup>

(1. School of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Crop Physiology/Ecology and Genetic Breeding, Ministry of Education, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2. College of Agronomy, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to determine the suitable sowing date for the cultivation of ordinary maize in red soil dryland of Jiangxi Province. [Method] The experimental materials used in this study were

收稿日期:2024-03-05 修回日期:2024-06-26

基金项目:国家自然科学基金项目(32160445)

Project supported by National Natural Science Foundation of China(32160445)

**作者简介:**梁星伟,硕士生, orcid.org/0009-0007-8961-3186, liangxw1120@163.com; \*通信作者:梁效贵,副教授,主要从事作物栽培与生态生理研究, orcid.org/0000-0001-9530-862X, liangxg@jxau.edu.cn; 黄国勤,教授,博士生导师,主要从事耕作制度、农业生态、农业可持续发展等研究, orcid.org/0009-0004-3159-7644, hgq-mail441@sohu.com。

©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

Zhengdan 958 and Xianyu 335 maize varieties. The sowing date treatments were set between May and July in 2021 and 2022. The study investigated the changes of maize yield and its contributing factors under different sowing date. The aim of this study was to provide theoretical reference for high-yield maize cultivation in Jiangxi Province. **[Result]** The adjustment of the sowing date significantly impacted the growth process, pre- and post-silking material accumulation, and the final yield of maize. Planting maize in early May yielded the highest ( $5529.99 \text{ kg/hm}^2$ ), with a downward trend observed with delayed sowing dates. Ear grain number emerged as the primary factor influencing production with changes in sowing dates. Furthermore, grain weight was notably affected by adjustments in the sowing date and exhibited a significant positive correlation with grain weight during the maximum grain filling rate. In terms of hybrid comparison, Zhengdan 958 showed a higher overall yield than that of Xianyu 335. **[Conclusion]** In order to achieve a higher yield in common maize cultivation in the red soil dryland of Jiangxi, it is recommended to select suitable varieties and sow them before early/mid-May, while ensuring that it does not interfere with the cultivation of winter crops such as rapeseed.

**Keywords:** Jiangxi; red soil dryland; sowing date; maize yield; grain-filling; meteorological factors; dry matter accumulation

【研究意义】玉米作为我国第一大粮食作物,其高产稳产对于“新一轮千亿斤粮食产能提升行动”的实施意义重大<sup>[1]</sup>。南方(如江西)玉米受气候、土壤、农艺措施等因素的制约,单产普遍较低,提升潜力较大<sup>[2]</sup>。江西地区红壤旱地资源丰富<sup>[3]</sup>,随着种植业结构和产业结构的调整,近年来玉米种植面积不断扩大,但目前有关江西玉米高产高效栽培体系、理论与技术的研究尚较缺乏,极大限制了玉米生产和相关产业的发展。【前人研究进展】南方丘陵玉米区属于亚热带或热带气候,适合玉米生长发育的时间较长。因此,玉米播种期时间范围较宽,在江西地区一般4—7月均可播种。播期是影响作物生产最主要的栽培因素之一,适宜的播期是实现作物高产的必要条件<sup>[4]</sup>。气象条件是限制玉米生长发育的关键因子<sup>[5]</sup>,不同播期的玉米生长发育期间光、温、水条件存在明显差异,显著影响玉米的生育进程。有研究<sup>[6]</sup>表明随播期延迟,春玉米的生育期缩短,播期每推迟7.0 d,生育期平均缩短3.9 d,这可能与日平均气温升高有关。彭丹丹等<sup>[7]</sup>研究发现,播期每推迟10 d,总生育天数平均缩短5.2 d,适当早播则生育期相对延长,有利于积温的增加和更多的干物质积累。不同播期也会影响玉米的光合性能及干物质积累等<sup>[8]</sup>,例如,玉米吐丝前、后干物质积累和再转运均受播期显著影响<sup>[9]</sup>。最后,播期调整通过上述因素影响产量。陈静等<sup>[10]</sup>研究表明不同玉米品种产量与有效积温呈正相关,且与吐丝至生理成熟期间的有效积温的关系更密切。在相同收获密度下,产量高低决定于穗粒数和粒重。有研究认为,播期调整主要通过影响粒数影响产量,但也有学者认为粒重的影响更加关键<sup>[11-13]</sup>。

【本研究切入点】前人围绕不同地区不同播期条件下玉米干物质生产及产量的影响进行了大量研究,然而,针对江西地区乃至南方丘陵山地玉米生产中,播期调整下的玉米产量及产量构成要素变化研究仍鲜见报道。【拟解决的关键问题】本研究进行了2年的大田试验,针对江西轮作制度,尤其是冬种作物(如油菜)模式下,设置不同播期处理,对玉米产量及生长发育进行调查。本研究旨在探究不同播期下光、温、水资源的改变对玉米产量的影响,明确江西红壤旱地普通玉米品种的适宜播期,以期对南方玉米区的单产提升提供理论和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于2021—2022年在江西省南昌市江西农业大学科技园( $28^{\circ}45'N$ ,  $115^{\circ}50'E$ )开展,试验地土壤类型为红壤土,酸性强,土壤质地为黏质壤。试验地基础地力:pH值4.56,有机质24.65 g/kg、全氮1.3 g/kg、碱解氮183.20 mg/kg、有效磷23.87 mg/kg和速效钾102.05 mg/kg。

### 1.2 试验设计

试验选用全国推广面积较大,抗逆性较好的商业化杂交品种郑单958和先玉335。江西红壤旱地冬季作物种植较为普遍,尤其是冬种油菜,一般在每年4月中下旬至5月间收获。因此,本试验于油菜收

获后的5—7月共计设置4个不同播期,每个播期间隔15 d左右。根据降雨情况,2021年实际播种日期为5月9日(SD<sub>1</sub>)、5月24日(SD<sub>2</sub>)、6月8日(SD<sub>3</sub>)和6月23日(SD<sub>4</sub>),2022年实际播种日期为5月12日(SD<sub>1</sub>)、5月30日(SD<sub>2</sub>)、6月14日(SD<sub>3</sub>)和7月1日(SD<sub>4</sub>)。每个处理3次重复,共计12个小区,小区面积为20 m<sup>2</sup>(4 m×5 m),小区间走道宽为1 m。采用人工点播方式,行距60 cm,株距24.7 cm,密度为67 500株/hm<sup>2</sup>,生育期内病虫害及其他管理同常规大田。

