中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

气候变化背景下播期对东北三省春玉米产量的影响

白帆，杨晓光，刘志娟，孙爽，张镇涛，王晓煜，高继卿，刘涛

引用本文:
白帆, 杨晓光, 刘志娟, 等. 气候变化背景下播期对东北三省春玉米产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(4): 480–491.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190585

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

近60年东北地区春玉米旱涝趋势演变研究

Evolution of drought and flood trend in the growth period of spring maize in Northeast China in the past 60 years

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(2): 179–190 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190684

基于Hybrid–maize模型的吉林省不同生态区玉米产量潜力研究

Analysis of yield potential of maize in different ecological regions in Jilin Province using Hybrid–maize model

中国生态农业学报. 2016, 24(7): 926–934 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160156

品种和播期对华北春玉米产量及水分利用效率的影响

Effects of sowing date and cultivar on grain yield and water use efficiency of spring maize in the North China Plain

中国生态农业学报. 2018, 26(6): 837–846 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170786

播期和品种变化对马铃薯产量的耦合效应

Coupling impacts of planting date and cultivar on potato yield

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(2): 296–304 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180707

中国东北春玉米区干旱时空分布特征及其对产量的影响

Spatial distribution characteristics and impact on spring maize yield of drought in Northeast China

中国生态农业学报. 2015(6): 758–767 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.141350

中国生态农业学报(中英文) 2020 年 4 月 第 28 卷 第 4 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Apr. 2020, 28(4): 480−491

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190585

白帆, 杨晓光, 刘志娟, 孙爽, 张镇涛, 王晓煜, 高继卿, 刘涛. 气候变化背景下播期对东北三省春玉米产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(4): 480−491

BAI F, YANG X G, LIU Z J, SUN S, ZHANG Z T, WANG X Y, GAO J Q, LIU T. Effects of sowing dates on grain yield of spring maize in the Three-Province of the Northeast China under climate change[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(4): 480−491

气候变化背景下播期对东北三省春玉米产量的影响*

白 帆[1,3], 杨晓光[1**], 刘志娟[1], 孙 爽[1], 张镇涛[1], 王晓煜[1,2], 高继卿[1], 刘 涛[1]

(1. 中国农业大学资源与环境学院 北京 100193; 2. 中国气象局资产管理事务中心 北京 100081; 3. 北京市气象服务中心 北京 100089)

摘 要: 为探究气候变化背景下东北三省(黑龙江省、吉林省和辽宁省)春玉米适宜播期的变化程度, 本文以东北三省春玉米潜在种植区为研究区域, 基于 1981—2015 年气象资料, 1981—2012 年农业气象观测站玉米生育期、产量资料以及土壤资料, 分气侯区对农业生产系统模型(APSIM)进行调参和验证, 建立适用于东北三省 10 个不同气候区的模型相关参数, 在各气候区利用调参验证后的 APSIM-Maize 模型设置不同播期, 模拟各年代不同播期下春玉米潜在产量和气候生产潜力, 综合高产和稳产性指标, 明确了不同区域各年代不同条件下适宜播期范围。研究结果表明, APSIM 模型对于东北三省 7 个春玉米品种开花和成熟两个关键生育期以及产量模拟结果与实测结果具有较好的一致性, 表明 APSIM 模型能够较好地模拟研究区域春玉米生育期和产量。充分灌溉条件下, 研究区域内适宜播期范围从 4 月 16 日至 5 月 19 日, 空间上呈纬向分布南早北迟的特征; 20 世纪 90 年代和 21 世纪 00 年代玉米适宜播期较 20 世纪 80 年代有提前趋势, 其中 20 世纪 90 年代提前趋势更明显; 第 1、第 3、第 5、第 7 和第 9 气候区雨养条件下较充分灌溉条件下适宜播期有推迟趋势, 推迟天数为 3~6 d。雨养条件下各年代不同气候区理论上的适宜播期较目前生产中实际播期下的产量提高 2.84%~9.96%。以上结果为进行未来气候变化对东北三省春玉米影响及其适宜播期等研究提供了技术支撑。

关键词: 气候变化; 东北三省; 春玉米; APSIM 模型; 适宜播期; 产量

中图分类号: S513 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Effects of sowing dates on grain yield of spring maize in the Three-Province of the Northeast China under climate change*

BAI Fan[1,3], YANG Xiaoguang[1**], LIU Zhijuan[1], SUN Shuang[1], ZHANG Zhentao[1], WANG Xiaoyu[1,2], GAO Jiqing[1], LIU Tao[1]

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Asset Operation Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 3. Beijing Meteorological Service Center, Beijing 100089, China)

Abstract: Northeast China is the most sensitive area to climate change, where is also the important region of maiza production in

* 国家重点研究与发展计划项目(2017YFD0300301)资助
** 通信作者: 杨晓光, 主要研究方向为气候变化对作物的影响与适应。E-mail: yangxg@cau.edu.cn
白帆, 主要研究方向为气候变化对作物的影响与适应。E-mail: baifan19950613@126.com
收稿日期: 2019-08-06 接受日期: 2019-12-31
* The study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2017YFD0300301).
** Corresponding author, E-mail: yangxg@cau.edu.cn
Received Aug. 6, 2019; accepted Dec. 31, 2019

China. It has both theoretical and practical significance to explore suitable sowing date of spring maize in three provinces of Northeast China (Heilongjiang Province, Jilin Province and Liaoning Province) under climate change. Meteorological data from 1981 to 2015 and agro-meteorological observations, including maize phenology data, yield data, and soil data from 1981 to 2012, were used to construct an APSIM-Maize model. The data were collected from the potential cultivation zones of spring maize in the three provinces of the Northeast China. The model was calibrated and validated in different climatic zones across the study area and related parameters were established accordingly. The potential yields and climatic potential yields of spring maize during different decades were then determined by setting different sowing dates based on the validated APSIM model. Combined with the indices of yield level and yield stability, the suitable range of sowing dates was determined under different conditions during different decades in each climatic zone. The results showed that the simulated values, including the days from sowing date to flowering date and maturity date, and the yield, were in agreement with the observed values for the seven spring maize varieties in the study area. This indicated that the APSIM model accurately simulated the phenological development and yield information of spring maize in the study area. Under the condition of sufficient irrigation, the suitable sowing date in the study area ranged from April 16 to May 19. A latitudinal distribution was exhibited for the suitable sowing date with the date moving earlier from south to north. The suitable sowing date of maize in the 1990s and 2000s was earlier than that in the 1980s, and this advanced trend was more significant in the 1990s than in the 2000s. However, under rainfed conditions, the suitable sowing period in the first, third, fifth, seventh, and ninth climatic zones displayed a delayed trend, with the delay ranging from 3 days to 6 days. Compared with the yield simulated using the sowing date applied in current production, the yield simulated using the theoretical suitable sowing date increased by 2.84%–9.96% in different climatic zones during different decades under rainfed conditions. This research supports the use of the APSIM model in Northeast China for applications such as the selection of suitable sowing dates under future climate scenarios.

Keywords: Climate change; Three-Province of the Northeast China; Spring maize; APSIM model; Suitable sowing date; Yield

根据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第 5 次评估报告, 1880—2012 年期间, 全球地表平均温度上升了 0.85 ℃[1]。全球变暖的背景下, 近百年来(1909—2011 年)中国陆地区域平均增温 0.9~1.5 ℃, 高于全球增温平均水平, 近 15 年来气温上升的趋势变缓, 但仍处于近百年来气温最高阶段[2]。东北三省是中国高纬度地区, 也是我国乃至全球气候变暖最为显著的地区之一[3]。中国是世界第二大玉米(*Zea mays*)生产国, 2016 年全国玉米总产量已达 2.1 亿 t, 而东北三省春玉米产量占全国玉米总产量的 34%[4]。气候变暖背景下, 如何通过调整播期, 充分利用热量资源, 保证玉米高产稳产, 对东北三省玉米生产具有重要的理论和实践意义。

