

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2018.02.005

赵俊芳, 李宁, 候英雨, 等. 基于 APSIM 模型评估北方八省春玉米生产对气候变化的响应[J]. 中国农业气象, 2018, 39(2): 108-118

基于 APSIM 模型评估北方八省春玉米生产对气候变化的响应*

赵俊芳¹, 李 宁^{1,2}, 候英雨³, 张 伟¹, 徐精文², 蒲菲堉², 潘志华⁴, 郭建平¹

(1. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081; 2. 四川农业大学资源学院, 成都 611130; 3. 国家气象中心农业气象中心, 北京 100081; 4. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要: 基于北方地区农业气象试验站春玉米多年田间试验数据和逐日气象数据, 分析农业生产系统模型 APSIM 在北方八省春玉米产区的适用性, 在区域尺度上识别春玉米发育期和产量的关键气象响应因子, 模拟过去 54a (1961–2014 年) 该地区春玉米的生长发育和产量形成过程, 探讨春玉米发育期和产量对气候变化的响应规律。结果表明: 验证后的 APSIM 玉米模型在北方八省春玉米产区具有较好的适用性。气温和土壤温度是北方各地春玉米发育期的首要关键气象响应因子, 其中北方春播区春玉米各关键发育期对最高气温响应最明显, 西北内陆区春玉米各关键发育期对最低气温响应最明显。平均气温、日最高气温、日最低气温和土壤温度的升高均会导致春玉米生育期 (出苗、开花和成熟) 日序提前, 发育天数减少, 春玉米提前成熟。北方春播区春玉米产量对温度、降水、日照时数响应明显, 西北内陆区春玉米产量对温度和潜在蒸散响应明显, 大部分地区温度的升高和潜在蒸散的增加会引起玉米产量的显著下降。

关键词: APSIM 模型; 北方春玉米; 发育期; 关键气象因子

Evaluation of Response of Spring Maize Production to Climate Change in the Eight Provinces of Northern China Based on APSIM Model

ZHAO Jun-fang¹, LI Ning^{1,2}, HOU Ying-yu³, ZHANG Yi¹, XU Jing-wen², PU Fei-yu², PAN Zhi-hua⁴, GUO Jian-ping¹

(1. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 2. Resources College, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130; 3. China National Meteorological Center, Beijing 100081; 4. College of Resources & Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193)

Abstract: Based on the spring maize field trial data from agro-meteorological experiment stations in the northern China and daily meteorological data, the adaptability of agricultural production system model APSIM in the maize producing areas of the eight provinces in the northern China was analyzed. The critical meteorological response factors for the development stage and yield of spring maize were determined at the regional scale. The growth and yield formation of spring maize in the past 54 years (1961–2014) were simulated based on APSIM. Response laws of spring maize to climate change were explored. The results showed that, (1) the validated APSIM model had better adaptability in the maize producing areas of the eight provinces in the northern China. (2) Air temperature and soil temperature were the most important meteorological response factors for the development stages of spring maize in the eight provinces of northern China. In the northern spring sowing area, the response of the development stage of spring maize to the maximum temperature was the most obvious. However, in the northwestern inland region, the response of the development stage of spring maize to the minimum temperature was the most obvious. The increase

* 收稿日期: 2017-06-12

基金项目: 中国气象科学研究院基本科研业务费专项 (2017R001); 公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY201506016)

作者简介: 赵俊芳 (1977–), 女, 博士, 研究员, 研究方向为气候变化对农业的影响。E-mail: zhaojfcams@163.com

in daily average temperature, daily maximum temperature, daily minimum temperature and daily soil temperature advanced the day of year (DOY) of spring maize growth stage (emergence, flowering and maturation) and decreased the days of development, causing spring maize mature ahead of time. (3) The key meteorological response factors for spring maize yield in the northern spring maize region were temperature, precipitation and sunshine hours. The key meteorological response factors for spring maize yield in the northwestern inland maize region were mainly temperature and potential evapotranspiration. In most areas, the increase in temperature and potential evapotranspiration significantly decreased in spring maize yield.

Key words: APSIM model; Spring maize in the northern China; Development stage; Key meteorological factors

全球气候的复杂变化已对中国北方旱地农业生产造成了重大影响^[1-2]。随着气候变暖和降水差异的加剧,复杂的气候变化单独或与其它因素一起对农业生产造成严重影响,将会危害粮食生产安全^[3]。因此,加强区域尺度上气候变化对农业生产影响的研究,保证粮食生产安全至关重要。

玉米(*Zea mays* L.)是世界上分布最广的作物之一,从栽培面积和总产量看,仅次于小麦和水稻居第3位^[4-5]。玉米集粮食、饲料、加工原料和能源等多种用途于一身,在全球粮食安全和国民经济发展中具有举足轻重的地位^[6]。中国是世界上仅次于美国的第二大玉米生产国,同时也是玉米最大消费国,消费量90%以上靠国内生产^[7]。中国春玉米种植区主要分布在北方,包括北方春播玉米区和西北内陆春玉米区,其中北方春播玉米区占全国玉米播种面积的42.2%。北方地区水资源相对匮乏,气候条件相对较差,承担了巨大的粮食生产压力,同时,受气候变化的影响较大。多重压力下,尤其是全球变暖背景下,玉米等作物面临减产风险,对粮食安全带来严重威胁。因此,进一步加强北方春玉米生产对气候变化的响应研究,是服务和促进北方农业可持续发展的迫切需要,对于保障该地区粮食安全、主动适应气候变化等具有十分重要的现实意义。

中国开展气候变化对北方玉米生产影响的研究已有几十年的历史,研究成果也非常丰富^[8-17]。Liu等研究发现,气候变化致使中国东北地区春玉米的潜在产量显著下降,下降比例高达22%~26%^[8]。气温升高致使东北大部分地区玉米生育期延长,玉米播种期普遍提前。积温带北移使玉米作物品种由中晚熟品种替换为早中熟品种^[14]。气温升高对玉米生物量的作用以负面为主,CO₂肥效对生物量有一定的补偿作用^[13]。气候变化背景下,日照时数和温度的变化致使华北地区玉米产量潜力下降^[15]。相关研究

成果为科学安排、指挥农业生产提供了很有价值的参考依据。然而,针对气候变化对中国北方春玉米生产影响的研究仍较薄弱,无法适应稳定农业生产、保障国家粮食安全和农业防灾减灾的需求。