### 1.3 测定项目与方法

#### 1.3.1 气象数据收集

本研究使用2013—2022年的降雨量和月平均气温数据,气象站点位于江西省南昌市新建区。试验期间的逐日降雨和温度数据由设于江西农业大学科技园内的气象站记录获取。

#### 1.3.2 干物质积累

于吐丝期、成熟期进行取样,每个小区取3株具有代表性的植株,按器官分离,在105℃烘箱中杀青30 min后,65℃烘干至恒重后测定干物重。

$$\text{花前干物重占比} = (\text{吐丝期总生物量} + \text{成熟期总生物量}) / \text{吐丝期总生物量} \quad (1)$$

$$\text{花后干物重占比} = (\text{吐丝期总生物量} + \text{成熟期总生物量}) / \text{成熟期总生物量} \quad (2)$$

$$\text{果穗分配占比} = \text{成熟期果穗重} / \text{成熟期总生物量} \quad (3)$$

#### 1.3.3 籽粒灌浆

玉米播种后及时观察记录吐丝期和生理成熟期的时间。以吐丝长2 cm,同个处理下出现50%的吐丝植株的日期记录为吐丝期,生理成熟期以果穗中下部籽粒乳线消失,黑层出现的日期为准。自授粉后10 d开始取样,间隔10 d取样1次,直至达到生理成熟期。每次从各小区取代表性果穗1穗,取果穗中部籽粒100粒,于65℃烘干48 h,称取百粒干重。以授粉后天数( $t$ )为自变量、百粒质量为因变量( $W$ ),参照朱庆森等<sup>[4]</sup>的方法,利用logistics方程 $W=A(1+Be^{-kx})^{-1}$ 模拟籽粒灌浆过程并计算灌浆参数,公式如下:

$$W=A(1+Be^{-kx})^{-1} \quad (4)$$

$$F=ACBe^{-Ct}[(1+Be^{-Ct})^{(D+1)/D}]^{-1} \quad (5)$$

$$G_{\text{ave}}=AC(2D+4)^{-1} \quad (6)$$

$$P=2(D+2)C^{-1} \quad (7)$$

$$D_{\text{max}}=(\ln B - \ln D)C^{-1} \quad (8)$$

$$W_{\text{max}}=A(D+1)^{-1/D} \quad (9)$$

$$G_{\text{max}}=(CW_{\text{max}}D)^{-1}[1-(W_{\text{max}}A^{-1})D] \quad (10)$$

式(4)~(10)中: $W$ 为粒重(g); $t$ 为授粉后天数(d); $F$ 为灌浆速率(g/d); $A$ 为终极生长量(g), $B$ 、 $C$ 、 $D$ 为回归方程所确定的参数(其中 $B$ 为初值参数, $C$ 为生长速率参数, $D$ 为形状参数),当 $D=1$ 时,即为Logistics方程; $G_{\text{ave}}$ 为平均灌浆速率(g/d); $P$ 为灌浆活跃期(约完成总积累量的90%,d); $D_{\text{max}}$ 为灌浆速率达到最大时的天数(d); $W_{\text{max}}$ 为灌浆速率达到最值的粒重(g); $G_{\text{max}}$ 为最大灌浆速率(g/d)。

#### 1.3.4 产量测定

每个小区取代表性果穗20~40穗,称量,计算平均单穗重后,从中选择较均匀的5~10穗,测定穗长、穗粗、秃尖长、穗行数、行粒数、百粒质量。果穗脱粒后分别称量穗轴重和籽粒重,计算产量。

### 1.4 统计与分析

采用Excel 2019进行数据标准化处理,SPSS Statistics 20进行方差分析,处理间差异显著性用LSD法进行检验( $P<0.05$ ),利用Origin 2021进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 试验所在地2021—2022年玉米种植期间气象数据变化情况

近10年试验所在地平均月均温和降雨量如图1所示,1—6月的降雨量逐月增加,峰值为333.65 mm,之后气温逐月走低,在10月份降至最低值,为31.73 mm。在气温方面,所统计的10年间降雨量月均值呈单峰状正偏态分布,在8月份达到温度最大值,为30.30℃。近2年试验所在地玉米种植期间的逐日降雨及温度如图2、图3所示,类似的,在3—7月降雨较多且集中,而9—11月间降雨明显减少。不同的是,

2021年与2022年在8—9月份的降雨以及温度情况有明显变化。其中,2021年8月降水量达423.4 mm,占到了全年降水量的24.38%,而22年8月降水量仅为0.29%,且2022年9月份降雨量几乎为零,表明2022年干旱问题较为严重。温度方面,近2年的最高温均出现在7月末,与图1所示的近10年的规律相符。同时,近2年的日均温在8—9月均维持在25~35℃,但2022年8—9月平均温度达到了30.37℃,超过35℃的极端温度天数达到了35 d,占全年极端高温天气的53.85%(图2、图3)。综合来看,试验地8—9月出现的干旱以及高温情况会严重影响玉米在各生育时期的发育,进而导致产量的差异。

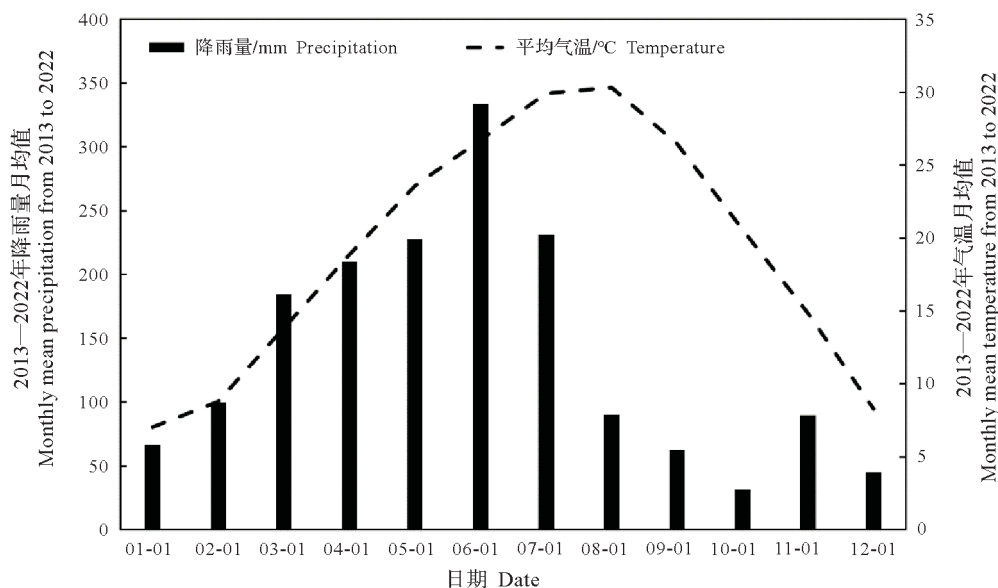
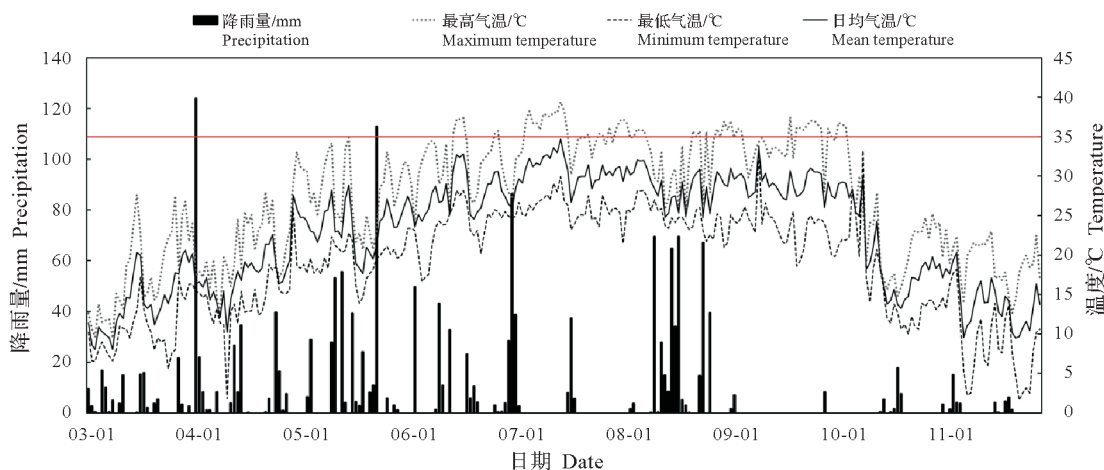