适宜的播期是实现作物高产的关键因素之一。在当前全球气候变化背景下, 充分利用当地的气候条件趋利避害, 使作物各生育期处于有利的气象条件, 播期的选择至关重要[5]。前人采用田间试验方法在东北地区开展了大量的研究。赵先丽等[6]结合辽宁庄河地区开展的播期试验数据及 1981—2010 年该地区的春玉米作物数据, 探讨了播期对该地区春玉米生长发育及产量的影响, 发现春玉米产量随播期的推迟呈现先增后减的趋势; 马树庆等[7]利用东北地区玉米分期播种试验, 结合逐日气温和降水等气象资料, 分析了气候变化对玉米生产的影响, 发现在水分适宜条件下, 气候变化对春玉米生长发育及产量呈正效应; 李文科等[8]通过在吉林梨树进行播期试验, 探讨了播期对吉林春玉米生长发育和产量形成的影响, 得出吉林西南部春玉米适宜播期在 5 月中旬左右。在利用作物模型研究春玉米播期对产量影响方面, 戴明宏等[9]使用调参验证后的 CERES-Maize 模型对北京地区的春玉米进行模拟, 分析了播期推迟对该区域春玉米产量和水分利用效率的影响, 发现在适宜水分条件下, 适当推迟播期会有一定的增产效应; 米娜等[10]利用辽宁锦州的分期播种试验资料, 通过调参验证后的 CERES-Maize 模型模拟不同播期下各年代玉米产量, 利用最佳季节法分析了该地区玉米最佳播期, 得出辽宁大部分地区春玉米适宜播期在 4 月中下旬, 新疆春播中晚熟玉米的最适播期为 4 月 20 日—5 月 5 日; 许红根等[11]基于新疆地区 2015—2017 年实际播期试验数据, 利用 APSIM 模型分析了不同播期下春玉米产量的稳定性。目前, 前人研究主要基于田间试验分析播期对春玉米生长发育及产量的影响[12-13], 但田间试验有较大的局限性, 播期设置不能过密, 除播期外其他因素对春玉米生长发育及产量的影响无法剥离。而基于作物生长模型进行的研究中大多局限于局部地区, 且研究年份较短。综合考虑水分限制对播期的影响, 利用作物模型对东北不同气候区不同年代适宜播期进行分析, 目前仍少见报道。本研究基于调参验证后的 APSIM-Maize 模型, 分气候区研

究播期对东北三省春玉米产量的影响，明确在水分不限制的灌溉模式下和非灌溉模式的雨养条件下各气候区各年代春玉米的适宜播期，为东北三省春玉米高产稳产提供理论依据和科学参考。

1 研究区域概况与研究方法

1.1 研究区域概况

本文以我国东北三省春玉米潜在种植区为研究区域，包括黑龙江、吉林、辽宁3省。东北三省为温带大陆性季风气候，玉米生长季内平均气温为19.0~22.0 ℃，降水量为300~500 mm，日照为800~1 000 h，温差大，无高温危害，日照充足，气候条件适宜玉米的生长发育[14]。东北三省主要种植制度是一年1熟，该地区地处在“黄金玉米带”，土地肥沃，光照资源丰富，为玉米的高产稳产提供了基础条件。

1.2 数据来源

气象数据来自于中国气象科学数据共享服务网(http://cdc.cma.gov.cn)，包括 1961—2015 年黑龙江省、吉林省和辽宁省 57 个气象站逐日气象资料，气象要素包括日平均气温、日最高和最低气温、日降水量、日照时数、相对湿度和平均本站气压等。

作物数据来自东北三省数据较全且品种单一、适宜进行多年份调参验证的 7 个农业气象观测站(佳木斯、哈尔滨、通化、白城、辽源、瓦房店、建平)，包括 1981—2012 年春玉米品种、播种日期、播种密度、播种深度、行距，生育期(出苗期、开花期和成熟期)、产量、施肥时间和施肥量以及灌溉时间和灌溉量，数据完备。

土壤数据来自农业气象观测站、《中国土壤数据库》及《第二次土壤普查农田肥力》，包括 0~2 m 土层的土壤容重、田间持水量、萎蔫系数和土壤含水量等，其中的土壤数据与年份均与作物数据对应，土壤数据的测量时间为开花期，数据完备。

1.3 研究方法

1.3.1 ≥10 ℃有效积温的计算

≥10 ℃有效积温利用 1961—2015 年气象站点逐日气象资料计算，具体计算公式为[15]:

$$\mathrm{GDD}=\sum_{i=1}^{n}\max\left(0,\ T_i-T_{\mathrm{b}}\right) \tag{1}$$

式中: T_i为第 i 天的气温(℃); T_{b}为生物学下限温度，本文取 10 ℃作为下限温度; n 为计算≥10 ℃有效积温的天数。

1.3.2 水分亏缺指数的计算

水分亏缺指数可反映一段时间内作物水分供需状况，具体计算公式为[16]:

$$K=\frac{\mathrm{ET_c}-P}{\mathrm{ET_c}} \tag{2}$$

$$\mathrm{ET_c}=\mathrm{ET_0}\times K_{\mathrm{c}} \tag{3}$$

式中: $\mathrm{ET_c}$为作物需水量(mm); P为作物降水量(mm); $\mathrm{ET_0}$为参考作物蒸散量(mm); K_{c}为作物系数，$K<0$ 说明降水量可以满足玉米生长季内需水，$K>0$ 说明降水量不能满足玉米生长季需水。其中参考作物蒸散量($\mathrm{ET_0}$)的计算公式为[17]:

$$\mathrm{ET_0}=\frac{0.408\left(R_{\mathrm{n}}-G\right)+\gamma\dfrac{900}{T+273}U_2\left(e_{\mathrm{a}}-e_{\mathrm{d}}\right)}{\Delta+\gamma\left(1+0.34U_2\right)} \tag{4}$$

式中: $\mathrm{ET_0}$为参考作物需水量(mm), R_{n}为作物表面的净辐射量($\mathrm{MJ\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}}$), G 为土壤热通量($\mathrm{MJ\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}}$), T 为平均气温(℃), U_2为 2 m 高处的平均风速($\mathrm{m\cdot s^{-1}}$), e_{a}为饱和水汽压(kPa), e_{d}为实际水汽压(kPa), Δ为水汽压与温度曲线的斜率(kPa·℃$^{-1}$), γ 为干湿表常数(kPa·℃$^{-1}$)。

1.3.3 农业生产系统模型

农业生产系统模型(agricultural production system simulator, APSIM)是从 1991 年开始由澳大利亚联邦科工组织和昆士兰州政府的农业生产系统研究组(APSRU)共同研制开发的作物生产模拟系统。APSIM 模型可模拟玉米、小麦(*Triticum aestivum*)、棉花(Gossypium *spp.*)、大麦(*Hordeum vulgare*)、甘蔗(*Saccharum officinarum*)、花生(*Arachis hypogaea*)、其他豆类作物等多种作物。该模型具有模块化的特点，通过中央引擎将各模块结合在一起，在进行作物模拟时主要用到的模块是气象模块、作物模块、地表有机质模块、土壤模块、管理模块、施肥模块、灌溉模块和结果输出模块[18-19]。目前，APSIM 模型已在世界多个国家及地区的气候变化评估、农业环境影响评价、农业生产管理决策、水资源合理利用等方面得到较好的应用[20-27]。

1.3.4 模型适应性评价指标

通过模型模拟结果与实测结果差异性以及各项评价指标来对 APSIM 模型模拟东北三省春玉米生育期和产量准确性进行检验。本研究中，采用以下统计量作为检验 APSIM 模型的指标: 模拟值与实测值之间的决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)、归一化均方根差(NRMSE)[28]、平均绝对误差(MAE)和 D 指标[29]。R^2 和 D 可以反映出模拟值与实测值之间的一致性程度，指标值越接近 1，说明模拟效果越好; RMSE 为模拟值与实测值之间的绝对误差，值越小，表明模拟值与实际观测值的偏差越小; NRMSE 为模拟值与实测值之间的相对误差，控制在 10%以内说

明模型的模拟有较高精度。

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-S_i)^2}{N}} \tag{5}$$

$$\mathrm{NRMSE}=\frac{\mathrm{RMSE}}{O}\times 100\% \tag{6}$$

$$\mathrm{MAE}=\frac{\sum\left|S_i-O_i\right|}{n} \tag{7}$$

$$D=\frac{\sum\left(S_i-O_i\right)^2}{\sum\left(\left|S_i-O\right|+\left|O_i-O\right|\right)^2} \tag{8}$$

