

# 黄河下游地区青贮-子粒双季玉米种植模式的热量资源可行性分析

徐欣莹<sup>1</sup>, 邵长秀<sup>2</sup>, 龙步菊<sup>1</sup>, 孙志刚<sup>2,3,4</sup>, 董宛麟<sup>5</sup>

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 4. 中科院山东东营地理研究院, 山东 东营 257000; 5. 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081)

**摘要:** 为了解黄河下游地区的热量资源并设计青贮-子粒新型双季玉米种植模式, 基于位于黄河下游灌区的中科院禹城综合试验站 1961-2020 年逐日平均气温资料, 对玉米可能生长期日数、初始日序、终止日序、活动积温、有效积温的历史趋势变化特征以及不同熟期青贮-子粒玉米的组合模式进行系统分析和预测, 比较青贮-子粒新型双季玉米种植模式与传统双季玉米种植模式。结果表明, 禹城地区玉米积温与可能生长期日数在近 60 年内的年际增加趋势显著。根据可利用热量资源与玉米品种熟期, 禹城地区双季玉米适宜的种植模式为早熟青贮-早熟子粒玉米、早熟青贮-中熟子粒玉米和中熟青贮-早熟子粒玉米, 夏播子粒玉米的可调整弹性播期有显著增加趋势。

**关键词:** 青贮-子粒双季玉米; 积温; 热量资源

中图分类号: S513.01

文献标识码: A

## Feasibility Analysis on Heat Resources of Silage Grain Double Crop Corn Planting Model in the Lower Reaches of the Yellow River

XU Xin-ying<sup>1</sup>, SHAO Chang-xiu<sup>2</sup>, LONG Bu-ju<sup>1</sup>, SUN Zhi-gang<sup>2,3,4</sup>, DONG Wan-lin<sup>5</sup>

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193;  
2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101;  
3. College of Resource and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;  
4. Zhongke Shandong Dongying Institute of Geography, Dongying 257000;  
5. China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In order to understand the heat resources in the lower reaches of the Yellow River and design a new double cropping corn planting model of silage grain. Based on the daily average temperature data of Yucheng comprehensive experimental station of Chinese Academy of Sciences located in the irrigation area of the lower Yellow River from 1961 to 2020. This paper systematically analyzes the historical trend change characteristics of the number of days in the possible growth period, the initial date sequence, the ending date sequence, the active accumulated temperature, and the effective accumulated temperature of corn, as well as the combination mode of different maturity types of silage grain corn, and compare the new dual season corn planting mode of silage grain corn with the traditional dual season corn planting mode. The results showed that the interannual increasing trend of accumulated temperature and days of possible growth period of corn in Yucheng area was significant in recent 60 years. According to the available heat resources and the maturity type of corn varieties, the suitable planting modes of double cropping corn in Yucheng area are early silage early maturing grain corn, early silage medium maturing grain corn and medium silage early maturing grain corn.

**Key words:** Silage grain double cropping corn; Accumulated temperature; Heat resources

录用日期: 2023-06-01

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31870421)

作者简介: 徐欣莹(1996-), 女, 主要研究方向为资源利用与植物保护。E-mail: sy20193030449@cau.edu.cn

邵长秀为并列第一作者。Email: shaocx@igsrr.ac.cn

龙步菊和孙志刚为本文通信作者。E-mail: longbuj@cau.edu.cn E-mail: sun.zhigang@igsrr.ac.cn

玉米是我国主要粮食作物,2000–2018年玉米平均种植面积和总产量分别为33 636 km<sup>2</sup>、18 703.6万t,总体呈上升趋势,其中,玉米播种面积和总产量分别于2007、2011年起超过小麦和水稻,成为我国第一大粮食作物<sup>[1]</sup>。根据国家统计局数据显示,2018年我国玉米播种面积和产量分别占全国农作物总播种面积和粮食总产量的21.1%和33.0%。玉米是世界性粮食作物,也是重要的饲料来源之一。近年来,人们的膳食结构发生巨大改变,社会对肉、蛋、奶、粗粮的需求提高了50%以上。畜牧业的发展以及玉米加工技术的进步,使得既可作粮用又可作饲用的玉米的需求量急剧增大。全球气候变暖背景下,我国气候变化总体趋势与全球一致,近百年间(1914–2013年),我国地表平均气温增幅为0.91℃,这极大地改变了我国各地区农业气候资源<sup>[2]</sup>。华北平原是我国气候变化敏感区之一,研究表明,气候变暖使华北平原热量资源更加丰富,≥10℃积温呈北移东扩的变化特征<sup>[3]</sup>。1961–2015年华北平原夏玉米生长季≥10℃积温增加了75.4℃·d,特别是2000年以后热量资源增加更显著<sup>[4]</sup>。因此,基于玉米需求量骤增的新时期粮食生产现状和华北平原热量资源显著增加前提下,双季玉米种植模式可以作为传统种植模式的重要补充。

双季玉米种植模式是近年来提出的一种提高作物资源利用效率的种植模式。已有研究在黄淮海地区进行了早春地膜双季青贮玉米、早春覆膜双季子粒玉米种植模式的品种类型及种植密度等种植技术探索及资源利用分析<sup>[5–8]</sup>。与传统冬小麦–夏玉米模式相比,双季玉米模式可以充分发挥玉米C<sub>4</sub>作物高光效、高资源利用效率的特点,有效提高全年水热利用效率和周年经济效益<sup>[9–11]</sup>,是水、光、温生产效率高、经济效益好的高效和简化的种植模式。双季子粒玉米栽培需要的热量资源多,技术要求高,并且产值受市场波动大。青贮–子粒玉米模式一方面顺应“粮改饲”种植调整,促进农牧结合,使种植结构多元化,另一方面可增加秋粮生产<sup>[12]</sup>。在我国华北平原地区,为了应对农业水资源短缺、粮食需求结构性变化、气候变暖、灾害性气候事件频发等突出问题,推广一种双季玉米弹性种植系统,将有重要的科学意义和社会经济价值。通过调整种植制度、选择适宜播种日期,可以充分利用当地水热资源,降低气候灾害风险,提高作物产量<sup>[13–16]</sup>。品种是影响耕作制度的重要因素之一,也是种植制度演进的先决条件<sup>[17]</sup>,热量是影响玉米生长发育和品种搭配的首要条件。

玉米需求量骤增和气候变暖背景下,黄河下游

地区现有和未来气候条件下是否能满足青贮–子粒双季玉米连作种植模式的热量需求,不同熟期玉米品种如何搭配以提高全年热量资源利用,目前还鲜有报道。围绕以上两个问题,本研究利用中国科学院禹城综合试验站1961–2020年逐日平均气温资料,分析黄河下游灌区近60年内的热量资源历史趋势变化以及不同年份的玉米熟期品种搭配,为黄河下游地区新型种植模式的推广、种植模式优化布局和农业生产可持续发展提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

研究区为中国科学院禹城综合试验站(以下简称禹城站),位于山东省西北部(36°57'N, 116°36'E, 海拔28 m),地处华北平原的黄河冲积平原、黄河下游,研究区内土壤为黄河冲积物母质发育,土壤类型主要为潮土和盐化潮土,是华北平原地区的典型农田生态系统。年均气温13.4℃,年均降水量567 mm,夏季为主要降雨期,夏季降雨量占全年雨量60%以上<sup>[18,19]</sup>,水热条件优良,利于作物种植和生长。研究区属温暖带半湿润季风气候,四季分明,雨热同期,春季干旱多风,夏季炎热多雨,冬小麦–夏玉米为其传统典型种植模式,与黄河下游地区典型农业类型一致。

