

刘维,王冬妮,侯英雨,等,2018. 基于吉林省观测土壤水分的 WOFOST 模型模拟研究[J]. 气象,44(10):1352-1359.

# 基于吉林省观测土壤水分的 WOFOST 模型模拟研究<sup>\*</sup>

刘 维<sup>1</sup> 王冬妮<sup>2</sup> 侯英雨<sup>1</sup> 何 亮<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 国家气象中心,北京 100081

<sup>2</sup> 吉林省气象科学研究所,长春 130062

**提 要:** 利用吉林省白城站试验数据进行模型参数调整,通过独立的观测资料对生育期、叶面积指数、地上部分各器官生物量进行模拟验证与评价。以白城站和榆树站代表吉林省西部玉米种植区和中部黄金玉米带参数,利用农业气象观测站发育期资料、气象资料和经过质量控制后的逐日土壤水分自动站观测数据进行模拟。为了提高 WOFOST 模型模拟精度,将由模型通过降水量计算的土壤体积含水量替换为实测土壤水分计算的体积含水量,采用替换后的土壤体积含水量参与模型下一步运算,以此来模拟 2001—2016 年春玉米穗生物量变化状况,构建玉米土壤体积含水量改善率(PD)指标,来表征降水驱动和土壤水分驱动对作物模型模拟结果的影响。结果表明:(1)模型对白城站春玉米生育期、叶面积、地上部分总生物量和叶生物量较准确,而穗生物量模拟效果一般。(2)从代表站白城来看,穗生物量模拟值与降水量存在明显正相关,降水偏少的年份土壤模拟效果明显优于降水驱动。(3)从区域来看,以盐碱土为主的地区或降水量偏少的年型下土壤水分驱动效果优于降水驱动;在以黑土为主的区域或降水偏多的年型下,两者模拟效果基本接近。(4)总体来说,利用观测土壤水分替换降水量参与模型能够显著提高模型模拟精度。

**关键词:** WOFOST, 土壤水分, 春玉米, 土壤体积含水量改善率

**中图分类号:** S161, P49

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.10.012

## Simulation Research of WOFOST Model Based on Observed Soil Moisture Data in Jilin Province

LIU Wei<sup>1</sup> WANG Dongni<sup>2</sup> HOU Yingyu<sup>1</sup> HE Liang<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Meteorological Centre, Beijing 100081

<sup>2</sup> Institute of Meteorological Sciences of Jilin Province, Changchun 130062

**Abstract:** The experimental data from Baicheng Station, Jilin Province, are used to calibrate the parameters in crop model WOFOST, and the independent observation data including development stages, leaf area index, biomass for each organ are adopted to verify and evaluate the adaption. The parameters from Baicheng and Yushu Stations represent the parameters in the western and central parts of Jilin Province. The developmental phase data, weather data and daily soil moisture data under optimization from automatic soil observation stations are used in the simulation of WOFOST model. To improve the simulation accuracy of WOFOST, the volume content of soil calculated based on precipitation is replaced by the volume content of soil calculated based on the observed soil moisture data, which was used in the next-step computing of model to simulate the biomass from 2001 to 2016. The improvement rate of volume content of soil (PD) is constructed to analyze the different changes by using soil moisture data and precipitation data. The

<sup>\*</sup> 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506001)、国家自然科学基金项目(41705095)和国家气象中心作物模型业务应用创新团队共同资助  
2017 年 11 月 25 日收稿; 2018 年 8 月 22 日收修定稿

第一作者:刘维,主要从事农业气象业务与科研。Email:rainvswindvs@163.com

通信作者:侯英雨,主要从事农业气象与卫星遥感研究。Email:yyhou@cma.gov.cn

results showed that (1) the model simulation is more accurate for the growth period, leaf area, total biomass and leaf biomass of spring maize at Baicheng Station, while the simulation effect of spike biomass is general. (2) From the perspective of the typical Baicheng Station, there is a significant positive correlation between the simulated value of spike biomass and precipitation, and the simulation effect of soil in years with less precipitation is significantly better than that driven by precipitation. (3) Regionally speaking, the driving effect of soil moisture in regions dominated by saline-alkali soil or with less precipitation years is better than that driven by precipitation. In the region where the soil type is backland and in the year with more precipitation, the simulation results of the two are similar. (4) In general, the WOFOST model can significantly improve the simulation accuracy by replacing precipitation with observed soil moisture.