式中: S_i 为模拟值, O_i 为实测值, O 为实测平均值, n 为样本数。

1.3.5　高稳系数的计算

高稳系数(HSC)是 1994 年由温振民等[30]首先提出, 该系数可以综合反映作物产量的高产性和稳产性, 系数越高, 表明作物高产性和稳产性越好。本文通过高稳系数法分析春玉米在不同播期下产量的高产性与稳产性, 得到该地区春玉米的适宜播期。

$$\mathrm{HSC}_i=\frac{\bar{x}_i-S_i}{\bar{x}} \tag{9}$$

式中: HSC_i 为该站点播期为 i 时的高稳系数, $\bar{x}_i$ 为该站点播期为 i 时的平均产量, S_i 为该站点播期为 i 时的产量的标准差, $\bar{x}$ 为整个研究区域所有站点产量的平均值。

2　结果与分析

2.1　东北三省气候区划分

本文以 1961—2010 年 80%保证率条件下的≥10 ℃有效积温 1 314 ℃·d 作为玉米种植北界。由于东北三省积温及降水条件空间差异较大, 为了精细分析研究区域适宜播期, 按照东北春玉米种植区域玉米生长季内有效积温及作物水分亏缺指数将全区分为 10 个亚区[31], 如表 1 和图 1 所示。

2.2　APSIM 模型有效性验证及情景设置

2.2.1　模型有效性验证

在使用 APSIM 模型模拟之前, 需将模型参数本土化。每个气候区因积温、降水条件相近, 所以针对同一品种进行调参验证。需要进行本土化的参数包括玉米各品种从出苗到营养生长期结束的积温、开花到灌浆的积温、光周期斜率、每株最大籽粒数、灌浆速率等。

将各个站点的气象数据、土壤数据及作物数据输入模型后, 对参数进行调参验证。本文采取“试错法”在区域尺度上对东北三省各春玉米品种参数进行调整验证, 使模拟值与实测值尽可能的接近, 从而使 APSIM 模型本土化。生育期方面, 主要针对玉米的开花期及成熟期进行实测值和模拟值比对; 产量方面, 主要对产量进行评价。各气候区内代表性站点、品种及调参验证数据对应年份如表 2 所示。

图 2 和图 3 为东北三省不同气候区典型站点春玉米开花期和成熟期模拟值和实测值的比较结果。由图可以看出 APSIM 模型对于 7 个品种的开花期和成熟期两个关键生育期的模拟结果和实测结果具有较好的一致性, 开花期和成熟期的决定系数 R^2 均在 0.7 以上。从表 3 可以看出开花期和成熟期的均方根

表 1　东北三省气候区划及划分标准

Table 1　Criteria for the division and distribution of climatic zones in the Three-Province of the Northeast China

气候区 Climatic zone	区域范围分布 Regional distribution	代表站点 Representative station	≥10 ℃有效积温 Effective accumulated temperature (≥10 ℃) (℃·d)	水分亏缺指数(K) Crop water deficit index (K)
CZ1	黑龙江省东部及西北部 Eastern and Northwest of Heilongjiang Province	富锦、鸡西、宝清 Fujin, Jixi, Baoqing	1 314~1 600	>0
CZ2	黑龙江省中部及吉林省东部 Central of Heilongjiang Province and East of Jilin Province	佳木斯、尚志、牡丹江 Jiamusi, Shangzhi, Mudanjiang	1 314~1 600	<0
CZ3	黑龙江省西南部 Southwest of Heilongjiang Province	哈尔滨、海伦、齐齐哈尔 Harbin, Hailun, Qiqihar	1 601~1 800	>0
CZ4	吉林省中部 Central of Jilin Province	通化、蛟河、桦甸 Tonghua, Jiaohe, Huadian	1 601~1 800	<0
CZ5	吉林省西部 West of Jilin Province	白城、泰来、乾安 Baicheng, Tailai, Qian’an	1 801~2 000	>0
CZ6	辽宁省东部 East of Liaoning Province	宽甸、桓仁、开原 Kuandian, Huanren, Kaiyuan	1 801~2 000	<0
CZ7	辽宁省西北部 Northwest of Liaoning Province	阜新、彰武、黑山 Fuxin, Zhangwu, Heishan	2 001~2 200	>0
CZ8	辽宁省中部 Central of Liaoning Province	本溪、岫岩、庄河 Benxi, Xiuyan, Zhuanghe	2 001~2 200	<0
CZ9	辽宁省西南部 Southwest of Liaoning Province	朝阳、建平、锦州 Chaoyang, Jianping, Jinzhou	2 201~2 370	>0
CZ10	辽宁省南部 South of Liaoning Province	营口、兴城、大连 Yingkou, Xingcheng, Dalian	2 201~2 370	<0

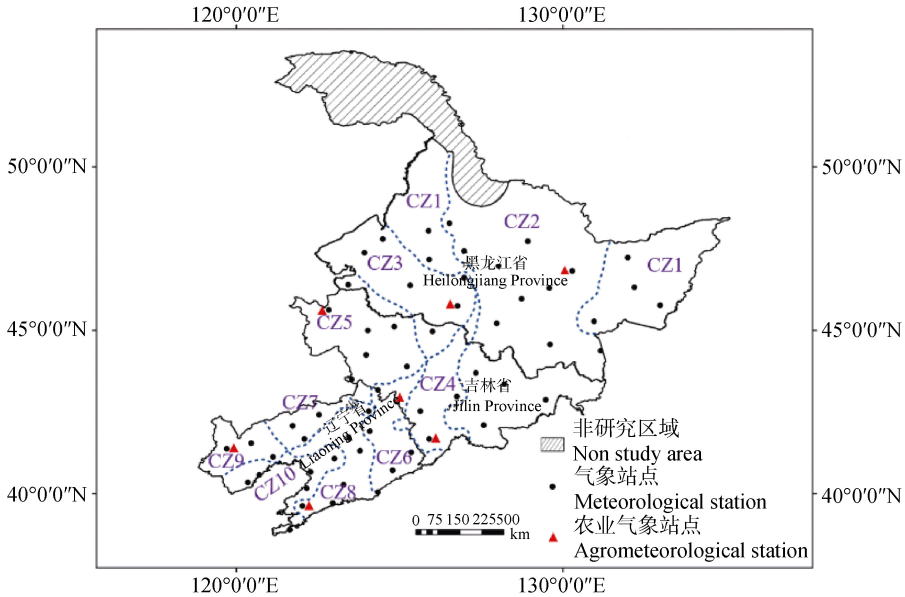

图 1 研究区域气候区划分及站点分布

Fig.1 Division of climatic zones (CZx) and distribution of stations in the study area

表 2 东北三省各气候区春玉米 APSIM 模型调参和验证所用品种及数据来源

Table 2 Maize cultivars and data sources for APSIM calibration and evaluation in different climatic zone in the Three-Province of the Northeast China

气候区 Climatic zone	代表站点 Representative station	品种 Variety	调参验证年份 Year for calibration and validation
CZ1, CZ2	黑龙江佳木斯 Jiamusi, Heilongjiang	东农 248 Dongnong 248	1994, 1996, 1998, 2001—2003
CZ3	黑龙江哈尔滨 Harbin, Heilongjiang	四单 19 Sidan 19	1999—2004
CZ4	吉林通化 Tonghua, Jilin	吉单 101 Jidan 101	1988—1991, 1995, 1999
CZ5	吉林白城 Baicheng, Jilin	白单 9 Baidan 9	1990—1995
CZ6	吉林省辽源 Liaoyuan, Jilin	吉单 159 Jidan 159	1998, 2002—2006
CZ7, CZ8	辽宁瓦房店 Wafangdian, Liaoning	连玉 6 号 Lianyu 6	1999—2005
CZ9, CZ10	辽宁建平 Jianping, Liaoning	丹玉 13 Danyu 13	1996, 1998, 2001—2004