图1 2013—2022年研究区月降雨量和月均温的变化情况

Fig.1 The average changes in monthly precipitation and temperature in the study area from 2013 to 2022



图中红线表示温度为35℃。

The red line in the figure indicates a temperature of 35 °C.

图2 试验期间温度和降雨量的变化(2021)

Fig.2 Climate data for temperature and precipitation during the experimental period in 2021

## 2.2 播期对产量及穗部性状的影响

播期显著影响玉米产量和穗部性状(表1),整体上,随着播期的推迟,产量显著降低,其中SD<sub>1</sub>的产量最高,达到5 529.99 kg/hm<sup>2</sup>,造成上述现象的原因主要是穗粒数随着播期的推迟而显著下降,SD<sub>4</sub>的百粒质量显著高于其他播期。与SD<sub>2</sub>和SD<sub>3</sub>相比,SD<sub>1</sub>和SD<sub>4</sub>玉米穗长均减少,播期对穗粗影响不大。

品种间分析表明,郑单958的产量显著高于先玉335的产量,其中2022年SD<sub>2</sub>的产量和穗粒数出现显著差异,产量由5 606.87 kg/hm<sup>2</sup>降至2 121.23 kg/hm<sup>2</sup>,降低幅度为62.17%,穗粒数由392.6粒降至191.1粒,降低幅度为51.32%。



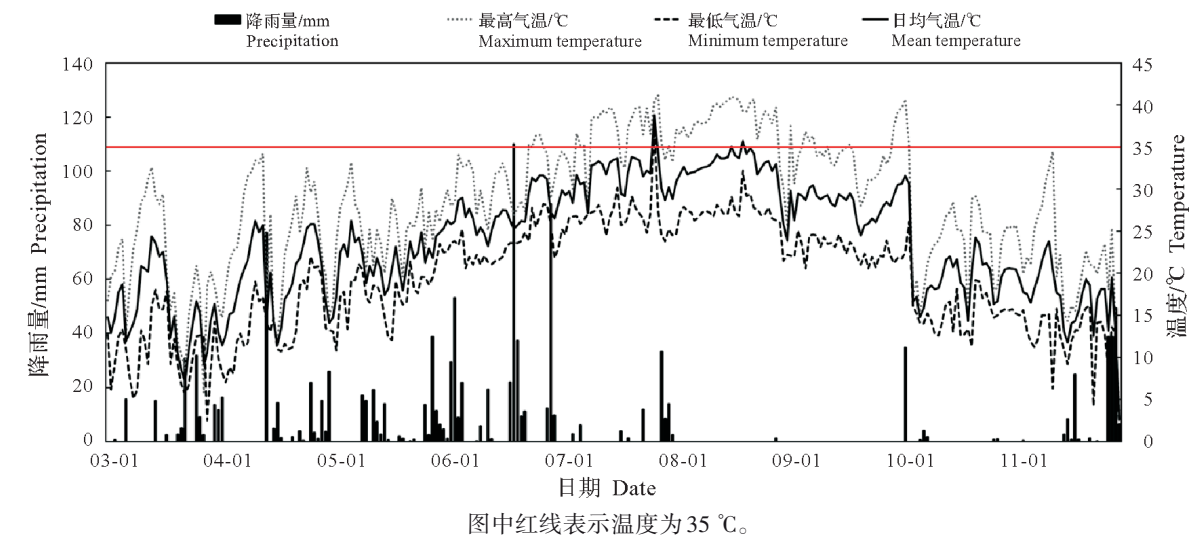


图 3 试验期间温度和降雨量的变化(2022)

Fig.3 Climate data for temperature and precipitation during the experimental period in 2022

表 1 播期对江西红壤普通玉米穗部性状及产量的影响

Tab.1 The effects of sowing date on ear traits and yield of ordinary maize in Jiangxi red soil