一般来说,气候变化对农业影响的研究主要集中在观测试验和模型模拟两方面^[12]。作物模型是目前量化研究气候变化及其影响的较科学和理想的方法。APSIM (Agricultural Production Systems Simulator) 模型是由澳大利亚学者研究开发,是一个成功的旱田作物系统模型,可以以模型主体为基础构建不同的作物模型系统。该模型已经在多个国家和地区的应用实例中得到验证,对于干旱地区的作物生产模拟效果良好。国内对 APSIM 模型的应用研究还未得到广泛应用,目前仅对华北平原、东北平原和黄土高原等地的适用性作了研究^[6,8-9]。但区域尺度上基于 APSIM 模型识别中国北方地区气候变化对农作物生产影响的运用还鲜见报道。鉴于此,本研究在已有研究的基础上,基于 1961–2014 年逐日气象数据和北方八省农业气象试验站春玉米田间试验数据,对农业生产系统模型 APSIM 在北方八省玉米产区的适应性进行验证,模拟过去 54a 该地区春玉米的生长发育和产量形成过程,运用一阶差分法提取影响春玉米关键发育期和产量的“优势因子”,识别春玉米生长发育及产量的关键气象响应因子,探讨各地春玉米发育期和产量对气候变化的响应规律,以期为北方各地玉米种植结构调整、玉米生产的合理布局以及制定适应气候变化的管理措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

中国春玉米种植区主要分布在北方,包括北方春播玉米区和西北内陆春玉米区,种植制度为一年一熟^[16]。北方春播玉米区横跨全国东西,地形狭长,生态环境复杂,大部分位于北纬 40° 以北,包括黑龙

江、吉林、辽宁、内蒙古、宁夏全省（区），河北、陕西两省的北部，山西省大部 and 甘肃省部分地区。该地区属寒温带或温带湿润、半湿润气候带，冬季低温干燥，降水差异明显，其中 60%集中在 7-9 月；西北内陆玉米种植区包括新疆的全部，甘肃和宁夏的一部分。该区属大陆性干燥气候带，大部分地区气温较低，4-10 月平均气温在 15℃以上；全年降水量在 150~300mm，日照充足，干旱少雨，玉米播种面积少^[16]。受资料限制，本研究主要包括内蒙古、黑龙江、吉林、辽宁、山西、甘肃、宁夏和新疆八省区（图 1），其中 2004-2013 年这 8 个省区玉米平均播种面积占全国的 46%，平均总产量占全国的 49%，在中国玉米生产中占重要地位。本研究以北方八省（区）15 个农业气象试验站春玉米田间试验数

据为基础，基于 APSIM 模型探讨各地春玉米发育期和产量对气候变化的响应规律，站点基本情况见表 1 和图 1。

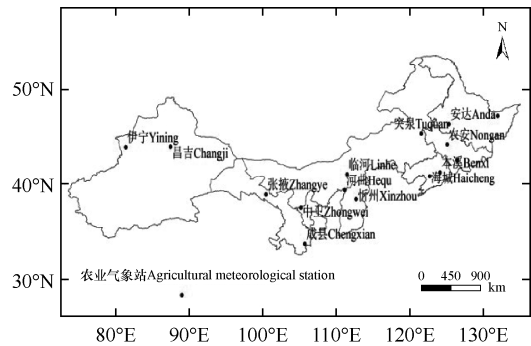


图 1 研究区域和 15 个农业气象站点的分布
Fig. 1 Distribution of study area and 15 agricultural meteorological stations

表 1 所选 15 个气象站点的基本信息

Table 1 Basic information of 15 meteorological sites in the northern China

省份 Province	站点 Station	站点类型 Station type	经度 Longitude (° E)	纬度 Latitude (° N)	海拔高度 Altitude (m)
新疆 Xinjiang	伊宁 Yining	基本站 BS	81.33	43.95	662.5
	昌吉 Changji	一般站 GS	87.43	44.01	579.3
山西 Shanxi	河曲 Hequ	基本站 BS	111.15	39.38	861.5
	忻州 Xinzhou	一般站 GS	112.70	38.42	797.7
宁夏 Ningxia	中卫 Zhongwei	基本站 BS	105.18	37.53	1225.7
内蒙古 Inner Mongolia	临河 Linhe	基本站 BS	111.47	41.08	1039.3
	突泉 Tuquan	一般站 GS	121.58	45.38	311.7
黑龙江 Heilongjiang	安达 Anda	基本站 BS	125.32	46.38	149.3
	富锦 Fujin	基本站 BS	131.98	47.23	66.4
吉林 Jinlin	桦甸 Huadian	基本站 BS	126.45	42.59	263.3
	农安 Nongan	基本站 BS	125.09	44.23	170.2
辽宁 Liaoning	本溪 Benxi	基本站 BS	124.12	41.3	211.9
	海城 Haicheng	基本站 BS	122.72	40.88	25.3
甘肃 Gansu	张掖 Zhangye	基本站 BS	100.42	38.92	1482.7
	成县 Chengxian	一般站 GS	105.72	33.75	970

Note: GS is general station, BS is basic station.

1.2 APSIM 模型简介

APSIM 模型（Agricultural Production System Simulator）是由隶属澳大利亚联邦科工组织和昆士兰州政府的 APSRU（Agricultural Production System Research Unit）研制的一种农业生产系统模型，该模型具有模块化特点，由包括气候、养分、水分、作物、土壤、系统控制和管理等模块组成，通过中央引擎将各模块有机结合在一起^[18-19]。通过“插-拔”的功能实现模块之间的逻辑连接，用户可根据

研究目的组合作物、土壤及其它模块进行各种管理决策模拟。APSIM 模型的核心是土壤，天气和管理措施的变化引起土壤状况的变化，进而影响作物生长发育，能够模拟生长在温带和热带地区的大多数谷物和纤维作物，如玉米、大麦、小麦、棉花等，对于干旱地区作物水分关系具有较强的分析能力，可以模拟轮作系统作物发育期、生物量和产量、不同耕作措施与各生长发育阶段气象因子、土壤水分的动态关系^[20]，充分说明了模型的强大功能和广泛

的适用性。APSIM 模型的特点是能够模拟作物产量对不同基因型、气候和管理条件的反应, 评价轮作序列中土壤肥力指标和作物产量, 在多变的气候条件下, 反映旱作农业区农业生产系统各组分的状态和应对^[21]。目前, APSIM 模型已在全球不同地区得到了广泛引用^[22], 自引进中国以来, 在东北、西南、西北黄土高原等地区进行了大量调参验证工作, 模型本地化取得一定进展, 具有较好的适应性。但区域尺度上基于 APSIM 模型识别中国北方地区气候变化对农作物生产影响的运用还鲜见报道。

