

引用格式:

杜霞, 豆攀, 陈祥, 孔凡磊, 袁继超. 气象条件对川中丘陵地区玉米生长和产量的影响及播期优化——以中江为例[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2022, 48(3): 257-264.

DU X, DOU P, CHEN X, KONG F L, YUAN J C. Effects of meteorological conditions on maize growth and yield in hilly area of central Sichuan and optimization of sowing date: a case study of Zhongjiang, Sichuan[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2022, 48(3): 257-264.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



# 气象条件对川中丘陵地区玉米生长和产量的影响及播期优化

——以中江为例

杜霞<sup>1</sup>, 豆攀<sup>2</sup>, 陈祥<sup>1</sup>, 孔凡磊<sup>1</sup>, 袁继超<sup>1\*</sup>

(1.四川农业大学农学院, 四川 成都 611130; 2.渭南市农业科学研究所, 陕西 渭南 714000)

**摘要:** 2016、2019、2020年以四川主推玉米品种‘正红505’为试验材料, 设置5个播期, 研究不同播期下气象因子的差异及其对玉米生育进程和产量的影响, 以期为川中丘陵地区玉米的播期优化提供理论依据。结果表明: 随播期推迟, 日均温升高, 玉米营养生长期缩短, 其间活动积温减少, 气象因子对玉米全生育期的影响主要表现在营养生长期; 相关和回归分析表明, 温度是决定玉米生育期长短的主要气象因子, 日均温度和活动积温对各生育时期的贡献率达83.0%, 其中吐丝—成熟期达99.9%; 籽粒产量同时受温度、光照和降水量的影响, 其中光照条件贡献较大(贡献率35.7%~54.0%), 日均温和活动积温贡献率25.2%~31.2%, 降水量贡献率20.8%~33.1%; 气象因子对产量构成因素的贡献率不同, 对穗粒数贡献最大的是播种—吐丝阶段的温度, 对千粒质量贡献最大的是吐丝—成熟阶段的光照; 随播期推迟, 玉米生物产量和籽粒产量均呈先增后减趋势, 籽粒产量(y)与播期(x 第一播期后的天数)的回归方程为  $y = -1.16x^2 + 19.87x + 7977.34$ ,  $R^2 = 0.47^{**}$ , 在4月3日左右最高。推断4月上旬是本区玉米高产的适宜播期。

**关键词:** 玉米; 气象因子; 播期; 产量; 川中地区

中图分类号: S513.042

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2022)03-0257-08

## Effects of meteorological conditions on maize growth and yield in hilly area of central Sichuan and optimization of sowing date: a case study of Zhongjiang, Sichuan

DU Xia<sup>1</sup>, DOU Pan<sup>2</sup>, CHEN Xiang<sup>1</sup>, KONG Fanlei<sup>1</sup>, YUAN Jichao<sup>1\*</sup>

(1.College of Agriculture, Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan 611130, China; 2.Weinan Institute of Agricultural Sciences, Weinan, Shaanxi 714000, China)

**Abstract:** The main maize variety ‘Zhenghong 505’ in the central hilly area of Sichuan Province was selected as experimental material in 2016, 2019, and 2020. Five sowing dates were set to study the differences of meteorological factors under different sowing dates and their effects on the maize growth process and yield, to build the theoretical basis and establish guideline for maize sowing date optimization in this area. The results showed that the daily average temperature increased, the vegetative growth period of maize shortened, and the active accumulated temperature decreased. Meteorological factors mainly affected the vegetative growth stage of maize in the whole growth period.

收稿日期: 2021-06-25

修回日期: 2022-05-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0301704、2018YFD0301206)

作者简介: 杜霞(1995—), 女, 重庆垫江人, 硕士研究生, 主要从事作物高产优质高效栽培理论与技术研究, [duxia00009@163.com](mailto:duxia00009@163.com); \*通信作者, 袁继超, 博士, 教授, 主要从事玉米生理生态与机械化高效生产技术研究, [yuanjichao5@163.com](mailto:yuanjichao5@163.com)

Correlation and regression analysis showed that temperature is the main meteorological factor determining the growth process of maize. The contribution rate of daily average temperature and active accumulated temperature to each growth period was 83.0%, of which 99.9% was from silking to maturity. The grain yield was affected by temperature, light, and precipitation at the same time. The contribution of light conditions was larger (35.7%-54.0%), the contribution of daily average mild active accumulated temperature was 25.2%-31.2%, and the contribution of rainfall was 20.8%-33.1%. The contribution rate of meteorological factors to yield components were different. The temperature from sowing to silking contributed most to the number of grains per ear, and the light from silking to maturity contributed most to the 1000-kernel weight. With the delay of the sowing date, the biomass and grain yield increased first and then decreased. The regression equation between grain yield ( $y$ ) and sowing date (days after the first sowing date,  $x$ ) was  $y = -1.16x^2 + 19.87x + 7977.34$ ,  $R^2 = 0.47^{**}$ , the highest on April 3. Therefore, early April was the suitable sowing date for a high yield of maize in this region according to this study.