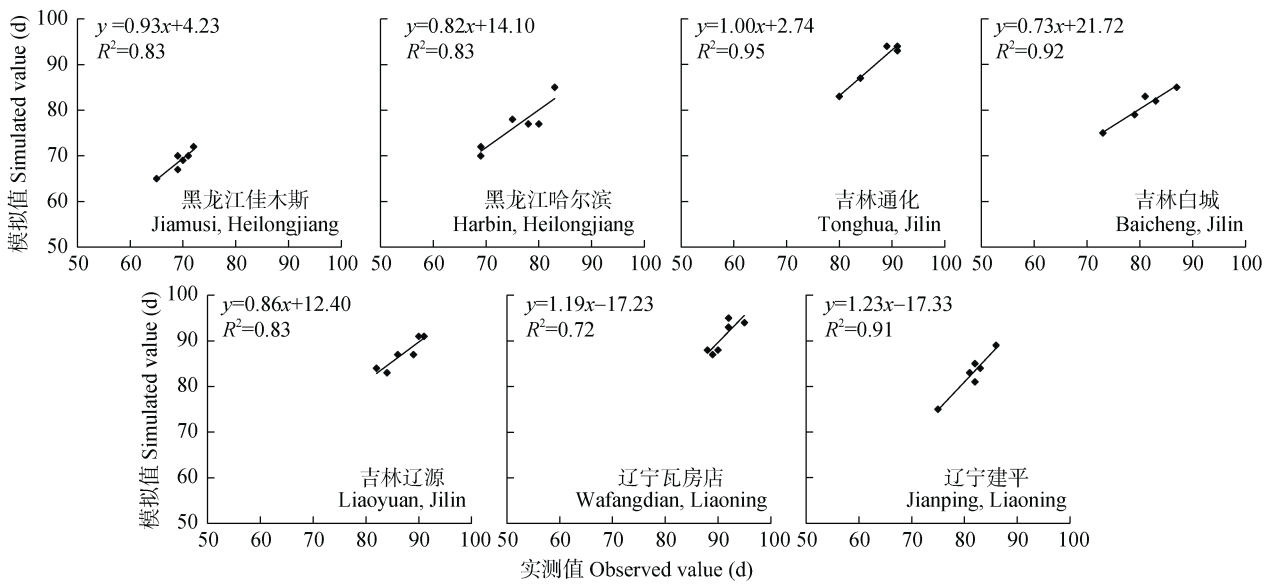

图 2 东北三省代表站点春玉米播种到开花日数实测值及模拟值验证结果比较

Fig. 2 Validation of the APSIM model simulation for days from sowing to flowering of spring maize in representative stations of the Three-Province of the Northeast China

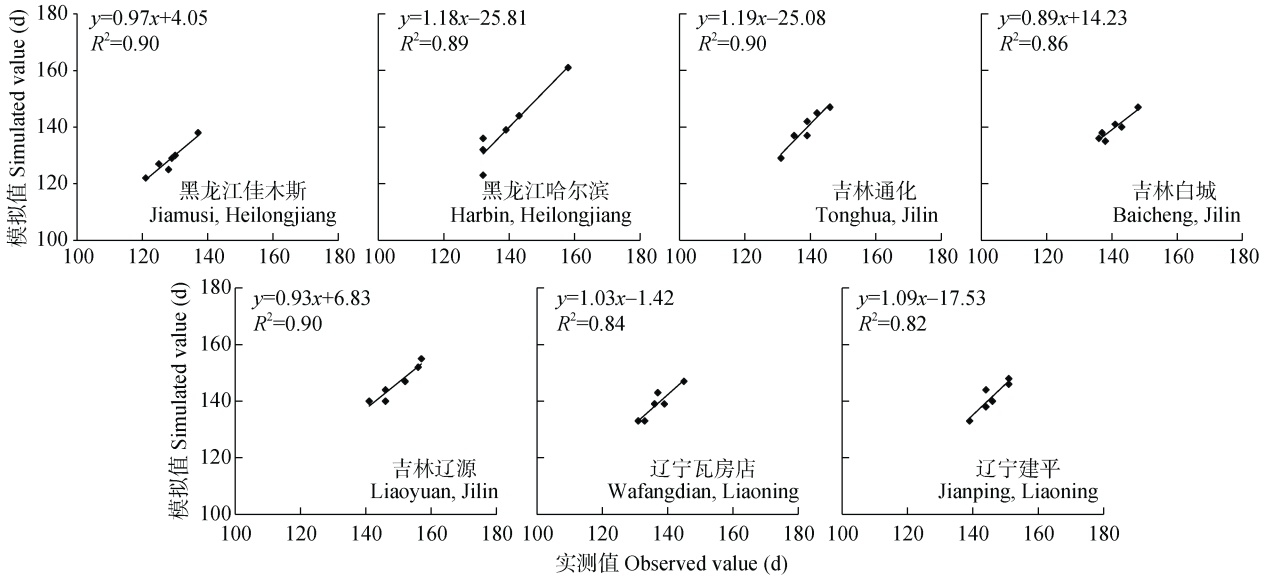

图 3　东北三省代表站点春玉米播种到成熟日数实测值及模拟值验证结果比较

Fig.3　Validation of the APSIM model simulation for days from sowing to maturity of spring maize in representative stations in the Three-Province of the Northeast China

表 3　东北三省不同气候区春玉米开花期、成熟期及产量 APSIM 模型验证结果评价

Table 3　Validation metrics of APSIM model performance for the flowering date, maturity date and yield of spring maize in each climatic zone in the Three-Province of the Northeast China

气候区 Climatic zone	品种 Variety	项目 Item	模型评价指标 Validation parameter				
			R^2	RMSE	NRMSE (%)	MAE	D
CZ1, CZ2	东农 248 Dongnong 248	开花期 Flowering date	0.826	1.08 d	1.56	0.83 d	0.941
		成熟期 Maturity date	0.902	1.58 d	1.23	1.17 d	0.973
		产量 Yield	0.890	452.81 kg·hm^{-2}	11.30	305.37 kg·hm^{-2}	0.954
CZ3	四单 19 Sidan 19	开花期 Flowering date	0.828	2.35 d	3.14	2.17 d	0.947
		成熟期 Maturity date	0.892	4.22 d	3.03	2.83 d	0.959
		产量 Yield	0.893	621.20 kg·hm^{-2}	10.27	553.5 kg·hm^{-2}	0.870
CZ4	吉单 101 Jidan 101	开花期 Flowering date	0.955	3.29	3.81	3.17 d	0.865
		成熟期 Maturity date	0.898	2.27	1.64	2.17 d	0.955
		产量 Yield	0.898	1 418.61 kg·hm^{-2}	15.11	1 372.75 kg·hm^{-2}	0.740
CZ5	白单 9 Baidan 9	开花期 Flowering date	0.922	1.47 d	1.83	1.17 d	0.961
		成熟期 Maturity date	0.863	1.83 d	1.30	1.33 d	0.948
		产量 Yield	0.923	1 412.69 kg·hm^{-2}	13.77	1 279.58 kg·hm^{-2}	0.825
CZ6	吉单 159 Jidan 159	开花期 Flowering date	0.832	1.35 d	1.56	1.17 d	0.952
		成熟期 Maturity date	0.905	3.32 d	2.22	3.00 d	0.919
		产量 Yield	0.904	1 424.04 kg·hm^{-2}	17.07	1 409.69 kg·hm^{-2}	0.756
CZ7, CZ8	连玉 6 号 Lianyu 6	开花期 Flowering date	0.718	1.78 d	1.96	1.50 d	0.889
		成熟期 Maturity date	0.837	2.97 d	2.17	2.17 d	0.905
		产量 Yield	0.899	914.98 kg·hm^{-2}	14.66	858.00 kg·hm^{-2}	0.813
CZ9, CZ10	丹玉 13 Danyu 13	开花期 Flowering date	0.909	2.00 d	2.45	1.67 d	0.931
		成熟期 Maturity date	0.817	3.19 d	2.19	2.83 d	0.874
		产量 Yield	0.954	1 536.51 kg·hm^{-2}	15.47	15.47 kg·hm^{-2}	0.817

误差 RMSE 基本在 3~5 d 以内，开花期和成熟期的归一化均方根 NRMSE 误差均在 4%内，开花期和成熟期的平均绝对误差 MAE 值均在 3 以内，开花期和成熟期的 D 指标均在 0.85 以上。由此可知 APSIM 模型可以较好地模拟东北地区春玉米的生长进程。

图 4 为东北三省春玉米产量模拟值和实测值比较结果。从图 4 和表 3 可以看出, APSIM 模型对于 7

个玉米品种的产量模拟值和实测值的相关关系较好，产量模拟值和实测值的决定系数 R^2 都在 0.8 以上。从表 3 可以看出产量的均方根误差 RMSE 基本在 1 500 kg·hm^{-2} 以内，归一化均方根误差 NRMSE 均在 18%以内，D 指标 0.80 以上。由此可知 APSIM 模型可以较好地模拟东北三省春玉米产量。

