

DOI: 10.12357/cjea.20240079

李扬, 王靖, 王培娟, 尹红, 胡琦, 黄明霞, 陈仁伟. 不同水分供应条件下春玉米的适宜播期[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(7): 1170–1182

LI Y, WANG J, WANG P J, YIN H, HU Q, HUANG M X, CHEN R W. Optimal sowing date of spring maize under different water supply conditions[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(7): 1170–1182

不同水分供应条件下春玉米的适宜播期*

李 扬^{1,2}, 王 靖^{2**}, 王培娟¹, 尹 红³, 胡 琦², 黄明霞³, 陈仁伟²

(1. 中国气象科学研究院 北京 100081; 2. 中国农业大学资源与环境学院 北京 100193; 3. 国家气候中心 北京 100081)

摘 要: 春玉米是半干旱区重要的粮食作物, 但该区降水少且年际变异大, 春玉米产量低而不稳。适宜播期的选择有利于作物稳产高产, 但适宜播期会随水分供应条件的变化而变化。本文以半干旱区主栽春玉米品种‘郑单 958’为研究对象, 使用 APSIM-Maize 模型探究该区分期播种试验的适宜间隔以及不同水分供应条件下 [雨养、灌溉 60 mm、灌溉 120 mm、灌溉 180 mm、灌溉 240 mm、潜在条件 (灌溉量 308 mm)] 春玉米的适宜播期范围。结果表明: 1) 以不同供水条件下春玉米产量的 5% 分位为差异阈值划分播期时, 该地区春玉米分期播种试验和模拟的时间步长建议设定为 4 d; 2) 雨养条件下, 干旱年、正常年和湿润年春玉米平均产量分别为 $0.9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $2.3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $5.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 平均水分利用效率分别为 $0.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $0.7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $1.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 潜在条件、灌溉 240 mm、灌溉 180 mm、灌溉 120 mm、灌溉 60 mm 和雨养条件下的适宜播期范围分别为 5 月 6 日—6 月 2 日、5 月 6—29 日、5 月 10—29 日、5 月 14—29 日、5 月 14—25 日和 5 月 14—17 日, 适宜播期范围随生育期供水量的增加而提前和扩大; 3) 潜在条件下春玉米产量的气象决定因子是生育期辐射量, 灌溉 240 mm 和 180 mm 时产量的气象决定因子分别是营养生长阶段辐射量和降水量, 灌溉 120 mm 和 60 mm 及雨养条件下的产量决定因子均为生育期降水量。本文探讨了春玉米的适宜播期及其随生育期供水量的变化规律, 研究结果可为半干旱区春玉米适水播种提供理论参考。

关键词: 春玉米; 播种窗口; 适宜播期; 产量保证率; 水分利用效率; 灌溉; 降水年型

中图分类号: S162.5+7

Optimal sowing date of spring maize under different water supply conditions*

LI Yang^{1,2}, WANG Jing^{2**}, WANG Peijuan¹, YIN Hong³, HU Qi², HUANG Mingxia³, CHEN Renwei²

(1. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 3. National Climate Center, Beijing 100081, China)

Abstract: Spring maize is an important food crop in the semi-arid region of northern China. However, owing to the low amount and high interannual and intramonthly variability of precipitation in this region, the yield of spring maize is low and unstable. Selecting a suitable sowing time can help increase the yield and yield stability of spring maize. However, it is difficult to determine the optimal sowing time for spring maize because it changes with the various water supply conditions in this region. To investigate the optimal interval of sowing time and optimal sowing time for spring maize in the semi-arid areas of northern China under different water conditions, this study used the calibrated and validated APSIM-Maize model to explore the optimal sowing time of spring maize under different water supply conditions [rainfed conditions, irrigation of 60 mm, irrigation of 120 mm, irrigation of 180 mm, irrigation of 240 mm, and potential condition (irrigation of 308 mm)] at a typical site in the semi-arid region. The main results of this study are as

* 国家重点研发计划 (2021YFD1901104) 资助

** 通信作者: 王靖, 主要从事农业生产系统模拟与气候变化影响评估研究。E-mail: wangj@cau.edu.cn

李扬, 主要从事农业生产系统模拟研究。E-mail: lyang@cma.gov.cn

收稿日期: 2024-02-22 接受日期: 2024-05-11

* This research was supported by the National Key Research and Development Program of China (2021YFD1901104).

** Corresponding author, E-mail: wangj@cau.edu.cn

Received Feb. 22, 2024; accepted May 11, 2024

follows: 1) by taking the 5% quantile of spring maize yield as the threshold for yield difference, the optimal time interval of sowing time could be set at four days as a reference for the serial-sowing experiment and simulation of spring maize. 2) When spring maize was sown between May 14 and 17, the yield guarantee rates under most water supply conditions were higher than those during the other sowing periods. The optimal sowing time for spring maize was significantly associated with water availability during the growth period. With an increase in irrigation amount, the optimal sowing time for spring maize advanced, and the range of the optimal sowing date was extended (rainfed condition: May 14 to 17; irrigation of 60 mm: May 14 to 25; irrigation of 120 mm: May 14 to 29; irrigation of 180 mm: May 10 to 29; irrigation of 240 mm: May 6 to 29; potential condition: May 6 to June 2). Under rainfed conditions, the mean yields of spring maize in the dry years, normal years, and wet years were 0.9, 2.3, and 5.5 t·hm⁻², respectively. The spring maize yield within the optimal sowing window under rainfed condition, and 60 mm, 120 mm, 180 mm, and 240 mm of irrigation and potential condition were 4.0, 5.7, 6.8, 8.6, 10.1, and 10.4 t·hm⁻², respectively. 3) The meteorological determining factor of spring maize yield under the potential condition was the solar radiation during growth period. Under 240 mm and 180 mm of irrigation, the meteorological determining factors of spring maize yields were solar radiation and precipitation during the vegetative growth period of spring maize. The growth period precipitation was the meteorological determining factor of spring maize yield under rainfed conditions and irrigation of 120 and 60 mm. Our results revealed the optimal sowing date and its change with the water supply conditions. The results of this study provide a scientific reference for sowing spring maize at a suitable time by considering the water available in the semi-arid region of northern China.

Keywords: Spring maize; Sowing window; Optimal sowing date; Yield guarantee rate; Water use efficiency; Irrigation; Precipitation year type

赤峰市位于内蒙古自治区东南部,是内蒙古重要的粮食产区之一^[1]。该区气候特点为温带半干旱大陆性季风气候,属 400 mm 降水等值线过渡区,多年平均降水量为 380 mm,属于典型半干旱地区^[2]。赤峰市粮食总播种面积约 1.09×10⁶ hm²,其中春玉米(*Zea mays* L.)播种面积约占粮食总播种面积的 32%^[3]。然而,受水资源限制,该地区春玉米单产水平普遍较低,产量年际变异较大,玉米实际产量仅为潜在产量的 30% 左右^[4]。

优化农艺管理是保证该地区春玉米稳产和高产的重要手段。播期调控作为简便有效的管理方式,可以在节省农业投入的前提下最大限度地提高作物光温水资源需求与供给的匹配度,进而提升作物产量,因此成为干旱半干旱地区作物稳产增产的重要措施^[5-7]。目前研究农作物的适宜播期主要采用大田试验和作物模型模拟两种方法。大田试验是探究春玉米适宜播期的最直接手段,如张可心等^[8]在甘肃陇东地区以 10 d 为间隔设置的玉米播期试验结果表明,适当晚播可因玉米抽雄期降水量的增加而增产。但也有研究表明晚播会加速玉米灌浆过程,从而降低同化产物积累和干物质转移,最终导致减产^[9]。张冬梅等^[10]在山西省中部的试验结果表明,旱地玉米较常规播期早播 7~8 d 可提高产量和水分利用效率,但太早播种极易导致玉米在苗期发生冻害而导致减产。