1.3 模型参数初始化和调试

APSIM-maize 模型运行所需的最基本气象要素包括: 当地的纬度、月平均气温和月均温变化, 以及逐日太阳总辐射量 ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$)、逐日最高气温 ($^{\circ}\text{C}$)、逐日最低气温 ($^{\circ}\text{C}$) 和逐日降水量 (mm) 等参数项。本研究所使用的 1961–2014 年逐日气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网, 涵盖新疆、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、黑龙江、吉林、辽宁 8 省(区), 一共 15 个农业气象试验站, 主要包括日最高温、日最低气温、日平均气温、相对湿度、降水量、日照时数、平均风速等。本研究中, 模型所需的地表总辐射通过 Penman-Monteith 公式计算得到。

APSIM-maize 模型所需要的土壤参数主要包括土壤容重 $\text{BD}(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ 、风干系数 $\text{AirDry}(\text{mm}\cdot\text{mm}^{-1})$ 、凋萎系数 $\text{LL15}(\text{mm}\cdot\text{mm}^{-1})$ 、田间持水量 $\text{DUL}(\text{mm}\cdot\text{mm}^{-1})$ 、饱和含水量 $\text{SAT}(\text{mm}\cdot\text{mm}^{-1})$ 、有机质含量和 pH 值。数据主要来自中国气象局农业气象观测站和前人研究成果^[23]。

APSIM 模型采用通用作物生长模型来模拟各种 1a 生和多年生作物的生长, 但是针对不同作物需要输入对应的模型参数值。为此, 通过中国气象局各省市农业气象观测站收集北方地区 2008–2014 年田间定位研究的春玉米属性资料, 建立春玉米属性参数, 主要包括品种遗传特性参数、作物生长发育进程、植株形态与产量形成等春玉米参数。同一站点春玉米品种保持不变。考虑到近年来当地作物数据收集较全面, 因此, 将玉米田间试验数据分为两组, 2008–2010 年数据用于输入 APSIM-maize 模型中所需的基本作物参数, 2011–2013 年数据用于验证模型。作物数据主要提取同一个地点春玉米每年开花与成熟的日期, 采用“试错法”在单点尺度上对研究区春玉米的品种参数进行调整, 目的是使模拟值

与实测值之差尽可能小, 将模型输出结果与对应的试验站点当年的田间实测结果进行对照; 调试模型直至模拟输出的生育时期(出苗、开花和成熟)和产量数值等与实测数据相符^[20]。

1.4 模型适用性评价

采用以下统计量作为检验 APSIM-maize 模型的指标^[20]: 模拟值与实测值之间的决定系数 (R^2)、一致性指标 (D 指标)、均方根差 (RMSE)、平均绝对误差 (MAE)、相对均方根差 (NRMSE) 和模型的有效性 (M_E)。即

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

$$\text{NRMSE} = \frac{\text{RMSE}}{O} \times 100\% \quad (2)$$

$$M_E = 1 - \frac{\sum (O_i - S_i)^2}{\sum (O_i - O)^2} \quad (3)$$

$$D = 1 - \frac{\sum (S_i - O_i)^2}{\sum (|S_i - O| + |O_i - O|^2)} \quad (4)$$

$$\text{MAE} = \frac{\sum |S_i - O_i|}{n} \quad (5)$$

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; RMSE 为模拟值与实测值之间的绝对误差, 数值越小, 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; M_E 为模型的有效性指数, 当 $M_E > 0.5$ 时, 说明模型的模拟结果较好; R^2 和 D 指标可反映模拟值与实测值之间的一致性, 对系统模拟误差的响应更敏感, 其值愈接近 1 说明模拟效果愈好; MAE 为平均绝对误差。

1.5 一阶差分法评估北方春玉米发育期和产量对关键气象因子的响应

一阶差分法就是离散函数中连续相邻两项之差, 本文利用一阶差分法识别影响北方春玉米发育期和产量的主要气象因子。首先计算北方春玉米种植区各气象站点春玉米产量、春玉米发育期(出苗、开花和成熟)日序和各气象因子的一阶差分值, 即后一年值与当年值之差, 然后分别建立产量的变化量 ΔY 和发育期日序的变化量 ΔD 与各气象因子变化量 ΔX_n 之间的线性回归方程, 并用 F 检验来判断其显著性, 分析春玉米生育期和产量对各气候因子变化的响应。

$$\Delta D_m = a\Delta X_{mn} + b \quad (6)$$

$$\Delta Y_m = a\Delta X_{mn} + b \quad (7)$$

式中, m 为各气象站点; a 为单因子回归方程的一次项系数; n 分别表示春玉米生长季内平均温度、日最高温度、日最低温度、压强、日照时数、降水量、湿度、土壤温度、太阳辐射和潜在蒸散量; b 为单因子回归方程常数项。当 F 检验判断气象因子显著后, 比较单因子回归方程的一次项系数, 找出影响春玉米发育期和产量的主要气象因子。用单因子分析时通过 0.05 水平显著性检验的气象因子构建生育期、产量一阶差分值的多元回归方程, 即

$$\Delta D_m = a + b\Delta X_{n1} + c\Delta X_{n2} + d\Delta X_{n3} + \dots \quad (8)$$

$$\Delta Y_m = a + b\Delta X_{n1} + c\Delta X_{n2} + d\Delta X_{n3} + \dots \quad (9)$$

式中, $n1$ 、 $n2$ 、 $n3$ 等分别表示通过 0.05 水平显著性检验的气象因子; a 为综合回归方程常数项; b 、 c 、 d 表示回归系数。

2 结果与分析

2.1 APSIM-maize 模型在北方八省春玉米产区适用性的验证

作物数据主要提取同一个地点春玉米每年开花与成熟的日期, 采用“试错法”在单点尺度上对北方八省春玉米的品种参数进行调整。APSIM 模型中春玉米品种控制参数主要分为两类: 一类控制作物的生长发育进程; 一类是控制作物最终产量的形成(表 2)。影响春玉米生长发育期的作物参数包括出苗-营养生长结束的积温、顶叶-开花的积温、开花-灌浆的积温、开花-成熟期的积温、光周期临界值 1、光周期临界值 2、光周期斜率和潜在灌浆速率等。