**Key words:** WOFOST, soil moisture data, spring maize, improvement rate of volume content of soil

## 引 言

近年来,玉米已经成为中国第一大粮食作物(郭焱和朱俊峰,2017),而东北地区是我国春玉米最主要的产区,已经成为我国重要的商品粮、优质玉米生产加工基地,在全国粮食生产中占有重要的比例(刘志娟等,2017)。吉林省作为东北黑土区腹地和世界三大黄金玉米带之一,玉米产能占全国的 12.5% (齐晓宁等,2002;舒坤良等,2017)。定量化评价气象条件对吉林省玉米长势、产量的影响,为决策部门提供科学准确的评估,有着重要的作用。传统的气候适宜度、统计方法等都只考虑了作物发育期与气象条件的关系,而忽视了作物本身的生理特性,存在一定的缺陷。卫星遥感技术和作物模型则较好地兼顾了作物本身的生理特性和气象要素,成为当下先进的评价手段。但是卫星遥感受天空云量、资料获取途径较少的影响,很难进行不同作物、逐日、全国范围内的评价;作物模型则能够模拟光温水、管理措施、养分等对作物生长发育和产量的影响,具有较高的模拟精度(刘布春等,2002;谢云和 Kiniry,2002;罗毅和郭伟,2008;李秀芬等,2017),已经成为现阶段国家级农业气象业务评价中主要的技术方法(王涛等,2010;刘维等,2016;薛昌颖,2016)。

WOFOST(World Food Studies)模型是由荷兰瓦赫宁根大学开发研制并得到广泛应用的机理模型,作为综合作物生长模拟模型,可进行多种作物的生长模拟,该模型在中国具有很好的适用性(Supit et al,1994;谢文霞等,2006;李秀芬等,2013;米津辉等,2014)。WOFOST 模型是一个机理性模型,描述作物的基本生理过程,包括光合作用、呼吸作用等,并描述这些过程如何受环境的影响(刘布春等,

2006;王石立和马玉平,2008)。该模型可模拟 3 种不同产量水平,光温限制的潜在产量、光温水限制的雨养产量以及光温水肥限制的产量。它通过逐日气象数据进行驱动,通过土壤、管理和作物参数数据限制和调整作物的生长过程(何亮等,2016;刘维等,2017)。目前的研究大多是利用现有的作物模型,经过试验确定适应当地的本地化参数,利用光温水等气象数据驱动模型进行模拟运算,并将运算结果应用于未来气候情景下产量水平(刘志娟等,2017)、作物长势监测(李秀芬等,2005)、灾害评估(张建平,2012;栾庆祖等,2014)、产量预报(Wit and Diepen,2007;黄健熙等,2012)等方面,但针对模型改进的相关研究较少(马玉平等,2005;王锐等,2015)。

在 WOFOST 模型中,逐日降水量仅在土壤水分平衡过程中协同土壤参数、蒸发等要素计算逐日土壤体积含水量,而实际生产中体积含水量可由田间持水量和逐日土壤相对湿度求得,利用实测土壤相对湿度,可以减少由降水量计算土壤相对湿度时对径流系数、入渗参数误差(王锐等,2015),提高模型的准确率。目前国内外关于作物模型土壤水分同化的研究较多,应用效果也较好,但大多是利用卫星遥感资料同化的土壤水分参与模型运算(Jin et al,2018),利用实测的土壤水分则较少。仅王锐等(2015)利用实测的每 5 天土壤相对湿度,经过线性插值后计算其余 4 天土壤湿度,来表征逐日的土壤湿度,存在一定的误差。

本文利用吉林省白城站试验数据进行模型参数调整和验证,以白城和榆树站代表吉林省西部玉米种植区和中部黄金玉米带参数,利用农业气象观测站发育期资料、气象资料和经过质量控制后的逐日土壤水分自动站观测数据,在不考虑地表径流和下渗的前提下,利用逐日自动土壤水分站观测数据驱

动 WOFOST 模型,模拟 2001—2016 年春玉米穗生物量变化状况,构建玉米土壤体积含水量改善率指标(PD),以此分析降水驱动和土壤水分驱动对作物模型模拟结果的影响。

## 1 材料与方 法

### 1.1 作物与气象数据

作物数据采用吉林省白城站 2007—2011 年水分充足供应下的玉米叶面积指数、生物量数据和产量数据等试验数据,包含了 2001—2016 年白城站统计局玉米产量资料,同时选取 2001—2016 年吉林中西部玉米主产区全部气象站数据。气象资料为吉林省西部和中部气象站点 2001—2016 年同期气象数据,包括日辐射、最低气温、最高气温、水汽压、平均风速、降水量等要素。土壤湿度数据来源于国家气象中心农业气象中心经过质量控制的 2013—2016 年 4 年自动土壤水分站实时资料(张蕾等,2016),由于自动土壤水分站从 2012 年才开始陆续全国设站,因此选择 2013 年以后数据。模型中使用的土壤参数资料来源于中国科学院南京土壤研究所制作 10 km 分辨率的中国土壤数据集,包括凋萎系数、田间持水量及饱和含水量等。