基于田间试验验证的作物模型可以考虑长期气候特征,通过设定更精确的播期间隔和管理方式来探究不同环境条件下春玉米的适宜播期^[11]。Shen

等^[12]使用 DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) 模型在黄土高原以 10 d 为间隔设置播期模拟了过去 51 年春玉米产量,结果表明春玉米适宜播期的选择主要依赖于播种前的温度条件,当日平均气温连续 7 d 大于 10℃ 时可作为玉米的适宜播种期。Binder 等^[13]在华北平原使用 CERES (Crop Environment Resource Synthesis)-Maize 探究春玉米的适宜播期,结果表明推迟播期可以使春玉米生育期更接近雨季,从而有效避免生育期内的干旱胁迫。前人探究春玉米适宜播期的研究中大多凭借经验设定播期间隔,极易忽略作物产量和水分生产力最高的播期。此外,作物适宜播期的选择会随生育期内降水量和灌溉量的变化而变化^[14-16],且在不同降水年型下作物的适宜播期也会产生较大差异^[17-19],而当前对生育期不同供水条件下春玉米的适宜播期变化鲜有研究。近年来,APSIM (Agricultural Production Systems sIMulator) 模型因其丰富的作物模块和精细的土壤水氮运移模块,被广泛应用于农业生产指导,特别适用于评估干旱半干旱区农业管理措施对作物系统的长期影响。Huang 等^[17]验证了 APSIM-Maize 在中国不同玉米主产区的模拟精度,证明了该模型能准确模拟不同气候和土壤条件、品种更替和优化农艺管理等对玉米生长发育和产量的影响。因此,本研究以半干旱区典型站点为例,以当地主栽玉米品种为研究对象,采用 APSIM-Maize 模型在春玉米潜在播种窗口内通过逐日设置播期的方式来探究不同降水年型(干旱年、正常年和湿润年)

和不同供水条件下[雨养、灌溉 60 mm、灌溉 120 mm、灌溉 180 mm、灌溉 240 mm 和潜在条件(灌溉量 308 mm)]春玉米的适宜播期范围,并分析不同供水条件下春玉米产量的气象决定因子,为农户选择和政府决策提供指导,并促进春玉米高产和稳产。

1 材料与方法

1.1 研究站点及气象和土壤数据

选择半干旱区代表性站点赤峰(118°52′58″E, 42°15′23″N, 海拔 572.5 m)探究不同供水条件下春玉米的适宜播期。赤峰属中温带半干旱大陆性季风气候^[20],无霜期 160~170 d,主要种植作物为春玉米,是典型的一年一熟制种植区域。本文收集了赤峰站 1961—2023 年逐日气象资料,主要包括逐日最高温度(℃)、最低温度(℃)、降水量(mm)和日照时数(h),

资料来源于中国气象局(<http://www.cma.gov.cn/>)。逐日太阳辐射($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)使用日照时数由 Ångström 方程进行计算^[21]。1961—2023 年春玉米生长季(4—9 月)的总太阳辐射、平均温度和降水量分别为 $3722.6 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 18.1°C 和 323.9 mm ,变异系数分别为 3%、4% 和 25%,其中太阳辐射和平均温度在不同月份的变异较小,而月降水量的变异较大,4 月降水量的变异系数高达 98% (图 1)。土壤数据(表 1)来自中国土种数据库(<http://www.soil.csdb.cn/>) 2014 年普查数据,主要包括土壤容重($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)、饱和含水量($\text{mm}\cdot\text{mm}^{-1}$)、田间持水量($\text{mm}\cdot\text{mm}^{-1}$)、凋萎含水量($\text{mm}\cdot\text{mm}^{-1}$)。

1.2 APSIM-Maize 模型和品种参数

APSIM 模型主要包含作物模块、土壤模块和管理模块,以日为步长模拟作物的生长发育、产量形

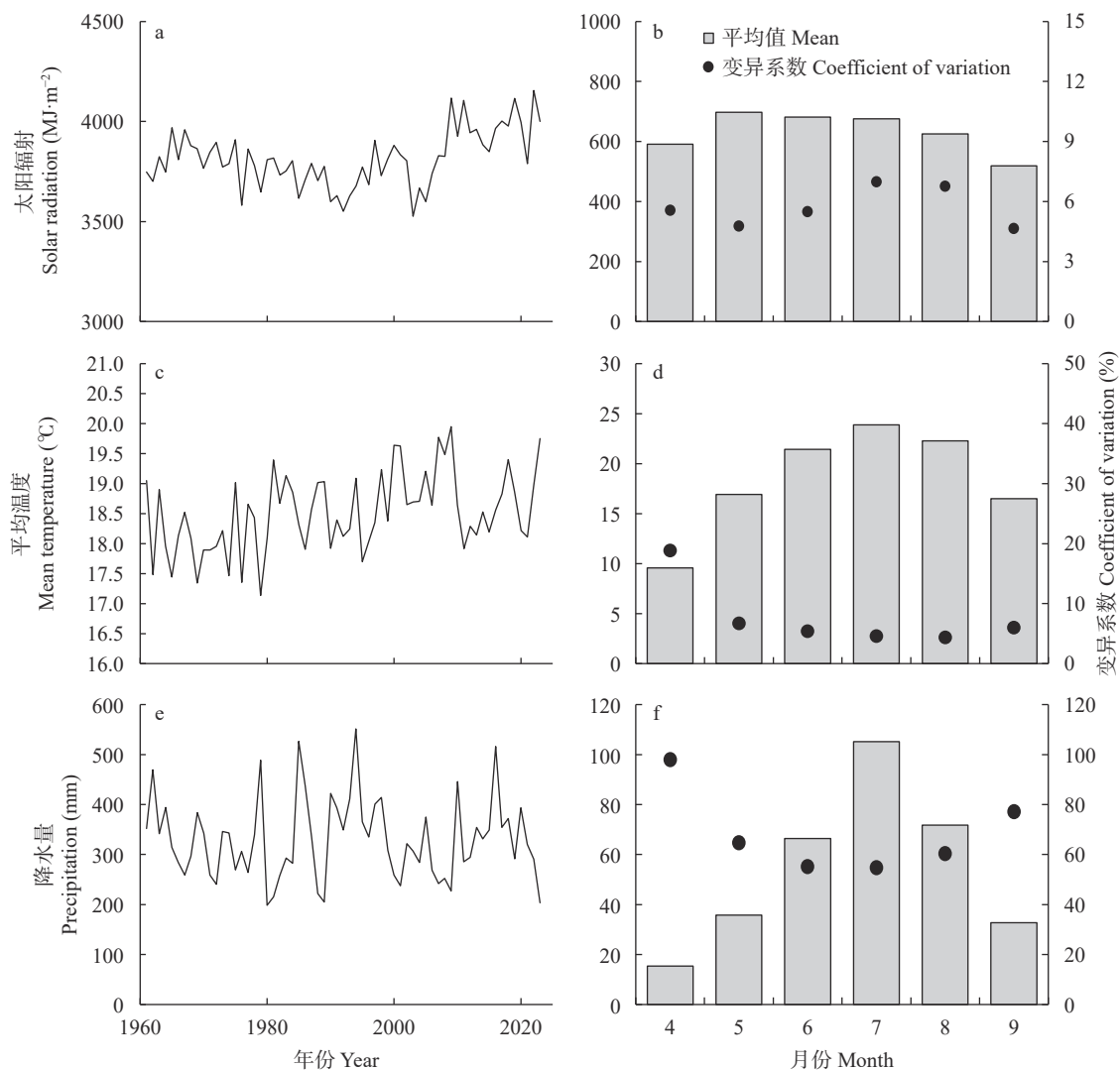


图 1 赤峰 1961—2023 年生长季(4—9 月)总辐射、平均温度、降水量以及月平均辐射、月平均温度、月平均降水量

Fig. 1 Solar radiation, mean temperature, precipitation of growing season (April to September), and monthly solar radiation, mean temperature, precipitation at Chifeng from 1961 to 2023

表 1 研究站点土壤基础参数
Table 1 Parameters of soil profiles at the study site

土层 Soil layer (cm)	容重 Bulk density ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	饱和含水量 Saturated water content ($\text{mm}\cdot\text{mm}^{-1}$)	田间持水量 Field capacity ($\text{mm}\cdot\text{mm}^{-1}$)	凋萎含水量 Wilting water content ($\text{mm}\cdot\text{mm}^{-1}$)
0~20	1.23	0.393	0.286	0.149
20~40	1.23	0.391	0.283	0.159
40~60	1.21	0.392	0.316	0.173
60~80	1.21	0.390	0.345	0.178
80~100	1.21	0.406	0.357	0.195