**Keywords:** maize; meteorological factors; sowing date; yield; central Sichuan region

近年全球的气候变化对农业生产和粮食安全的影响已成为国际社会关注的重大问题。为实现农业的绿色可持续发展,调整播期成为适应气候变化的简单有效措施。研究<sup>[1-4]</sup>表明,适宜播期是实现玉米高产、稳产的必要栽培条件。适宜的播期能使作物充分利用其生育期内的温度、光照、水分等资源,促进茎秆抗倒特性的建成<sup>[5-7]</sup>和干物质积累<sup>[3]</sup>,提高籽粒灌浆质量<sup>[8-10]</sup>,保证较优的果穗性状和产量构成<sup>[11-12]</sup>;适宜的播期也能减少病虫害<sup>[13]</sup>,规避灾害天气在关键生育期的发生<sup>[14]</sup>,充分发挥气象因子(环境)在作物生产中的积极作用,从而达到高产、稳产的目的。气象因素对播种日期和产量的影响存在较大的区域差异,适宜的播期需因地制宜进行设置<sup>[15-16]</sup>。不同地区可根据当地气候因素对作物播期作适当调整。

川中丘陵地区是玉米的主产区,无霜期较长,热量资源丰富,雨量充沛,但季节分布不均<sup>[17]</sup>,玉米播种时间范围较广,3—6月均有播种。由于播期不同,玉米各生育阶段所处的气象条件存在较大差异。深入分析各阶段气象条件与玉米生育进程、物质积累和产量构成的关系,并在此基础上优化玉米的播期,对于充分利用本地区的气象资源、规避自然灾害的影响、提高玉米的产量具有重要意义。本研究中,拟通过3年的播期试验,研究不同播期下气象因子的差异及其对玉米生育进程和产量的影响,以期为本地区玉米高产、稳产的播期优化提供理论依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 供试材料

以四川主推玉米品种‘正红505’为试验材料,于2016、2019和2020年在四川省德阳市中江县辑庆镇合兴乡新建村(30°35' N、104°37' E)进行试验。该地区2010—2020年3—9月的日均温度为22.28℃,降水量为753.24 mm。

### 1.2 试验设计

采用单因素随机区组设计。设播期1、播期2、播期3、播期4、播期5等5个播期(2016年为3月26日、4月10日、4月25日、5月10日、5月25日,2019年和2020年为3月25日、4月9日、4月24日、5月9日、5月24日)。3次重复,共15个小区。2016年小区规格5.5 m×3.2 m,行株距(110+50) cm×25 cm;2019年小区规格6 m×4.5 m,行株距(100+50) cm×25 cm;2020年小区规格5.5 m×4.8 m,行株距(110+50) cm×27.8 cm。3年均采用穴直播,留单株,其他管理措施同一般高产玉米田。

### 1.3 测定项目与方法

#### 1.3.1 气象数据的获取

本试验气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>):中国地面气候资料日值数据集(V3.0)中江站(站点编号56199,距本试验点直线距离12.8 km)。结合温秀秀等<sup>[18]</sup>和HE等<sup>[19]</sup>的方法,计算实际太阳辐射量和活动积温。

### 1.3.2 生育时期的记载

记载吐丝期(全小区 50%植株的雌穗花丝从苞叶中伸出 3 cm)和成熟期(全小区 50%植株的果穗中下部籽粒乳线消失,基部出现黑色层)。

### 1.3.3 干物质积累的计算

于吐丝期和成熟期,各小区选取长势均匀一致的代表性植株 6 株,105 °C 杀青 30 min,80 °C 烘干至恒重,称量其干质量。计算吐丝前、后干物质积累率。

$$c_1 = m_1/m_2 \times 100\% \quad (1)$$

$$c_2 = (1 - m_1/m_2) \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $c_1$  表示吐丝前干物质积累率;  $c_2$  表示吐丝后干物质积累率;  $m_1$  表示吐丝期干物质质量;  $m_2$  表示成熟期干物质质量。

### 1.3.4 产量及其构成因素

收获前统计各小区有效穗数,分小区进行实收计产(籽粒含水量折合为 14%)。采用平均穗重法选取 20 个具有代表性的果穗考种,考察穗长、穗粗、秃尖长、穗行数、行粒数、籽粒总质量、千粒质量以及含水量等。

## 1.4 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2010 进行数据整理;运用

SPSS 27.0 进行单因素方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同播期下玉米生育进程、干物质积累及产量的差异