### 1.2 数据来源

气象数据来源于禹站气象观测站1961–2020年逐日气象资料,主要包括日平均气温、日最高气温、日最低气温、日降水量、日照时数、日平均水汽压、风速和风向等。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 气候倾向率计算

用 $X$ 表示样本量为 $n$ 的某一气候要素,用 $t$ 表示对应的年序,采用最小二乘法拟合得到一元线性回归方程,即:

$$X = at + b \quad (t = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式(1)中, $a$ 为回归系数,以 $a$ 的10倍作为气象要素的气候倾向率,正的(或负的) $a$ 值表明增加(或减少)趋势<sup>[20]</sup>。拟合的回归方程采用 $F$ 检验法进行显著性检验。

#### 1.3.2 生长季计算

使用5日滑动平均法计算玉米可能生长季。初始日以春季第一次出现高于10℃之日起向前推4 d,按日序依次计算出每连续5日的平均气温,从中选出平均气温大于10℃并在其后连续5日不再出现平均气温低于10℃的时段中挑出第1个日平均气温大

于等于10℃的日期,以此日即为≥10℃的起始日。

终止日在秋季第1次出现低于10℃之日起向前推4 d,按日依次算出每连续5日的平均气温,并从连续5日中选出第1个出现小于或等于10℃的时段中挑出最后1个日平均气温大于或等于界限温度10℃的时期,以此日即为终止日期<sup>[21]</sup>。

### 1.3.3 积温计算

积温是农业生产的重要热量指标。大于等于界限温度的日平均温度之和为活动积温,即:

$$AT_a = \sum_0^n T_i (T_i \leq B, T_i = 0) \quad (2)$$

式(2)中, $AT_a$ 为活动积温; $n$ 为界限温度期间的持续日数; $T_i$ 为第*i*日平均气温; $B$ 为界限温度,对玉米而言,界限温度通常为10℃。对玉米生育期内逐日平均气温持续≥10℃的日平均温度求和得玉米成熟所需活动积温<sup>[22]</sup>。

$AT_e$ 为有效积温,即:

$$AT_e = \sum_0^n (T_i - B) (T_i \leq B, T_i = 0) \quad (3)$$

### 1.3.4 不同熟期玉米成熟所需活动积温

玉米熟期数据来自文献<sup>[27-35]</sup>和试验。根据整个生育期(播种至收获)所需≥10℃活动积温将玉米划分为早熟、中熟和晚熟3个熟期。由表1所示,早熟

期玉米包括协玉早1号、新农早3号、登海518、衡早8号等,全生育期所需活动积温为2 300~2 500℃·d;中熟期玉米包括益农103、利合16、太玉396、并单6号、并单16、元华5号、泉玉12等,全生育期所需活动积温为2 500~2 800℃·d;晚熟期玉米包括大丰26、潞玉36、郑单958、农大108、先玉335、先玉987、登海605、登海618、登海661、迪卡516、吉祥1号、玉农1008、潞玉1号、明玉3号等,全生育期所需活动积温为2 800~3 000℃·d。华北平原广泛种植和推广的杂交玉米为浚单20、郑单985、先玉335等<sup>[36]</sup>。

### 1.3.5 Mann-Kendall 检验(M-K 检验)

Mann-Kendall 检验法(简称 M-K 法)是世界气象组织推荐的用于提取序列变化趋势的有效工具,其优点在于不受个别异常值的干扰,能够客观反映时间序列趋势,目前已被广泛用于气候参数和水文序列的分析中。M-K 法可以根据输出的两个序列(UF 和 UB)明确突变的时段和区域。若 UF 值大于0且超过临界直线,表明时间序列呈显著上升趋势( $P < 0.05$ );反之,若 UF 值小于0且超过临界直线,表明时间序列呈显著下降趋势( $P < 0.05$ );若 UF 和 UB 两条曲线相交且交点在临界直线之间,则突变开始的时间即为交点所对应的时刻。

表1 不同熟期玉米品种播种至成熟期所需活动积温

Table 1 Active accumulated temperature(≥10℃) required by different maturity types of corn varieties at different growth stages

熟期 Maturity	子粒玉米活动积温(℃·d) Active accumulated temperature of kernel corn	生育期天数(d) Days of growth stage	品种名称 Variety
早熟	2 300	95	协玉早1号、新农早3号、登海518、衡早8号、益农103
中熟	2 500	105	益农103、利合16、太玉396、并单6号、并单16、元华5号、泉玉12
晚熟	2 800	115	大丰26、潞玉36、郑单958、农大108、先玉335、先玉987、登海605、登海618、登海661、迪卡516、吉祥1号、玉农1008、潞玉1号、明玉3号

## 2 结果与分析

### 2.1 活动积温历史变化趋势与特征

禹城站1961–2020年玉米可能生长季活动积温多年平均值为4 613.5℃·d,总体有增加趋势,气候倾向率为51.6℃·d/10a( $R^2=0.22, P=0.00$ )(图1)。

禹城站1961–1970、1971–1980年玉米可能生长季活动积温平均值分别为4 552.2、4 459.1℃·d,有减少趋势;气候倾向率为-87.4( $R^2=0.02, P=0.73$ )、-117.1℃·d/10a( $R^2=0.07, P=0.45$ )。1981–1990、1991–2000年平均生长季活动积温分别为4 553.7、4 616.7℃·d,呈增加趋势;气候倾向率为101.8

( $R^2=0.04, P=0.56$ )、212.3℃·d/10a( $R^2=0.12, P=0.34$ )。2001–2010、2011–2020年平均生长季活动积温分别为4 770.7、4 728.8℃·d,有减少趋势;气候倾向率分别为-120.2( $R^2=0.07, P=0.45$ )、-129.2℃·d/10a( $R^2=0.05, P=0.53$ )(表2)。

近60年来,禹城站玉米生长季活动积温有波动,每10年变化不显著,但1961–2020年呈显著增加趋势。M-K 检验结果表明,≥10℃活动积温在1990–1995有1个突变点,且变化趋势显著( $P < 0.05$ ),即近60年禹城站的≥10℃活动积温增加趋势主要是从20世纪90年代开始的。

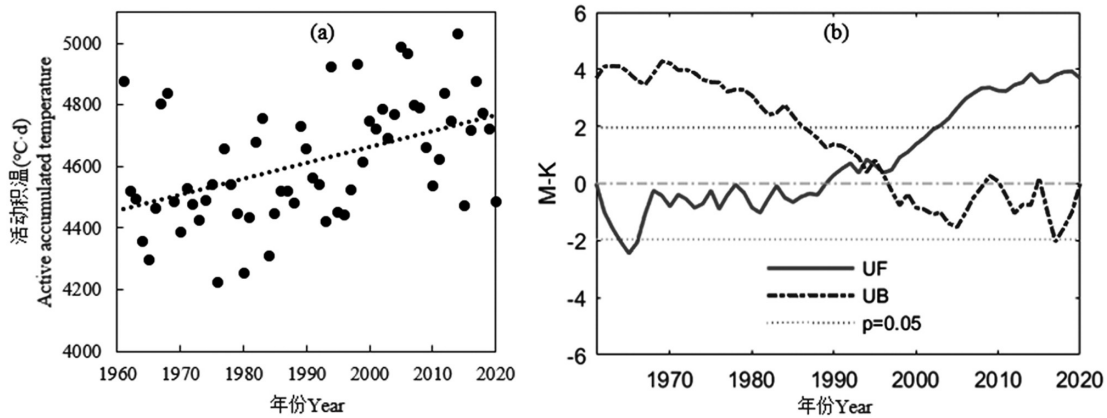


图1 1961–2020年玉米可能生长季 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温变化趋势(a)及其M-K趋势检验(b)