成以及作物和土壤之间的相互作用^[22]。APSIM 模型以土壤模块为核心,模拟土壤水分和养分变化对作物生长发育的影响;管理模块包括作物播种和收获日期、灌溉、施肥量和施肥时期等,模拟不同管理措施的影响;作物模块模拟作物光合、呼吸以及干物质积累和分配等^[23]。APSIM-Maize 模型基于玉米的三基点温度采用积温法模拟玉米生长发育过程,模型默认的玉米发育下限温度、最适温度和上限温度分别为 8℃、34℃ 和 44℃^[24]。干物质积累速率由辐射截获量和辐射利用效率决定,水氮胁迫时会降低干物质的积累速率。前人研究使用大田试验数据对 APSIM-Maize 模型在中国玉米带的适用性进行了充分验证,表明模型可以有效模拟气候、环境和管理的交互作用对玉米生长发育及产量的影响^[17,25-26]。

本研究使用半干旱区主栽玉米品种‘郑单 958’的遗传参数 (表 2) 探究不同供水条件对春玉米适宜播

期的影响。为进一步验证 APSIM-Maize 模型模拟不同播期下春玉米生长发育和产量的精确性,收集了北方春玉米品种‘郑单 958’的大田试验数据 (表 3),对模型在不同播期下的模拟能力进行验证,并使用决定系数 (R^2)、均方根误差 (RMSE) 和相对均方根误差 (RRMSE) 表示模型的模拟精度:

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{\text{avg}})(S_i - S_{\text{avg}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{\text{avg}})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - S_{\text{avg}})^2}} \right)^2 \quad (1)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (2)$$

$$\text{RRMSE} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}}{O_{\text{avg}}} \quad (3)$$

式中: O_i 为实测值, S_i 为模拟值, O_{avg} 为实测值的平均

表 2 玉米品种‘郑单 958’在 APSIM-Maize 模型中的主要参数
Table 2 Parameters of maize cultivar ‘Zhengdan 958’ in the APSIM-Maize model

品种参数 Cultivar parameter	描述 Description	值 Value
tt_emerg_to_endjuv ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)	出苗到营养生长期结束所需积温 Accumulated temperature from seedling to end of vegetative phase	200
tt_flower_to_maturity ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)	开花到成熟所需积温 Accumulated temperature from flowering to maturity	700
tt_flower_to_start_grain ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)	开花到灌浆所需积温 Accumulated temperature from flowering to grain filling	150
photoperiod_slope ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$)	光周期斜率 Photoperiod slope	23.0
grain_gth_rate [$\text{mg}(\text{grain})\cdot\text{d}^{-1}$]	灌浆速率 Grain-filling rate	12.0
grain_gth_no_max	最大籽粒数 Maximum grain numbers per head	660

表 3 用于验证 APSIM-Maize 模型中‘郑单 958’品种参数的站点、播期、密度、产量、灌溉量、施氮量和数据源的详细信息
Table 3 Detailed information of experimental site, sowing date, density, yield, irrigation, nitrogen application rate, and data source of maize cultivar ‘Zhengdan 958’ used for verification of APSIM-Maize model

站点 Site	年份 Year	播期(月-日) Sowing date (month-day)	密度 Density (plants·m ⁻²)	灌溉量 Irrigation (mm)	施氮量 Nitrogen application amount (kg·hm ⁻²)	产量 Yield (t·hm ⁻²)	数据源 Data source
内蒙古呼和浩特 Hohhot, Inner Mongolia	2013	04-20, 04-30, 05-10	6	100	300	10.9, 11.3, 12.1	[27]
辽宁阜新 Fuxin, Liaoning	2014	04-26	6	0	340	12.5	[28]
辽宁阜新 Fuxin, Liaoning	2015	05-19	6	0	340	6.9	[28]
内蒙古赤峰 Chifeng, Inner Mongolia	2017	05-05	7.5	充足 Sufficient	充足 Sufficient	9.3	[29]
内蒙古通辽 Tongliao, Inner Mongolia	2020	05-08	7.5	充足 Sufficient	充足 Sufficient	10.8	[30]

值, S_{avg} 为模拟值的平均值, n 为样本的个数。

1.3 情景设定和潜在播种窗口

为探究不同水分供应条件下春玉米的适宜播期, 本研究使用 APSIM-Maize 模型在春玉米的潜在播种窗口内每天设置 1 个播期进行长期连续模拟 (1961—2023 年)。玉米潜在播种窗口定义为 5 日滑动平均气温稳定通过玉米的下限温度 (8°C)^[4], 最晚播期定义为早熟玉米品种可以在霜冻日 (最低气温 $< 0^{\circ}\text{C}$) 前正常成熟, 玉米潜在播种窗口如图 2 所示, 变化范围为 4 月 16 日—6 月 30 日, 共 76 d。玉米种植密度参考当地种植习惯, 设定为 $7.5 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[31]。本文首先模拟了潜在条件下春玉米的蒸散量和灌溉需求, 分别为 582 mm 和 308 mm, 以生长季多年平均降水量 323.9 mm 和节水灌溉方式为参考, 设置雨养、灌溉 60 mm、灌溉 120 mm、灌溉 180 mm、灌溉 240 mm 和潜在条件 (土壤水分低于田间持水量时自动灌溉到田间持水量, 相当于灌溉量 308 mm) 共 6 个水分梯度来探究不同水分供应条件下春玉米的适宜播期^[32]。当前该区春玉米的主要灌溉方式为膜下滴灌, 因此模型中设置的小额灌溉方式可在生产中实现^[31]。灌溉 60 mm 时, 在出苗期和灌浆期分别进行 30 mm 的补灌^[33], 其他灌溉情景在春玉米出苗期、拔节期、抽穗期和灌浆期分 4 次进行平均灌溉, 模型中设置灌溉效率为 1。模拟期间, 当 0~60 cm 土层中的氮含量低于 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时进行自动施氮以保证不受氮肥胁迫。

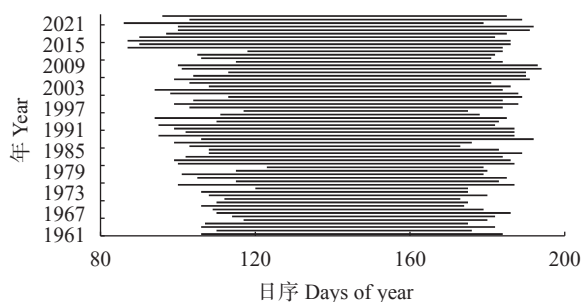


图 2 赤峰 1961—2023 年春玉米的潜在播种窗口

Fig. 2 Potential sowing window of spring maize at Chifeng from 1961 to 2023

1.4 降水年型划分

为探究不同降水年型下水分供应对春玉米适宜

播期的影响, 本研究将赤峰市 1961—2023 年作物生长季 (4—9 月) 降水量根据干旱系数划分为不同的降水年型^[34]:

$$DC = (P - A) / \sigma \quad (4)$$

式中: DC 为干旱系数 ($DC < -0.35$ 为干旱年, $DC > 0.35$ 为湿润年, $-0.35 \leq DC \leq 0.35$ 为正常年), P 为当年作物生长季降水量 (mm), A 为作物生长季多年平均降水量 (mm), σ 为多年生长季平均降水量的均方差。研究年份的年型划分情况如表 4 所示。

1.5 适宜播期确定规则

为确定适宜的播期间隔和适宜播期范围, 本研究将所有模拟年份在不同供水条件下春玉米 76 个播期的产量按照从高到低的顺序排列, 之后按照不同产量百分位进行分类, 以产量差异不超过 5% 作为一个等级, 5% 分位产量对应的播期数量 (即播期范围内对应的天数间隔) 作为适宜的播期间隔, 并将产量 95% 分位之上所对应的播期范围作为春玉米的适宜播期范围。

1.6 产量保证率

使用农业气候学中计算气候要素保证率的方法, 比较不同水分供应条件下春玉米各播期产量 $\geq$ 或 $\leq$ 某产量值出现的可能性或概率^[23]:

$$P = \frac{m}{n} \times 100\% \quad (5)$$

式中: P 为保证率, %; m 为产量达到某产量值的年份数; n 为总研究年份数, 本研究时间序列长为 63 年, 因此 n 的取值为 63。

1.7 水分利用效率和变异系数

使用水分利用效率 ($\text{WUE}, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) 量化春玉米单位耗水量 (ET, mm) 所获得的产量^[18] ($Y, \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$):

$$\text{WUE} = \frac{Y}{\text{ET}} \times 0.1 \quad (6)$$

式中: 0.1 为单位转换系数, Y 和 ET 均为 APSIM-Maize 模型的输出量。

使用变异系数 (coefficient of variation, CV) 表示玉米生长季气象因子在年际间的变异情况:

$$\text{CV} = \frac{S}{\bar{x}} \quad (7)$$

表 4 赤峰 1961—2023 年基于作物生长季 (4—9 月) 降水量划分的年型

Table 4 Year type division of Chifeng site based on the growing season (April to September) precipitation from 1961 to 2023