| 年份<br>Year | 品种<br>Hybirds | 播期<br>Sowing date | 穗粒数/粒<br>Grain number<br>per ear | 百粒质量/g<br>100-grains<br>weight | 穗长/cm<br>Ear<br>length | 穗粗/mm<br>Ear<br>diameter | 秃尖长/cm<br>Barren tip<br>length | 产量/<br>(kg·hm <sup>-2</sup> )<br>Yield |
|------------|---------------|-------------------|----------------------------------|--------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------------|----------------------------------------|
| 2021       | 郑单 958        | SD <sub>1</sub>   | 410.9 a                          | 23.18 c                        | 15.86 ab               | 44.99 a                  | 0.99 b                         | 5 529.99 a                             |
|            |               | SD <sub>2</sub>   | 278.0 c                          | 27.03 ab                       | 17.12 a                | 41.61 a                  | 1.58 a                         | 4 363.35 c                             |
|            |               | SD <sub>3</sub>   | 344.6 b                          | 25.76 b                        | 14.76 b                | 41.51 a                  | 0.84 b                         | 5 153.74 b                             |
|            |               | SD <sub>4</sub>   | 137.6 d                          | 27.57 a                        | 12.38 c                | 36.39 b                  | 1.42 ab                        | 2 202.79 d                             |
|            | 先玉 335        | SD <sub>1</sub>   |                                  |                                |                        |                          |                                |                                        |
|            |               | SD <sub>2</sub>   | 249.2 a                          | 27.19 b                        | 14.37 a                | 40.49 a                  | 1.06 b                         | 3 934.05 a                             |
|            |               | SD <sub>3</sub>   | 250.7 a                          | 28.50 ab                       | 15.99 a                | 38.93 a                  | 1.12 b                         | 4 147.61 a                             |
|            |               | SD <sub>4</sub>   | 104.0 b                          | 29.99 a                        | 14.65 a                | 30.50 b                  | 1.79 a                         | 1 811.13 b                             |
| 2022       | 郑单 958        | SD <sub>1</sub>   | 330.9 b                          | 18.73 b                        | 15.77 b                | 40.15 a                  | 1.65 ab                        | 3 597.83 b                             |
|            |               | SD <sub>2</sub>   | 392.6 a                          | 24.60 a                        | 18.13 a                | 44.49 b                  | 1.44 ab                        | 5 606.87 a                             |
|            |               | SD <sub>3</sub>   | 314.6 b                          | 18.65 b                        | 16.05 b                | 38.11 b                  | 2.03 a                         | 3 406.48 c                             |
|            |               | SD <sub>4</sub>   | 67.3 c                           | 23.67 a                        | 15.98 b                | 31.09 c                  | 1.10 b                         | 924.01 d                               |
|            | 先玉 335        | SD <sub>1</sub>   | 264.0 a                          | 19.74 c                        | 18.54 ab               | 35.69 a                  | 1.44 a                         | 3 025.37 b                             |
|            |               | SD <sub>2</sub>   | 191.1 b                          | 19.12 c                        | 17.17 b                | 33.93 a                  | 1.35 a                         | 2 121.23 c                             |
|            |               | SD <sub>3</sub>   | 45.5 b                           | 25.12 b                        | 15.19 c                | 30.42 b                  | 1.06 a                         | 663.44 d                               |
|            |               | SD <sub>4</sub>   | 182.5 c                          | 31.63 a                        | 19.96 a                | 35.45 a                  | 1.25 a                         | 3 350.85 a                             |

图中不同字母代表处理间差异显著( $P<0.05$ ),SD<sub>1</sub>、SD<sub>2</sub>、SD<sub>3</sub>、SD<sub>4</sub>分别代表第1~4个播期。

The different letters are significantly different among the different treatments at the 0.05 probability level,SD<sub>1</sub>,SD<sub>2</sub>,SD<sub>3</sub>,SD<sub>4</sub>, are sowing dates from first to fourth.

2.3 播期对玉米吐丝期和成熟期各器官干物质积累的影响

玉米干物质积累量是籽粒产量形成的物质基础<sup>[3]</sup>。由表 2 可知,早播有利于增加成熟期干物质积累,晚播成熟期干物质积累量减少。整体上,随着播期的推迟,花前干物重占比增加而花后干物重

占比降低,且在SD<sub>4</sub>时达到显著差异。2年试验中,SD<sub>2</sub>的平均成熟期干物质积累比吐丝期干物质积累提高50.98%。玉米成熟期干物质分配表现由多到少依次为:果穗、茎秆和叶,随播期的推迟果穗占比呈逐渐减少的趋势。不同品种间,郑单958花前干物重占比小于先玉335,花后干物重占比则相反。

表2 播期对普通玉米各器官干物质积累量的影响

Tab.2 The effects of sowing date on dry matter accumulation in various organs of ordinary maize

| 年份<br>Year | 品种<br>Hybirds | 播期<br>Sowing date | 吐丝期                     | 成熟期            |              |             |                         | 花前干物重                               | 花后干物重                              | 果穗分配                           |
|------------|---------------|-------------------|-------------------------|----------------|--------------|-------------|-------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
|            |               |                   | Silking stage           | Maturity stage |              |             |                         | 占比                                  | 占比                                 | 占比                             |
|            |               |                   | 总生物量/g<br>Total biomass | 叶/g<br>Leaf    | 茎秆/g<br>Stem | 果穗/g<br>Ear | 总生物量/g<br>Total biomass | Dry weight ratio at flowering stage | Dry weight ratio at maturity stage | Proportion of ear distribution |
| 2022年      | 郑单958         | SD <sub>1</sub>   | 51.16 b                 | 25.14 b        | 43.56 b      | 54.61 ab    | 123.30 b                | 29.33% b                            | 70.67% a                           | 44.29% ab                      |
|            |               | SD <sub>2</sub>   | 64.70 b                 | 40.52 a        | 65.53 a      | 72.81 a     | 178.86 a                | 26.56% b                            | 73.44% a                           | 40.71% ab                      |
|            |               | SD <sub>3</sub>   | 62.25 b                 | 30.26 ab       | 50.54 ab     | 74.34 a     | 155.14 ab               | 28.64% b                            | 71.36% a                           | 47.92% a                       |
|            |               | SD <sub>4</sub>   | 112.65 a                | 31.85 ab       | 52.23 ab     | 41.66 b     | 125.74 b                | 47.25% a                            | 52.75% b                           | 33.13% b                       |
|            | 先玉335         | SD <sub>1</sub>   | 79.24 a                 | 28.58 a        | 44.61 a      | 47.84 b     | 121.03 b                | 39.57% a                            | 60.43% a                           | 39.53% ab                      |
|            |               | SD <sub>2</sub>   | 85.58 a                 | 39.53 a        | 52.26 a      | 40.81 b     | 132.60 b                | 39.23% a                            | 60.77% a                           | 30.78% b                       |
|            |               | SD <sub>3</sub>   | 81.01 a                 | 36.33 a        | 58.50 a      | 36.02 b     | 130.85 b                | 38.24% a                            | 61.76% a                           | 27.52% b                       |
|            |               | SD <sub>4</sub>   | 80.22 a                 | 39.27 a        | 49.60 a      | 85.97 a     | 174.84 a                | 31.45% b                            | 68.55% a                           | 49.17% a                       |

图中不同字母代表处理间差异显著( $P<0.05$ ),SD<sub>1</sub>、SD<sub>2</sub>、SD<sub>3</sub>、SD<sub>4</sub>分别代表第1~4个播期。

The different letters are significantly different among the different treatments at the 0.05 probability level,SD<sub>1</sub>,SD<sub>2</sub>,SD<sub>3</sub>,SD<sub>4</sub>, are sowing dates from first to fourth.