Fig.1 Variation trend(a) and M-K test(b) for  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  active accumulated temperature in corn growing season from 1961 to 2020

表2 不同年代间玉米可能生长季活动积温变化

Table 2 Active accumulated temperature of corn in different decadal periods

年份 Year	生长季活动积温( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ) Active accumulated temperature	线性回归方程 Linear regression equation	$R^2$	P值 P value
1961–1970	4 552.2 $\pm$ 199.2	$y=-8.74x+21\ 731.84$	0.02	0.73
1971–1980	4 459.1 $\pm$ 125.0	$y=-11.71x+27\ 586.85$	0.07	0.45
1981–1990	4 553.7 $\pm$ 138.3	$y=10.18x-15\ 655.10$	0.04	0.56
1991–2000	4 616.7 $\pm$ 179.4	$y=21.23x-37\ 752.01$	0.12	0.34
2001–2010	4 770.7 $\pm$ 127.5	$y=-12.02x+28\ 876.80$	0.07	0.45
2011–2020	4 728.8 $\pm$ 162.1	$y=-12.92x+30\ 767.81$	0.05	0.53
1961–2020	4 613.5 $\pm$ 190.7	$y=5.16x-5\ 660.19$	0.22	0.00

## 2.2 玉米可能生长季变化

禹城站 1961–2020 年玉米可能生长季天数 60 年平均值为 216.6 d, 总体有增加趋势, 趋势为 2.2 d/10 a ( $R^2=0.18$ ,  $P=0.07$ ); 可能生长季初始日序 60 年平均值为 92(4 月 2 日), 总体有提前趋势, 趋势为 -1.3 d/10 a ( $R^2=0.09$ ,  $P=0.02$ ); 可能生长季终止日序 60 年平均值为 307(11 月 3 日), 总体有推迟趋势, 趋势为 0.8 d/10 a ( $R^2=0.18$ ,  $P=0.00$ )(图 2)。

禹城站 1961–1970、1971–1980 年, 平均生长季天数分别为 210.8、212.1 d, 呈降低趋势, 趋势分别为 -5.0 ( $R^2=0.02$ ,  $P=0.13$ )、-3.9 d/10 a ( $R^2=0.03$ ,  $P=0.42$ ); 1981–1990 年平均生长季天数为 215.9 d, 呈增加趋势, 趋势不显著; 1991–2000 年平均生长季天数为 217.4 d, 无明显变化趋势; 2001–2010、2011–2020 年平均生长季天数分别为 223.5、220.0 d, 趋势分别为 -1.2 ( $R^2=0.20$ ,  $P=0.89$ )、-1.2 d/10 a ( $R^2=0.16$ ,  $P=0.48$ )(表 3)。

禹城站 1961–1970 年平均生长季初始日序分别为 96(4 月 6 日), 趋势不显著; 1971–1980、1981–1990、1991–2000 年, 平均生长季初始日序分别为 94.0(4 月

4 日)、90.3(3 月 31 日)和 92.1(4 月 2 日), 呈提前趋势, 趋势显著; 2001–2010 年平均生长季天数为 84.5 d(3 月 26 日), 趋势为 1.0 d/10 a ( $R^2=0.19$ ,  $P=0.20$ ); 2010–2020 年平均生长季天数为 91.6 d(4 月 2 日), 趋势为 1.6 d/10 a ( $R^2=0.25$ ,  $P=0.14$ )(表 4)。

禹城站 1961–1970、1971–1980 年玉米可能生长季终止日序平均值分别为 306(11 月 2 日)、305(11 月 1 日), 有明显提前趋势, 趋势分别为 -7.8 ( $R^2=0.26$ ,  $P=0.68$ )、-4.8 d/10 a ( $R^2=0.08$ ,  $P=0.64$ ); 1981–1990 年玉米可能生长季终止日序平均值为 305.2(11 月 1 日), 有明显推迟趋势, 趋势为 7.4 d/10 a ( $R^2=0.13$ ,  $P=0.48$ ); 1991–2000 年玉米可能生长季终止日序平均值为 309(11 月 5 日), 有提前趋势, 趋势为 -2.7 d/10 a ( $R^2=0.02$ ,  $P=1.00$ ); 2001–2010 年玉米可能生长季终止日序平均值为 307(11 月 3 日), 有提前趋势, 趋势为 -1.5 d/10 a ( $R^2=0.00$ ,  $P=0.20$ ); 2011–2020 年玉米可能生长季终止日序平均值为 310.6(11 月 7 日), 有推迟趋势, 趋势为 3.5 d/10 a ( $R^2=0.07$ ,  $P=0.26$ )(表 5)。

近 60 年来, 禹城站玉米生长季天数有波动增加趋势, 但变化不显著。玉米生长季初始日序呈提前

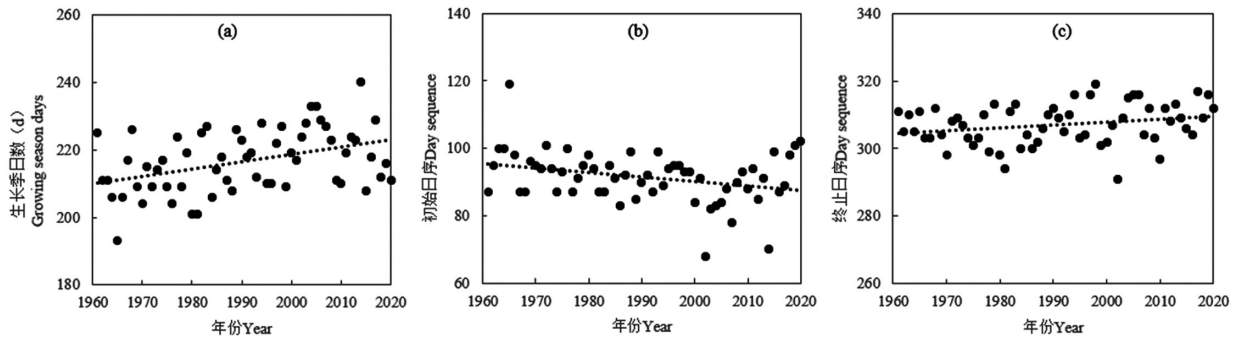


图2 1961–2020年玉米可能生长季日数(a)、初始日序(b)及终止日序(c)的变化趋势

Fig.2 Variation trend of growing season days of corn(a), initial day sequence(b) and ending day sequence(c) in corn growing season from 1961 to 2020

表3 不同年代际间玉米可能生长季天数变化

Table 3 Changes of growing season days of corn growing season in different decadal periods

