

陈艳玲, 顾晓鹤, 宫阿都. 基于 EFAST 方法的 WOFOST 作物模型参数敏感性分析[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2018, 37(3): 72-78. doi: 10.16186/j.cnki.1673-9787.2018.03.10

CHEN Y L, GU X H, GONG A D. Global sensitivity analysis of WOFOST model parameters based on EFAST method[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science) 2018, 37(3): 72-78. doi: 10.16186/j.cnki.1673-9787.2018.03.10

基于 EFAST 方法的 WOFOST 作物模型参数 敏感性分析

陈艳玲^{1 2}, 顾晓鹤⁴, 宫阿都^{1 2 3}

(1. 北京师范大学 环境遥感与数字城市北京市重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875; 3. 北京师范大学 地理科学学部, 北京 100875; 4. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 作物生长模型广泛应用于作物长势监测和产量预测。为了有效识别作物模型关键参数, 减少模型模拟的不适用性, 选取河北省藁城市 2009—2010 年冬小麦作为研究对象, 应用扩展傅立叶振幅灵敏度检验法(EFAST), 对 WOFOST 模型 26 个作物参数进行敏感性分析。结果表明, 生育期为 0.5 和 1.0 时的比叶面积(SLATB1 和 SLATB2), 出苗到开花期的积温(TSUM1), 35℃时叶面积的生长周期(SPAN), 20℃下单叶有效光能利用率(EFFT3)和最大 CO₂ 同化率在 30℃的校正因子(TMPF4)等 6 个参数的敏感性指数均大于 0.1, 说明对产量形成的贡献较大。研究证明, 基于扩展傅立叶幅度检验法(EFAST)的敏感性分析对模型修正具有指导意义, 可为模型参数“本地化”提供重要依据。

关键词: 敏感性分析; 扩展傅立叶幅度检验法(EFAST); WOFOST 模型; 作物参数

中图分类号: P98

文献标志码: A

文章编号: 1673-9787(2018)03-72-7

Global sensitivity analysis of WOFOST model parameters based on EFAST method

CHEN Yanling^{1 2}, GU Xiaohe⁴, GONG Adu^{1 2 3}

(1. Beijing Key Laboratory of Environmental Remote Sensing and Digital City, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, MOE, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. National Engineering Research Center For Information Technology in Agriculture, Beijing 100097)

Abstract: Crop growth simulation models are widely applied in crop growth monitoring and yield forecasting. In order to identify the key parameters of crop model and reduce the non-applicability of the model simulation, the winter wheat of Gaocheng was selected as a case. The extend fourier amplitude sensitivity test was employed to analyze the sensitivity of WOFOST model parameters. The result shows that six parameters have high sensitivity with values were greater than 0.1. They are the specific leaf area at 0.5 and 1.0 growth stages, the accumulated temperature from seedling to flowering stage, the growth cycle of leaf area at 35℃, the correction factor of effective light energy utilization at 20℃ and the maximum CO₂ assimilation rate at 30℃. It also indica-

收稿日期: 2017-11-18; 修回日期: 2018-01-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41671412); 国家重点研发计划课题(2017YFB0504102); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目

第一作者简介: 陈艳玲(1989—), 女, 河南濮阳人, 博士生, 主要从事城市遥感研究。

E-mail: 201631480010@mail.bnu.edu.cn

ted that the contribution of the parameters to the yield formation was large. The research demonstrated that EFAST method has significant value in guiding model modification and can also provide an important basis for the localization of model parameters.

Key words: sensitivity analysis; extend fourier amplitude sensitivity test; WOFOST model; crop parameters