年型 Year type	年份 Year
干旱年 Dry year	1966, 1967, 1968, 1971, 1972, 1975, 1977, 1980, 1981, 1982, 1983, 1984, 1988, 1989, 2000, 2001, 2004, 2006, 2007, 2008, 2009, 2011, 2012, 2019, 2022, 2023
正常年 Normal year	1961, 1963, 1965, 1970, 1973, 1974, 1976, 1978, 1987, 1992, 1996, 1999, 2002, 2003, 2013, 2014, 2015, 2017, 2021
湿润年 Wet year	1962, 1964, 1969, 1979, 1985, 1986, 1990, 1991, 1993, 1994, 1995, 1997, 1998, 2005, 2010, 2016, 2018, 2020

式中: S 为玉米生长季气象因子标准差, $\bar{x}$ 为生长季气象因子的多年平均值。

1.8 统计分析

本文使用线性回归方法, 分析不同灌溉条件下春玉米各播期产量与不同生育阶段总辐射量、平均温度和降水量之间的关系, 线性回归方程通过 Student's t-test 在 95% 和 99% 两个置信区间进行检验。

2 结果与分析

2.1 APSIM-Maize 模拟能力

图 3 表明 APSIM-Maize 模型能够较好地模拟不同播期下春玉米品种‘郑单 958’的生长发育和产量。春玉米在不同播期播种时营养生长期实测值和模拟值的均方根误差 (RMSE) 和相对均方根误差 (RRMSE) 分别为 4.9 d 和 9.6%, 生殖生长期模拟值与实测值的 RMSE 和 RRMSE 分别为 4.1 d 和 6.5%; 不同地区春玉米产量的实测值和模拟值的 RMSE 为 $0.85 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, RRMSE 为 12.5%。表明模型模拟的春玉米生育期和产量与实测值之间具有较好的相关性和一致性。

2.2 播期间隔和适宜播期范围

将不同供水条件下春玉米产量从高到低排序后

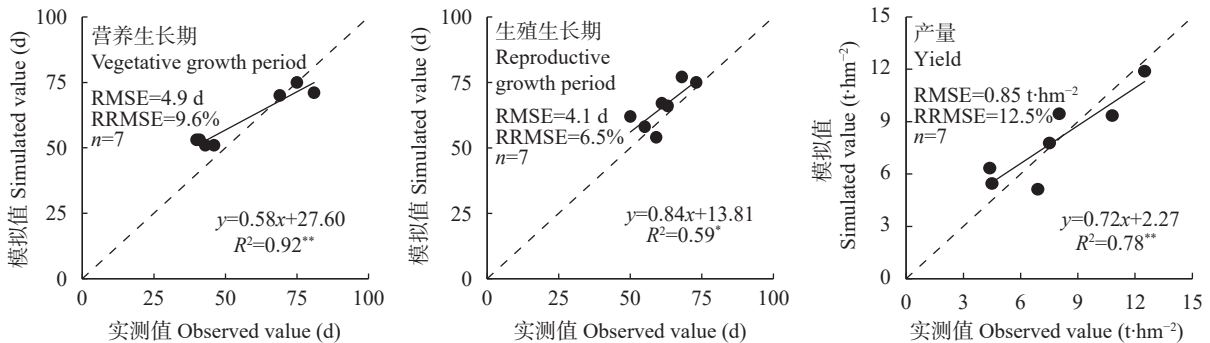


图 3 春玉米营养生长期、生殖生长期和产量的实测值和 APSIM-Maize 模型的模拟值比较

Fig. 3 Comparison between observed and simulated vegetative growth period, reproductive growth period, and yield of spring maize by APSIM-Maize model

*, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$.

表 5 春玉米播期 (月-日) 划分和范围

Table 5 Spring maize sowing time (month-day) division and range

播期 Sowing date	开始 Beginning	结束 Ending	播期 Sowing date	开始 Beginning	结束 Ending	播期 Sowing date	开始 Beginning	结束 Ending
A	04-16	04-19	H	05-14	05-17	O	06-11	06-14
B	04-20	04-23	I	05-18	05-21	P	06-15	06-18
C	04-24	04-27	J	05-22	05-25	Q	06-19	06-22
D	04-28	05-01	K	05-26	05-29	R	06-23	06-26
E	05-02	05-05	L	05-30	06-02	S	06-27	06-30
F	05-06	05-09	M	06-03	06-06			
G	05-10	05-13	N	06-07	06-10			

按照 5% 分位划分播种窗口内的 76 个播期时, 各水分条件下每间隔 5% 分位对应播期数量的平均值和中位数分别为 3.75 个和 4 个。因此, 春玉米在播期设置时的适宜播期间隔为 3~4 d, 本文以中位数 4 d 作为适宜播期的选择间隔 (表 5), 适宜播期范围为高于最高产量 95% 分位时所对应的播期。

2.3 不同播期下春玉米产量保证率

图 4 表明, 潜在条件下, H 播期 (5 月 14—17 日) 春玉米产量在 $6 \sim 8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的保证率高于其他播期下的保证率, J 播期 (5 月 22—25 日) 播种时产量达 $10 \sim 12 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的保证率高于其他播期; 灌溉 240 mm 时, H 播期产量达 $2 \sim 4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的保证率为 100%, 达 $6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $12 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的保证率分别为 96%、84%、58% 和 27%; 灌溉 180 mm、120 mm 和 60 mm 时各产量等级平均保证率最高的播期分别为 H、J 和 H, 产量达 $6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的保证率分别为 89%、49% 和 25%; 雨养条件下 H 播期在各产量等级的保证率均高于其他播期, 达 $2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $12 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的保证率分别为 56%、35%、16%、9%、5% 和 2%。