图4揭示了多种因素与玉米产量的关系。本研究结果表明,吐丝期总生物量与产量呈现负相关关系,而成熟期总生物量与产量呈现正相关关系。玉米穗粒数的变化对产量具有显著的影响,产量随粒数的增加而增加,而产量与百粒质量间无显著相关性,说明穗粒数变化是决定不同播期下玉米产量的关键。穗行数和行粒数与玉米产量均呈正相关性,但仅行粒数与产量的相关性达到显著水平,说明行粒数的降低是推迟播期降低产量的主导因素。

## 2.4 籽粒灌浆动态及灌浆参数

籽粒灌浆过程符合慢-快-慢的“S”形生长曲线(图5A,B)。不同品种的籽粒干物质积累略有差异,郑单958在吐丝后10 d进入灌浆中期,籽粒灌浆开始呈现线性增长,干物质积累迅速,吐丝后30 d线性灌浆结束籽粒干物质积累逐渐减缓,到生理成熟时粒重达最大值,从大到小依次是SD<sub>4</sub>、SD<sub>2</sub>、SD<sub>1</sub>、SD<sub>3</sub>。先玉335在吐丝后10 d进入灌浆中期,籽粒灌浆开始呈现线性增长,干物质积累迅速,吐丝后40 d线性灌浆结束籽粒干物质积累逐渐减缓,到生理成熟时粒重达最大值,从大到小依次是SD<sub>4</sub>、SD<sub>2</sub>、SD<sub>3</sub>、SD<sub>1</sub>,整体上,先玉335的峰值高于郑单958。两个品种籽粒灌浆速率均呈单峰曲线变化且第4播期的峰值都显著高于其他播期,不同品种的各播期达到灌浆峰值后,郑单958的SD<sub>1</sub>灌浆速率下降最慢,而先玉335是SD<sub>3</sub>灌浆速率下降最慢,两个品种的SD<sub>2</sub>次之,SD<sub>4</sub>灌浆速率下降最快(图5C,D)。

以吐丝后天数( $X$ )为自变量,对应时间点的百粒质量( $W$ )为因变量,运用logistics方程分别对不同播期下籽粒的灌浆过程进行模拟,拟合系数 $R^2$ 为0.917 1~0.999 9,说明该方程能较好的模拟籽粒灌浆过程(表3)。籽粒平均灌浆速率( $G_{ave}$ )、最大灌浆速率( $G_{max}$ )在郑单958品种上体现的是随播期推迟呈升高趋势,整体上先玉335呈降低趋势,平均灌浆速率的粒重范围为0.50~1.15 g/(100 grains),灌浆速率达最大值的粒重范围为0.75~1.72 g/(100 grains),均在SD<sub>1</sub>处理达最小值。相关性分析表明,玉米最终粒重与 $W_{max}$ 呈显著正相关( $P<0.01$ ),两品种的相关系数分别为0.78和0.88。

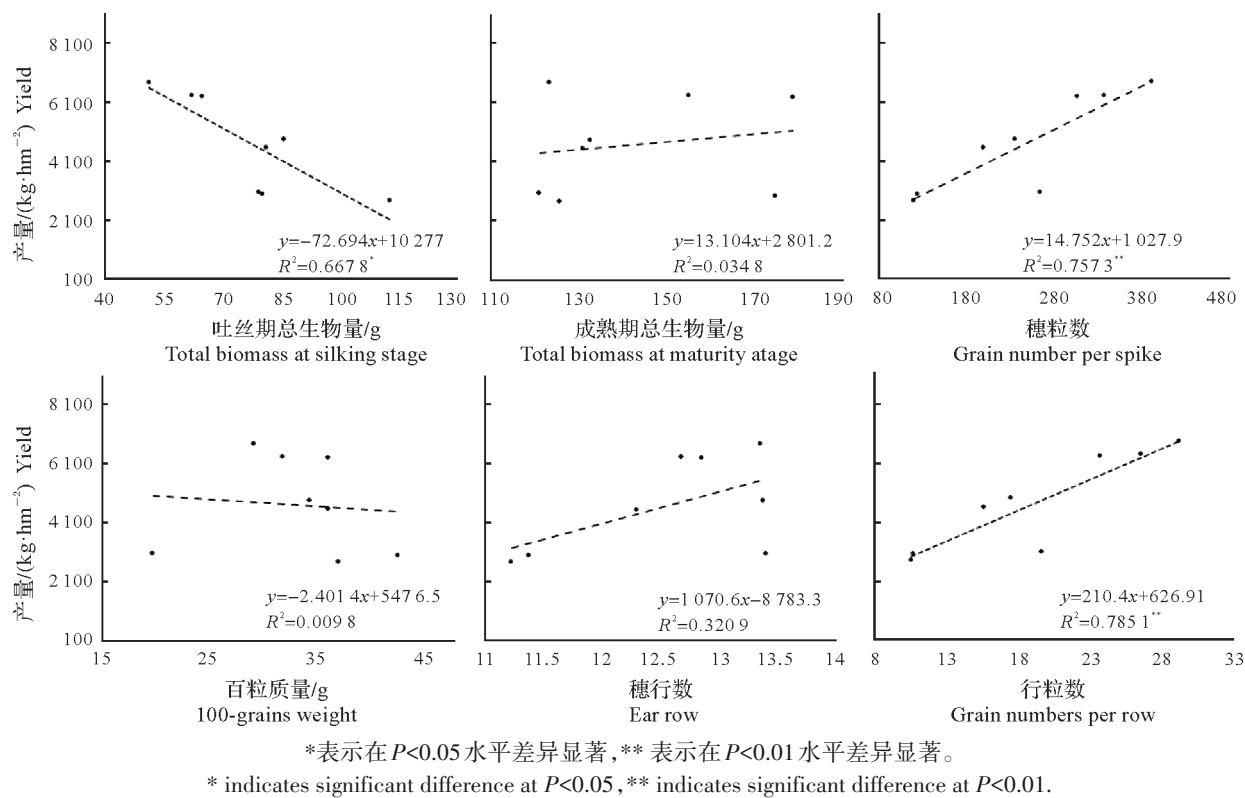
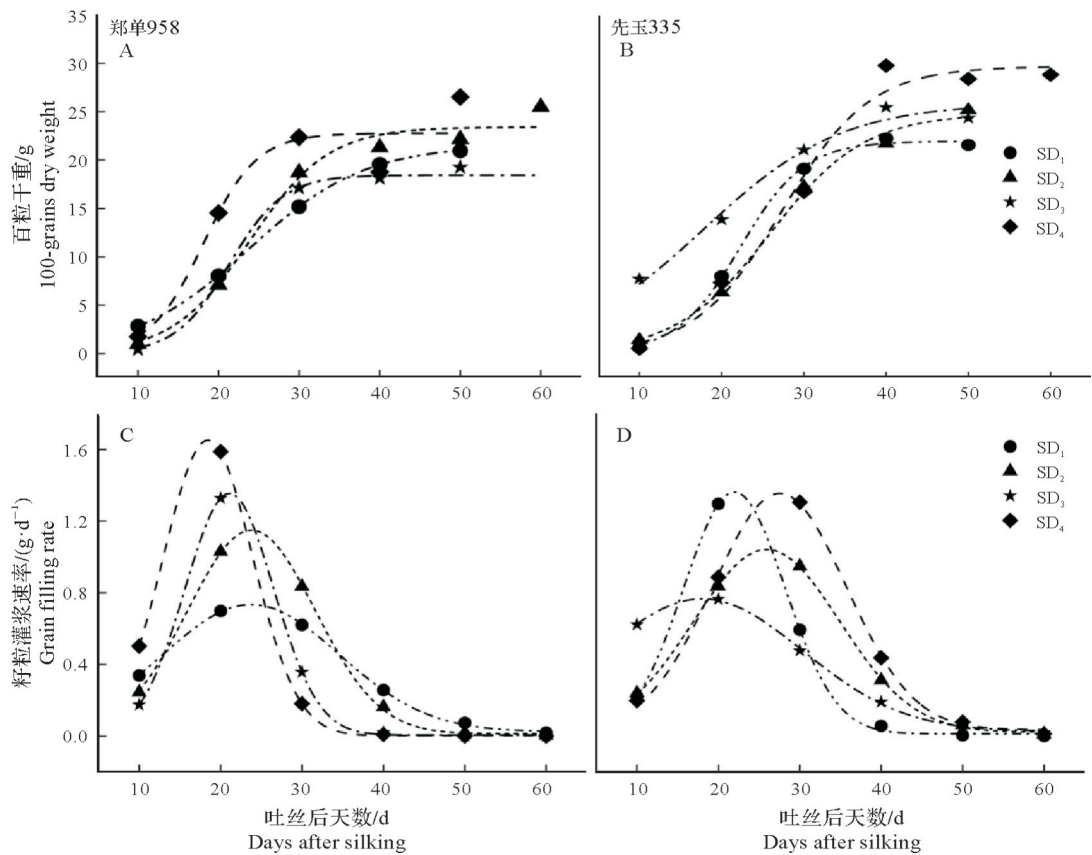