0 引言

中国是农业大国,小麦是我国三大粮食作物之一,其产量位居我国粮食产量的第二位,世界第一位^[1]。冬小麦长势监测的实时性和产量预报的准确性是保障国家粮食安全、经济发展的基础。作物生长模型模拟技术是近年来发展迅速的一项技术,其综合考虑影像作物生长的遗传特性和环境因素,定量模拟作物的生长发育进程,具有较强的时间连续性和机理性,已成为农业生态模型的研究趋势。迄今为止,以荷兰和美国为代表所建立的模型多达百种,其中,WOFOST 模型是由荷兰瓦赫宁根农业大学和世界粮食研究中心共同开发的具有较大影响力的模型,是从 SUCROS 导出的最早面向应用的机理性模型之一。其最大特点是普适性强,所描述的生理和物理过程均可适用于广泛的环境条件,通过调整作物参数,就可适用于不同的作物。自面世以来,WOFOST 模型发展迅速,已由 WOFOST 3.1 发展到 WOFOST 7.1,应用范围不断扩大,它的适应性及应用研究在世界范围内进行,反馈的结果反过来又促进了模型的发展。

近年来,国内外学者针对作物模型与遥感信息的同化研究取得了突破性的进展^[2-7]。模型的“区域化”和“本地化”是作物模型和遥感信息耦合的前提。目前,敏感性分析是解决该问题有效和常用方法之一^[8]。模型参数敏感性分析是识别和筛选出对模型模拟结果影响较大的主要因素,目前可分为局部敏感性分析和全局敏感性分析 2 种^[9-10]。局部敏感性分析结果比较片面,只评价单个参数对模拟结果的直接影响,可操作性强,然而,其忽略了模型参数间的相互作用,稳定性较差,主要用于线性模型。全局敏感性分析同时考虑多个参数变化对模拟结果的总影响,并分析参数间的相互作用对模型模拟的影响,稳定性强,分析结果全面客观,因此,在模型分析中的应用越来越广泛。其中扩展傅立叶幅度检验法(extended fourier amplitude sensitivity test, EFAST) 具有较大的应用潜力。如姜志伟等^[11],何亮等^[12]分别利用 EFAST 方法对 CERES-Wheat 和 APSIM-

Wheat 模型参数进行敏感性分析。目前,国内基于 EFAST 方法针对 WOFOST 模型参数的敏感性分析的研究尚不多见。

本研究利用河北藁城逐日气象数据和田间管理数据,选用 EFAST 法对 WOFOST 模型中的 26 个作物参数进行全局敏感性分析,旨在实现 WOFOST 作物模型参数的“本地化”,为作物模型与遥感信息的耦合奠定基础。

1 研究区概况和数据

1.1 研究区概况

本试验选取河北省藁城市作为研究区,该区域地处华北平原,位于河北省西南部($37^{\circ}51'00'' \sim 38^{\circ}18'44''N$, $114^{\circ}38'45'' \sim 114^{\circ}58'47''E$)。研究区概况见图 1。研究区属于大陆性季风气候,受地形地貌的影响较小,四季分明,冬冷夏热,年均气温 $12.5^{\circ}C$ 。年均降水量 494 mm,7—8 月份降水量最多,约占全年降水量的 56.2%。年日照时数 2 711.4 h,日照率高达 61.2%,无霜期 190 d。褐土类和潮土类是藁城市面积最大、最主要的土壤类型。藁城市地势平坦,气候适宜,冬小麦是其主要粮食作物之一,一般 9 月下旬播种,次年 6 月中下旬收获。

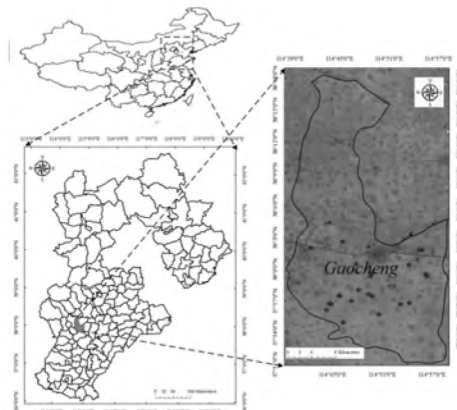


图 1 研究区概况

Fig.1 Description of study area

1.2 数据

1.2.1 气象数据

本研究所需要 2009—2010 年的气象数据由

中国气象科学数据共享服务网下载,主要包括日降雨量、日照时数、日最高温以及最低温等气象要素。WOFOST 模型输入所需要的地面总辐射量无法直接下载得到,需要利用联合国粮食及农业组织 FAO 提出的 Angstrom 公式,由日照时数计算得到。

$$R_s = (a_s + b_s \frac{n}{N}) R_a, \quad (1)$$

式中: a_s 、 b_s 为与大气质量有关的经验参数,分别取 0.18 和 0.55; n 为实测日照时长; N 为可能日照时数(由式(2)得到); R_a 为大气上届入射辐射能量(式(3))。