2.4 不同水分供应条件下春玉米的适宜播期

雨养条件下, 干旱年、正常年和湿润年春玉米

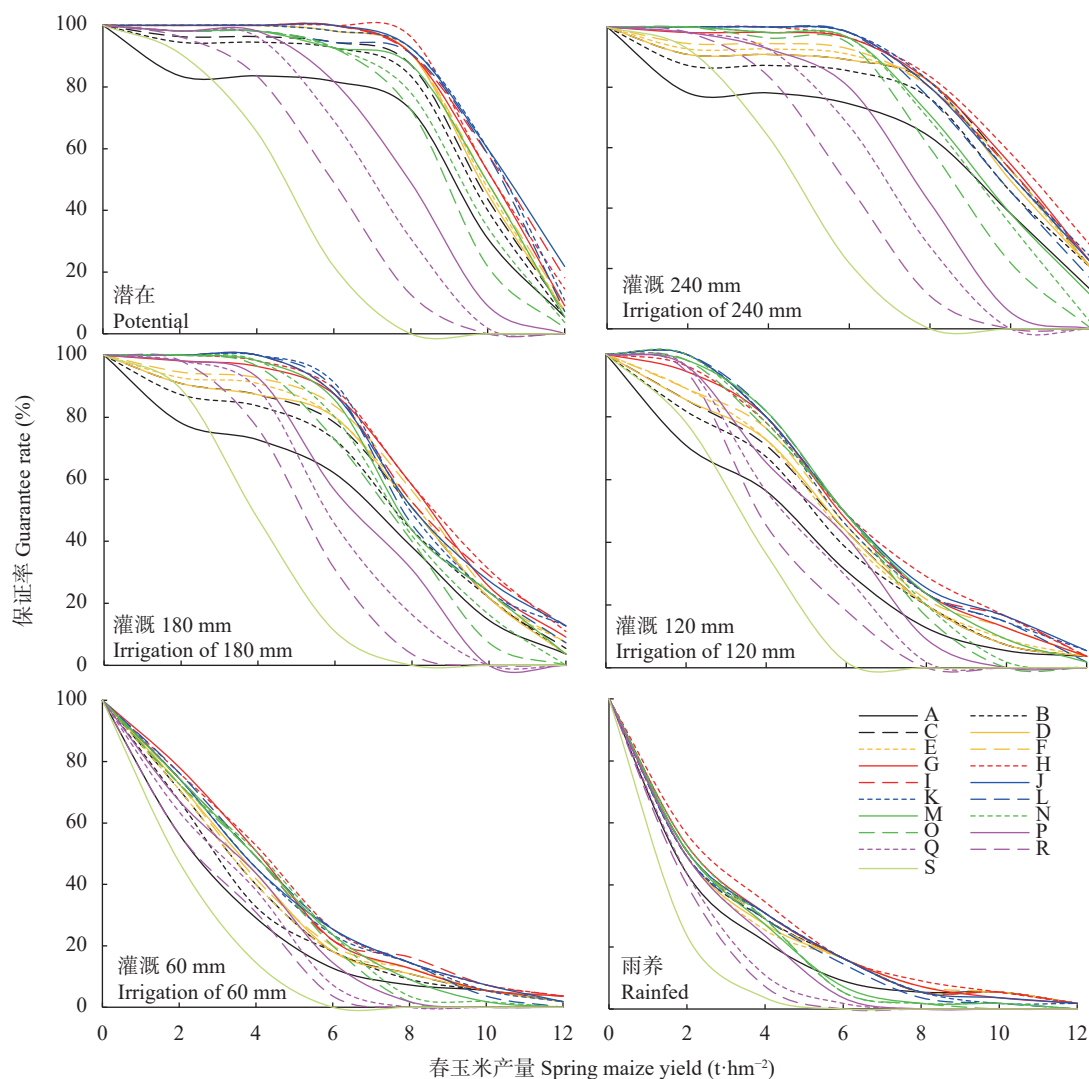


图 4 不同水分条件下各播期春玉米产量保证率

Fig. 4 Guarantee rates of spring maize yield for various sowing dates under different water supply conditions

播期 A-S 具体日期见表 4。Exact date of sowing dates A to H is shown in Table 4.

平均产量分别为 $0.9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $2.3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $5.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，平均水分利用效率分别为 $0.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $0.7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $1.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。潜在、灌溉 240 mm、180 mm、120 mm、60 mm 和雨养条件下不同年型的平均适宜播期范围分别为 5 月 6 日至 6 月 2 日 (F—L)、5 月 6—29 日 (F—K)、5 月 10—29 日 (G—K)、5 月 14—29 日 (H—K)、5 月 14—25 日 (H—J) 和 5 月 14—17 日 (H)，适宜播期范围随生育期供水量的增加而提前和扩大，适宜播种窗口内的平均产量分别为 $10.4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $10.1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $8.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $6.8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $5.7 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $4.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，平均水分利用效率分别为 $2.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $2.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $1.9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $1.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $1.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $1.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (图 5)。

为分析降水年型和水分供给条件对春玉米播期的综合影响，使用春玉米生育期灌溉量与生长季

降水量之和表示各年型水分供给量，建立其与适宜播期的开始时间及适宜播期范围的关系，结果表明随着春玉米生育期水分供给量的增加，适宜播期的开始时间显著提前，而适宜播期范围显著扩大 (图 6)。

2.5 不同水分供应条件下春玉米产量的气象决定因子

在潜在条件下，决定春玉米产量的气象因子为生育期辐射量，二者存在极显著的正相关关系 ($R^2=0.59$, $P<0.01$)，适宜播种窗口 (OSW) 内春玉米生育期辐射量较所有播期 (A) 的平均值增加 6.4% (图 7a-b)；在灌溉 240 mm 和 180 mm 时，决定春玉米产量的气象因子分别为营养生长阶段的辐射量和降水量，可分别解释产量变异的 56% 和 64%，而适宜播种窗口内春玉米营养生长阶段辐射量和降水量较所

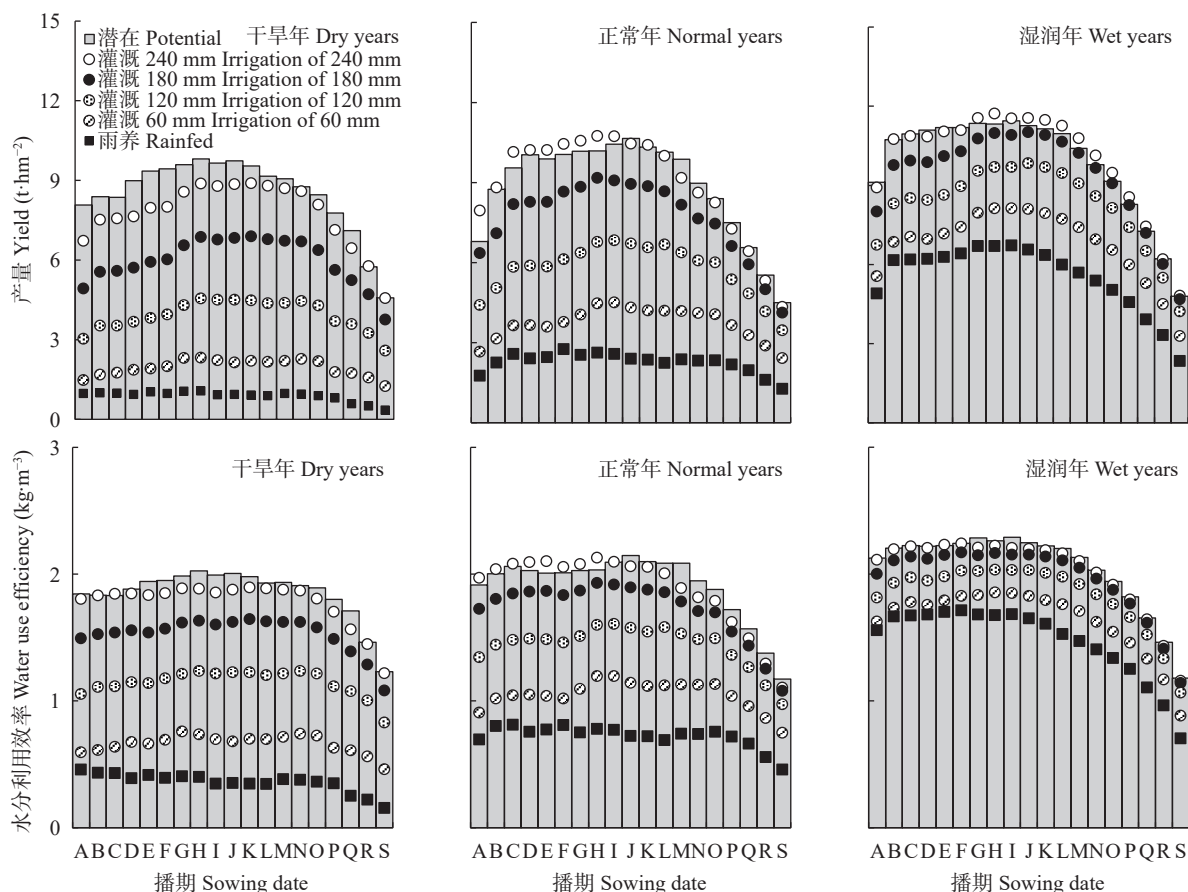


图 5 干旱年、正常年和湿润年不同水分条件下各播期春玉米产量和水分利用效率

Fig. 5 Spring maize yield and water use efficiency for each sowing date under different water conditions in dry, normal, and wet years

播期 A-S 具体日期见表 4。Exact date of sowing dates A to H is shown in Table 4.