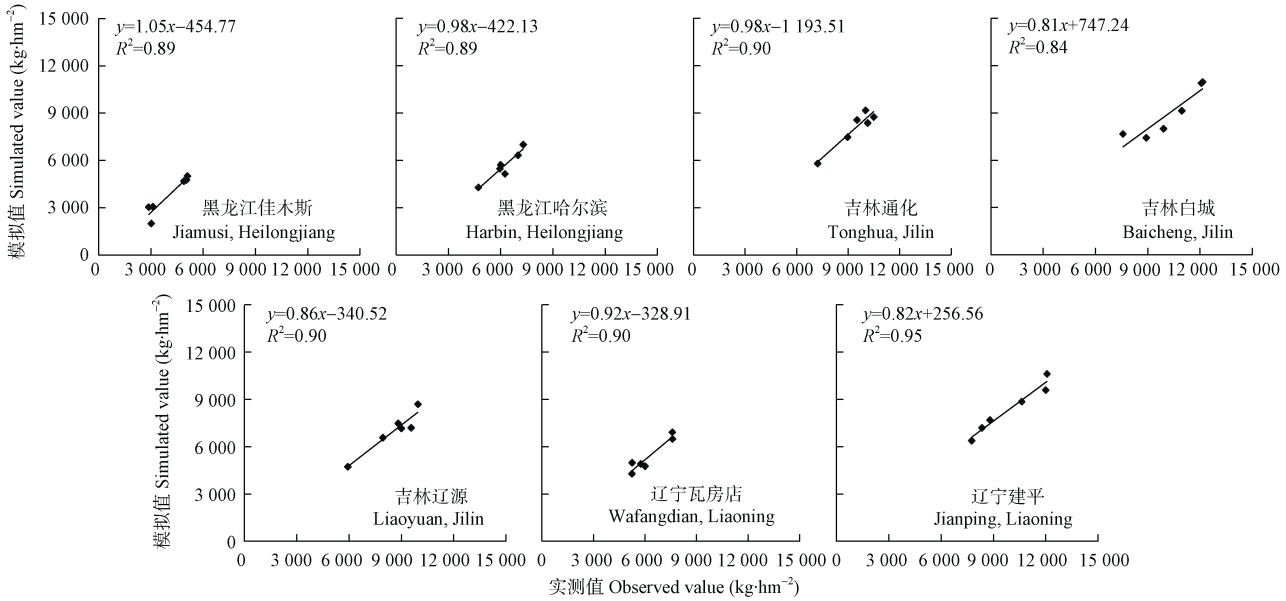

图 4 东北三省代表站点春玉米产量实测值及模拟值验证结果比较

Fig. 4 Validation of the APSIM model simulation for the yield of spring maize in in representative stations in the Three-Province of the Northeast China

2.2.2 模型的情景设置

根据东北三省春玉米生长发育所需积温条件和生长下限温度，结合当地实际播期数据，将播期模拟范围设置为 4 月 10 日至 5 月 25 日，每 3 d 为 1 个播期，各气候区内每年 15 个播期，分别模拟每年不同播期的产量，分别按照 20 世纪 80 年代(1981—1990 年)、20 世纪 90 年代(1991—2000 年)和 21 世纪 00 年代(2001—2015 年)3 个年代进行统计。

播期设置时采用已经调参验证的 7 个品种，播种深度为 5 cm，行距为 0.6 m，播种密度为 80 000 株·hm^{-2}。

由于东北三省春玉米大多不灌溉(雨养)，为明确不同水分条件下各气候区适宜播期，分别设置两个情景进行模拟：一种为充分灌溉条件下的潜在产量模拟(限制条件为当地光温条件，水分和氮肥均为适宜，模型设置为自动灌溉和施肥)；另一种情景为不灌溉条件下气候生产潜力模拟(限制条件为当地光温降水条件，其他要素为最适宜条件，模型设置自动施肥)。

2.3 研究区春玉米适宜播期空间分布

2.3.1 充分灌溉条件下春玉米适宜播期

根据已有研究表明，近 35 年(1981—2015 年)东北三省热量资源呈明显增加趋势，平均气温升温趋势明显，每 10 年升高 0.22 ℃，其中 20 世纪 90 年代升温较为显著，21 世纪 00 年代升温趋势趋缓；降水方面，近 35 年(1981—2015 年)东北三省降水量呈减少趋势，平均每 10 年减少 11.1 mm，其中 21 世纪 00 年代减少趋势最为明显。

在以上气候变化背景下，本文利用 APSIM 模型对充分灌溉条件下各气候区各站点各年份不同播期下的春玉米产量进行模拟，计算每个站点不同年代产量的高稳系数，高稳系数最高值所对应的播期区间即为该站点该年代的适宜播期。将各站点适宜播期通过 Arcgis 软件插值得到图 5。各气候区适宜播期即为气候区内所有站点适宜播期的并集。灌溉条件下东北三省各年代不同气候区适宜播期时空分布如图 5a、5b、5c 所示。可以看出在水分满足条件下东北三省的适宜播期呈纬向分布，从东北到西南逐渐提前。

20 世纪 80 年代东北三省春玉米适宜播期分布为由北向南逐渐提前。适宜播期最晚区域为第 1、第 2 和第 3 气候区，播期最早区域为东北三省西南部也就是第 8、第 9 和第 10 气候区内。第 1 气候区适宜播期范围为 5 月 10—16 日，第 2 气候区适宜播期范围为 5 月 7—19 日，第 3 气候区适宜播期范围为 5 月 7—16 日，第 4 气候区的适宜播期范围为 5 月 4—13 日，第 5 气候区的适宜播期范围为 5 月 1—13 日，第 6 气候区的适宜播期范围为 4 月 28 日—5 月 7 日，第 7 气候区的适宜播期范围为 4 月 28 日—5 月 1 日，第

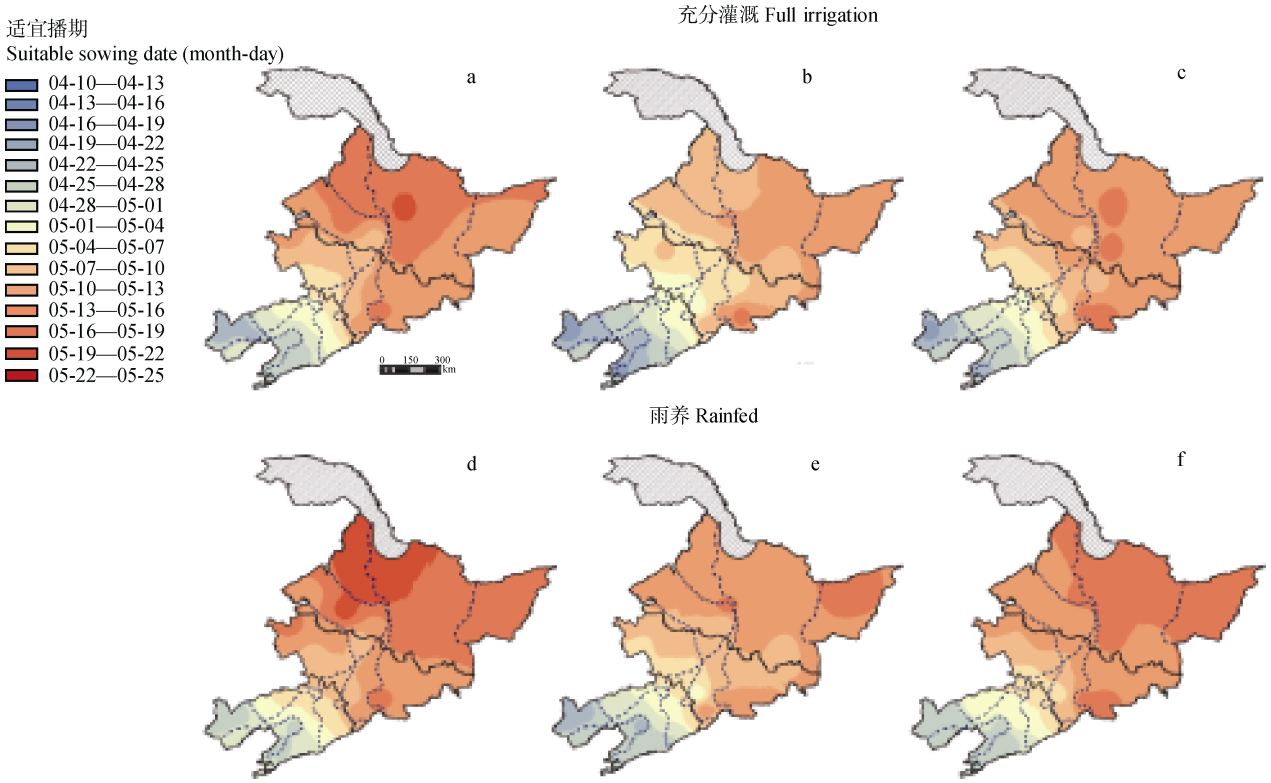

图 5　充分灌溉(a, b, c)和雨养(d, e, f)条件下 20 世纪 80 年代(a, d)、90 年代(b, e)和 21 世纪 00 年代(c, f)东北三省不同气候区春玉米适宜播期的时空分布