### 1.2 模型参数校准

利用白城 2007—2009 年田间试验资料进行模型调参,获得各个发育阶段发育速率、干物质分配系数、比叶面积等参数。采用白城 2010—2011 年观测数据来验证春玉米发育期、叶面积指数、各器官生物量的模拟,进一步评价模型的有效性与适应性。选用国际上通用的指标体系进行模型适应性检验与评价,包括模拟值与实测值的平均值、两者之间的线性回归系数  $\alpha$ 、模拟值与实测值的线性回归决定系数( $R^2$ )、均方根误差(RMSE)、归一化均方根误差(NRMSE)、模拟性能指数(EF)、残差聚集系数(CRM)等(王宗明等,2005;莫志鸿等,2011),由此反映模型模拟效果。在此基础上利用白城站校准后的参数模拟吉林中西部玉米主产区气象站点。

### 1.3 方 法

WOFOST 模型中作为输入端的逐日降水量资料,经过运行后生成逐日的土壤体积含水量,生成的

逐日土壤体积含水量将参与下一步作物呼吸消耗、光合作用等的运算。本文中,利用站点观测的逐日实时土壤水分与站点田间持水量计算求出土壤体积含水量,以此来替换模型通过降水量计算的体积含水量,替换后参与模型后续的运算。

吉林玉米主产区主要包括吉林西部玉米区和中部黄金玉米带(图 1),因此利用白城和榆树站参数分别代表两个区域中的模型参数,白城站模型校准参见本文,榆树站模型校准参见刘维等(2017)已有成果。

由于吉林玉米主产区农业气象观测站数量少于气象站,针对作物模型需要的发育期数据,有玉米观测资料的使用观测资料,没有观测资料的使用临近观测站数据。利用校准后的作物参数,分别模拟由降水量驱动的 2001—2016 年玉米,获得 16 年雨养条件下穗生物量模拟历史序列,将 16 年平均值作为多年均值,再模拟由土壤水分驱动的 2013—2016 年玉米,将降水驱动、土壤水分驱动与 16 年平均值对比,构建玉米土壤体积含水量改善率(PD)来表征降水驱动和土壤水分驱动模拟的优劣性,计算如下:

$$PR_{ij} = \frac{WSO_{pij} - \overline{WSO}_l}{\overline{WSO}_l} \times 100 \quad (1)$$

$$SR_{ij} = \frac{WSO_{sij} - \overline{WSO}_l}{\overline{WSO}_l} \times 100 \quad (2)$$

$$DR_{ij} = \sqrt{SR_{ij}^2} - \sqrt{PR_{ij}^2} \quad (3)$$

$$SUMDR_n = \begin{cases} a & DR_{ij} > 0 \\ b & DR_{ij} = 0 \\ c & DR_{ij} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

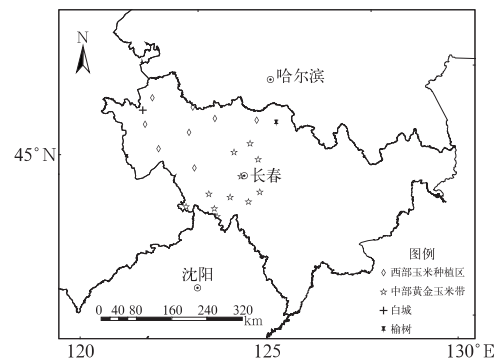


图 1 吉林省玉米主产区站点分布和代表性站点

Fig. 1 The spring maize stations in Jilin Province and representative stations

$$PD = \frac{\sum DR_{ij}}{ij} \times 100 \quad (5)$$

式中,  $WSO_{p_{ij}}$  为降水驱动下穗生物量,  $WSO_{s_{ij}}$  为土壤水分驱动下穗生物量,  $\overline{WSO}_i$  为单站多年平均值, 单位均为:  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;  $PR_{ij}$  为降水驱动下穗生物量距平百分率,  $SR_{ij}$  为土壤水分驱动下穗生物量距平百分率;  $DR_{ij}$  为不同驱动下距平百分率改善值, 其中  $DR_{ij}$  值大于 0 表示改善值下降, 小于 0 表示提高, 等于 0 表示改善值不变;  $a, b, c$  分别表示满足  $DR_{ij}$  数值的条件个数, 以  $\sum DR_n$  表示;  $i$  为玉米站点个数, 总共有 21 站,  $j$  为年份数, 总共有 2013—2016 年 4 年数据。