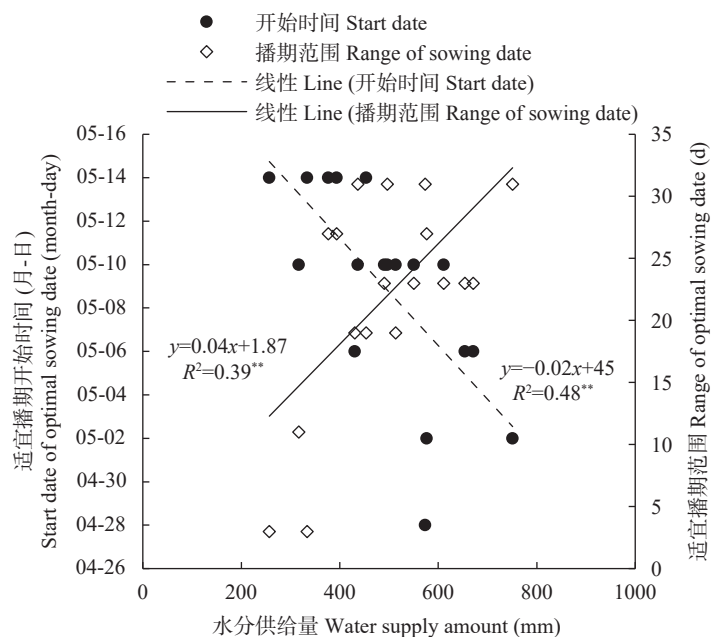


图 6 不同水分供给量与春玉米适宜播期开始时间以及适宜播期范围的关系

Fig. 6 Relationship between the water supply amount with the start date of optimal sowing date and the range of the optimal sowing date for spring maize

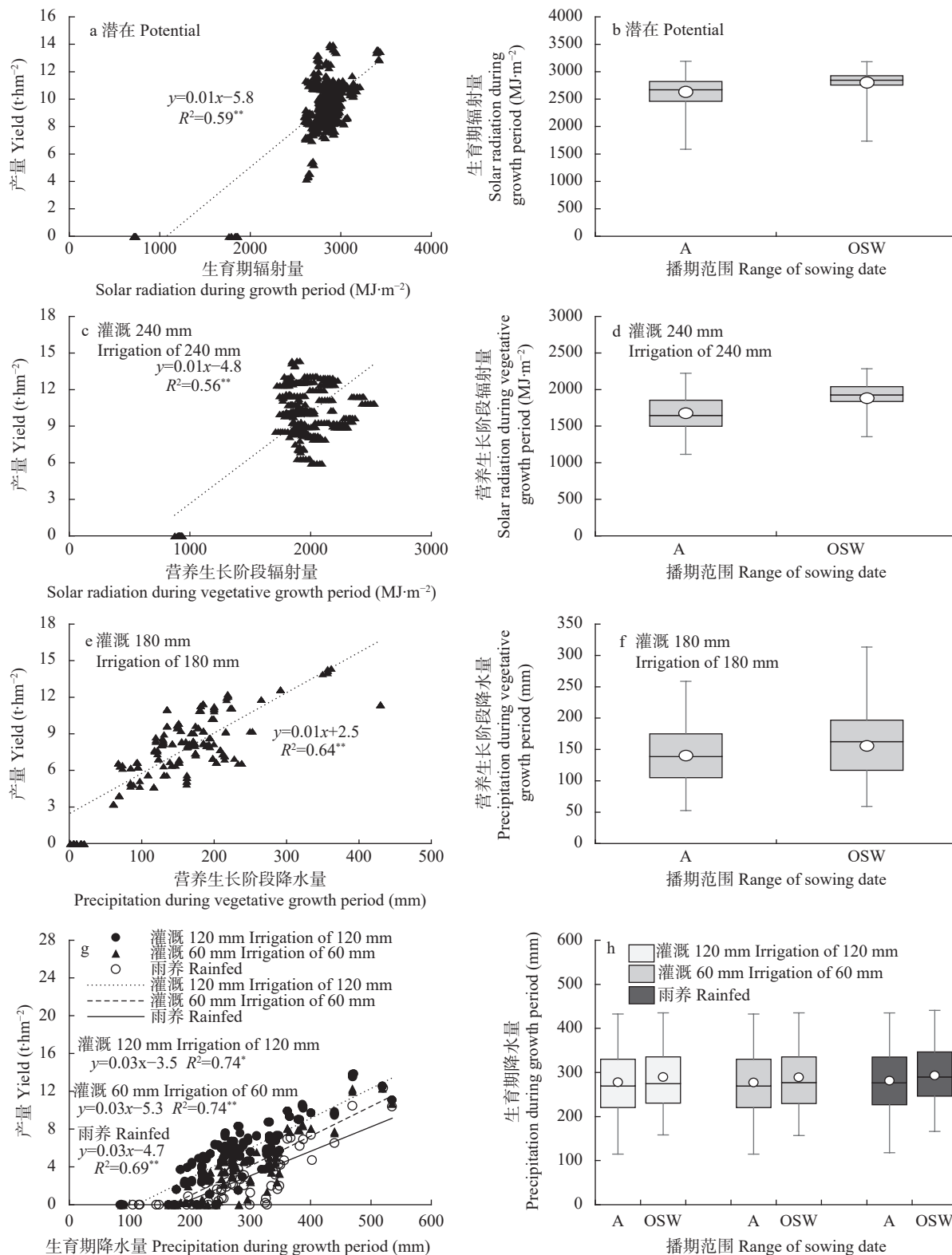


图 7 不同水分条件下春玉米产量的气象决定因子 (a, c, e, g) 和气象决定因子在所有播期 (A) 平均值与适宜播种窗口 (OSW) 内平均值的比较 (b, d, f, h)

Fig. 7 Meteorological determining factors of spring maize yield (a, c, e, g) and comparison of their values (b, d, f, h) averaged over all sowing dates (A) and optimal sowing window (OSW) under different water supply conditions

*: $P<0.05$; **: $P<0.01$.

有播期平均值分别增加 12.2% 和 11.0% (图 7c-f); 在灌溉 120 mm、60 mm 和雨养条件下, 决定春玉米产

量的关键气象因子为生育期降水量, 其与产量均达显著正相关, 分别决定了产量变异的 74%、74% 和

69%, 在适宜播种窗口内的生育期降水量比所有播期的平均值分别提高了 4.3%、4.4% 和 4.2% (图 7g-h)。

3 讨论与结论

3.1 讨论

适宜播期有利于作物充分利用生长季的水热资源从而获得更高的产量^[35-36]。以往研究结果表明早播有利于提升春玉米水分利用效率和产量^[37]。本研究通过分析赤峰 1961—2023 年玉米生长季 (4—9 月) 月降水量变化情况发现, 4 月降水量最低且年际间变异最大 (图 1f), 此时播种易导致春玉米苗期因发生严重干旱而无法正常出苗, 且早播会增大春玉米苗期遭受冻害的风险, 因此早播需要搭配覆膜^[5]等管理方式来保证春玉米苗期适宜的水热条件。过晚播种同样对春玉米的生长发育和产量有不利影响, 如前人研究结果表明春玉米在 5 月下旬播种时, 中晚熟品种会在生育后期受到早霜冻害的影响, 从而降低产量^[38]。因此, 选择 5 月上旬至 5 月中旬播种可避开作物生育前期较大的降水变异和生育末期早霜冻害的影响, 促进春玉米高产和稳产^[3]; 申广立等^[7]的研究结果亦表明内蒙古自治区通辽地区春玉米的适宜播期为 5 月中上旬, 与本研究结果基本一致。此外, 温度也是影响春玉米适宜播期选择的重要因子, 如 Shen 等^[12]的研究表明当日平均气温连续 7 d 大于 10℃ 时可作为黄土高原地区春玉米的适宜播种期, 然而此研究结果仅适用于判定春玉米适宜播期的开始时间, 并未考虑春玉米适宜播种窗口的变化情况, 而作物适宜播期、产量和水分利用效率通常会随着年型及生育期供水量发生较大变化^[39]。中国北方作物生长季较长, 热量条件基本可满足单季作物的生长需求, 但作物生长季内降水量通常不能满足作物对水分的需求。以赤峰为例, 作物生长季降水量的多年平均值为 323.9 mm, 而春玉米需水量约为 582 mm, 生长季降水不能满足春玉米需水量, 且作物生长季降水变异 (25%) 远大于温度的年际变异 (4%), 因此决定春玉米适宜播期的首要因素仍是作物生长季的水分条件。Shen 等^[12]的研究同样表明随农田土壤水分增减, 春玉米适宜播期在不同地区存在着提前或推后的情况。

以往研究大多对某一地区玉米生产提出了固定的播期, 如华北、东北和西北地区春玉米的适宜播期分别为 5 月 30 日、5 月 10 日和 4 月 22 日^[8,15-16]。然而, 前人研究表明不同地区或不同水分条件下作物的适宜播期不同^[4,17]。本文在半干旱区典型站点春