分析北方八省各农业气象试验站点春玉米 3 个

关键发育阶段(出苗、开花和成熟), 得出平均模拟日序分别为第 129、202 和 263 天(日序以 1 月 1 日为第 1 天, 依次类推), 实测日序分别为第 135、205 和 264 天, 其中出苗阶段相差 6d, 开花阶段相差 3d, 成熟阶段相差 1d, 3 个关键发育阶段模拟值误差均较小, 在可接受范围内。3 个发育阶段实测和模拟日序的决定系数 R^2 分别为 0.91、0.52 和 0.72; 均方根误差 RMSE 分别为 7.34、6.84 和 5.67; 归一化均方根误差 NRMSE 分别为 5.44%、3.35% 和 2.15%; D 值分别为 0.87、0.8 和 0.91, 模拟结果良好(图 2)。同时对比分析该地春玉米模拟产量与实测产量得出, 决定系数(R^2)值为 0.92, 相对均方根误差 NRMSE 值为 7.09%, D 值为 0.98, 表明 APSIM-maize 模型模拟的北方地区春玉米模拟产量和实测产量有很好的一致性(图 3)。可见, APSIM-maize 模型能够较好地模拟北方地区春玉米的生长发育和产量, 表明 APSIM-maize 模型在北方八省春玉米产区有较好的适用性。

2.2 模拟春玉米发育期对单一关键气象因子变化的响应

春玉米发育期主要划分为出苗期、拔节期、抽雄期、开花期、吐丝期和成熟期, 由于资料的限制, 本文主要研究出苗期、开花期和成熟期对关键气象因子的响应。春玉米生长发育和产量对气象因子的响应并不是单一的, 为了提取北方地区春玉米发育期对气象因子响应的“优势因子”, 选取 10 种气象因子生长季内(4-9 月)的统计值为研究对象。

分析北方八省春玉米主要发育期的一阶差分值与各种气象因子一阶差分值之间的相关关系(表 3)

表 2 APSIM-maize 模型品种参数描述

Table 2 Parameter description in APSIM-maize model

参数类型 Parameter type	品种参数 Variety parameter	描述 Description	单位 Unit
生育期 Growth stage	tt_emerg_to_endjuv	出苗到营养生长期结束的积温 Accumulated temperature from seedling to end of vegetative phase	℃·d
	tt_flag_to_flower	顶叶到开花的积温 Accumulated temperature from parietal to flowering	℃·d
	tt_flower_to_start_grain	开花到灌浆的积温 Accumulated temperature from flowering to grain filling	℃·d
	tt_flower_to_maturity	开花到成熟的积温 The accumulated temperature from flowering to maturity	℃·d
	Photoperiod_crit1	光周期临界值 1 Photoperiod critical value 1	hours
	Photoperiod_crit2	光周期临界值 2 Photoperiod critical value 2	hours
	Photoperiod_slope	光周期斜率 Photoperiod slope	—
	grain_gth_rate	潜在灌浆速率 Potential filling rate	mg·grain ⁻¹ ·d ⁻¹
控制产量 Control yield	x_stem_wt	每平方米茎秆重 Stem weight per square meter	g·stem ⁻¹
	y_height	植株高度 Plant height	m
	Head_grain_no_max	每平方米籽粒数 Grain per square meter	Kernel·head ⁻¹

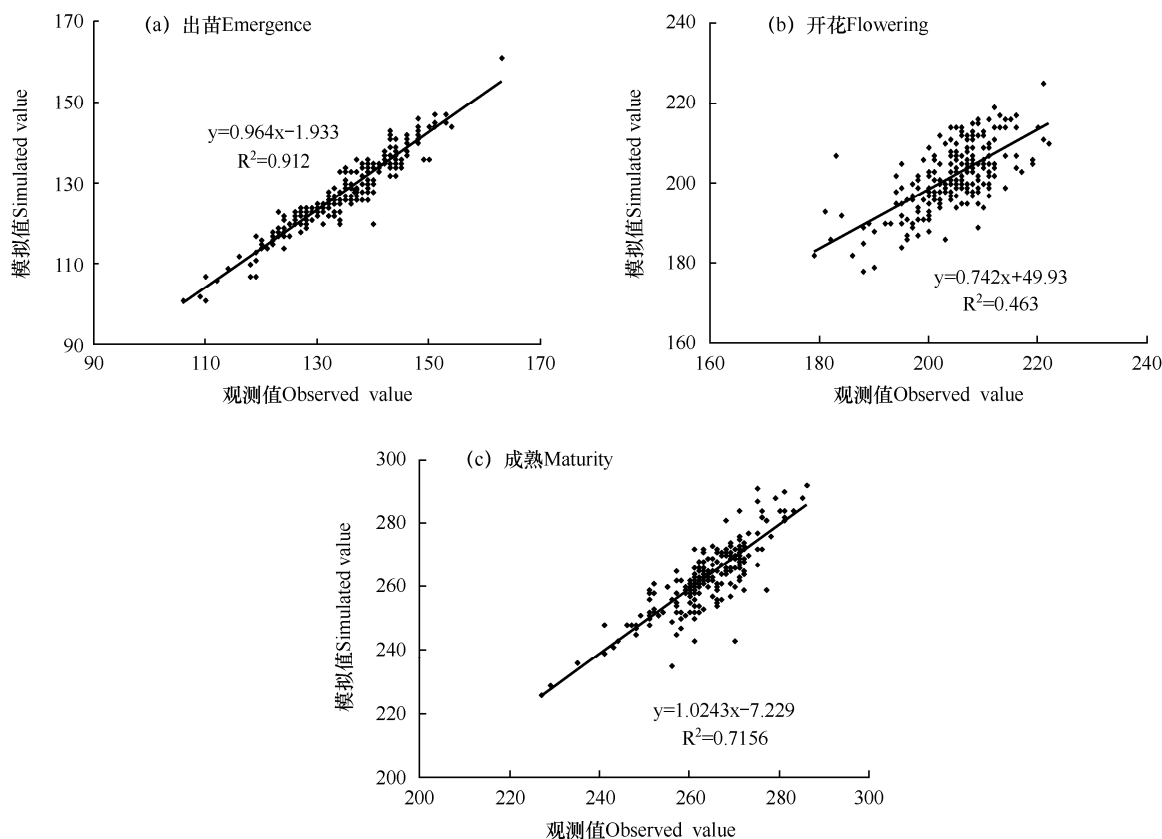


图2 北方八省春玉米发育期（日序，以1月1日为1）实测值与模拟值的对比

Fig. 2 Comparison between simulated and observed the day of year (DOY) of developmental stage of spring maize in the eight provinces of the northern China