需要注意的是由于 WOFOST 模型模拟值本身不是真值, 但通过单站 16 年年模拟可以反映当地不同气象条件对玉米产量的影响, 在缺少各站实际产量值的背景下, 将模拟的多年平均值作为相对可靠的标准值, 通过模型与模型本身对比, 以此来表征由降水计算的土壤体积含水量和直接由土壤观测水分计算的体积含水量对模型模拟精度的影响。

## 2 结果与分析

### 2.1 发育期与生物量模拟

对发育期参数进行本地化后, 以开花期、乳熟期、成熟期为对象, 利用 WOFOST 模型模拟白城 2007—2009 年春玉米发育期。白城站春玉米在开花期和乳熟期模拟效果好, 观测值与模拟值  $R^2$  为

0.999, 观测值与模拟值的  $\alpha$  为 0.978(图 2a)。表明 WOFOST 模型对白城春玉米发育期模拟精度较高。从白城站 2007—2009 年的叶面积指数模拟趋势来看, 模拟值与实际值较吻合, 叶面积指数模拟值与观测值的相关性高,  $R^2$  达到 0.940。从各年看, 以 2009 年白城站为例, 穗、茎、叶和地上总生物量实测值和模拟值模型较好(图 2b)。由此表明经过参数化后的 WOFOST 可以用于白城站模拟。

### 2.2 模型验证与评价

利用 2010—2011 年白城站试验资料进行模型验证, 由统计分析结果可知(表 1), 对于叶面积指数、地上总生物量和叶生物量来说, 白城站春玉米  $\alpha$  均大于 0.8,  $R^2$  均大于 0.86, 回归方程效果显著; NRMSE 都在 0.26 以下。从模型 EF 来看, 叶面积、地上部分总生物量和叶生物量分别为在 0.878、0.933  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和 0.906  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 整体模拟性能较好; CRM 分别为 0.002、0.105 和 -0.104, 表明模型对三者的模拟基本较准确。

但对于穗生物量来说, 观测值与模拟值偏离较大,  $R^2$  不足 0.5, 整体 EF 不足 0.6, 表明模型对 2010、2011 年模拟效果不佳。由于模型中当发育进程(DVS)到达 2 时模拟即结束, 但在实际中, 成熟期是指大田中 50% 的春玉米进入成熟期, 后期仍然会持续的灌浆, 导致模拟与实测存在一定偏差。通过整理生育期资料发现模型在 2010 年  $DVS=2$  时日序为 265 d, 而实测值日序为 271 d 时, 存在 6 d 的差异, 是导致穗生物量偏差的重要原因。同时, 玉米

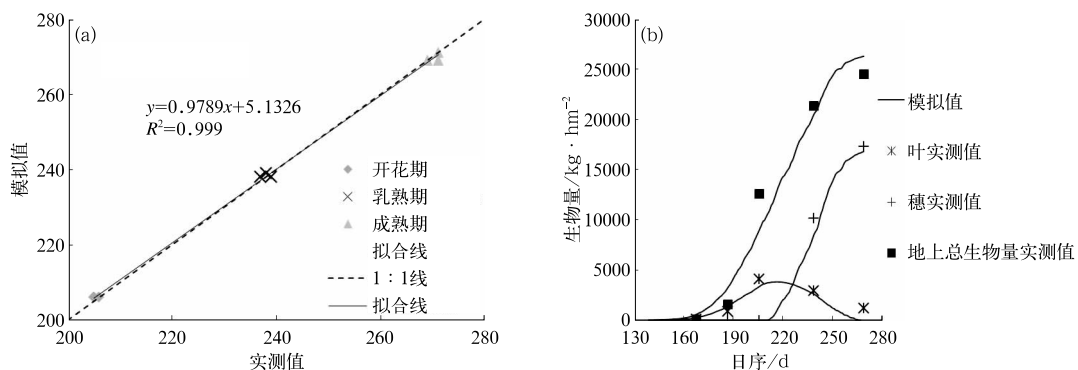


图 2 2007—2009 年白城春玉米开花期、乳熟期和成熟期模拟值与实测值对比(a) 和 2009 年潜在生物量模拟与实测值对比(b)

Fig. 2 Validation on the simulated and measured days of anthesis, milkstage and maturity for spring maize in Baicheng during 2007—2009 (a) and comparison between potential simulated and measured days above ground total biomass in 2009 (b)

表 1 2010—2011 年白城站春玉米叶面积指数、各生物量潜在模拟值与实测值的统计指标

Table 1 Statistical indicators of simulated and measured LAI and biomass for spring maize in Baicheng