#### 2.1.1 生育进程

从表 1 可以看出,播期对玉米生育进程影响显著。随着播期的推迟,玉米全生育期呈缩短趋势,2016、2019、2020 年播期 5 较播期 1 分别缩短了 15.9%、23.7%、22.9%,播期推迟天数(第一播期后的天数,  $x$ )与全生育期持续时间( $y$ )呈负相关关系,回归方程为  $y_{2016} = 125.40 - 0.34x$ ,  $R^2 = 0.97^{**}$  (\*\*示极显著相关,下同);  $y_{2019} = 131.00 - 0.51x$ ,  $R^2 = 0.99^{**}$ ;  $y_{2020} = 129.00 - 0.48x$ ,  $R^2 = 0.98^{**}$ 。播期每推迟 1 d,生育期缩短 0.34~0.51 d,3 年平均缩短 0.44 d,  $y = -0.44x + 128.47$ ,  $R^2 = 0.96^{**}$ 。其中,营养生长阶段生育期的变化较大,生育期缩短 6~25 d,变异系数约为 15%,播期每推迟 1 d,播种—吐丝期( $y_1$ )3 年平均缩短 0.38 d,  $y_1 = -0.38x + 78.80$ ,  $R^2 = 0.91^{**}$ 。生殖生长阶段生育期则相对稳定,变异系数小于 7%。说明气象因子对玉米全生育期的影响主要表现在营养生长阶段,而生殖生长阶段受影响相对较小。

表 1 不同处理玉米的生育时期及持续时间

Table 1 Growth period and duration of maize under different treatments

年份	播期	播种期	吐丝期	成熟期	播种—吐丝/d	吐丝—成熟/d	全生育期/d
2016	A1	03-26	06-15	07-30	81	45	126
	A2	04-10	06-23	08-09	74	47	121
	A3	04-25	06-30	08-16	66	47	113
	A4	05-10	07-14	08-28	65	45	110
	A5	05-25	07-23	09-08	59	47	106
2019	B1	03-25	06-15	08-03	82	49	131
	B2	04-09	06-21	08-10	73	50	123
	B3	04-24	07-01	08-18	68	48	116
	B4	05-09	07-10	08-26	62	47	109
	B5	05-24	07-21	09-01	58	42	100
2020	C1	03-25	06-11	08-03	78	53	131
	C2	04-09	06-18	08-07	70	50	120
	C3	04-24	06-26	08-15	63	50	113
	C4	05-09	07-05	08-25	57	51	108
	C5	05-24	07-18	09-02	55	46	101

#### 2.1.2 干物质积累

从表 2 可以看出,播期对玉米吐丝前后干物质

积累率、单株干物质积累量及生物产量的影响均达极显著水平,年际间差异较大。成熟期单株干物质

积累量和生物产量以播期5的最低;3年平均,播期5、播期2、播期1、播期3、播期4的生物产量依次增加,播期5的生物产量分别较播期1、播期2、播期3、播期4低24.3%、24.1%、27.3%、27.5%。3

年平均,吐丝前积累率以播期5的最高,分别较播期1、播期2、播期3、播期4高24.8%、19.1%、17.2%和22.6%;吐丝后积累率以播期5最低,播期1最高。

表2 不同播期玉米的干物质积累率和干物质积累量

年份	播期	吐丝前积累率/%	吐丝后积累率/%	单株干物质积累量/g	生物产量/(t·hm <sup>-2</sup> )
2016	A1	43.91b	56.09b	398.77a	16.97a
	A2	51.79a	48.21c	402.11a	16.70a
	A3	45.24b	54.76b	412.34a	19.58a
	A4	36.09c	63.91a	438.32a	18.57a
	A5	50.85a	49.15c	347.11b	16.02a
2019	B1	36.23b	63.77a	325.42c	17.31b
	B2	35.59b	64.41a	376.85ab	19.30a
	B3	43.52a	56.48b	345.92bc	18.04ab
	B4	42.85a	57.15b	385.59a	19.57a
	B5	40.37a	59.63b	270.30d	13.74c
2020	C1	34.83b	65.17a	376.54a	16.80a
	C2	33.13b	66.87a	340.79b	14.96b
	C3	33.73b	66.27a	362.55ab	15.54ab
	C4	38.12b	61.88a	343.60b	15.21ab
	C5	52.31a	47.69b	220.58c	8.90c
F 值	年份	27.04**	27.04**	73.49**	26.41**
	播期	16.29**	16.29**	58.94**	18.25**
	年份×播期	13.69**	13.69**	6.81**	3.38**

同一年份同列数据不同字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ ); “\*”“\*\*”分别表示差异显著( $P<0.05$ )、极显著( $P<0.01$ )。