年份 Year	生长季日数(d) Growing season days	线性回归方程 Linear regression equation	$R^2$	P值 P value
1961–1970	210.8±9.4	$y = -0.50x + 1187.59$	0.02	0.13
1971–1980	212.1±6.7	$y = -0.39x + 990.33$	0.03	0.42
1981–1990	215.9±8.8	$y = 0.78x - 1336.40$	0.07	0.31
1991–2000	217.4±6.6	$y = -0.02x + 265.78$	0.00	0.73
2001–2010	223.5±7.9	$y = -1.22x + 2666.56$	0.20	0.89
2011–2020	220.0±9.0	$y = -1.25x + 2736.32$	0.16	0.48
1961–2020	216.6±9.2	$y = 0.22x - 211.52$	0.16	0.07

表4 不同年代际间玉米可能生长季初始日序变化

Table 4 Changes of initial days of growing season days of corn growing season in different decadal periods

年份 Year	日序 Sequence	线性回归方程 Linear regression equation	$R^2$	P值 P value
1961–1970	96.4±9.0	$y = -0.28x + 644.36$	0.01	0.81
1971–1980	94.0±4.6	$y = -0.08x + 261.62$	0.00	0.88
1981–1990	90.3±4.7	$y = -0.04x + 174.53$	0.00	0.94
1991–2000	92.1±4.1	$y = -0.25x + 587.95$	0.03	0.63
2001–2010	84.5±7.0	$y = 1.07x - 2066.85$	0.19	0.20
2011–2020	91.6±9.1	$y = 1.60x - 3133.20$	0.25	0.14
1961–2020	91.5±7.7	$y = -0.13x + 353.47$	0.09	0.02

表5 不同年代际间玉米可能生长季终止日序变化

Table 5 Changes of ending days of growing season days of corn growing season in different decadal periods

年份 Year	日序 Sequence	线性回归方程 Linear regression equation	$R^2$	P值 P value
1961–1970	306.2±4.4	$y = -0.78x + 1830.95$	0.26	0.68
1971–1980	305.1±4.8	$y = -0.48x + 1250.95$	0.08	0.64
1981–1990	305.2±6.0	$y = 0.74x - 1162.87$	0.13	0.48
1991–2000	308.5±6.2	$y = -0.27x + 852.73$	0.02	1.00
2001–2010	307.0±8.0	$y = -0.15x + 598.71$	0.00	0.20
2011–2020	310.6±4.0	$y = 0.35x - 397.88$	0.07	0.26
1961–2020	307.1±6.0	$y = 0.08x + 140.96$	0.18	0.00

趋势,每10年变化不显著,但1961-2020年呈显著增加趋势;玉米生长季终止日序呈推迟趋势,每10年变化不显著,但1961-2020年呈显著增加趋势。

### 2.3 青贮-子粒双季玉米系统适宜搭配模式

#### 2.3.1 不同熟期玉米成熟所需活动积温

结合多年试验数据及前人研究,华北平原不同熟期的子粒玉米乳熟至完熟期积温统一取700°C·d。基于不同熟期的玉米整个生育期(播种至收获)所需≥10°C活动积温,获得不同熟期搭配下玉米青贮-子粒双季玉米模式所需积温(表6)。

表6 不同积温范围的品种搭配

Table 6 Different varieties assortment with different accumulated temperature

≥10°C活动积温(°C·d) ≥10°C active accumulated temperature	品种搭配 Variety assortment
≥4 900	晚-晚、晚-中、晚-早、中-中、中-早、早-早
4 600 ~ 4 900	晚-中、晚-早、中-中、中-早、早-早
4 400 ~ 4 600	晚-早、中-中、中-早、早-早
4 300 ~ 4 400	中-中、中-早、早-早
4 100 ~ 4 300	中-早、早-早
3 900 ~ 4 100	早-早

注:早、中、晚即早熟、中熟、晚熟,分别代表玉米品种的不同熟期。早熟、中熟、晚熟品种播种至成熟所需≥10°C活动积温分别为2 300、2 500、2 800°C·d。

Notes: Early, medium, and late ripening represent different maturity types of corn varieties. The active accumulated temperature required for sowing early, medium, and late maturing varieties to maturity is ≥10°C, which is 2 300°C·d, 2 500°C·d, and 2 800°C·d, respectively.

#### 2.3.2 早熟青贮-不同熟期子粒双季玉米搭配模式分析

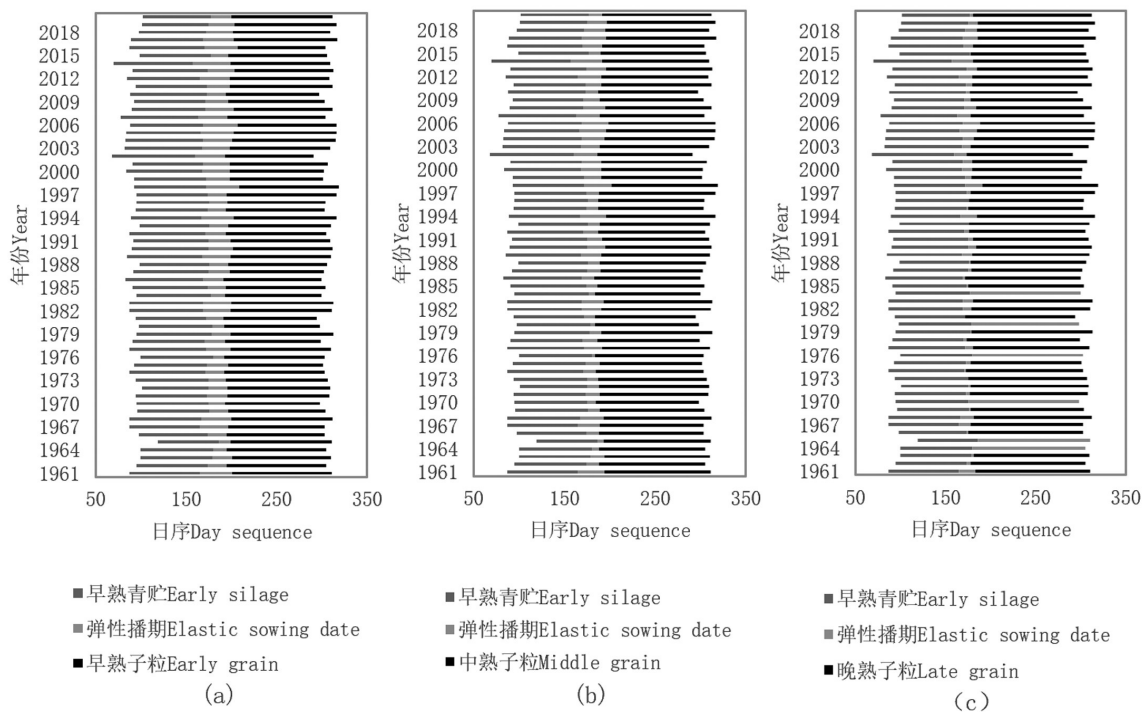


图3 1961-2020年早熟青贮玉米与不同熟期子粒玉米搭配的生长期变化

Fig.3 Growth period changes of early maturing silage corn with different mature grain corn from 1961 to 2020