作物变量	观测平均值	模拟平均值	$\alpha$	$R^2$	RMSE	NRMSE	CRM	EF
叶面积指数	3.88	3.87	0.923	0.862	0.397	0.11	0.002	0.878
地上总生物量	23746 kg · hm <sup>-2</sup>	20358 kg · hm <sup>-2</sup>	0.801	0.975	3732 kg · hm <sup>-2</sup>	0.16	0.105	0.933
穗生物量	18369 kg · hm <sup>-2</sup>	13111 kg · hm <sup>-2</sup>	0.499	0.909	3469 kg · hm <sup>-2</sup>	0.18	0.108	0.558
叶生物量	2219 kg · hm <sup>-2</sup>	2451 kg · hm <sup>-2</sup>	0.834	0.939	478 kg · hm <sup>-2</sup>	0.21	-0.104	0.906

观测中穗重包括了籽粒与穗轴等,而 WOFOST 模拟的只是籽粒重,仅是实测穗重的一部分,且穗重向籽粒的转换有一定误差(王石立和马玉平,2008;刘维等,2017),故实测值大于模拟值。同时,试验资料是在白城站水分充足供应的情形下获得的,可以认为是白城站的潜在水平,获得的数据只能针对模型潜在产量进行调参,因此校准与验证采用的是潜在水平,导致穗生物量模拟效果不好。此外,也可能跟种植玉米品种的改变有关。从分析 2007—2011 年白城模拟效果来看,总体上用调参获得的模型参数可以作为白城站春玉米参数,为下一步用降水和土壤水分模拟雨养条件下生物量提供基础。

### 2.3 不同地区玉米模拟结果分析

分析 2001—2016 年降水驱动下吉林中部和西部春玉米穗生物量可以发现(图 3a),玉米模拟穗生物量年际间波动较大,西部玉米穗生物量明显低于中部黄金玉米带,其中西部穗生物量 16 年平均值为 5708 kg · hm<sup>-2</sup>,中部为 7031 kg · hm<sup>-2</sup>。吉林西部以盐碱土为主,中部以黑土为主(谢佳贵等,2008);西部地区平均降水量比中部地区偏少 25%(图 3b),但年内变化趋势基本相同。两个区域穗生

物量 16 年相关系数为 0.441,但 2008 年后相关系数提高到 0.858,表明两地区玉米穗生物量相关性较高,在生产管理水平差距不大的情况下,主要是由于土壤性状和降水量差异造成的(杨青华等,2000)。

### 2.4 白城不同驱动模拟分析

以西部玉米种植区代表站白城为例,由图 4 可知,白城站降水驱动下 2001—2009 年模拟产量年际间波动较大,2010 年后平稳上升,但 2015 年则呈现急剧下降特点,总体来看降水驱动下模拟产量呈现缓慢上升的趋势。穗生物量模拟值与降水量存在明显的正相关性,相关系数为 0.780, $R^2$  为 0.61;降水量大的年份模拟产量也相对较高,以 2003、2008、2014 年为代表;降水量小的年份模拟产量也较低,以 2001、2004、2007、2015 年为代表。从穗生物量模拟值与统计局产量来看,两者相关系数为 0.619,相关性也较高,表明白城站模拟结果可以反映当地产量水平;其中 2001—2010 年相关性明显高于 2011—2016 年,由于统计局产量趋于稳定,而模拟产量受气象要素尤其是降水的影响比重大。分析 2013—2016 年土壤水分驱动下的模拟值,可以看出在 2015 年土壤水分驱动下的模拟值更接近 16 年平均值和统计局产

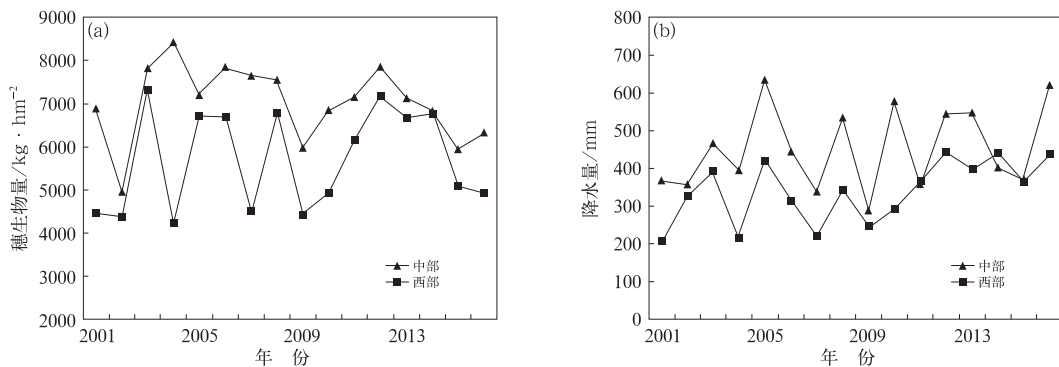


图 3 2001—2016 年吉林西部和中部雨养下春玉米穗生物量模拟(a)和 5—9 月累计降水量(b)