### 2.1.3 产量及其构成

由表3可知,播期对玉米穗部性状、产量及其构成因素(除有效穗)和收获指数的影响均达极显著水平,且年际间变化较大,对2020年的影响最大。随播期推迟(第一播期后的天数,  $x$ ),玉米的籽粒产量( $Y$ )呈先升后降(2016年)或降低(2019、2020年)趋势,二者间呈极显著二次凸函数关系,3年的回归方程分别为:

$Y_{2016} = -0.76x^2 + 22.78x + 8527.44$ ,  $R^2 = 0.44^*$  (\*示显著相关,下同);

$Y_{2019} = -0.55x^2 - 8.68x + 7831.20$ ,  $R^2 = 0.79^{**}$ ;

$Y_{2020} = -2.18x^2 + 45.51x + 7573.30$ ,  $R^2 = 0.95^{**}$ 。

3年平均的回归方程为  $Y = -1.16x^2 + 19.87x + 7977.34$ ,  $R^2 = 0.47^{**}$ , 在4月3日( $x=8.56$ )左右播种产量最高。播期主要通过影响千粒质量来影响产量。随播期推迟,千粒质量逐渐降低,3年平均,千粒质量( $y_1$ )与播期推迟天数( $x$ )的回归方程为  $y_1 = 275.12 - 1.32x$ ,  $R^2 = 0.54^{**}$ , 播期每推迟1d,千粒质量降低1.32g。从物质生产角度分析,播期推迟不仅影响光合产物的积累,还会降低光合产物向籽粒的分配,从而降低收获指数,收获指数( $y_2$ )与  $x$  的回归方程为  $y_2 = 48.45 - 0.21x$ ,  $R^2 = 0.42^{**}$ , 播期每推迟1d,收获指数降低0.21%。

表3 不同播期玉米的产量及产量构成因素

年份	播期	穗长/cm	秃尖度/%	穗粗/cm	有效穗/ ( $\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$ )	穗粒数	千粒质量/g	籽粒产量/ ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	收获指数/%
2016	A1	22.14a	6.90b	5.51a	4.24	783.64	255.35a	8532.20	50.97ab
	A2	22.06a	13.98a	5.58a	4.17	761.87	249.78a	8661.47	51.84a
	A3	21.97a	14.50a	5.56a	4.75	774.83	250.76a	8602.00	43.94c
	A4	21.35a	12.61a	5.53a	4.22	842.28	236.81b	7936.40	42.80c
	A5	19.39b	8.65b	5.01b	4.62	745.26	236.45b	7165.60	44.72bc

表3(续)

年份	播期	穗长/cm	秃尖度/%	穗粗/cm	有效穗/ ( $\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$ )	穗粒数	千粒质量/g	籽粒产量/ ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	收获指数/%
2019	B1	18.66	15.88ab	5.31a	5.32a	667.54ab	248.05a	7858.37a	45.38a
	B2	17.95	15.47ab	5.23ab	5.12b	650.18b	242.65a	7477.63a	38.87b
	B3	18.56	12.86bc	5.30a	5.22ab	735.98a	211.10b	7217.58ab	40.01b
	B4	18.16	11.81c	5.04b	5.08b	672.87ab	188.17c	6249.44bc	31.98c
	B5	18.55	18.78a	5.04b	5.08b	670.36ab	181.65c	5361.84c	39.05b
2020	C1	22.21a	13.67ab	5.57b	4.46a	754.13a	310.26a	7774.22a	46.28a
	C2	20.00b	14.51ab	5.46c	4.39a	711.49a	269.60b	7210.31a	48.22a
	C3	21.30a	13.23ab	5.72a	4.29ab	742.33a	270.61b	7434.45a	47.93a
	C4	19.73b	11.80b	5.25d	4.43a	744.27a	230.94c	5146.63b	33.88b
	C5	17.76c	15.86a	4.79e	4.03b	655.10b	152.63d	2403.10c	27.20c
F 值	年份	102.20**	16.19**	42.86**	42.36**	47.29**	79.39**	49.73**	24.43**
	播期	23.46**	4.20**	81.80**	0.82	8.19**	140.40**	41.06**	24.19**
	年份 $\times$ 播期	7.46**	7.83**	11.54**	1.81	3.21*	35.80**	6.14**	7.11**

秃尖度为秃尖长占穗长的百分数;同一年份同列数据不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ );“\*”“\*\*”“\*\*\*”分别示差异显著( $P < 0.05$ )、极显著( $P < 0.01$ )。