1961-2020年禹城地区双季玉米的早熟青贮玉米的收获期平均日序为172.1,早熟子粒玉米的播种期平均日序为197.9,中熟子粒玉米的播种期平均日序为190.3,晚熟子粒玉米的播种期平均日序为

179.1,所有年份积温均满足早熟青贮-早熟子粒玉米、早熟青贮-中熟子粒玉米的种植条件,94%的年份积温可以达到早熟青贮-晚熟子粒玉米的种植条件。3种植植模式平均弹性播期分别为25.8、18.3、

9.0 d, 均有增加趋势, 趋势分别为  $1.9(R^2=0.23, P=0.00)$ 、 $1.8(R^2=0.20, P=0.00)$ 、 $1.5 \text{ d}/10 \text{ a}(R^2=0.13, P=0.00)$ (图3)。

### 2.3.3 中熟青贮—不同熟期子粒双季玉米搭配模式分析

1961–2020年禹城地区双季玉米的中熟青贮玉米的收获期平均日序为179.7, 早熟子粒玉米的播种期平均日序为197.9, 中熟子粒玉米的播种期平均日

序为190.3, 中熟子粒玉米的播种期平均日序为179.1。所有年份积温均满足中熟青贮—早熟子粒玉米的种植条件, 98%的年份积温可以达到中熟青贮—中熟子粒玉米的种植条件, 46%的年份积温可以达到中熟青贮—晚熟子粒玉米的种植条件。3种植植模式平均弹性播期分别为18.2、11.5、6.2 d, 均有增加趋势, 趋势分别为  $2.0(R^2=0.24, P=0.00)$ 、 $1.8(R^2=0.21, P=0.00)$ 、 $0.9 \text{ d}/10 \text{ a}(R^2=0.14, P=0.00)$ (图4)。

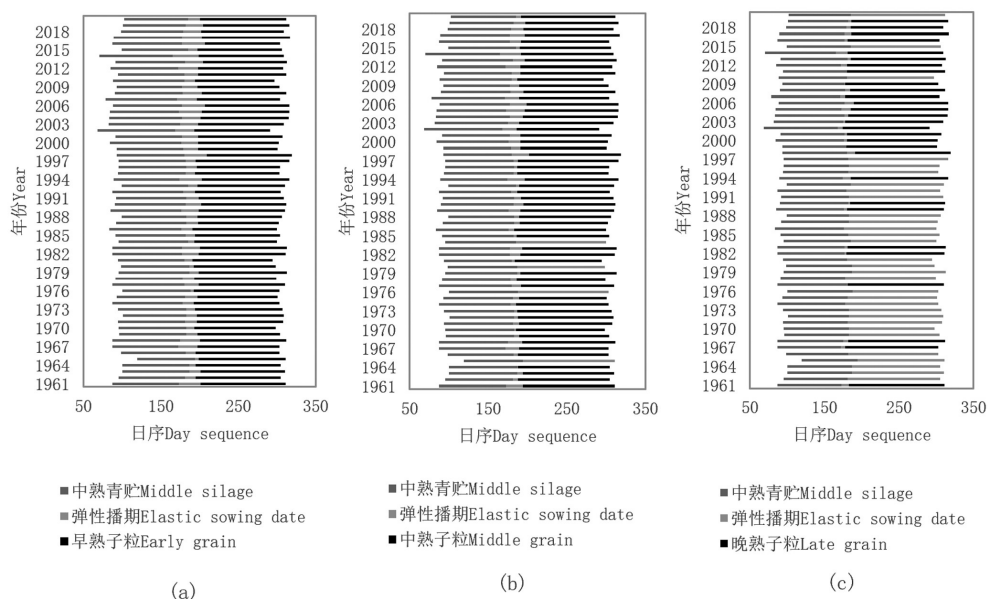


图4 1961–2020年中熟青贮玉米与不同熟期子粒玉米搭配的生长期搭配的变化

Fig.4 Changes in growth period of medium mature silage corn and different mature grain corn from 1961 to 2020

### 2.3.4 晚熟青贮—不同熟期子粒双季玉米搭配模式分析

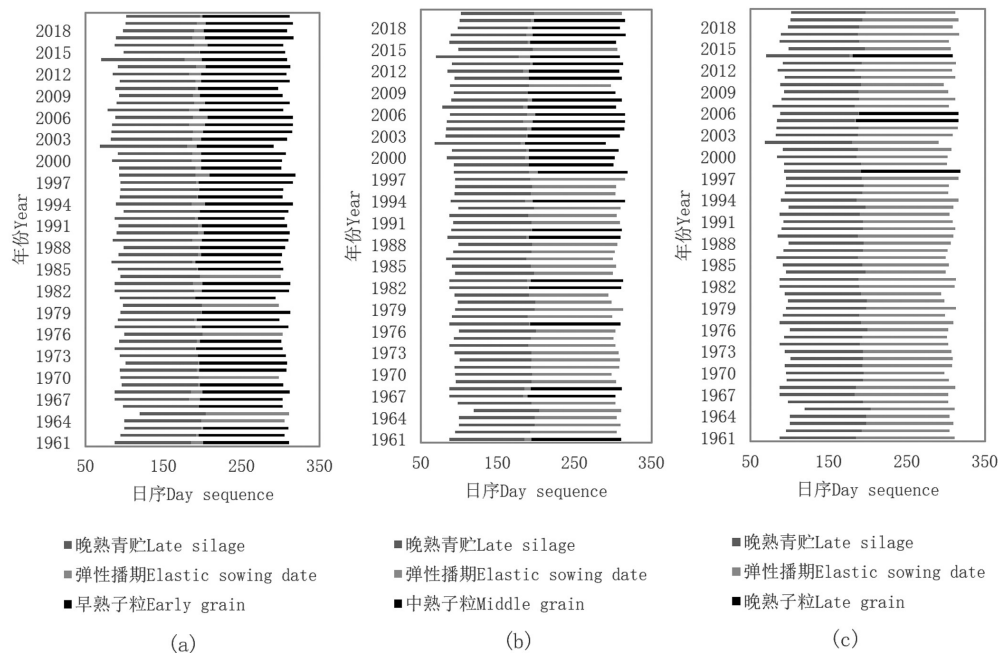


图5 1961–2020年晚熟青贮玉米与不同熟期子粒玉米搭配的生长期搭配的变化

Fig.5 Changes in the growth period of late maturing silage corn and different mature grain corn from 1961 to 2020

1961–2020年禹城地区双季玉米的晚熟青贮玉米的收获期平均日序为191.0,早熟子粒玉米的播种期平均日序为197.9,中熟子粒玉米的播种期平均日序为190.3,中熟子粒玉米的播种期平均日序为179.1。91%的年份积温可以达到晚熟青贮-早熟子粒玉米的种植条件,46%的年份积温可以达到晚熟青贮-中熟子粒玉米的种植条件;晚熟青贮-晚熟子粒玉米的种植条件几乎不能满足,只有7%。3种植模式平均弹性播期分别为8.7、6.1、1.8 d。均有增加趋势,前两种模式弹性播期的趋势分别为1.8 ( $R^2=0.23, P=0.00$ )、0.8 d/10 a ( $R^2=0.14, P=0.00$ ) (图5)。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 青贮-子粒新型双季玉米种植模式与传统种植模式的比较