图4 不同播期玉米产量与物质积累、产量构成要素间的相关性

Fig.4 Correlation between maize yield ,biomass accumulation ,and yield components under different sowing dates



SD<sub>1</sub>、SD<sub>2</sub>、SD<sub>3</sub>、SD<sub>4</sub>分别代表第1~4个播期。  
SD<sub>1</sub>、SD<sub>2</sub>、SD<sub>3</sub>、SD<sub>4</sub>,are sowing dates from first to fourth.

图5 不同播期下两个品种吐丝后干物质积累的动态变化和籽粒灌浆速率变化

Fig.5 The dynamic changes in the accumulation of dry matter after silk emergence and the rate of grain filling in two different varieties under different sowing date.

表 3 不同播期下玉米的灌浆参数及其与收获百粒质量的相关性  
Tab.3 Grain filling parameters of maize and their correlation with harvest weight of 100 grains under different sowing dates

| 品种<br>Hybirds | 播期<br>Sowing date | Logistics 方程<br>Logistics equation<br>$y = \frac{a}{1 + be^{-kx}}$ | $R^2$   | 灌浆参数 Grain filling parameter |             |                                               |                                                                |                                                                |
|---------------|-------------------|--------------------------------------------------------------------|---------|------------------------------|-------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
|               |                   |                                                                    |         | $P/d$                        | $D_{max}/d$ | $W_{max}/$<br>[g·(100 grains) <sup>-1</sup> ] | $G_{max}/$<br>[g·(100 grains) <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> ] | $G_{ave}/$<br>[g·(100 grains) <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> ] |
| 郑单 958        | SD <sub>1</sub>   | $y = \frac{21.57}{1 + 26.57e^{-0.14x}}$                            | 0.999 9 | 43.38                        | 23.71       | 10.78                                         | 0.75                                                           | 0.50                                                           |
|               | SD <sub>2</sub>   | $y = \frac{23.42}{1 + 139.10e^{-0.21x}}$                           | 0.983 6 | 29.09                        | 23.93       | 11.71                                         | 1.21                                                           | 0.81                                                           |
|               | SD <sub>3</sub>   | $y = \frac{18.46}{1 + 587.70e^{-0.30x}}$                           | 0.996 6 | 33.36                        | 22.47       | 9.37                                          | 1.32                                                           | 0.88                                                           |
|               | SD <sub>4</sub>   | $y = \frac{22.78}{1 + 237.12e^{-0.30x}}$                           | 0.917 1 | 19.89                        | 18.13       | 11.39                                         | 1.72                                                           | 1.15                                                           |
| 先玉 335        |                   | 相关性                                                                |         | -0.362                       | -0.299      | 0.780**                                       | 0.521                                                          | 0.521                                                          |
|               | SD <sub>1</sub>   | $y = \frac{21.86}{1 + 309.29e^{-0.26x}}$                           | 0.998 5 | 23.29                        | 22.25       | 10.93                                         | 1.41                                                           | 0.94                                                           |
|               | SD <sub>2</sub>   | $y = \frac{24.71}{1 + 90.15e^{-0.17x}}$                            | 0.994 5 | 34.49                        | 25.88       | 12.35                                         | 1.07                                                           | 0.72                                                           |
|               | SD <sub>3</sub>   | $y = \frac{25.79}{1 + 8.67e^{-0.12x}}$                             | 0.985 0 | 49.84                        | 17.94       | 12.89                                         | 0.78                                                           | 0.52                                                           |
|               | SD <sub>4</sub>   | $y = \frac{29.58}{1 + 168.60e^{-0.19x}}$                           | 0.982 7 | 32.06                        | 27.40       | 14.79                                         | 1.38                                                           | 0.92                                                           |
|               |                   | 相关性                                                                |         | 0.244                        | 0.155       | 0.883**                                       | 0.061                                                          | 0.061                                                          |
|               |                   |                                                                    |         |                              |             |                                               |                                                                |                                                                |
|               |                   |                                                                    |         |                              |             |                                               |                                                                |                                                                |

$P$ : 活跃灌浆期;  $D_{max}$ : 灌浆速率达最大时的天数;  $W_{max}$ : 灌浆速率达最大值的粒重;  $G_{max}$ : 籽粒最大灌浆速率;  $G_{ave}$ : 平均灌浆速率。 \*\* 表示在  $P<0.01$  水平差异显著。  
 $P$ : Active grain-filling period;  $D_{max}$ : Date of the maximum grain-filling rate;  $W_{max}$ : the increased grain weight at the maximum grain-filling rate;  $G_{max}$ : the maximum grain-filling rate;  $G_{ave}$ : average grain-filling rate. \*\* indicates significant difference at  $P<0.01$ .