Fig. 3 Simulated biomass for spring maize within precipitation in west and middle parts of Jilin Province (a) and total precipitation from May to September in 2001—2016 (b)

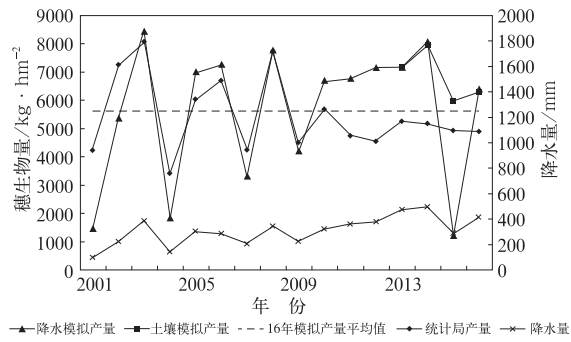


图 4 2001—2016 年白城站春玉米降水驱动和土壤水分驱动穗生物量模拟、统计局产量及 5—9 月累计降水量

Fig. 4 Simulated biomass for spring maize within precipitation and soli water, yield and total precipitation from May to September in Baicheng in 2001—2016

量,模拟明显优于降水驱动的模式值。

### 2.5 不同地区不同驱动模拟分析

从表 2 可以看出,利用观测的土壤水分驱动模型后,西部地区有 42% 的样本数 PD 值变高,有 6% 的 PD 值下降,且两者有 36% 的差异,可见土壤

水分驱动比降水驱动能够有效提高模拟精度。分析西部 PD 值下降的两个站点数据,  $DR_j$  值 ( $>0$ ) 分别为 5.4% 和 14.0%, 表明该两个站点在土壤水分驱动和降水驱动下两者的区别不大。但对中部地区来说, PD 值提高仅比 PD 值下降的数量高 6%, 提高程度有限。主要是因为西部地区盐碱土的持水性能比中部地区黑土的持水性能差, 该区降水后土壤径流和下渗的水量高于中部地区, 用降水计算体积含水量误差将大于土壤实测的体积含水量。这也表明, 在盐碱土和沙地上同化土壤水分利于提高模拟精度, 在黑土地地区同化土壤水分模拟精度提高有限。而在中部黑土为主的地区, 降水后土壤径流小、持水性能高, 土壤下渗量少, 这与实测的土壤相对湿度误差不大, 因此在中部地区 PD 值提高略高于下降。

从区域上来看(图 5), 2015 年有两个站点 PD 下降, 而有 7 个站点上升。2016 年有 5 个站点 PD 下降, 主要分布在中部玉米带; 有 10 个站点上升, 西部地区基本上都有不同程度提高。结合降水量可以看出, 西部盐碱土地区对降水的敏感性高于中部地区; 两区域在降水量少的年份改善率变化不明显, 降水量多的年份变化明显; 由于降水量少的年份下地表径流和下渗不明显, 土壤能够充分保持降雨, 因此

表 2 2013—2016 年吉林春玉米产区穗生物量土壤体积含水量改善率  
Table 2 The improvement rate of volume content of soil of simulated biomass for spring maize in Jilin Province from 2013 to 2016

区域	a	b	c	样本数/个	PD 下降/%	PD 不变/%	PD 提高/%
西部	2	19	15	36	6	53	42
中部	10	25	13	48	21	52	27
主产区	14	44	26	84	17	52	31

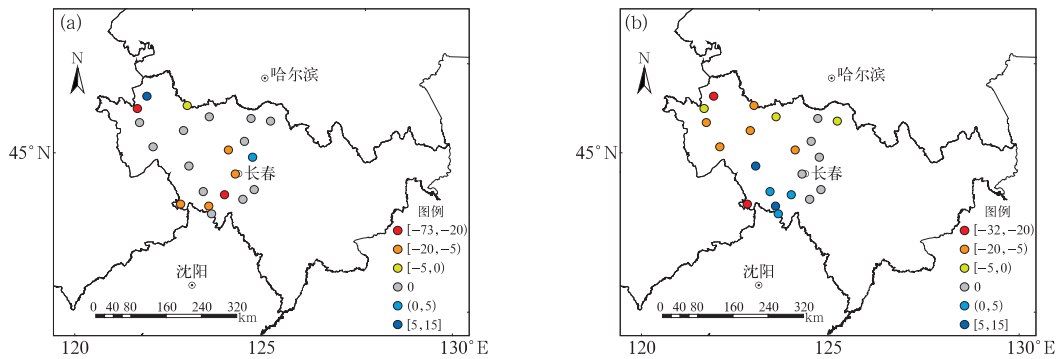


图 5 2015 年(a)和 2016 年(b)吉林省春玉米土壤体积含水量改善率(单位: %)