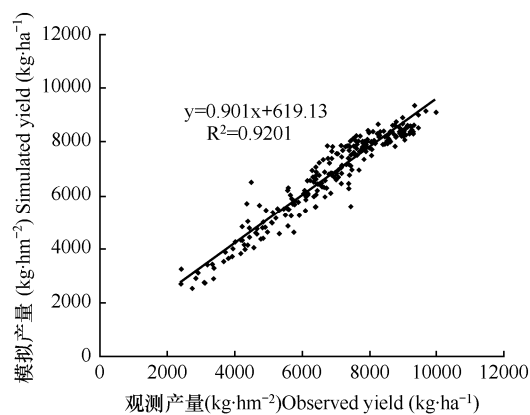


图3 北方八省春玉米产量实测值与模拟值的对比

Fig. 3 Comparison between simulated and observed yield of spring maize in the eight provinces of the northern China

可见，总体上，发育期变化量与各个温度变化量包括生长季平均气温变化量、最高气温变化量、最低气温变化量和土壤表层温度变化量之间呈现极显著的负相关关系（ $P<0.01$ ），说明春玉米发育期对温度的变化有较明显的响应，平均温度、最高温度、最低温度

和土壤表层温度的上升均会引起春玉米发育期提前。

总体来说，北方春播玉米区春玉米各关键发育期对最高气温响应最明显，西北内陆玉米区春玉米各关键发育期对最低气温响应最明显，且因为地理环境的差异，不同地区春玉米发育期的关键气象因子响应不同。具体来说，山西春玉米发育期的主要响应气象因子是气温（平均温度、日最高温度和日最低温度）和土壤温度；内蒙古为气温（平均温度、日最高温度和日最低温度）、土壤温度和降水；辽宁为气温（平均温度、日最高温度和日最低温度）、土壤表层温度、日照时数和太阳辐射；吉林为气温（平均温度、日最高温度和日最低温度）、土壤温度；黑龙江为气温（平均温度、日最高温度和日最低温度）、土壤温度；甘肃为气温（平均温度、日最高温度和日最低温度）、土壤温度、日照时数和太阳辐射；新疆为气温（平均温度、日最高温度和日最低温度）、土壤温度和降水；宁夏为气温（平均温度、日最高温度和日最低温度）、土壤温度。

表 3 北方八省春玉米发育期一阶差分与气象因子一阶差分的相关性分析

Table 3 The first difference correlation analysis between the development stages and the meteorological factors of spring maize in the eight provinces of northern China

区域 Region	站点 Station		ΔD	ΔTA	ΔTMX	ΔTMN	ΔP	ΔSH	$\Delta Rain$	ΔH	ΔST	ΔR
新疆 Xinjiang	昌吉 Changji	出苗 E	-0.384**	-0.321*	-0.414**	0.471	0.028	0.086	0.222	-0.407**	-0.002	
		开花 F	-0.702**	-0.630**	-0.705**	0.317	0.117	0.389**	0.652	-0.605**	0.107	
		成熟 M	-0.874**	-0.797**	-0.844**	0.234	0.078	0.422**	0.632	-0.727**	0.059	
	伊宁 Yining	出苗 E	-0.100	-0.070	-0.121	0.282	0.125	0.086	0.093	-0.192	0.122	
		开花 F	-0.641**	-0.581**	-0.440**	0.623	-0.180	0.409**	0.480	-0.613**	-0.191	
		成熟 M	-0.756**	-0.674**	-0.709**	0.520	-0.270	0.266	0.404	-0.725**	-0.284	
山西 Shanxi	河曲 Hequ	出苗 E	-0.243	-0.098	-0.412**	0.225	0.138	-0.083	0.06	-0.028	0.126	
		开花 F	-0.711**	-0.593**	-0.539**	0.308	-0.090	0.076	0.411	-0.533**	-0.107	
		成熟 M	-0.891**	-0.772**	-0.643**	0.274	-0.280	0.289	0.475	-0.682**	-0.297*	
	忻州 Xinzhou	出苗 E	-0.277	0.037	-0.613**	0.115	0.394**	-0.457**	-0.231	0.109	0.379**	
		开花 F	-0.789**	-0.697**	-0.373*	0.345	-0.260	0.204	0.493	-0.636**	-0.269	
		成熟 M	-0.911**	-0.748**	-0.535**	0.433	-0.296*	0.208	0.439	-0.696**	-0.305*	
宁夏 Ningxia	中卫 Zhongwei	出苗 E	-0.213	-0.001	-0.482**	0.283	0.053	-0.166	-0.247	0.322*	0.045	
		开花 F	-0.235	-0.15	-0.309*	0.102	-0.140	0.029	0.104	0.328*	-0.133	
		成熟 M	-0.590**	-0.478**	-0.438**	0.362	-0.190	0.173	0.125	0.04	-0.184	
内蒙古 Inner Mongolia	临河 Linhe	出苗 E	-0.094	-0.073	-0.235	0.327	0.227	-0.153	-0.071	0.033	0.218	
		开花 F	-0.651**	-0.671**	-0.617**	0.235	-0.040	0.12	0.332	-0.608**	-0.046	
		成熟 M	-0.789**	-0.768**	-0.728**	0.279	-0.080	0.173	0.387	-0.759**	-0.083	
	突泉 Tuquan	出苗 E	-0.397**	-0.326*	-0.278	0.143	0.017	0.123	0.075	-0.372*	0.005	
		开花 F	-0.705**	-0.629**	-0.611**	-0.171	0.127	0.043	0.062	-0.420**	0.140	
		成熟 M	-0.866**	-0.766**	-0.747**	0.058	-0.14	0.105	0.144	-0.756**	-0.138	
辽宁 Liaoning	本溪 Benxi	出苗 E	-0.227	-0.238	-0.200	-0.061	-0.080	-0.198	-0.046	-0.296*	-0.093	
		开花 F	-0.870**	-0.849**	-0.617**	-0.002	-0.250	-0.015	0.03	-0.729**	-0.249	
		成熟 M	-0.928**	-0.830**	-0.813**	-0.079	-0.180	-0.136	-0.157	-0.785**	-0.176	
	海城 Haicheng	出苗 E	-0.366*	-0.298*	-0.446**	0.007	-0.150	-0.023	-0.104	-0.366*	-0.167	
		开花 F	-0.846**	-0.814**	-0.780**	0.217	-0.501**	-0.015	0.111	-0.726**	-0.509**	
		成熟 M	-0.894**	-0.804**	-0.884**	0.131	-0.463**	-0.050	0.057	-0.775**	-0.475**	
吉林 Jilin	桦甸 Huadian	出苗 E	-0.311*	-0.380**	-0.146	-0.029	-0.190	-0.029	0.209	-0.299*	-0.196	
		开花 F	-0.896**	-0.854**	-0.709**	-0.174	-0.150	-0.177	0.043	-0.787**	-0.162	
		成熟 M	-0.811**	-0.742**	-0.710**	-0.150	-0.100	-0.167	-0.127	-0.700**	-0.113	
	农安 Nongan	出苗 E	-0.173	-0.159	-0.094	0.085	-0.09	-0.17	0.164	-0.106	-0.099	
		开花 F	-0.857**	-0.818**	-0.704**	0.002	-0.230	0.006	0.22	-0.702**	-0.223	
		成熟 M	-0.895**	-0.818**	-0.825**	0.041	-0.110	-0.084	0.059	-0.684**	-0.112	
黑龙江 Heilongjiang	安达	出苗 E	-0.294*	-0.292*	-0.222	-0.001	-0.150	0.087	0.016	-0.182	-0.150	
Anda	开花 F	-0.760**	-0.802**	-0.555**	-0.191	-0.190	0.294*	0.405	-0.674**	-0.181		
	成熟 M	-0.826**	-0.851**	-0.662**	-0.088	-0.21	0.385**	0.363	-0.778**	-0.205		
	富锦 Fujin	出苗 E	-0.151	-0.149	-0.140	0.002	-0.090	-0.214	0.018	-0.099	-0.105	
		开花 F	-0.843**	-0.854**	-0.653**	-0.152	-0.260	0.084	0.534	-0.719**	-0.267	
		成熟 M	-0.844**	-0.827**	-0.683**	-0.160	-0.391**	0.198	0.396	-0.746**	-0.397**	
甘肃 Gansu	张掖 Zhangye	出苗 E	-0.130	-0.089	-0.276	-0.132	0.261	-0.007	-0.088	-0.078	0.263	
		开花 F	-0.751**	-0.826**	-0.366*	0.312	-0.325*	0.481**	0.538	-0.715**	-0.327*	
		成熟 M	-0.207	-0.325*	-0.146	0.058	-0.070	0.092	0.170	-0.239	-0.059	