2.2 不同播期下的主要气象因子差异

试验期间的主要气象因子变化如表 4 和表 5 所示,不同播期下玉米生育期间所经历的气候条件不同,且年间存在较大差异,其中降水量的分布不均最明显。吐丝—成熟阶段,2016 年降雨较少,2019、2020 年 7 月底、8 月初均有强降雨的发生;

由于 2019 和 2020 年降水较多,其日照时数和太阳辐射量均较 2016 年少,日均温度降低。5 个播期平均,2016 年全生育期的日均温度分别较 2019 年和 2020 年高 1.11、0.44  $^{\circ}\text{C}$ ,活动积温多 112.65、61.64  $^{\circ}\text{C}$ ,日照时数多 142.67、87.36 h,太阳辐射量多 101.41、66.49  $\text{MJ}/\text{m}^2$ ,降水量少 195.30、267.20 mm。

表4 2016、2019和2020年播种—吐丝阶段的气象因子

Table 4 Meteorological factors from sowing to silking in 2016, 2019 and 2020

播期	日平均温度/ $^{\circ}\text{C}$			活动积温/ $^{\circ}\text{C}$			总日照时数/h			实际太阳辐射量/ $(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2})$			总降水量/mm		
	2016	2019	2020	2016	2019	2020	2016	2019	2020	2016	2019	2020	2016	2019	2020
1	21.27	21.13	21.16	1722.50	1754.11	1671.50	334.00	337.36	363.60	1023.69	1036.97	1022.30	187.50	123.86	79.70
2	22.71	22.16	23.15	1703.10	1640.11	1643.80	350.70	284.96	338.90	999.23	934.09	949.11	175.20	131.96	154.30
3	23.93	22.97	24.90	1603.30	1584.71	1593.40	325.00	264.61	330.80	915.19	884.92	888.24	148.20	162.26	153.90
4	25.14	23.70	25.53	1659.00	1493.11	1480.90	310.80	244.31	260.90	902.93	817.19	784.56	177.40	118.36	177.90
5	26.39	24.55	26.03	1583.40	1448.41	1457.60	284.30	203.31	207.50	823.70	748.05	727.01	157.50	174.86	217.00
平均	23.89	22.90	24.15	1654.26	1584.09	1569.44	320.96	266.91	300.34	932.95	884.24	874.24	169.16	142.26	156.56

表5 2016、2019和2020年吐丝—成熟阶段的气象因子

Table 5 Meteorological factors from silking to maturity in 2016, 2019 and 2020

播期	日平均温度/ $^{\circ}\text{C}$			活动积温/ $^{\circ}\text{C}$			总日照时数/h			实际太阳辐射量/ $(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2})$			总降水量/mm		
	2016	2019	2020	2016	2019	2020	2016	2019	2020	2016	2019	2020	2016	2019	2020
1	27.52	25.24	26.37	1238.20	1237.00	1397.80	207.20	121.74	180.60	610.77	587.29	671.23	138.40	267.00	319.80
2	27.28	25.53	26.48	1282.20	1276.70	1323.80	223.30	133.84	182.10	637.23	601.92	638.84	199.50	456.50	232.10
3	27.92	26.48	26.44	1312.30	1271.00	1322.10	256.20	177.33	188.70	655.47	605.92	637.30	199.30	424.00	446.40
4	28.81	27.21	25.85	1296.60	1278.70	1318.60	300.90	189.34	175.00	654.15	595.68	626.76	121.10	413.80	612.60
5	27.58	27.38	25.63	1296.30	1149.80	1179.20	256.40	178.64	183.90	626.64	529.92	571.18	130.50	338.50	576.90
平均	27.82	26.37	26.15	1285.12	1242.64	1308.30	248.80	160.18	182.06	636.85	584.15	629.06	157.76	379.96	437.56

随着播期的推迟,玉米播种—吐丝期的日均温度逐渐升高,活动积温减少,3 年平均,播期每推迟 1 d,播种—吐丝期的日均温度分别升高 0.07

$^{\circ}\text{C}$ (2016、2019 和 2020 年分别为 0.08、0.06、0.08  $^{\circ}\text{C}$ ),活动积温减少 3.71  $^{\circ}\text{C}$ 。随着播期的推迟,吐丝到成熟期的日均温度升高(2019 年)或先升后降(2016 和

2020年),活动积温则表现为先升后降(2016和2019年)或降低(2020年),日照时数和太阳辐射量均是先升后降。

### 2.3 生育期、干物质积累及产量与气象因子的关系

由表6可以看出,玉米播种—吐丝、吐丝—成熟和全生育期的天数与同期日均温度呈极显著或显著负相关,与积温和太阳辐射量呈极显著或显著正相关,表明温度升高,玉米生长加快,生育期内