玉米潜在播种窗口内, 以日步长作为播期进行模拟, 通过对不同播期模拟的产量进行分级, 最终确定了玉米的适宜播期间隔, 以上可为半干旱区玉米播期试验和模型模拟的播期间隔设置提供方法依据。在此基础上, 本文进一步证明了春玉米适宜播期与生育期水分供应量存在密切关系, 即增加春玉米生育期灌溉量可使春玉米适宜播期提前且适宜播期范围扩大。随着水分供应的增加, 播期对玉米生产的影响下降, 增加了农户安排播期的空间。但在雨养或者水分限制条件下, 抢时播种就尤为重要, 本研究给出了不同水分供应条件下的适宜播期范围, 为农户选择和政府决策提供指导。Tang 等^[19]在研究内蒙古马铃薯 (*Solanum tuberosum* L.) 播期的研究中也发现随着生长季降水量增加, 马铃薯的适宜播期有逐渐提前的趋势。

本文结果仍然存在一定的局限。首先, 本研究基于收集的大量大田试验数据对 APSIM-Maize 在研究区的模拟能力进行了验证, 尽管模型模拟精度较前人研究有一定提升^[25], 但受数据限制, 模型的模拟精度仍存在提升空间, 后续研究可通过更多的精细化田间试验对模型的模拟能力进行更充分的验证; 此外, 本研究中春玉米产量和水分利用效率数据均来自于 APSIM-Maize 模型的长期模拟结果, 但模型并不能考虑实际生产中霜冻、杂草和病虫害等对产量造成的不利影响^[40], 且模拟时设置的施氮量为充分满足, 未考虑玉米生产中的水氮交互作用, 因此后续的研究中应考虑水肥耦合对春玉米适宜播种窗口的影响^[41-42]; 其他管理措施如覆膜和起垄等均会影响春玉米适宜播期的选择^[43-44], 因此需要在未来结合生产实际进一步考虑不同的田间管理方式对玉米生产的影响; 最后, 本研究基于模型探究了不同供水条件对春玉米产量和水分利用效率的影响, 当前尚未深入解析不同水分供应条件下播期调控对作物产量三要素的影响机制, 后续研究拟通过与大田试验进一步结合探究不同水分供应条件对春玉米生长发育和产量构成的影响机制。

3.2 结论

本研究基于校准的 APSIM-Maize 模型、气象数据、土壤数据及玉米大田试验数据, 通过精细化的播期设置方式定量了不同水分供应条件下半干旱区春玉米的产量、水分利用效率和适宜播期范围, 确定了半干旱区分期播种试验和模型模拟的时间间隔, 主要结论如下:

1) 以春玉米产量的 5% 分位为产量差异阈值时,

半干旱区分期播种试验和模型模拟的播期间隔适宜范围为 4 d, 该方法可作为半干旱区分期播种和模型模拟播期设置参考。

2) 潜在条件、灌溉 240 mm、灌溉 180 mm、灌溉 120 mm、灌溉 60 mm 和雨养条件下的适宜播期范围分别为 5 月 6 日至 6 月 2 日、5 月 6—29 日、5 月 10—29 日、5 月 14—29 日、5 月 14—25 日和 5 月 14—17 日, 适宜播期范围随生育期供水量的增加而提前和扩大。

3) 潜在条件、灌溉 240 mm 和 180 mm 时春玉米产量的气象决定因子分别是生育期辐射量、营养生长阶段辐射量和降水量, 灌溉 120 mm、60 mm 和雨养条件下春玉米产量的气象决定因子均为生育期降水量, 各水分条件下适宜播种窗口内的气象决定因子量比所有播期的平均值提升 4.2%~12.2%。

参考文献 References

- [1] 王志春, 杨军, 陈素华, 等. 气候变暖对内蒙古东部地区农牧业气候资源的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(4): 132-137
WANG Z C, YANG J, CHEN S H, et al. Impact of warmer climate on agricultural and animal husbandry climatic resources in eastern Inner Mongolia[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(4): 132-137
- [2] 李洪波. 内蒙古赤峰市半干旱区农业水价综合改革实践[J]. 农业工程技术, 2022, 42(8): 34, 36
LI H B. Practice of comprehensive reform of agricultural water price in semi-arid area of Chifeng City, Inner Mongolia[J]. Agricultural Engineering Technology, 2022, 42(8): 34, 36
- [3] 慈艳华, 霍剑锋, 孟繁盛, 等. 赤峰地区玉米品种选择关键技术探讨[J]. 内蒙古农业科技, 2011, 39(2): 85, 119
CI Y H, HUO J F, MENG F S, et al. Discussion on key techniques of maize variety selection in Chifeng area[J]. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 2011, 39(2): 85, 119
- [4] LI Y, WANG J, FANG Q X, et al. Optimal planting dates for diverse crops in Inner Mongolia[J]. Field Crops Research, 2022, 275: 108365
- [5] 郝天民, 李春峰, 汪耳琪. 对北方旱地覆膜玉米高产栽培最佳播期的研究[J]. 中国农学通报, 2002, 18(6): 86-89
HAO T M, LI C F, WANG E Q. Study on optimum sowing time for high-yield cultivation of plastic-film corn in North China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2002, 18(6): 86-89
- [6] 李扬, 王靖, 唐建昭, 等. 农牧交错带马铃薯高产和水分高效利用的播期和品种选择[J]. 农业工程学报, 2020, 36(4): 118-126
LI Y, WANG J, TANG J Z, et al. Selecting planting date and cultivar for high yield and water use efficiency of potato across the agro-pastoral ecotone in North China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(4): 118-126
- [7] 申广立, 萨日娜, 佟莎仁, 等. 通辽地区玉米分期播种试验及时播种期探讨[J]. 内蒙古气象, 2013(6): 14-16
SHEN G L, SA R N, TONG S R, et al. Discuss on experiment of sowing by stages and timely sowing time of maize in Tongliao[J]. Meteorology Journal of Inner Mongolia, 2013(6): 14-16
- [8] 张可心, 鱼潇, 张谋草. 播期对陇东春玉米生长发育进程及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2023, 39(6): 6-12
ZHANG K X, YU X, ZHANG M C. Effects of sowing date on growth and yield of spring maize in east Gansu[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(6): 6-12
- [9] HUANG M X, WANG J, WANG B, et al. Assessing maize potential to mitigate the adverse effects of future rising temperature and heat stress in China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 311: 108673
- [10] 张冬梅, 张伟, 刘恩科, 等. 早熟区不同播期旱地玉米产量对施肥水平和种植密度的响应[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(12): 1449-1458
ZHANG D M, ZHANG W, LIU E K, et al. Response of dryland maize yield to fertilization rate and planting density at different sowing dates in early-maturity areas[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(12): 1449-1458
- [11] 戴明宏, 陶洪斌, 廖树华, 等. 基于 CERES-Maize 模型的华北平原玉米生产潜力的估算与分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 30-36
DAI M H, TAO H B, LIAO S H, et al. Estimation and analysis of maize potential productivity based on CERES-Maize model in the North China Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(4): 30-36
- [12] SHEN H Z, XU Y, WANG Y, et al. Optimization of sowing date for spring maize in China's Loess Plateau based on presowing temperature and soil water content[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(6): 3157-3167
- [13] BINDER J, GRAEFF S, LINK J, et al. Model-based approach to quantify production potentials of summer maize and spring maize in the North China Plain[J]. Agronomy Journal, 2008, 100(3): 862-873
- [14] 纪春学, 何长安, 刘兴焱, 等. 黑龙江省早熟区播期对不同熟期玉米品种生育进程及产量的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2020(7): 29-33
JI C X, HE C A, LIU X Y, et al. Effects of sowing date on growth process and yield of maize varieties at different maturity stages in early maturity region of Heilongjiang Province[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2020(7): 29-33
- [15] 吕佳佳, 王秋京, 闫平, 等. 基于气温资料的黑龙江省玉米播种期分析[J]. 中国农业气象, 2014, 35(1): 68-73
LYU J J, WANG Q J, YAN P, et al. Study on maize sowing time in Heilongjiang Province based on temperature data[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, 35(1): 68-73
- [16] 裴世娟, 张萌, 李向岭, 等. 冀东地区晚播春玉米氮素积累、分配与转运特性[J]. 核农学报, 2022, 36(8): 1676-1684
PEI S J, ZHANG M, LI X L, et al. Characteristics of nitrogen accumulation, distribution and translocation of late sowing spring maize in Eastern Hebei Province[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2022, 36(8): 1676-1684