(续表)

区域 Region	站点 Station	ΔD	ΔTA	ΔTMX	ΔTMN	ΔP	ΔSH	$\Delta Rain$	ΔH	ΔST	ΔR
甘肃 Gansu	成县	出苗 E	-0.431**	-0.395**	-0.233	0.289	-0.160	0.139	0.260	-0.29	-0.158
	Chengxian	开花 F	-0.724**	-0.660**	-0.435**	0.382	-0.270	0.004	0.518	-0.467**	-0.279
		成熟 M	-0.890**	-0.780**	-0.516**	0.538	-0.441**	0.221	0.597	-0.744**	-0.453**

注：*为 $P<0.05$ ，**为 $P<0.01$ 。 ΔD 为逐年模拟的出苗、开花、成熟期（日序）的变化量。 ΔTA 、 ΔTMX 、 ΔTMN 分别为逐年春玉米生长季内日平均气温、日平均最高温度和日平均最低温度的变化量。 ΔP 、 ΔSH 、 $\Delta Rain$ 分别为逐年春玉米生长季内日平均水汽压、日平均日照时数、总降水量的变化量。 ΔH 、 ΔST 、 ΔR 分别为逐年春玉米生长季内日平均空气湿度、日平均土壤表层温度和太阳总辐射的变化量。下同。

Note: * is $P<0.05$, ** is $P<0.01$. ΔD is the change in diurnal order of development stage i.e. emergence(E), flowering(F) and maturity(M) year by year simulated by APSIM-maize model. ΔTA , ΔTMX , ΔTMN are the changes in daily average temperature, daily maximum temperature and daily minimum temperature during spring maize growing season, respectively. ΔP , ΔSH , $\Delta Rain$ are the changes in daily average vapor pressure, daily average sunshine hours, total precipitation during spring maize growing season, respectively. ΔH , ΔST , ΔR are the changes in daily average air humidity, daily average soil surface temperature and total solar radiation during spring maize growing season, respectively. E is emergence. F is flowering. M is maturity. The same as below.

2.3 模拟春玉米产量对单一关键气象因子变化的响应

选取春玉米生长季内（4–9 月）10 种气象因子的统计值，分析北方地区各站点春玉米产量与关键气象因子的一阶差分差值的相关性（表 4），以筛选春玉米产量对气象因子响应的“优势因子”。

从表 4 可知，北方春播玉米区春玉米产量的关键响应气象因子主要有温度、降水、日照时数，西北内陆产区主要有温度和潜在蒸散。具体来说，内蒙古春玉米产量的主要响应气象因子是降水和温度；山西为温度；宁夏为土壤温度和日最低温度；

辽宁为日照时数和温度；吉林为温度和日照时数；黑龙江为温度、土壤温度和潜在蒸散；甘肃为温度和潜在蒸散；新疆为降水、温度和潜在蒸散。可见，大部分地区温度的升高和潜在蒸散的增加会引起玉米产量的显著下降。已有研究认为温度升高会导致玉米生育期缩短，减少干物质积累时间，从而导致其产量下降；白天最高温度的上升除引起生育期加快而减少最终产量外，还可能增加玉米的热胁迫，如高温条件下，玉米光合强度下降，开花受粉率降低等，从而进一步增加其产量损失^[17]。

表 4 各省春玉米模拟产量一阶差分与气象因子一阶差分的相关性分析

Table 4 The first difference correlation analysis between the yield simulated by APSIM-maize model and the meteorological factors of spring maize in each province