积温和太阳辐射减少。回归分析结果表明,日均温度每上升1℃,播种—吐丝期缩短4.66d,吐丝—成熟期缩短1.62d,全生育期缩短5.12d。进一步分析发现(表7),温度是玉米生育期长短的决定性气象因子,日均温度和活动积温对各生育时期的贡献率达83.0%,其中吐丝—成熟期达99.9%,光照和降水量对各阶段历时天数贡献小。

表6 玉米生育期、干物质积累和产量构成因素与气象因子的相关系数( $n=15$ )

指标	相关系数				
	日均温度	活动积温	日照时数	实际太阳辐射量	降水量
播种—吐丝天数	-0.938**	0.906**	0.755**	0.960**	-0.459
吐丝—成熟天数	-0.581*	0.776**	-0.408	0.561*	0.330
全生育期天数	-0.888**	0.844**	0.331	0.895**	-0.404
吐丝前干物质积累量	-0.051	0.308	0.308	0.270	0.066
吐丝后干物质积累量	0.276	0.671**	0.185	0.653**	-0.319
单株干物质积累量	-0.097	0.707**	0.757**	0.689**	-0.589*
穗粒数	0.068	0.381	0.521*	0.323	0.128
千粒质量	0.029	0.792**	0.050	0.774**	-0.417
籽粒产量①	-0.374	0.833**	0.734**	0.846**	-0.777**
籽粒产量②	0.390	0.495	0.260	0.584*	-0.716**

表中籽粒产量①对应数据来源于全生育期各气象因子与籽粒产量进行的相关分析;籽粒产量②对应数据来源于吐丝—成熟阶段各气象因子与籽粒产量进行的相关分析;穗粒数对应数据来源于播种—吐丝阶段各气象因子与穗粒数进行的相关分析;千粒质量对应数据来源于吐丝—成熟阶段各气象因子与千粒质量进行的相关分析。“\*”“\*\*”分别示显著相关( $P<0.05$ )、极显著相关( $P<0.01$ )。

表7 气象因子对玉米生育期和产量构成的贡献率( $n=15$ )

指标	贡献率				
	日均温度	活动积温	日照时数	实际太阳辐射量	降水量
播种—吐丝天数	52.8	34.7	2.7	3.5	6.3
吐丝—成熟天数	44.7	55.2	0.1	0.0	0.0
全生育期天数	45.6	37.4	7.8	8.3	0.9
穗粒数	29.0	25.2	18.3	26.0	1.3
千粒质量	3.2	0.2	34.8	22.2	39.6
籽粒产量①	17.1	14.1	16.8	18.9	33.1
籽粒产量②	21.4	3.8	37.0	17.0	20.8

表中籽粒产量①对应数据来源于全生育期各气象因子与籽粒产量进行的相关分析;籽粒产量②对应数据来源于吐丝—成熟阶段各气象因子与籽粒产量进行的相关分析;穗粒数对应数据来源于播种—吐丝阶段各气象因子与穗粒数进行的相关分析;千粒质量对应数据来源于吐丝—成熟阶段各气象因子与千粒质量进行的相关分析。

从表6可以看出,吐丝前干物质积累量与同期的气象因子相关不显著,但吐丝后干物质积累量与同期的积温和太阳辐射量呈极显著正相关,与降水量呈负相关,表明充足的光热条件是干物质积累的基础,过多的降水不利于干物质积累。玉米的籽粒

产量与全生育期的积温、日照时数和太阳辐射量呈极显著正相关,与降水量呈极显著负相关,与日均温度呈负相关,表明在四川盆地玉米生长期间,充足的日照和太阳辐射,相对冷凉和少雨的气候条件有利于提高玉米产量;过高的日均温度加快玉米生

长, 生育期缩短(籽粒产量与生育期呈显著负相关,  $R^2=0.67^*$ ), 干物质积累减少, 不利于玉米高产(籽粒产量与单株干物质积累量呈极显著正相关,  $R^2=0.84^{**}$ , 单株干物质质量每增加 1 g, 玉米产量平均提高 24.93 kg/hm<sup>2</sup>)。同时, 过多的降雨不仅会减少日照时数和太阳辐射量, 而且集中暴雨极易引发玉米倒伏, 从而降低玉米籽粒产量。进一步分析发现, 对籽粒产量贡献最大的是光照(日照时数和太阳辐射量贡献了 35.7%~54.0%), 尤其是吐丝—成熟期; 温度、降水量对籽粒产量的贡献率也较高, 日均温和活动积温贡献了 25.2%~31.2%, 降水量贡献了 20.8%~33.1%。气象因子对产量构成因素的贡献率也不同, 对穗粒数贡献最大的是播种—吐丝阶段的温度, 对千粒质量贡献最大的是吐丝—成熟阶段的光照。