$C_4$ 作物具有高光合能力、高水肥利用效率等优点,产量及光温水资源利用效率的潜力比 $C_3$ 作物大。4~10月是双季玉米的生育期也是一年中光温水资源的集中期,同时使土地空余的时间长达150 d左右,既能充分利用气候资源,又能避免作物遭遇冻害和冬旱,有利于土壤中有机的积累和水分储存,使农田得到充分休养<sup>[37]</sup>。前人研究表明,根据双季玉米不同熟期的品种搭配的产量与冬小麦-夏玉米的产量相当或略高,但温度生产效率、光能生产效率、水分利用效率、经济效益显著高于冬小麦-夏玉米种植模式<sup>[38,39]</sup>。Wang等<sup>[40]</sup>通过对不同熟期玉米品种组合分析得出,华北平原地区双季玉米种植模式的平均产量与传统冬小麦-夏玉米种植模式相当。李立娟等通过大田试验研究表明,黄淮海平原区双季覆膜玉米-玉米模式比冬小麦-夏玉米模式周年产量略高,平均增幅2.3%~9.2%,但差异不显著。王美云等研究表明,双季青贮地膜玉米-玉米模式与传统模式冬小麦-夏玉米,全年干物质生产率提高10.3%。吴丹研究表明,各熟期搭配的双季玉米的水分利用效率和子粒光能生产效率均高于冬小麦-夏玉米。周宝元等有同样的研究结果,双季玉米的周年日产量及周年光、温生产效率及子粒光能利用效率显著高于冬小麦-夏玉米模式。唐永金研究指出,双季玉米经济效益比冬小麦-夏玉米高出1379元/hm<sup>2</sup>。

最初的双季玉米种植模式是为提高耕地复种指数、有效利用光热资源探索的一年三熟种植模式。1955年,郭中建<sup>[41]</sup>最初试种夏秋双季玉米,玉米套种在小麦地行间。1998年,郑建初<sup>[42]</sup>针对江苏省种植结构单一、饲料严重亏缺等问题,研究了双季玉米种

植模式及其配套栽培技术。2000年,黄淮南部地区开始试验双季玉米的栽培,并且取得了初步的成功和较好效益,2002年已逐步大面积推广<sup>[43]</sup>。21世纪以来,为了适应与农区畜牧业发展的新形势及气候变化造成的资源的浪费,探索了双季青贮玉米和双季玉米套种、移栽等种植模式。虽然双季子粒玉米周年产量比传统冬小麦-夏玉米模式高,但保证第一季玉米产量时,第二季同品种玉米产量会明显降低,主要原因可能是第二季玉米后期灌浆遭遇低温及热量不足情况导致产量较低。温度是热量资源限制型两熟区双季玉米的生产主导因素,较大限度地发挥了玉米的产量潜力;覆膜栽培能有效提高前期温度,使有效生育期得到延长,并能获得高出苗率和保苗株数,从而增加产量。资源限制型二熟区生产双季青贮-子粒玉米可以减少单季玉米的热量资源浪费和弥补双季子粒玉米的热量不足。

#### 3.2 青贮-子粒新型双季玉米种植模式的未来热量资源可行性分析

通过禹城站1961–2020年玉米可能生长季活动积温、生长季天数、生长季初始日序和终止日序线性趋势,分析未来30、60年的玉米可能生长季情况。2050年玉米可能生长季活动积温增至4920.7℃·d、生长季天数增加至239.5 d,初始日序提前至87,终止日序推迟至305;2080年玉米可能生长季活动积温增加至5075.5℃·d、生长季天数增加至246.1 d,初始日序提前至83,终止日序推迟至307。

相对1961–1990、1991–2020年,未来30年玉米可能生长季活动积温预计平均增加321.5、137.8℃·d,可能生长季天数预计增加13.3、5.9 d;未来60年玉米可能生长季活动积温预计增加476.4、292.7℃·d,可能生长季天数预计增加19.7、12.4 d。根据积温条件分析,1961–1990年满足晚-早、中-中、中-早、早-早搭配模式,1991–2020、2021–2050年增加了晚-中搭配模式,2051–2080年开始增加了晚-晚搭配模式,积温条件满足所有品种搭配。晚熟玉米品种生育期长、灌浆期长,因而能够获得较高的产量。丰富的热量资源,可以选择更丰富的品种搭配,在保证子粒安全成熟的前提下,选择生育期合适的品种,适当延长生育期,可增加光能利用时间,提高玉米产量<sup>[44]</sup>。未来随着热量资源的增加,双季玉米种植模式的中熟、晚熟品种搭配比重也会增加,这会大大增加双季玉米种植模式的周年产量及周年热量利用。

#### 3.3 双季玉米种植模式的应用前景展望与问题

随着全球气候变暖,未来可能生长季日数和活

动积温不断增加,黄河下游地区青贮-子粒双季玉米种植模式的多样性增加,弹性播期延长、不同品种搭配模式增加等,更适宜青贮-子粒双季玉米种植模式。全球气候变暖的趋势越来越明显,IPCC第5次评估报告指出,1880-2012年全球平均气温升高 $0.85^{\circ}\text{C}$ <sup>[45]</sup>,同时,极端性气候如夏季高温事件发生频次增加,且持续时间延长<sup>[46]</sup>。未来气候变暖可以增加双季玉米热量资源的同时,极端天气发生频率也不断增加。高温胁迫下,夏玉米生育期缩短、细胞衰老加速、光合速率降低、开花授粉过程受阻、玉米穗粗减小、穗长变短、秃尖长度增加、穗粒数和百粒重降低、空秆率和畸形穗率增加,最终导致产量下降<sup>[47]</sup>。花期和灌浆期是玉米雌雄穗生长发育和子粒形成的关键时期,禾谷类作物经济产量的60%~100%来自开花后到成熟期的光合代谢产物<sup>[48]</sup>,该时期的高温胁迫造成的产量损失远高于营养生长期。研究表明,降水年型显著影响旱地玉米产量<sup>[49]</sup>。因此,综合多种气候因素,新型双季玉米模式还有诸多不确定因素,现阶段进行的只是热量资源方面的可行性分析。本文仅针对双季玉米热量资源的可行性进行分析,降水、灌溉、气象灾害及不同农艺措施对玉米生长发育的影响,在未来的工作中进行。禹城站玉米可能生长季日数、积温在近60年内的年际趋势变化显著,且初始日序有提前趋势,终止日序有推迟趋势。根据禹城站1961-2020年气象数据分析可知,禹城站近60年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温平均值为 $4\ 613.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ,总体呈增加趋势,气候倾向率为 $51.6^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}/10\ \text{a}$ ( $R^2=0.22, P=0.00$ );玉米适宜生长季多年平均值为216.6 d,呈增加趋势,趋势为 $2.2\ \text{d}/10\ \text{a}$ ( $R^2=0.18, P=0.07$ );生长季初始日序多年平均值为92(4月2日),呈提前趋势,趋势为 $-1.3\ \text{d}/10\ \text{a}$ ( $R^2=0.09, P=0.02$ );终止日序平均值为307(11月3日),呈推迟趋势,趋势为 $0.8\ \text{d}/10\ \text{a}$ ( $R^2=0.18, P=0.00$ )。