Fig. 5　Distribution of suitable sowing dates for spring maize in different climatic zones in the Three-Province of the Northeast China during 1980s (a, d), 1990s (b, e) and 2000s (c, f) under full irrigation (a, b, c) and rainfed (d, e, f) conditions

8 气候区的适宜播期范围为 4 月 22 日—5 月 1 日，第 9 气候区的适宜播期范围为 4 月 19—25 日，第 10 气候区的适宜播期范围为 4 月 22 日—5 月 1 日。

20 世纪 90 年代东北三省春玉米适宜播期最晚区域为黑龙江省东北部和吉林省东南部，即第 1 和第 2 气候区内，播期最早区域为东北西南部区域即第 8、第 9 和第 10 气候区。第 1 气候区适宜播期为 5 月 7—13 日，较 20 世纪 80 年代整体提前 3 d；第 2 气候区的适宜播期范围为 5 月 4—13 日，较 80 年代整体提前 3 d，部分地区提前 6 d；第 3 气候区适宜播期为 5 月 1—13 日，较 80 年代整体提前 3 d，部分地区提前 6 d；第 4 气候区适宜播期为 5 月 1—10 日，较 80 年代整体提前 3 d；第 5 气候区适宜播期为 4 月 28 日—5 月 10 日，较 80 年代整体提前 3 d；第 6 气候区适宜播期为 4 月 22 日—5 月 4 日，较 80 年代整体提前 3 d，部分地区提前 6 d；第 7 气候区适宜播期为 4 月 22—28 日，较 80 年代整体提前 3 d，部分地区提前 6 d；第 8 气候区适宜播期为 4 月 19—28 日，较 80 年代整体提前 3 d，部分地区提前 6 d；第 9 气候区适宜播期为 4 月 16—25 日，较 80 年代部分地区提前 3 d；第 10 气候区适宜播期为 4 月 16 日—5 月 1 日，较 80 年代整体提前 3 d，部分地区提前 6 d。总体来看，20 世纪 90 年代适宜播期与 80 年代相比有较大幅度的提前，大部分地区提前幅度为 3 d，少部分地区提前幅度为 6 d。

21 世纪 00 年代东北三省春玉米适宜播期最晚区域为东北三省北部的第 1、第 2 和第 3 气候区，播期最早区域为东北三省西南部第 8、第 9 和第 10 气候区。第 1 气候区适宜播期为 5 月 7—13 日，较 20 世纪 90 年代变化不大，较 80 年代整体提前 3 d；第 2 气候区适宜播期为 5 月 7—16 日，较 90 年代整体推迟 3 d，较 80 年代部分地区提前 3 d；第 3 气候区适宜播期为 5 月 1—13 日，较 90 年代变化不大，部分地区推迟 3 d，较 80 年代整体提前 3 d，部分地区提前 6 d；第 4 气候区适宜播期为 5 月 4—13 日，较 90 年代整体推迟 3 d，较 80 年代变化不大；第 5 气候区适宜播期为 5 月 1—10 日，较 90 年代部分地区推迟 3 d，较 80 年代部分地区提前 3 d；第 6 气候区适宜播期为 4 月 25 日—5 月 7 日，较 90 年代部分地区推迟 3 d，较 80 年代部分地区提前 3 d；第 7 气候区适宜播期为 4 月 25 日—5 月 1 日，较 90 年代部分地区推迟 3 d，较 80 年代部分地区提前 3 d；第 8 气候区适宜播期为 4 月 19—28 日，较 90 年代整体推迟 3 d，较 80 年代部分地区提前 3 d；第 9 气候区适

宜播期为 4 月 16—25 日，较 90 年代变化不大，较 80 年代部分地区提前 3 d；第 10 气候区适宜播期为 4 月 16 日—5 月 1 日，较 90 年代部分地区推迟 3 d，较 80 年代部分地区提前 3 d。

总体来看，20 世纪 90 年代东北三省春玉米适宜播期与 80 年代相比有较大幅度提前，大部分地区提前幅度为 3 d，少部分地区提前幅度为 6 d；而 21 世纪 00 年代大部分地区较 20 世纪 80 年代有 0~3 d 的提前趋势，较 90 年代有 0~3 d 的推迟趋势。

2.3.2 雨养条件下春玉米适宜播期

利用 APSIM 模型对雨养条件下各气候区各站点逐年不同播期下的春玉米产量进行模拟，计算每个站点不同年代产量的高稳系数，高稳系数最高值点所对应的播期区间即为该站点该年代的适宜播期。将各站点适宜播期通过 Arcgis 软件插值得到图 5d、5e、5f。各气候区适宜播期即为气候区内所有站点适宜播期的并集。

雨养条件下东北三省的适宜播期基本呈纬向分布，从北到南逐渐提前。20 世纪 80 年代第 1 和第 2 气候区适宜播期均为 5 月 10—16 日，第 3 气候区适宜播期为 5 月 7—19 日，第 4 气候区适宜播期为 5 月 4—13 日，第 5 气候区适宜播期为 5 月 4—16 日，第 6 气候区适宜播期为 4 月 28 日—5 月 7 日，第 7 气候区适宜播期为 4 月 28 日—5 月 7 日，第 8 气候区适宜播期为 4 月 22 日—5 月 1 日，第 9 气候区适宜播期为 4 月 22— 28 日，第 10 气候区适宜播期为 4 月 22 日—5 月 1 日。

20 世纪 90 年代东北三省春玉米第 1 气候区适宜播期范围为 5 月 10—16 日，较 80 年代整体变化不大；第 2 气候区适宜播期范围 5 月 7—13 日，较 80 年代整体提前 3 d；第 3 气候区适宜播期为 5 月 1— 16 日，较 80 年代整体提前 3 d，部分地区提前 6 d；第 4 气候区适宜播期为 5 月 4—10 日，较 80 年代部分地区提前 3 d；第 5 气候区适宜播期为 5 月 1—10 日，较 80 年代整体提前 3 d，部分地区提前 6 d；第 6 气候区适宜播期为 4 月 22 日—5 月 7 日，较 80 年代整体提前 3 d，部分地区提前 6 d；第 7 气候区适宜播期为 4 月 28 日—5 月 1 日，较 80 年代整体提前 3 d，部分地区提前 6 d；第 8 气候区适宜播期为 4 月 19—28 日，较 80 年代整体提前 3 d，部分地区提前 6 d；第 9 气候区适宜播期为 4 月 19—28 日，较 80 年代部分地区提前 3 d；第 10 气候区适宜播期为 4 月 16 日—5 月 1 日，较 80 年代整体提前 3 d，部分地区提前 6 d。总体来看，20 世纪 90 年代适宜播期与 80 年代相比有较大幅度的提前，大部分地区提前幅度为 3 d，少部分地区提前幅度为 6 d。

21 世纪 00 年代东北三省春玉米第 1 气候区适宜播期为 5 月 10—16 日，较 20 世纪 80 年代、90 年代变化不大；第 2 气候区适宜播期为 5 月 7—16 日，较 90 年代部分地区推迟 3 d，较 80 年代整体提前 3 d；第 3 气候区适宜播期为 5 月 1—16 日，较 90 年代变化不大，较 80 年代整体提前 3 d；第 4 气候区适宜播期为 5 月 4—13 日，较 90 年代整体推迟 3 d，较 80 年代变化不大；第 5 气候区适宜播期为 5 月 4—13 日，较 90 年代部分地区推迟 3 d，较 80 年代部分地区提前 3 d；第 6 气候区适宜播期为 4 月 25 日—5 月 7 日，较 90 年代部分地区推迟 3 d，较 80 年代部分地区提前 3 d；第 7 气候区适宜播期为 4 月 28 日—5 月 4 日，较 90 年代部分地区推迟 3 d，较 80 年代部分地区提前 3 d；第 8 气候区适宜播期为 4 月 22—28 日，较 90 年代部分地区推迟 3 d，较 80 年代部分地区提前 3 d；第 9 气候区适宜播期为 4 月 22—25 日，较 90 年代整体推迟 3 d，较 80 年代部分地区提前 3 d；第 10 气候区适宜播期为 4 月 16 日—5 月 1 日，较 90 年代部分地区推迟 3 d，较 80 年代部分地区提前 3 d。