3 讨论与结论

玉米品种、环境因子和栽培技术措施是影响玉米产量的重要因素<sup>[15-18]</sup>,通过调整播期改变光、温、水条件,影响发育进程使植株群体处于有利环境,从而实现玉米高产<sup>[19-21]</sup>。在种植密度既定的前提下,保证穗粒数是提高玉米产量的关键<sup>[22-23]</sup>。花期高温、干旱胁迫,是导致玉米籽粒败育的重要因素<sup>[24]</sup>,江西玉米开花期(播期5月下旬至7月)处于高温干旱季,使得玉米遭遇高温胁迫,开花期高温胁迫会显著降低玉米穗粒数,一般认为花期高温胁迫降低了碳水化合物供应,从而导致籽粒中葡萄糖和淀粉含量降低,使籽粒败育<sup>[25]</sup>。适时提早播种有利于玉米各生育时期有更为适宜的雨热条件,增加干物质积累量,增加穗粒数,使玉米产量达到最佳<sup>[26-28]</sup>。本研究结果表明,5月初播种可避免江西高温干旱季的不利影响,避免开花授粉期高温、干旱等外界环境因素影响,稳定穗粒数,最终提高产量。

高温会影响玉米的生长发育和产量,日最高气温≥35℃持续5 d以上会引发明显的高温热害<sup>[29]</sup>。花期高温严重影响雌雄穗,目前的研究<sup>[30]</sup>表明花粉活力是影响穗粒数的主要因素,高温会使花药壁增厚,难以裂开。高温同时导致小孢子因缺少淀粉从而抑制花粉萌发,导致散粉量少,且花粉活力低或不能正常分裂,最终引起玉米产量减少<sup>[30]</sup>。有研究<sup>[31]</sup>表明在生育后期遭遇高温胁迫会使玉米植株过早衰亡或提前结束生育进程,使灌浆时间缩短,导致干物质积累大大减少,粒重和产量大幅度下降。本研究结果表明,生育后期遭遇高温胁迫会使灌浆时间缩短,增加干物质积累和粒重,减少穗粒数,然而干物质积累和粒重的增加无法挽回因穗粒数减少而带来产量的损失。

籽粒灌浆是同化物由源向库运输的结果,是影响粒重的主要原因。粒重是反映灌浆积累的指示性状,也是构成作物产量的主要因素<sup>[32-34]</sup>。关于灌浆速率和灌浆持续时间与粒重的关系,金益等<sup>[35]</sup>认为不同熟期玉米粒重主要由灌浆时间的长短决定,但本研究结果显示,玉米百粒质量、达到最大灌浆速率时的粒重呈极显著正相关,与最大灌浆速率和平均灌浆速率无显著相关。随播期推迟,籽粒最大灌浆速率逐渐下降,活跃灌浆期、灌浆速率达最大时的天数呈降低趋势。因此,本研究认为在江西红壤旱地生态



环境下,不同播期处理玉米粒重的差异主要受灌浆速率的影响,而非灌浆时间。本研究仍有待进一步探索,如百粒质量在本研究中并未表现出对于高产量的贡献。因此,可继续研究其他品种在不同播期条件下的生长发育情况进行多年的种植试验,观察播期与玉米产量的关系规律,从而能够根据当年的气象条件调整播期时间,使得玉米的生长发育与气象相适应,实现增产的目的。

致谢:研究生创新专项资金(YC2023-S378)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

## 参考文献 References:

- [1] 李腾飞,曾伟.农业强国背景下新一轮粮食产能提升潜力与实施路径研究[J].经济纵横,2023(9):48-55.  
LI T F, ZHENG W. Potential and paths of a new round of grain production capacity improvement in the context of building up China's strength in agriculture[J]. Economic review journal, 2023(9): 48-55.
- [2] 黄国勤.论江西玉米生产及其发展途径[J].玉米科学,2000(3):93-96.  
HUANG G Q, Discussion on maize production and development approach in Jiangxi [J]. Journal of maize sciences, 2000 (3): 93-96.
- [3] 叶川.江西红壤旱地高效种植模式研究[R].南昌:江西省红壤研究所,2019.  
YE C. Study on efficient planting model of red soil dryland in Jiangxi Province [R]. Nanchang: Jiangxi red soil research institute, 2019.
- [4] 马国胜,薛吉全,路海东,等.播种时期与密度对关中灌区夏玉米群体生理指标的影响[J].应用生态学报,2007(6):1247-1253.  
MA G S, XUE J Q, LU H D, et al. Effects of planting date and density on population physiological indices of summer corn (*Zea mays* L.) in central Shaanxi irrigation area [J]. Chinese journal of applied ecology, 2007(6): 1247-1253.
- [5] SULOCHANA S N S, DHEWA J S, BAJIA R. Effect of sowing dates on growth, phenology and agro meteorological indices for maize varieties [J]. The bioscan, 2015, 10(3): 1339-1343.
- [6] 黄开健,黄爱花,莫润秀,等.基于气候变化特征的广西春玉米播期研究[J].南方农业学报,2018,49(7):1304-1310.  
HUANG K J, HUANG A H, MO R X, et al. Sowing dates of spring maize in Guangxi based on climate change characters [J]. Journal of southern agriculture, 2018, 49(7): 1304-1310.
- [7] 彭丹丹,吴超,徐开未,等.不同播期玉米籽粒灌浆特性及其与气象因子的关系[J].中国生态农业学报(中英文),2022,30(7):1134-1142.  
PENG D D, WU C, XU K W, et al. The relationship between grain filling characteristics of maize and meteorological factors under different sowing dates [J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2022, 30(7): 1134-1142.
- [8] 裴世娟,李瑞盈,张萌,等.春玉米干物质积累和产量对播期调控下水热变化的响应[J].核农学报,2021,35(12):2869-2878.  
PEI S J, LI R Y, ZHANG M, et al. Response of dry matter accumulation and yield of hydrothermal changes with regulation of sowing date [J]. Journal of nuclear agricultural sciences, 2021, 35(12): 2869-2878.
- [9] 豆攀,李孝东,孔凡磊,等.播期对川中丘区玉米干物质积累与产量的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(2):221-229.  
DOU P, LI X D, KONG F L, et al. Effect of sowing date on dry matter accumulation and yield of maize in hilly regions of Sichuan Province, China [J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2017, 25(2): 221-229.
- [10] 陈静,任佰朝,赵斌,等.基于品种生育期有效积温确定夏玉米适宜播期[J].中国农业科学,2021,54(17):3632-3646.  
CHEN J, REN B Z, ZHAO B, et al. Determination on suitable sowing date of summer maize hybrids based on effective accumulated temperature in growth period [J]. Scientia agricultura Sinica, 2021, 54(17): 3632-3646.
- [11] 闫丽慧,王昌亮,常建智,等.气象因子对黄淮海地区粒收玉米籽粒灌浆与脱水特性的影响[J].玉米科学,2022,30(6):78-84.  
YAN L H, WANG C L, CHANG J Z, et al. Effects of meteorological factors on grain filling and dehydration characteristics of maize suitable for machine harvesting in Huang-Huai-Hai [J]. Maize science, 2022, 30(6): 78-84.
- [12] ZHOU B Y, YUE Y, SUN X F, et al. Maize kernel weight responses to sowing date-associated variation in weather conditions [J]. The crop journal, 2017, 5(1): 43-51.
- [13] ABBAS G, AHMAD S, HUSSAIN M, et al. Sowing date and hybrid choice matters production of maize-maize system [J]. International journal of plant production, 2020, 14(4): 583-595.
- [14] 朱庆森,曹显祖,骆亦其.水稻籽粒灌浆的生长分析[J].作物学报,1988,14(3):182-193.  
ZHU Q S, CAO X Z, LUO Y Q. Growth analysis on the process of grain filling in rice [J]. Acta agronomica Sinica, 1988, 14 (3): 182-193.
- [15] 王楷,王克如,王永宏,等.密度对玉米产量(>15 000 kg·hm<sup>-2</sup>)及其产量构成因子的影响[J].中国农业科学,2012,45:3437-3445.  
WANG K, WANG K R, WANG Y H, et al. Effects of density on maize yield (>15 000 kg·hm<sup>-2</sup>) and yield components [J]. Sci-