- [17] HUANG M X, WANG J, WANG B, et al. Optimizing sowing window and cultivar choice can boost China's maize yield under 1.5°C and 2°C global warming[J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(2): 024015
- [18] LI Y, TANG J Z, WANG J, et al. Diverging water-saving potential across China's potato planting regions[J]. *European Journal of Agronomy*, 2022, 134: 126450
- [19] TANG J Z, WANG J, FANG Q X, et al. Optimizing planting date and supplemental irrigation for potato across the agro-pastoral ecotone in North China[J]. *European Journal of Agronomy*, 2018, 98: 82–94
- [20] 尹小明. 1961年~2019年赤峰地区农业气候资源分析[J]. *内蒙古科技与经济*, 2021(7): 74–75
YIN X M. Analysis of agricultural climate resources in Chifeng area from 1961 to 2019[J]. *Inner Mongolia Science Technology & Economy*, 2021(7): 74–75
- [21] WANG J, WANG E L, YIN H, et al. Differences between observed and calculated solar radiations and their impact on simulated crop yields[J]. *Field Crops Research*, 2015, 176: 1–10
- [22] PROBERT M E, DIMES J P, KEATING B A, et al. APSIM's water and nitrogen modules and simulation of the dynamics of water and nitrogen in fallow systems[J]. *Agricultural Systems*, 1998, 56(1): 1–28
- [23] 李扬, 王靖, 唐建昭, 等. 播期和品种变化对马铃薯产量的耦合效应[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(2): 296–304
LI Y, WANG J, TANG J Z, et al. Coupling impacts of planting date and cultivar on potato yield[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(2): 296–304
- [24] WANG N, WANG E L, WANG J, et al. Modelling maize phenology, biomass growth and yield under contrasting temperature conditions[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 250: 319–329
- [25] 戴彤, 王靖, 赫迪, 等. 基于 APSIM 模型的气候变化对西南春玉米产量影响研究[J]. *资源科学*, 2016, 38(1): 155–165
DAI T, WANG J, HE D, et al. Modelling the impacts of climate change on spring maize yield in Southwest China using the APSIM model[J]. *Resources Science*, 2016, 38(1): 155–165
- [26] 刘霞霞, 李扬, 王靖, 等. 基于 APSIM 模型的内蒙古四大生态区不同降水年型下主要作物适应性评价[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(10): 1917–1937
LIU X X, LI Y, WANG J, et al. Adaptability evaluation of staple crops under different precipitation year types in four ecological regions of Inner Mongolia based on APSIM[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(10): 1917–1937
- [27] 胡树平, 青格尔, 高聚林, 等. 播期对不同品种春玉米生长发育和产量形成的影响[J]. *内蒙古农业科技*, 2015, 43(1): 1–5, 31
HU S P, QING G E, GAO J L, et al. The effects of sowing on the growth and yield of different hybrids of spring maize[J]. *Inner Mongolia Agricultural Science and Technology*, 2015, 43(1): 1–5, 31
- [28] 张哲, 孙占祥, 张燕卿, 等. 覆膜对半干旱区春玉米生长及产量构成的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2016, 42(3): 231–237
ZHANG Z, SUN Z X, ZHANG Y Q, et al. Effects of plastic mulch on growth and yield components of spring maize in semi-arid areas[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2016, 42(3): 231–237
- [29] 于胜男, 高聚林, 明博, 等. 北方春玉米粒收品种阶段生长发育与温度因子的关系[J]. *北方农业学报*, 2021, 49(4): 35–44
YU S N, GAO J L, MING B, et al. The relationship between growth, development and temperature factors of mechanical grain harvesting spring maize in northern China[J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2021, 49(4): 35–44
- [30] 潘天遵, 姜梦琪, 卢刚, 等. 通辽市科尔沁左翼中旗春玉米耐密高产优质品种鉴定[J]. *现代农业科技*, 2021(10): 36–37, 40
PAN T Z, JIANG M Q, LU G, et al. Identification and selection of spring maize varieties with density tolerance, high yield and good quality in Horqin Left Wing Middle Banner, Tongliao City[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2021(10): 36–37, 40
- [31] 李玉珩. 内蒙古赤峰市松山区玉米无膜浅埋滴灌水肥一体化技术[J]. *农业工程技术*, 2022, 42(26): 36, 38
LI Y H. Water and fertilizer integration technology of corn non-film shallow drip irrigation in Songshan District of Chifeng City, Inner Mongolia[J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2022, 42(26): 36, 38
- [32] 张海春. 海原县高效节水补灌需水量分析[J]. *甘肃农业*, 2014(16): 45–46
ZHANG H C. Water requirement for high-efficiency water-saving supplementary irrigation in Haiyuan County[J]. *Gansu Agriculture*, 2014(16): 45–46
- [33] 任义, 李俊鸣. 锡林浩特青贮玉米大型喷灌优化灌溉制度试验研究[J]. *内蒙古水利*, 2018(3): 10–11
REN Y, LI J M. Study on optimal irrigation system of large scale sprinkler irrigation for silage maize[J]. *Inner Mongolia Water Resources*, 2018(3): 10–11
- [34] 张森昱, 冯雨露, 马建涛, 等. 不同降水年型下秸秆带状覆盖对西北旱地马铃薯品质和产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(5): 207–216
ZHANG S Y, FENG Y L, MA J T, et al. Effects of straw strip mulching on potato tuber quality and yield in the northwestern dryland region under different hydrological year[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(5): 207–216
- [35] 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
WANG Y X, WU Y R, WANG C, et al. Effects of sowing dates on the growth and yield for summer maize varieties[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2019, 45(5): 461–465
- [36] ZHAO J, YANG X G, DAI S W, et al. Increased utilization of lengthening growing season and warming temperatures by adjusting sowing dates and cultivar selection for spring maize in Northeast China[J]. *European Journal of Agronomy*, 2015, 67: 12–19
- [37] 沈姣姣, 王靖, 潘学标, 等. 播种期对农牧交错带马铃薯生长发育和产量形成及水分利用效率的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(2): 137–144
SHEN J J, WANG J, PAN X B, et al. Effect of sowing date on

- the growth and yield formation and water use efficiency of potato in Agro-pastoral Ecotone[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(2): 137–144
- [38] 牛冬, 唐红艳. 基于土壤温度的春玉米适宜播种指标及播种期分析[J]. *中国农学通报*, 2019, 35(2): 79–85
- NIU D, TANG H Y. Suitable sowing date and sowing indexes of spring maize based on soil temperature[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(2): 79–85
- [39] 刘江, 赵福年, 杨红燕, 等. 半干旱雨养农业区春小麦水分利用效率变化及其年型划分[J]. *寒旱农业科学*, 2023, 2(9): 822–830
- LIU J, ZHAO F N, YANG H Y, et al. Variation of water use efficiencies and climatic year patterns for spring wheat in semi-arid rainfed region[J]. *Journal of Cold-Arid Agricultural Sciences*, 2023, 2(9): 822–830
- [40] KERSEBAUM K C, BOOTE K J, JORGENSEN J S, et al. Analysis and classification of data sets for calibration and validation of agro-ecosystem models[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2015, 72: 402–417
- [41] WANG G Y, HU Y X, LIU Y X, et al. Effects of supplement irrigation and nitrogen application levels on soil carbon-nitrogen content and yield of one-year double cropping maize in subtropical region[J]. *Water*, 2021, 13(9): 1180
- [42] 张君, 赵沛义, 潘志华, 等. 基于产量及环境友好的玉米氮肥投入阈值确定[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(12): 136–143
- ZHANG J, ZHAO P Y, PAN Z H, et al. Determination of input threshold of nitrogen fertilizer based on environment-friendly agriculture and maize yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(12): 136–143
- [43] WANG Y P, LI X G, ZHU J, et al. Multi-site assessment of the effects of plastic-film mulch on dryland maize productivity in semiarid areas in China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 220: 160–169
- [44] ZHANG G X, HOU Y T, ZHANG H P, et al. Optimizing planting pattern and nitrogen application rate improves grain yield and water use efficiency for rain-fed spring maize by promoting root growth and reducing redundant root growth[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 220: 105385