区域 Region	站点 Station	ΔTA	ΔTMX	ΔTMN	ΔP	ΔSH	$\Delta Rain$	ΔH	ΔST	ΔR	ΔET_0
新疆 Xinjiang	昌吉 Changji	-0.455**	-0.511**	-0.397**	0.010	-0.101	0.451**	0.495	-0.427**	-0.093	-0.556**
	伊宁 Yining	-0.405**	-0.453**	0.069	0.145	-0.045	0.640**	0.062	-0.378**	-0.048	-0.425**
山西 Shanxi	河曲 Hequ	-0.650**	-0.544**	-0.503**	0.088	-0.006	0.110	0.276	-0.477**	-0.025	-0.381**
	忻州 Xinzhou	-0.576**	-0.427**	-0.355*	0.221	-0.020	0.237	0.398	-0.412**	-0.021	-0.446**
宁夏 Ningxia	中卫 Zhongwei	-0.123	-0.357*	0.208	0.005	-0.039	0.188	0.084	-0.574**	-0.048	-0.187
内蒙古 Inner Mongolia	临河 Linhe	0.010	-0.079	0.132	-0.008	0.168	0.008**	0.061	0.096	0.172	-0.141
辽宁 Liaoning	突泉 Tuquan	0.745**	0.667**	0.695**	0.061	-0.103	-0.042	-0.050	0.542**	-0.107	0.271
	本溪 Benxi	-0.278	-0.220	-0.210	0.053	0.140**	0.115	0.073	-0.152	0.124	-0.168
吉林 Jilin	海城 Haicheng	-0.179	-0.135	-0.167	0.299	0.108**	-0.049	0.094	-0.088	0.098	-0.148
	桦甸 Huadian	0.022**	0.057	-0.076	-0.018	0.491**	-0.168	-0.135	0.092	0.495**	0.123
	农安 Nongan	0.009	0.015	-0.049	0.070	0.164**	-0.103	-0.270	0.137	0.169**	0.320*
黑龙江 Heilongjiang	安达 Anda	-0.545**	-0.556**	-0.455**	-0.026	-0.177	0.231	0.293	-0.486**	-0.165	-0.470**
甘肃 Gansu	富锦 Fujin	0.546**	0.578**	0.409**	-0.196	0.371*	-0.245	-0.429	0.517**	0.386**	0.517**
	张掖 Zhangye	-0.363*	-0.442**	0.042	0.120	-0.381**	0.363*	0.445	-0.447**	-0.383**	-0.385**
	成县 Chengxian	-0.561**	-0.482**	-0.270	0.346	-0.144	0.243	0.558	-0.416**	-0.148	-0.560**

注： ΔET_0 为春玉米生长季内总潜在蒸散的变化量。

Note: ΔET_0 is the change in total potential evapotranspiration during the spring maize growing season.

3 结论与讨论

(1) 验证后的 APSIM 玉米模型在北方八省春玉米产区具有较好的适用性。北方各地春玉米出苗、开花和成熟 3 个关键发育期实测和模拟日序的均方根误差分别为 7.34、6.84 和 5.67, 归一化均方根误差分别为 5.44%、3.35%和 2.15%; D 值分别为 0.87、0.8 和 0.91, 结果良好。各地模拟产量与实测产量相对均方根误差值为 7.09%, D 值为 0.98, 表明 APSIM-maize 模型在北方八省春玉米产区具有较好的适用性。

(2) 北方各地春玉米发育期对温度响应最显著, 二者变化量之间呈极显著的负相关关系。北方春播玉米区的春玉米各关键发育期对最高气温响应最显著, 西北内陆春玉米各关键发育期对最低气温响应最显著。其中, 对于北方春播玉米区, 该地春玉米生长发育对平均气温、日最高气温、日最低气温和土壤温度的响应明显, 西北内陆春玉米生长发育对温度和降水的响应明显。平均气温、日最高气温、日最低气温和土壤温度的升高均会导致春玉米生育期(出苗、开花和成熟)日序提前, 发育期天数减少, 春玉米提前成熟。

(3) 北方春玉米产量对温度、降水和日照时数响应明显, 西北内陆春玉米产量对温度和潜在蒸散的响应明显; 大部分地区温度的升高和潜在蒸散的增加会引起玉米产量的显著下降。

玉米全生育期分为播种、出苗、三叶、七叶、拔节、抽雄、开花、灌浆、乳熟、成熟等主要发育时期, 发育期的历时长短和变化即发育速度与外界环境条件关系密切。玉米属喜温而又怕高温的作物, 整个生殖生长期需一定的温度条件才有利于产量的形成, 并且不同的生育阶段对温度的要求不同。研究表明: 开花期是玉米一生中温度要求最高、反应最敏感的时期。玉米雄花在雄穗抽出后 2~5d 开始开花。开花顺序为从主轴上中部小花开始, 然后向上向下同时进行。分枝的小花开放顺序与主轴相同。开花后 2~5d 为盛花期, 这时开花朵数占总花朵的 80%~90%。影响玉米雄穗开花散粉的主要因素是温度和湿度。玉米开花最适温度为 25~28℃, 温度高于 32~35℃, 大气相对湿度低于 30%时, 花粉粒因失水失去活力, 花柱易枯萎, 难于授粉、受精, 出现严重缺粒, 造成减产^[24]。一阶差分法是一种常用的将气候产量与非气候产量分离的统计方

法, 能够排除非气候产量对气象因子响应的干扰。本研究采用一阶差分法分析北方春玉米生育期和产量对气象因子的响应, 结果表明北方地区春玉米关键发育期(出苗、开花和成熟)对温度响应均最为显著, 研究结果与有关学者^[8,14,16,24-25]在东北和西北地区春玉米对环境的响应相似。土壤温度是影响作物生长发育的重要因素之一, 在一定的温度范围内, 土壤温度越高, 作物生长越快, 这与本研究结果相一致。影响玉米发育期的主要因素包括自然环境条件、作物的种植品种和栽培方式等。穆佳等^[25]指出玉米发育期很大程度上受到种植品种和管理措施影响, 主导气象要素只能解释生育期日数变异的 44%。多年田间试验资料分析表明: 中国北方地区春玉米的种植品种涵盖早熟、中熟、晚熟多种熟型, 不同品种对热量、水分等环境条件的需求差异很大, 这些均会影响玉米生长发育和产量形成。因此, 基于 APSIM 模型解析管理措施和品种对该地春玉米生长发育和产量形成的影响将是下一步研究重点。

最后评估结果的准确与否还要取决于研究所收集、使用数据的客观性与准确性^[26]。本文在区域尺度上探讨了气候变化对北方春玉米生产造成的影响, 但还存在一些不足之处。首先, 就气象因子而言, 本文只探讨了气象因子的平均变化, 并未涉及极端气候事件, 且未考虑 CO₂ 肥效、灌溉、土壤条件等因子以及各因子的协同效应。其次, 本研究时段较长, 前后气温相差较大, 因此一定程度上会影响作物参数的调试与确定, 以最近时段调出的参数直接推广以前将对最后评估结果造成偏差。最后, 由于该区基础数据样本系统性差, 农业气象试验站点分布不均匀, 数据本身存在较多问题等^[27], 致使本文在选点上存在差异, 北部地区选取站点多, 西部地区站点少, 如宁夏只选取了一个站点, 导致模型优化及运用的困难较大、参数不易确定, 致使模拟评估结果存在很大不确定性, 今后需继续加强。

参考文献 References

- [1] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 何斌, 刘志娟, 杨晓光, 等. 气候变化背景下中国主要作物农业气象灾害时空分布特征(II): 西北主要粮食作物干旱[J]. 中国农业气象, 2017, 38(1): 31-41.
- He B, Liu Z J, Yang X G, et al. Temporal and spatial variations