- entia agricultura Sinica, 2012, 45: 3437-3445.
- [16] 吕丽华,董志强,曹洁璇,等.播期、收获期对玉米物质生产及光能利用的调控效应[J].华北农学报,2013,28(S1): 177-183.
- LYU L H, DONG Z Q, CAO J X, et al. Effects of planting and harvest date on matter production of summer maize and its utilization of solar and heat resource[J]. Acta agriculturae boreali-Sinica, 2013, 28(S1): 177-183.
- [17] 李德新.玉米籽粒灌浆、脱水速率品种差异和相关分析[D].北京:中国农业科学院,2009.
- LI D X. Varieties and correlation analysis of grain filling and dehydration rate in maize[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009.
- [18] OTEGUI M E, BONHOMME R. Grain yield components in maize: I. ear growth and kernel set[J]. Field crops research, 1998, 56(3): 247-256.
- [19] 王喜梅,王克如,王楷,等.播期对高产玉米(15 000 kg/hm<sup>2</sup>)群体籽粒灌浆特征的影响[J].石河子大学学报,2013,31:556-560.
- WANG X M, WANG K R, WANG K, et al. Effects of planting dates on grain filling characteristics of corn population with high yield of 15 000 kg/hm<sup>2</sup>[J]. Journal of Shihezi university(natural science), 2013, 31: 556-560.
- [20] 于吉琳,聂林雪,郑洪兵,等.播期与密度对玉米物质生产及产量形成的影响[J].玉米科学,2013,21(5):76-80.
- YU J L, NIE L X, ZHENG H B, et al. Effect of matter production and yield formation on sowing date and density in maize[J]. Maize science, 2013, 21(5): 76-80.
- [21] 覃永媛,温国泉,顾明华,等.干旱胁迫对4份玉米自交系生理与光合特性的影响[J].西南农业学报,2016,29(6): 1264-1269.
- QIN Y A, WEN G Q, GU M H, et al. Effects of drought stress on physiology and photosynthesis in four maize inbred lines[J]. Southwest China journal of agricultural sciences, 2016, 29(6): 1264-1269.
- [22] 饶大恒,邹细标.密度、施肥量和施肥方式对玉米性状及产量影响的研究[J].江西农业大学学报,1993,15(4):418-422.
- RAO D H, ZOU X B. Density and fertilizer application and research on the effects of fertilization way of corn traits and yield [J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 1993, 15(4): 418-422.
- [23] JIA Q M, SUN L F, MOU H Y, et al. Effects of planting patterns and sowing densities on grain-filling, radiation use efficiency and yield of maize (*Zea mays* L.) in semi-arid regions[J]. Agricultural water management, 2018, 201: 287-298.
- [24] OTEGUI M E, ANDRADE F H, SUERO E E. Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking [J]. Field crops research, 1995, 40(2): 87-94.
- [25] ZINSELMEIER C, JEONG B R, BOYER J S. Starch and the control of kernel number in maize at low water potentials[J]. Plant physiology, 1999, 121(1): 25-36.
- [26] 李向岭,赵明,李从锋,等.播期和密度对玉米干物质积累动态的影响及其模型的建立[J].作物学报,2010,36(12): 2143-2153.
- LI X L, ZHAO M, LI C F, et al. Effects of sowing-date and planting density on dry matter accumulation dynamics and establishment of its simulated model in maize[J]. Acta agronomica Sinica, 2010, 36(12): 2143-2153.
- [27] PANAH M, NASERI R, SOLEIMANI R. Efficiency of some sweet corn hybrids at two sowing dates in Central Iran[J]. Middle east journal of scientific research, 2010, 6(1): 51-55.
- [28] WILLIAMS M M. Sweet corn growth and yield responses to planting dates of the North Central United States[J]. Hort science, 2008, 43(6): 1775-1779.
- [29] 陆魁东,黄晚华,方丽,等.气象灾害指标在湖南春玉米种植区划中的应用[J].应用气象学报,2008,18:548-554.
- LU K D, HUANG W H, FANG L, et al. The climatic zoning of spring maize in Hunan based on meteorological disaster indexes[J]. Journal of applied meteorological science, 2008, 18: 548-554.
- [30] WANG Y Y, SHENG D C, ZHANG P, et al. High temperature sensitivity of kernel formation in different short periods around silking in maize[J]. Environmental and experimental botany, 2021, 183: 104343.
- [31] 陈朝辉,王安乐,王娇娟,等.高温对玉米生产的危害及防御措施[J].作物杂志,2008,24(4):92-98.
- CHEN Z H, WANG A L, WANG J J, et al. Influence of high temperature on growth and development of maize[J]. Crops, 2008, 24(4): 92-98.
- [32] ZHOU B Y, YUE Y, SUN X F, et al. Maize kernel weight responses to sowing date-associated variation in weather conditions [J]. The crop journal, 2017, 5(1): 43-51.
- [33] SALA R G, WESTGATE M E, ANDRADE F H. Source/sink ratio and the relationship between maximum water content, maximum volume, and final dry weight of maize kernels[J]. Field crops research, 2007, 101(1): 19-25.
- [34] BORRÁS L, GAMBÍN B L. Trait dissection of maize kernel weight: towards integrating hierarchical scales using a plant growth approach[J]. Field crops research, 2010, 118(1): 1-12.
- [35] 金益,张永林,王振华,等.玉米灌浆后期百粒重变化的品种间差异分析[J].东北农业大学学报,1998,29(1):7-10.
- JIN Y, ZHANG Y L, WANG Z H, et al. Difference analysis on 100 kernel weight in 30-60 days after silking in maize hybrids [J]. Journal of northeast agricultural university, 1998, 29(1): 7-10.