总体来看，在雨养条件下，20 世纪 90 年代东北三省春玉米适宜播期与 80 年代相比有较大幅度提前，大部分地区提前幅度为 3 d，提前趋势没有充分灌溉条件下明显；而 21 世纪 00 年代大部分地区较 20 世纪 80 年代有 0~3 d 的提前趋势，较 90 年代有 0~3 d 的推迟趋势。

从表 4 可以看出，各年代中，雨养条件下东北三省春玉米适宜播期较充分灌溉条件有推迟的趋势。其中第 1、第 3、第 5、第 7、第 9 气候区推迟趋势比较明显，大部分地区推迟 3 d，少部分地区推迟 6 d；而第 2、第 4、第 6、第 8、第 10 气候区推迟趋势并不明显，部分地区适宜播期推迟 3 d 左右，大部分地区较充分灌溉模式下适宜播期变化不大。

2.4 雨养条件下适宜播期较实际播期增产幅度

由于东北三省大部分地区春玉米为雨养种植，所以在其他情景保持不变的基础上利用 APSIM 模型模拟雨养条件下各年代不同气候区在实际播期下的产量，将所得结果与雨养条件下适宜播期下产量进行比较，如表 5 所示。由表 5 可以看出，20 世纪 80 年代东北三省 10 个气候区的增产幅度都在 4%以上，其中第 3 气候区增产幅度最小，为 4.58%；第 9 气候区增产幅度最大，为 9.69%；90 年代大部分气候区增产幅度较 80 年代略有降低，

表 4　充分灌溉和雨养条件下不同年代东北三省各气候区春玉米的适宜播期

Table 4　Suitable sowing dates of spring maize in different climatic zones in the Three-Province of the Northeast China during different decades under full irrigation and rainfed conditions

灌溉条件 Irrigation	气候区 Climatic zone	适宜播期(月-日) Suitable sowing date (month-day)		
		1980s	1990s	2000s
充分灌溉 Full irrigation	CZ1	05-10—05-16	05-07—05-13	05-07—05-13
	CZ2	05-07—05-19	05-04—05-13	05-07—05-16
	CZ3	05-07—05-16	05-01—05-13	05-01—05-13
	CZ4	05-04—05-13	05-01—05-10	05-04—05-13
	CZ5	05-01—05-13	04-28—05-10	05-01—05-10
	CZ6	04-28—05-07	04-22—05-04	04-25—05-07
	CZ7	04-28—05-01	04-22—04-28	04-25—05-01
	CZ8	04-22—05-01	04-19—04-28	04-22—04-28
	CZ9	04-19—04-25	04-16—04-25	04-16—04-25
	CZ10	04-22—05-01	04-16—05-01	04-19—05-01
雨养 Rainfed	CZ1	05-10—05-16	05-10—05-16	05-10—05-16
	CZ2	05-10—05-16	05-07—05-13	05-07—05-16
	CZ3	05-07—05-19	05-01—05-16	05-01—05-16
	CZ4	05-04—05-13	05-04—05-10	05-04—05-13
	CZ5	05-04—05-16	05-01—05-10	05-04—05-13
	CZ6	04-28—05-07	04-22—05-07	04-25—05-07
	CZ7	04-28—05-07	04-28—05-01	04-28—05-04
	CZ8	04-22—05-01	04-19—04-28	04-22—04-28
	CZ9	04-22—04-28	04-19—04-28	04-22—04-25
	CZ10	04-22—05-01	04-16—05-01	04-19—05-01

表 5　雨养条件下东北三省各气候区不同年代春玉米适宜播期与实际播期相比的增产幅度

Table 5　Increase of yield in different climatic zones of spring maize sown in suitable dates over actual yield in the Three-Province of the Northeast China during different decades under rainfed condition

气候区 Climatic zone	增产幅度 Yield increase rate (%)		
	1980s	1990s	2000s
CZ1	6.69	6.44	3.90
CZ2	7.21	6.04	4.61
CZ3	4.58	5.60	5.45
CZ4	5.71	6.62	7.07
CZ5	5.83	4.37	4.46
CZ6	5.75	2.86	4.83
CZ7	7.81	2.39	8.08
CZ8	7.59	4.81	3.31
CZ9	9.69	4.04	2.84
CZ10	8.50	3.75	4.50

第 3、第 4 气候区增产幅度较 80 年代有所提高，第 4 气候区增产幅度最大，为 6.62%，第 6 气候区增产幅度最小，为 2.86%；20 世纪 00 年代大部分气候区增产幅度较 20 世纪 80 年代略有降低，第 3、第 4、第 7 气候区增产幅度较 80 年代有所提高，第 7 气候区增产幅度最大，为 8.08%，第 9 气候区增产幅度最小，为 2.84%。

3　讨论与结论

相比较而言，传统的田间试验方法研究播期对春玉米生长发育及产量具有较大的局限性，因影响因素较多,干扰性较大，耗时长，人力成本高，由于年际之间气象条件波动，试验处理无法完成重复，而采用作物模型方法重复性强，省时省力可设置多播期模拟多个年代作物的生长发育及产量形成。

本研究根据不同的积温及降水条件，将东北三省划分为 10 个气候区，基于 1981—2015 年气象数据、土壤数据及作物数据，对 10 个气候区内的 7 个作物品种进行调参验证，基于调参的结果对不同气候区不同播期的潜在产量和气候生产潜力进行模拟，根据计算后的高稳系数，确定各气候区在不同情境下的适宜播期范围。在模型模拟中，产量随播期的变化呈先增加后减小的趋势，与国内东北春玉米分期播种试验结果基本一致[12-13]。根据李少昆等[32]多年试验考察，总结出黑龙江省春玉米适宜播期范围从 4 月 20 日—5 月 20 日，其中播种日期由东北到西南逐渐提前，吉林省春玉米适宜播期范围为 4 月 25 日—5 月 15 日，辽宁省春玉米适宜播期范围为 4 月

15 日—5 月 10 日，其中辽宁省东北部及南部丘陵地区有适当推迟。本研究结果与之相比，黑龙江省西南部适宜播期推迟约 6 d 左右，吉林省适宜播期在其范围内，辽宁省南部适宜播期有小幅度提前，在 3 d 左右，其余地区吻合度较高。考虑到气候变化的影响，东北三省热量资源逐渐增加，玉米的潜在生长季延长，可适当选用生育期时间更长的品种替代现有品种，并在一定范围内提前播种，从而获得较高的产量。本研究结果可在一定程度上反映气候变化对东北春玉米生长发育及产量的影响，对当地农户实际生产有一定的指导意义，同时也可以作为研究未来气候变化对东北春玉米影响的基础。

本研究在使用 APSIM 模型对东北地区进行调参验证时，针对 10 个气候区选择了 7 个品种，调参验证的过程中，因为个别气候区长序列作物数据缺乏，因此选用积温条件相近的气候区内的品种进行代替。在调参验证过程中，未充分考虑品种的更替，使用的作物数据多为 20 世纪 90 年代的生育期和产量数据，在模拟 20 世纪 80 年代和 21 世纪 00 年代时，会产生一定的差异，应每个年代有 1 套独立的参数进行模拟。以上不足有待在未来的工作中进一步完善。今后可结合未来情景数据进行未来气候变化下春玉米适宜播期的研究，进而研究未来气候变化下的适应性管理措施。

本研究基于气象资料、作物资料和土壤资料对 APSIM 模型进行调参与验证，表明 APSIM 模型可以较好地模拟东北三省春玉米的生长发育进程和产量。在全球气候变暖背景下，过去 35 年，东北三省春玉米适宜播期呈提前的趋势。充分灌溉条件下，适宜播期范围从 4 月 16 日—5 月 19 日，呈纬向分布、南早北迟的特征，其中 20 世纪 90 年代较 80 年代适宜播期有较大提前趋势，提前 3~6 d; 21 世纪 00 年代较 20 世纪 80 年代也有提前趋势，大部分地区提前 0~3 d。雨养条件下，适宜播期范围与分布特征总体较灌溉条件下差异不大，其中 20 世纪 90 年代较 80 年代适宜播期有较大提前趋势，整体提前 3 d; 21 世纪 00 年代较 21 世纪 80 年代也有提前趋势，大部分地区提前 0~3 d。