禹城地区双季玉米适宜的种植模式为早熟青贮-早熟子粒玉米、早熟青贮-中熟子粒玉米、中熟青贮-早熟子粒玉米;较适宜的种植模式早熟青贮-晚熟子粒玉米、中熟青贮-中熟子粒玉米;热量条件丰富的情况下可以种植中熟青贮-晚熟子粒玉米、晚熟青贮-中熟子粒玉米;不适宜晚熟青贮-晚熟子粒玉米的种植模式。但随着热量资源增加,禹城地区的青贮-子粒双季玉米种植模式熟期搭配从1961-1990晚-早搭配模式,向1991-2020、2021-2050年晚-中搭配模式过渡,2051-2080年满足晚-晚搭配模式。根据不同年型选择适宜玉米品种搭配及管理措施,以提高周年产量及资源利用效率。

#### 参考文献:

- [1] 李存玲,李拴曹,邬 勃.对我国玉米产业发展的思考[J].安徽农学通报,2017,23(19):37-39.  
LI C L, LI S C, WU B. Thoughts on the development of corn industry in China[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2017, 23(19): 37-39. (in Chinese)
- [2] 周广胜.气候变化对中国农业生产影响研究展望[J].气象与环境科学,2015,38(1):80-94.  
ZHOU G S. Research prospect on impact of climate change on agricultural production in China[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2015, 38(1): 80-94. (in Chinese)
- [3] 马洁华,刘 园,杨晓光,等.全球气候变化背景下华北平原气候资源变化趋势[J].生态学报,2010,30(14):3818-3827.  
MA J H, LIU Y, YANG X G, et al. Characteristics of climate resources under global climate change in the North China Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(14): 3818-3827. (in Chinese)
- [4] 杨鹏宇,胡 琦,马雪晴,等.1961-2015年华北平原夏玉米生长季光热资源变化及其影响[J].中国农业气象,2018,39(7):431-441.  
YANG P Y, HU Q, MA X Q, et al. Spatiotemporal variation of heat and solar resources and its impact on summer maize in the north China plain over the period 1961-2015[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2018, 39(7): 431-441. (in Chinese)
- [5] 王美云,任天志,赵 明,等.双季青贮玉米模式物质生产及资源利用效率研究[J].作物学报,2007,33(8):1316-1323.  
WANG M Y, REN T Z, ZHAO M, et al. Matter production and resources use efficiency of double-cropping silage maize system[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(8): 1316-1323. (in Chinese)
- [6] 李立娟,王美云,薛庆林,等.黄淮海双季玉米产量性能与资源效率的研究[J].作物学报,2011,37(7):1229-1234.  
LI L J, WANG M Y, XUE Q L, et al. Yield performance and resource efficiency of double-cropping maize in the yellow, Huai and Hai River valleys region[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(7): 1229-1234. (in Chinese)
- [7] 周宝元,王志敏,岳 阳,等.冬小麦-夏玉米与双季玉米种植模式产量及光温资源利用特征比较[J].作物学报,2015,41(9):1393-1405.  
ZHOU B Y, WANG Z M, YUE Y, et al. Comparison of Yield and Light-temperature resource use efficiency between wheat - maize and maize - maize cropping systems[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(9): 1393-1405. (in Chinese)
- [8] 王 丹.双季玉米体系周年产量形成与气候资源高效利用机制研究[D].武汉:华中农业大学,2020.
- [9] 李立娟.黄淮海双季玉米关键栽培技术及产量性能和资源效率研究[D].保定:河北农业大学,2008.
- [10] 王美云,赵 明,任天志,等.早春地膜双季青贮玉米物质生产及其资源生产效率的研究[J].玉米科学,2008,16(4):127-129,134.  
WANG M Y, ZHAO M, REN T Z, et al. Study on material production and resource production efficiency of double cropping silage corn with plastic film in early spring[J]. Journal of Maize Sciences, 2008, 16(4): 127-129, 134. (in Chinese)
- [11] 石鹏飞,杨东玉,郑媛媛,等.华北平原粮饲复合种植模式[J].

- 草业科学, 2015, 32(12): 2107-2113.
- SHI P F, YANG D Y, ZHENG Y Y, et al. Grain feed compound planting model in North China Plain[J]. Grassland Science, 2015, 32(12): 2107-2113. (in Chinese)
- [12] 张顺风, 张桂萍, 管霞, 等. 河北省不同种植形式生态资源利用与效益分析[J]. 农业科技通讯, 2021(1): 36-39.
- ZHANG S F, ZHANG G P, G X, et al. Utilization and benefit analysis of ecological resources in different planting forms in Hebei Province[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2021(1): 36-39. (in Chinese)
- [13] 张军旗. 有效积温数值在玉米选育生产上的修订与应用[J]. 现代农业科技, 2017(10): 190-191.
- ZHANG J Q. Revision and application of effective accumulated temperature in maize breeding and production[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2017(10): 190-191. (in Chinese)
- [14] 杨海龙, 付俊, 张丽丽, 等. 积温在玉米熟期分类上的应用[J]. 农业科技通讯, 2017, 5(545): 178-179.
- YANG H L, FU J, ZHANG L L, et al. Application of accumulated temperature in maize maturity classification[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2017, 5(545): 178-179. (in Chinese)
- [15] 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.
- HE H Y, HU Q, PAN X B, et al. Characteristics of heat damage during flowering period of summer maize and suitable sowing date in north China plain under climate change[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2020, 41(1): 1-15. (in Chinese)
- [16] 刘永花. 不同熟期玉米品种积温需求定量研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2014.
- [17] 钱友山, 文化. 京郊气候资源与种植制度[J]. 北京农业科学, 1994, 12(4): 33-37.
- QIAN Y S, WEN H. Crops and their varieties and planting system in the suburbs of Beijing[J]. Beijing Agricultural Science, 1994, 12(4): 33-37. (in Chinese)
- [18] TU C, LI F D. Responses of greenhouse gas fluxes to experimental warming in wheat season under conventional tillage and no-tillage fields[J]. Journal of Environmental Sciences, 2017, 54(4): 314-327.
- [19] 李发东, 杜锐, 张秋英, 等. 华北平原农田 N<sub>2</sub>O 排放通量的高频动态观测[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(2): 195-202.
- LI F D, DU K, ZHANG Q Y, et al. High frequency dynamic observation of N<sub>2</sub>O emission flux from farmland in the north China plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(2): 195-202. (in Chinese)
- [20] 沈琪, 曾燕, 肖卉, 等. 江苏省日照时数的气候特征分析[J]. 气象科学, 2007, 27(4): 425-429.
- SHEN Z, ZENG Y, XIAO H. Changes of sunshine hours in the recent 40 years over Jiangsu province[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2007, 27(4): 425-429. (in Chinese)
- [21] 唐薇. 用5日滑动平均气温作四季划分[J]. 绵阳经济技术高等专科学校学报, 2000, 17(4): 19-20.
- TANG W. Dividing four seasons by 5-day moving average temperature[J]. Journal of Mianyang Economic and Technological College, 2000, 17(4): 19-20. (in Chinese)
- [22] 孙敬松, 周广胜. 利用最大熵法(MaxEnt)模拟中国冬小麦分布区的年代际动态变化[J]. 中国农业气象, 2012, 33(4): 481-487.
- SUN J S, ZHOU G S. Inter decadal variability of winter wheat planting zone in China during 1961 to 2010 simulated by maximum entropy[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2012, 33(4): 481-487. (in Chinese)
- [23] 张涵丹, 卫伟, 薛蕙. 基于R/S分析和Mann-Kendall检验的定西市气温降水变化特征[J]. 水土保持研究, 2015, 22(6): 183-189.
- ZHANG H D, WEI W, XUE S. Analysis on the variation of temperature and precipitation changes in Dingxi city based on R/S and Mann-Kendall test[J]. Research on Soil and Water Conservation, 2015, 22(6): 183-189. (in Chinese)
- [24] 康淑媛, 张勃, 柳景峰, 等. 基于Mann-Kendall法的张掖市降水量时空分布规律分析[J]. 资源科学, 2009, 31(3): 501-508.
- KANG S Y, ZHANG B, LIU J F, et al. Analysis of the spatiotemporal distribution of precipitation in Zhangye city using Mann-Kendall method[J]. Resources Science, 2009, 31(3): 501-508. (in Chinese)
- [25] GERSTENGARBE F W, WERNER P C. Estimation of the beginning and end of recurrent events within a climate regime[A]. New dimensions of India's foreign policy[C]. Vision Books, 1999: 97-107.
- [26] ZHANG Q, LIU C, XU C Y, et al. Observed trends of annual maximum water level and stream flow during past 130 years in the Yangtze River Basin, China[J]. Journal of Hydrology, 2006, 324(1-4): 255-265.
- [27] 马磊磊. 玉米生育进程对播期及其光温因子的响应[D]. 晋中: 山西农业大学, 2014.
- [28] 万泽花, 任伯朝, 赵斌, 等. 不同熟期夏玉米品种子粒灌浆与脱水特性及其密度效应[J]. 作物学报, 2018, 44(10): 1517-1526.
- WAN Z H, REN B Z, ZHAO B, et al. Grain filling and dehydration characteristics of summer maize hybrids differing in maturities and effect of plant density[J]. Acta Agronomica Sinica, 2018, 44(10): 1517-1526. (in Chinese)
- [29] 陈静, 任伯朝, 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. (in Chinese)
- [30] 张厚瑄. 中国种植制度对全球气候变化的响应的有关问题I: 气候变化对我国种植制度的影响[J]. 中国农业气象, 2000, 2(1): 9-13.
- ZHANG H X. Issues related to the response of China's planting system to global climate change I: the impact of climate change on China's planting system[J]. China Agrometeorology, 2000, 2(1): 9-13. (in Chinese)
- [31] 金照光. 不同播期对冀东地区春玉米生长发育及水分利用效率的影响[D]. 秦皇岛: 河北科技师范学院, 2014.
- [32] 杨宁, 潘学标, 张立祯, 等. 适宜播期提高农牧交错带春小麦产量和水氮利用效率[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 81-90.