### 3 结论与讨论

气象因子的影响贯穿玉米生长发育的始末, 显著影响玉米的生育进程和产量。马树庆等<sup>[20]</sup>、孟林等<sup>[21]</sup>研究表明, 玉米各阶段经历的天数和全生育期天数与同期平均温度呈负相关关系。本研究结果表明, 玉米播种—吐丝、吐丝—成熟及全生育期的天数与同期平均温度、活动积温、日照时数以及实际太阳辐射量均呈不同程度相关。进一步分析发现, 影响玉米生育进程快慢的决定因素是温度, 包括日均温和活动积温, 二者的贡献率在 83.0%以上, 其他气象因子的贡献率较小。其中播种—吐丝期受温度影响较大, 吐丝—成熟期相对稳定; 回归分析表明, 同期日均温度每上升 1 °C, 玉米播种—吐丝期缩短 4.66 d, 吐丝—成熟期缩短 1.62 d, 全生育期缩短 5.12 d。

研究发现中国不同地区制约玉米产量的气象因子不同。华北产区, 开花期降雨过多、低温寡照是影响玉米受精结实和产量提高的主要原因<sup>[22-23]</sup>; 东北产区, 以“气温升高, 降水量、日照时数减少”为特征的暖干化趋势成为制约玉米产量的主要因子<sup>[4, 20, 24]</sup>; 黄淮海产区, 温度是影响玉米产量的主要因子, 包括气温日较差、日均温和有效积温, 其中高温热害是玉米减产的主要原因<sup>[25-27]</sup>。本研究发现, 玉米籽粒产量不仅受温度的影响, 同时也受光照和降水量的影响, 进一步分析发现, 光照(包含

日照时数和太阳辐射)、温度(包含日均温和活动积温)、降水量(全生育期下降水量与温度的贡献相当)对籽粒产量的贡献依次降低; 三者对籽粒产量构成因素的影响也不尽相同, 吐丝前温度比吐丝前光照对穗粒数建成的贡献大; 吐丝后光照比吐丝后降水量对千粒质量形成的贡献大。可见, 优化播期, 保证吐丝前较高温度和全生育期足够光照条件是实现本区玉米高产稳产的有效措施。

播期不同导致玉米生育期间所处的气象条件有差异, 玉米的干物质积累与产量构成也不尽相同。适期播种是提高玉米产量的重要技术措施。由于地域不同或同一地区下播种时间不同, 气象条件存在差异, 适宜的播期也不尽相同。戴明宏等<sup>[22]</sup>、孙宏勇等<sup>[28]</sup>研究表明, 华北春玉米的适宜播期在 5 月 15 日—30 日, 而夏玉米的适宜播期在 6 月 15 日—7 月 5 日<sup>[29]</sup>。西北区春玉米适宜播期为 4 月 10 日左右<sup>[30]</sup>, 黄淮海区夏玉米适宜播期为 6 月初<sup>[1, 31]</sup>。本研究结果表明, 随播期推迟, 营养生长阶段(播种—吐丝期)的日均温度逐渐升高, 太阳辐射量减少, 但灌浆结实阶段的日照时数和太阳辐射量则先增后减, 玉米的籽粒产量表现为先增后降或降低, 与播期呈二次凸函数关系, 在 4 月上旬播种籽粒产量最高, 且较为稳定, 因此, 4 月上旬是本区玉米高产、稳产的适宜播期。晚播由于温度高, 生育期短, 太阳辐射量少而减产, 且本区夏季多大风暴雨, 容易导致玉米倒伏<sup>[32-33]</sup>, 产量低而不稳; 过早播种因温度低, 灌浆结实期太阳辐射量少, 且苗期还容易遭受春夏少雨影响, 也不利于高产。结合当地种植制度, 本区玉米春播以 4 月上旬为宜; 夏播要在前作收后及时早播, 以 5 月上旬为宜, 且要注意合理密植和化控抗倒。

### 参考文献:

- [1] 李向岭, 李从锋, 侯玉虹, 等. 不同播期夏玉米产量性能动态指标及其生态效应[J]. 中国农业科学, 2012, 45(6): 1074-1083.
- [2] 路海东, 薛吉全, 郝引川, 等. 播期对雨养旱地春玉米生长发育及水分利用的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(12): 1906-1914.
- [3] 豆攀, 李孝东, 孔凡磊, 等. 播期对川中丘陵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.
- [4] 王韵翔, 吴裕如, 王承, 等. 播期对夏玉米生长发育