- of agro-meteorological disasters of main crops in china in a changing climate(II):drought of cereal crops in northwest China[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2017,38(1):31-41.(in Chinese)
- [3]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,(1):80-94.
- Zhou G S.Research prospect on impact of climate change on agricultural production in China[J].Meteorological and Environmental Sciences,2015,(1):80-94.(in Chinese)
- [4]曹士亮,于芳兰,王成波,等.降水量与积温对玉米气象产量影响的综合分析[J].作物杂志,2009,(3):62-65.
- Cao S L,Yu F L,Wang C B,et al.Comprehensive analysis of the influences of precipitation and accumulated temperature on meteorological yield of maize[J].Crops,2009,(3):62-65.(in Chinese)
- [5]Zhao J F,Guo J P,Xu Y H,et al.Effects of climate change on cultivation patterns of spring maize and its climatic suitability in Northeast China[J].Agriculture,Ecosystems and Environment,2015,202:178-187
- [6]赵锦.气候变化背景下我国玉米产量潜力及提升空间研究[D].北京:中国农业大学,2015.
- Zhao J.The potential yield and improvement of maize in China under climate change[D].Beijing:Chinese Agriculture University,2015.(in Chinese)
- [7]李楠.烟草和玉米耐旱 HVA1 基因的遗传转化[M].北京:首都师范大学,2007.
- Li N.Genetic transformation of drought tolerant gene HVA1 in tobacco and maize[M].Beijing:Capital Normal University,2007.(in Chinese)
- [8]Liu Z,Yang X G,Hubbard K G,et al.Maize potential yields and yield gaps in the changing climate of northeast China[J].Global Change Biology,2012,18(11):3441-3454.
- [9]Yang X G,Chen F,Lin X M,et al.Potential benefits of climate change for crop productivity in China[J].Agricultural and Forest Meteorology,2015,208:76-84.
- [10]Xu X P,He P,Zhang J J,et al.Spatial variation of attainable yield and fertilizer requirements for maize at the regional scale in China[J].Field Crops Research,2017,203:8-15.
- [11]毛留喜,赵俊芳,徐玲玲,等.“镰刀弯”地区春玉米种植的气候适宜性与调整建议[J].应用生态学报,2016,27(12):3935-3943.
- Mao L X,Zhao J F,Xu L L,et al.Climatic suitability of spring maize planted in the "sickle bend" area of China and regulation suggestion[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2016,27(12):3935-3943.(in Chinese)
- [12]赵俊芳,郭建平,张艳红,等.气候变化对农业影响研究综述[J].中国农业气象,2010,31(1):200-205.
- Zhao J F,Guo J P,Zhang Y H,et al.Advances in research of impacts of climate change on agriculture[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2010,31(1):200-205.(in Chinese)
- [13]黄焕平.气候变化对中国和欧洲玉米生产的对比研究[D].北京:中国农业科学院,2013.
- Huang H P.A comparative study on the impact of climate change on China and European maize production[D].Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences,2013.(in Chinese)
- [14]赵秀兰.近 50 年气候变化对东北农业的影响[J].东北农业大学学报,2010,(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,(9):144-149.(in Chinese)
- [15]Wang J,Wang E L,Yin H,et al.Declining yield potential and shrinking yield gaps of maize in the North China Plain[J].Agricultural and Forest Meteorology,2014,195-196(2):89-101.
- [16]龚绍先.作物与气象[M].北京:北京农业大学出版社,1988.
- Gong S X.Food crops and meteorology[M].Beijing:Beijing Agricultural University Press,1988.(in Chinese)
- [17]王柳,熊伟,温小乐,等.温度、降水等气象因子对我国玉米生产的影响[J].农业工程学报,2014,30(21):138-146.
- Wang L,Xiong W,Wen X L,et al.Effect of climatic factors such as temperature,precipitation on maize production in China[J].Transactions of the CSAE,2014,30(21):138-146.(in Chinese)
- [18]Keating B A,Carberry P S,Hammer G L,et al.A novel view of APSIM,a model designed for farming systems simulation[J].Eur. J. Agron,2013,18(3-4):267-288.
- [19]李广,李玥,黄高宝,等.基于 APSIM 模型 CO₂ 和温度对旱地小麦产量的影响[J].中国生态农业学报,2012,20(8):1088-1095.
- Li G,Li Y,Huang G B,et al.Response of dry land spring wheat yield to elevated CO₂ concentration and temperature by APSIM model[J].Chinese Journal of Eco-Agriculture,2012,20(8):1088-1095.(in Chinese)
- [20]赵俊芳,蒲菲堉,闫伟兄,等.基于 APSIM 模型识别气象因子对内蒙春小麦潜在产量的影响[J].生态学报,2017,36(3):757-765.
- Zhao J F,Pu F Y,Yan W X,et al.Identifying the effects of

- meteorological variables on spring wheat potential yield in Inner Mongolia based on APSIM model[J].Chinese Journal of Ecology,2017,36(3):757-765.
- [21]Zeng W Z,Wu J W,Hoffmann M P,et al.Testing the APSIM sunflower model on saline soils of Inner Mongolia,China [J].Field Crops Research,2016,192:42-54.
- [22]Holzworth D P,Huth N I,de Voil P G,et al.APSIM—evolution towards a new generation of agricultural systems simulation[J].Environmental Modelling & Software,2014,62: 327-350.
- [23]Gauch H G,Hwang J T G,Fick G W.Model evaluation by comparison of model-based predictions and measured values[J].Agronomy Journal,2003,95(6):1442-1446.
- [24]李克南.华北地区冬小麦-夏玉米作物生产体系产量差特征解析[D].北京:中国农业大学,2014.
- Li K N.Yield gap analysis focused on winter wheat and summer maize rotation in the North China plain[M].Beijing: Chinese Agriculture University,2014.(in Chinese)
- [25]穆佳,赵俊芳,郭建平.过去 30 年东北春玉米发育期对气候变化的响应[J].应用气象学报,2014,25(6):680-689.
- Mu J,Zhao J F,Guo J P.Response of spring maize growth stage to climate change in Northeast China over the past 30 years[J].Journal of Applied Meteorological Science,2014, 25(6):680-689.(in Chinese)
- [26]Zhao J F,Guo J P,Mu J.Exploring the relationships between climatic variables and climate-induced yield of spring maize in Northeast China[J].Agriculture,Ecosystems and Environment, 2015,207:79-90.
- [27]Zhao J F,Zhang Y H,Qian Y L,et al.Coincidence of variation in potato yield and climate in Northern China[J].Science of the Total Environment,2016,573:965-973.