- YANG N, PAN X B, ZHANG L Z, et al. Suitable sowing date to improve spring wheat yield and water and nitrogen utilization efficiency in the agro pastoral ecotone[J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2014, 30(8): 81–90. (in Chinese)
- [33] ZHOU B, YUE Y, SUN X, et al. Maize kernel weight responses to sowing date-associated variation in weather conditions[J]. *Crop Journal*, 2017, 18(5): 43–51.
- [34] 刘 瑶. 不同熟期青贮玉米器官发育差异及不同器官对产量和品质的影响[D]. 张家口:河北北方学院, 2020.
- [35] 李立娟, 王美云, 赵 明. 品种对双季玉米早春季和晚夏季的适应性研究[J]. *作物学报*, 2011, 37(9): 1660–1665.
- LI L J, WANG M Y, ZHAO M. Adaptability of varieties to double-cropping in early spring and late summer[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(9): 1660–1665. (in Chinese)
- [36] 邵立威, 王艳哲, 苗文芳, 等. 品种与密度对华北平原夏玉米产量及水分利用效率的影响[J]. *华北农学报*, 2011(3): 182–188.
- SHAO L W, WANG Y Z, MIAO W F, et al. Effect of cultivar and plant density on summer maize grain yield and water use efficiency in north China plain[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2011(3): 182–188. (in Chinese)
- [37] MENG Q F; SUN Q P; CHEN X P, et al. Alternative cropping systems for sustainable water and nitrogen use in the north China plain [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2012, 146(1): 93–102.
- [38] 吴 丹. 双季玉米在河北平原适应性的系统研究[D]. 保定:河北农业大学, 2014.
- [39] 唐永金. 四川双季玉米栽培技术及效益分析[J]. *作物杂志*, 2004(3): 28–30.
- TANG Y J. Cultivation techniques and benefit analysis of double season corn in Sichuan[J]. *Crops*, 2004(3): 28–30. (in Chinese)
- [40] WANG X Y, LIU X W, WU Q Z, et al. The suitability of the emerging double maize system towards sustainable water use under a warm temperature continental monsoon climate[J]. *Agronomy Journal*, 2019, 111(4): 1946–1957.
- [41] 郭中建. 浙江浦江县群众种植双季玉米的经验[J]. *农业科学通讯*, 1955(6): 346.
- GUO Z J. Experience of planting double season corn in Pujiang county, Zhejiang province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1955(6): 346. (in Chinese)
- [42] 郑建初, 吴 魁. 玉米—玉米种植模式及其高产省工配套栽培技术研究初报[J]. *江苏农业科学*, 1998(4): 24–27, 45.
- ZHENG J C, WU K. Preliminary study on maize planting model and its high yield and labor-saving cultivation techniques[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 1998(4): 24–27, 45. (in Chinese)
- [43] 周 彤. 黄淮地区双季玉米栽培新模式[J]. *农业新技术*, 2003(2): 10.
- ZHOU T. A new cultivation model of double cropping maize in Huang Huai area[J]. *Beijing Agricultural Sciences*, 2003(2): 10. (in Chinese)
- [44] 王晓慧, 张 磊, 刘双利, 等. 不同熟期春玉米品种的子粒灌浆特性[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]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(18): 3557–3565. (in Chinese)
- [45] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change: Mitigation of Climate Change. Contribution of working group iii to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [46] GOURDJJI S M, SIBLEY A M, LOBELL D B. Global crop exposure to critical high temperatures in the reproductive period: historical trends and future projections[J]. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(2): 24–41.
- [47] 徐欣莹, 邵长秀, 孙志刚, 等. 高温胁迫对玉米关键生育期生理特性和产量的影响研究进展[J]. *玉米科学*, 2021, 29(2): 81–88, 96.
- XU X Y, SHAO C X, SUN Z G, et al. Research progress on effect of heat stress on maize physiological characteristics at key growth stage and its yield[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2021, 29(2): 81–88, 96. (in Chinese)
- [48] 李文阳, 王长进, 方 伟, 等. 不同生育期高温对玉米子粒品质及淀粉糊化特性的影响[J]. *玉米科学*, 2017, 25(1): 82–86.
- LI W Y, WANG C J, FANG W, et al. Effects of high temperature at different stages on kernel quality and starch pasting properties of maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2017, 25(1): 82–86. (in Chinese)
- [49] 张元红, 王 瑞, 徐宗贵, 等. 不同降水年型下旱地玉米产量性状对种植密度和品种响应[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(22): 136–144.
- ZHANG Y H, WANG R, XU Z G, et al. Response of yield traits of dryland maize to planting density and varieties under different precipitation years[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(22): 136–144. (in Chinese)

(责任编辑:朴红梅)