雨养条件下东北三省各气候区春玉米的适宜播期较充分灌溉条件下有一定的推迟趋势，其中第 1、第 3、第 5、第 7 和第 9 气候区推迟趋势较为明显，为 3~6 d，其余气候区推迟趋势并不明显。

在雨养条件下各年代东北三省不同气候区春玉米适宜播期下的模拟产量较实际播期下的模拟产量有一定幅度的提升，其中 20 世纪 80 年代的增产幅度较大，90 年代、21 世纪 00 年代大部分气候区增产幅度较 20 世纪 80 年代有所减小。

参考文献 References

[1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group Ⅰ to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 1–1552

[2] 《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第三次气候变化国家评估报告[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2015
Committee for the Compilation of Third National Climate Assessment. Compilation of Third National Climate Assessment[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2015

[3] 赵秀兰. 近 50 年中国东北地区气候变化对农业的影响[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(9): 144–149
ZHAO X L. Influence of climate change on agriculture in Northeast China in recent 50 years[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2010, 41(9): 144–149

[4] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook 2017[M]. Beijing: China Statistics Press, 2017

[5] 李宁, 翟志席, 李建民, 等. 播期与密度组合对夏玉米群体源库关系及冠层透光率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(5): 959−964
LI N, ZHAI Z X, LI J M, et al. Effect of sowing date and density on sink/source relationship and canopy light transmission of summer maize (*Zea mays* L.)[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(5): 959−964

[6] 赵先丽, 李丽光, 蔡福, 等. 播期对辽南地区春玉米生育进程及产量影响的试验研究[J]. 气象与环境学报, 2017, 33(6): 66−72
ZHAO X L, LI L G, CAI F, et al. Effects of different sowing dates on growth process and yield of spring maize in southern Liaoning[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2017, 33(6): 66−72

[7] 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
MA S Q, WANG Q, LUO X L. Effect of climate change on maize (*Zea mays*) growth and yield based on stage sowing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 2131−2139

[8] 李文科, 薛庆禹, 王靖, 等. 播期对吉林春玉米生长发育及产量形成的影响[J]. 玉米科学, 2013, 21(5): 81−86
LI W K, XUE Q Y, WANG J, et al. Effect of sowing date on the growth, development and yield formation of spring-maize in Jilin Province[J]. Journal of Maize Sciences, 2013, 21(5): 81−86

[9] 戴明宏, 赵久然, CLAUPEIN W, 等. 基于 CERES-Maize 模型春玉米水分优化管理决策[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 187−192
DAI M H, ZHAO J R, CLAUPEIN W, et al. Decision for optimized water management based on CERES-Maize Crop model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(1): 187−192

[10] 米娜, 张玉书, 纪瑞鹏, 等. 基于作物模型与最佳季节法的

锦州地区玉米最佳播种期分析[J]. 中国农业气象, 2016, 37(1): 68−76
MI N, ZHANG Y S, JI R P, et al. Analysis on optimum sowing date of maize in Jinzhou using crop growth model and optimum season method[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2016, 37(1): 68−76

[11] 许红根, 陈江鲁, 张镇涛, 等. 基于 APSIM 模型的新疆春播中晚熟玉米最适播期研究[J]. 石河子大学学报: 自然科学版, 2018, 36(2): 153−158
XU H G, CHEN J L, ZHANG Z T, et al. Optimal sowing date for maize in spring sowing medium-late maturing region in Xinjiang Province based on APSIM model[J]. Journal of Shihezi University: Natural Science, 2018, 36(2): 153−158

[12] 刘明, 陶洪斌, 王璞, 等. 播期对春玉米生长发育、产量及水分利用的影响[J]. 玉米科学, 2009, 17(2): 108−111
LIU M, TAO H B, WANG P, et al. Effects of sowing date on growth, yield formation and water utilization of spring maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2009, 17(1): 108−111

[13] 罗新兰, 崔佳龙, 蔡福, 等. 播期对玉米生长发育和产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(5): 14−20
LUO X L, CUI J L, CAI F, et al. Effect of sowing date on growth and yield of maize[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(5): 14−20

[14] 于振文. 作物栽培学各论[M]. 2 版. 北京: 中国农业出版社, 2013
YU Z W. Crop Cultivation[M]. 2nd ed. Beijing: China Agricultural University Press, 2013

[15] RAMANKUTTY N, FOLEY J A, NORMAN J, et al. The global distribution of cultivable lands: Current patterns and sensitivity to possible climate change[J]. Global Ecology and Biogeography, 2002, 11(5): 377−392

[16] 薛昌颖, 霍治国, 李世奎, 等. 灌溉降低华北冬小麦干旱减产的风险评估研究[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(3): 131−136
XUE C Y, HUO Z G, LI S K, et al. Action of irrigation on decreasing yield reduction due to drought: A risk assessment of winter wheat in North China Plain[J]. Journal of Natural Disasters, 2003, 12(3): 131−136

[17] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998

[18] KEATING B A, CARBERRY P S, HAMMER G L, et al. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation[J]. European Journal of Agronomy, 2003, 18(3/4): 267−288

[19] MCCOWN R L, HAMMER G L, HARGREAVES J N G, et al. APSIM: A novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research[J]. Agricultural Systems, 1996, 50(3): 255−271

[20] ASSENG S, ANDERSON G C, DUNIN F X, et al. Use of the APSIM wheat model to predict yield, drainage, and NO_3^- leaching for a deep sand[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1998, 49(3): 363−378

[21] ROBERTSON M J, CARBERRY P S, HUTH N I, et al. Simulation of growth and development of diverse legume species in APSIM[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 2002, 53(4): 429−446

[22] PEAKE A S, ROBERTSON M J, BIDSTRUP R J. Optimising maize plant population and irrigation strategies on the Darling Downs using the APSIM crop simulation model[J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 2008, 48(3): 313−325

[23] BASSU S, ASSENG S, MOTZO R, et al. Optimising sowing date of durum wheat in a variable Mediterranean environment[J]. Field Crops Research, 2009, 111(1/2): 109−118

[24] HOLZWORTH D P, HUTH N I, DEVOIL P G, et al. APSIM — Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation[J]. Environmental Modelling & Software, 2014, 62: 327−350

[25] 李广, 黄高宝, 王琦, 等. 基于 APSIM 模型的旱地小麦和豌豆水肥协同效应分析[J]. 草业学报, 2011, 20(5): 151−159
LI G, HUANG G B, WANG Q, et al. Analysis of cooperation effect of water and fertilizer on wheat and pea in dryland based on APSIM model[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2011, 20(5): 151−159

[26] 王静, 杨晓光, 吕硕, 等. 黑龙江省春玉米产量潜力及产量差的时空分布特征[J]. 中国农业科学, 2012, 45(10): 1914−1925
WANG J, YANG X G, LÜ S, et al. Spatial-temporal characteristics of potential yields and yield gaps of spring maize in Heilongjiang Province[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(10): 1914−1925

[27] 肖登攀, 陶福禄. 过去 30 年气候变化对华北平原冬小麦物候的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(11): 1539−1545
XIAO D P, TAO F L. Impact of climate change in 1981—2009 on winter wheat phenology in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(11): 1539−1545

[28] WALLACH D, GOFFINET B. Mean squared error of prediction in models for studying ecological and agronomic systems[J]. Biometrics, 1987, 43(3): 561−573

[29] ASSENG S, FILLERY I R P, DUNIN F X, et al. Potential deep drainage under wheat crops in a Mediterranean climate. I. Temporal and spatial variability[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 2001, 52(1): 45−56

[30] 温振民, 张永科. 用高稳系数法估算玉米杂交种高产稳产性的探讨[J]. 作物学报, 1994, 20(4): 508−512
WEN Z M, ZHANG Y K. Study of a method for estimation performance of the high and stable yield of maize hybrids by the high-stably yielding coefficient[J]. Acta Agronomica Sinica, 1994, 20(4): 508−512

[31] LIU Z J, YANG X G, LIN X M, et al. Maize yield gaps caused by non-controllable, agronomic, and socioeconomic factors in a changing climate of Northeast China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 541: 756−764

[32] 李少昆, 王振华, 高增贵, 等. 北方春玉米田间种植手册[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011
LI S K, WANG Z H, GAO Z G, et al. Northern Spring Maize Planting Manual[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2011