Fig. 5 The improvement rate of volume content of soil for spring maize in Jilin Province in 2015 (a) and 2016 (b) (unit: %)

呈现这一特点。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

利用白城和榆树站的作物参数代表不同种植区域的统一参数,具有一定的不足;在试验资料有限的情形下,在同一气候区和土壤种植区用同一套参数也有一定的代表性。评价气象条件对玉米生长的情形,可以利用模拟结果同多年模拟平均值和 30 年平均气象条件下模拟值比较,本文并未采用以 1981—2010 年 30 年平均气象条件下的模拟值,正是基于 30 年平均值下单站每日基本上都有降水量,在这种气象条件下模拟结果近似于作物潜在生物量,并不能反映出不同年型气象条件的差异,因此选择以多年模拟结果的平均值作为基准值。利用逐日土壤水分实时资料,替换由降水计算的体积含水量,能有效提高模型模拟效果,尤其是在降水偏少的年份和以盐碱土为主的地区,由于不同土壤类型对降水的利用效率不同,这是导致降水驱动和土壤水分驱动结果的差异;但是从区域化角度来说本文并未考虑不同土壤类型下,土壤径流和下渗等因素对土壤体积分含水量的影响。但从科学研究的角度,在单站点的背景下,同化土壤湿度应该整体考虑模型根部的土壤水分变化情况。

作物模型作为机理模型,能够量化评价某一时段气象条件对作物生长发育的影响,这是传统统计学模型所欠缺的。国家级以及省级气象业务单位从 20 世纪 90 年代就已经开始将其作为评价工具应用于农业气象服务,但大多进展缓慢,这同模型本身有关,作物模型作为单点的使用效果好,但是在区域化应用(王石立和马玉平,2008)、极端灾害评估等方面还是存在着一定的不足。随着科学的发展,作物模型自动化调参、区域土壤性质发布、农业气象观测体系的建立,从站点尺度到区域尺度这些已经不再是制约模型发展的影响因素。但是模型对极端灾害的反映仍然略显不足,比如针对水稻高温灾害,模型参数中以 35℃作为临界温度,高于该温度模型就不再光合同化,而实际情况中,持续的高温反而有利于水稻的生长,加之抗高温水稻品种的出现,模型就容易出现模拟与实际相反的结果,这也是目前作物模型普遍存在的一个问题。因而,需要在模型设

计或改进时考虑到各种极端灾害的影响,增加作物模型对灾害反映的功能,提高模型的模拟效果。

#### 3.2 结论

(1) 通过参数校准与验证后,WOFOST 模型对白城站春玉米生育期、叶面积指数、地上部分总生物量和叶生物量模拟较准确,而对穗生物量模拟效果一般。

(2) 利用土壤水分观测站实测数据计算土壤体积分含水量,可以替换 WOFOST 模型中由降水量计算的体积分含水量,在不考虑地表径流和下渗的前提下,能够减小模拟误差,显著提高模型模拟精度,同时也能扩展土壤水分观测资料的应用领域。

(3) 用观测土壤水分替换后,在以盐碱土为主的地区或者在降水量偏少的年型下,利用土壤水分驱动效果优于降水驱动;在黑土为主的区域或降水偏多的年型下,两者模拟效果基本接近,土壤水分驱动略优于降水驱动。