- 及产量的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2019, 45(5): 461-465.
- [5] 豆攀, 黄科程, 王兴龙, 等. 川中丘区不同玉米品种春、夏播茎秆抗倒特性研究[J]. 华北农学报, 2017, 32(4): 162-168.
- [6] WANG Q, XUE J, CHEN J L, et al. Key indicators affecting maize stalk lodging resistance of different growth periods under different sowing dates[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(10): 2419-2428.
- [7] YANG Y S, GUO X X, HOU P, et al. Quantitative effects of solar radiation on maize lodging resistance mechanical properties[J]. Field Crops Research, 2020, 255: 107906.
- [8] 徐田军, 吕天放, 赵久然, 等. 玉米籽粒灌浆特性对播期的响应[J]. 应用生态学报, 2016, 27(8): 2513-2519.
- [9] BONELLI L E, MONZON J P, CERRUDO A, et al. Maize grain yield components and source-sink relationship as affected by the delay in sowing date[J]. Field Crops Research, 2016, 198: 215-225.
- [10] 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.
- [11] 唐江华, 苏丽丽, 李玲, 等. 播期对北疆鲜食玉米生长发育、果穗特性及经济效益的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(17): 21-25.
- [12] 魏雯雯, 胡楠, 胡文河, 等. 播期对吉林省不同品种玉米生长发育及产量的影响[J]. 玉米科学, 2017, 25(6): 95-100.
- [13] 叶坤浩, 龚国淑, 祁小波, 等. 几种栽培措施对玉米纹枯病和小斑病的影响[J]. 植物保护, 2015, 41(4): 154-159.
- [14] 陈尚洪, 陈红琳, 郑盛华, 等. 四川盆地夏玉米适宜播期研究[J]. 中国农学通报, 2019, 35(27): 34-40.
- [15] CHOI Y S, GIM H J, HO C H, et al. Climatic influence on corn sowing date in the Midwestern United States[J]. International Journal of Climatology, 2017, 37(3): 1595-1602.
- [16] PIAO S L, CIAIS P, HUANG Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. Nature, 2010, 467(7311): 43-51.
- [17] 代姝玮, 杨晓光, 赵孟, 等. 气候变化背景下中国农业气候资源变化 II. 西南地区农业气候资源时空变化特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(2): 442-452.
- [18] 温秀秀, 张峰, 师庆东, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地逐日太阳总辐射模拟计算: 以达理雅博依绿洲为例[J]. 沙漠与绿洲气象, 2018, 12(6): 16-21.
- [19] HE H Y, HU Q, LI R, et al. Regional gap in maize production, climate and resource utilization in China[J]. Field Crops Research, 2020, 254: 107830.
- [20] 马树庆, 王琪, 罗新兰. 基于分期播种的气候变化对东北地区玉米(*Zea mays*)生长发育和产量的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(5): 2131-2139.
- [21] 孟林, 刘新建, 邬定荣, 等. 华北平原夏玉米主要生育期对气候变化的响应[J]. 中国农业气象, 2015, 36(4): 375-382.
- [22] 戴明宏, 单成钢, 王璞. 温光生态效应对春玉米物质生产的影响[J]. 中国农业大学学报, 2009, 14(3): 35-41.
- [23] 刘明, 陶洪斌, 王璞, 等. 播期对春玉米生长发育与产量形成的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(1): 18-23.
- [24] 车晓翠, 李洪丽, 张春燕, 等. 1980年代以来气候变化对吉林省玉米产量的影响[J]. 水土保持研究, 2021, 28(2): 230-234.
- [25] 李齐霞, 李中青, 李洪, 等. 播期和主要气象因子对长治地区玉米产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(23): 26-29.
- [26] 安盼盼, 明博, 董朋飞, 等. 黄淮南部玉米产量对气候生态条件的响应[J]. 作物学报, 2018, 44(3): 442-453.
- [27] 王丽君. 黄淮海平原夏玉米季干旱、高温的发生特征及对产量的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [28] 孙宏勇, 刘小京, 王金涛, 等. 品种和播期对华北春玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(6): 837-846.
- [29] 和骅芸, 胡琦, 潘学标, 等. 气候变化背景下华北平原夏玉米花期高温热害特征及适宜播期分析[J]. 中国农业气象, 2020, 41(1): 1-15.
- [30] 孟晓琛, 张富仓, 刘蓝骄, 等. 播期和水氮互作对滴灌施肥春玉米生长和水氮利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(10): 1794-1804.
- [31] 韩慧敏, 张磊, 孙淼, 等. 黄淮海不同夏玉米品种生长发育及产量对播期的响应[J]. 玉米科学, 2020, 28(2): 106-114.
- [32] XUE J, XIE R Z, ZHANG W F, et al. Research progress on reduced lodging of high-yield and-density maize[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(12): 2717-2725.
- [33] 李民华, 易永, 黄晚华, 等. 玉米灌浆中后期倒伏风灾指标及对产量的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(1): 9-16.

责任编辑: 毛友纯  
英文编辑: 柳正