#### 参考文献

- 郭焱,朱俊峰,2017.我国玉米生产的时空特征分析[J].农业经济与管理,(1):17-24.
- 何亮,侯英雨,赵刚,等,2016.基于全局敏感性分析和贝叶斯方法的 WOFOST 作物模型参数优化[J].农业工程学报,32(2):169-179.
- 黄健熙,武思杰,刘兴权,等,2012.基于遥感信息与作物模型集合卡尔曼滤波同化的区域冬小麦产量预测[J].农业工程学报,28(4):142-148.
- 李秀芬,马树庆,宫丽娟,等,2013.基于 WOFOST 的东北地区玉米生育期气象条件适宜度评价[J].中国农业气象,34(1):43-49.
- 李秀芬,马树庆,姜丽霞,纪瑞鹏,刘静,李兴华,韩俊杰,周永吉,2017.两种常用的春玉米干旱等级指标在东北区域的适用性检验[J].气象,43(11):1420-1430.
- 李秀芬,王育光,季生太,等,2005.作物长势监测系统(CGMS)在黑龙江省的应用[J].中国农业气象,26(3):155-157.
- 刘布春,刘文萍,梅旭荣,等,2006.我国农业气象业务引入作物生长模型的前景[J].气象,32(12):10-15.
- 刘布春,王石立,马玉平,2002.国外作物模型区域应用研究进展[J].气象科技,30(4):193-203.
- 刘维,侯英雨,吴门新,2016.基于 WOFOST 模型的 2014 年河南省干旱对夏玉米产量的预估[J].中国农学通报,32(36):146-151.
- 刘维,侯英雨,吴门新,等,2017. WOFOST 模型在东北春玉米产区的验证与适应性评价[J].气象与环境科学,40(3):7-13.
- 刘志娟,杨晓光,吕硕,等,2017.东北三省春玉米产量差时空分布特征[J].中国农业科学,50(9):1606-1616.
- 栾庆祖,叶彩华,莫志鸿,等,2014.基于 WOFOST 模型的玉米干旱损失评估:以北京为例[J].中国农业气象,35(3):311-316.

- 罗毅,郭伟,2008.作物模型研究与应用中存在的问题[J].农业工程学报,24(5):307-312.
- 马玉平,王石立,张黎,2005.针对华北小麦越冬的 WOFOST 模型改进[J].中国农业气象,26(3):145-149.
- 莫志鸿,冯利平,邹海平,等,2011.水稻模型 ORYZA2000 在湖南双季稻区的验证与适应性评价[J].生态学报,31(16):4628-4637.
- 齐晓宁,王洋,王其存,等,2002.吉林玉米带的地位与发展前景[J].地理科学,22(3):379-384.
- 舒坤良,吴迪,徐晓红,等,2017.玉米结构调整:实践、困境与政策支持——基于吉林省的分析[J].玉米科学,25(2):142-147.
- 王锐,李亚飞,张丽娟,等,2015.土壤湿度驱动 WOFOST 模型及其适应性[J].中国农业气象,36(3):263-271.
- 王石立,马玉平,2008.作物生长模拟模型在我国农业气象业务中的应用研究进展及思考[J].气象,34(6):3-10.
- 王涛,吕昌河,于伯华,2010.基于 WOFOST 模型的京津冀地区冬小麦生产潜力评价[J].自然资源学报,25(3):475-487.
- 王宗明,张柏,宋开山,等,2005. CropSyst 作物模型在松嫩平原典型黑土区的校正和验证[J].农业工程学报,21(5):47-50.
- 谢佳贵,王立春,尹彩侠,等,2008.吉林省不同类型土壤玉米施肥效应研究[J].玉米科学,16(4):167-171.
- 谢文霞,王光火,张奇春,2006. WOFOST 模型的发展及应用[J].土壤通报,37(1):154-158.
- 谢云, Kiniry J R, 2002. 国外作物生长模型发展综述[J]. 作物学报, 28(2):190-195.
- 薛昌颖,2016.基于作物模型的河南省旱稻干旱风险评估[J].气象与环境科学,39(2):126-131.
- 杨青华,高尔明,马新明,等,2000.不同土壤类型对玉米干物质积累动态及其分布的影响[J].玉米科学,8(1):55-57.
- 张建平,王春乙,赵艳霞,等,2012.基于作物模型的低温冷害对我国东北三省玉米产量影响评估[J].生态学报,32(13):4132-4138.
- 张蕾,吕厚荃,王良宇,等,2016.中国土壤湿度的时空变化特征[J].地理学报,71(9):1494-1508.
- 朱津辉,郭建茂,毛留喜,2014.基于 WOFOST 模型的河北省保定市冬小麦最佳灌溉方案研究[J].气象,40(11):1398-1407.
- Jin Xiuliang, Kumar L, Li Zhenhai, et al, 2018. A review of data assimilation of remote sensing and crop models[J]. Eur J Agron, 92:141-152.
- Supit I, Hooyer A A, van Diepen C A, 1994. System Description of the WOFOST 6.0 Crop Simulation Model Implemented in CGMS. Volume 1: Theory and Algorithms[M]. Luxembourg: Joint Research Centre, Commission of the European Communities:1-144.
- de Wit A J W, van Diepen C A, 2007. Crop model data assimilation with the ensemble Kalman filter for improving regional crop yield forecasts[J]. Agric Forest Meteorol, 146(1/2):38-56.