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s, \quad (2)$$

$$R_a = 37.6 d_r (\omega_s \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s), \quad (3)$$

式中: d_r 为日地相对距离; ω_s 为日面中心的时角; ϕ 为测点纬度; δ 为太阳赤纬,计算公式如下。

$$\begin{aligned} d_r &= 1 + 0.033 \cos(0.0172J), \\ \delta &= 0.4209 \sin(0.0172J - 1.39), \\ \omega_s &= \arccos(-\tan \phi \tan \delta), \end{aligned} \quad (4)$$

式中, J 为所计算日期的儒略日。

1.2.2 农学数据

本研究在研究区内选取 21 个样本点,在成熟期,抽取每个样本小区长势均衡的 1 m^2 冬小麦,进行脱粒、去杂以及烘干等操作后,求取各样点的产量数据。

2 模型和方法

2.1 WOFOST 作物生长模型

WOFOST(World Food Study) 模型由荷兰瓦赫宁根农业大学和世界粮食研究中心共同研制,是模拟特定气候和土壤条件下的一年生作物生长的动态解释性模型。该模型自问世以来,在农作物生长评估、产量预测以及土地的定量评价等领域得到广泛应用。WOFOST 模型定量模拟作物生长发育进程,主要包括作物发育、光合作用、呼吸作用、作物蒸腾、干物质增长与分配以及土壤水分平衡等,并描述外界环境因素的影响。WOFOST 模型模拟作物生长发育的过程如图 2 所示。

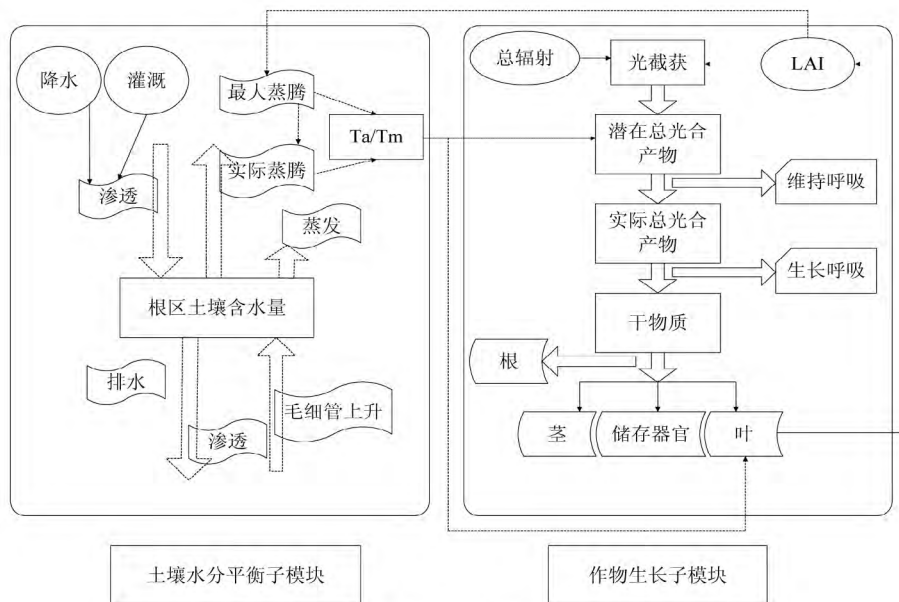


图 2 WOFOST 模型模拟作物生长发育的过程

Fig.2 Process of crop growing by WOFOST model

由图 2 可知,WOFOST 模型对作物生长的模拟过程由土壤水分平衡子模块和作物生长子模块共同构成 2 个模块相互作用,相互影响。光合作用使作物生长的基础,由空气中的 CO_2 进入开启的叶片气孔实现,在此过程中,植物吸收的大部分水分由蒸腾作用散失。作物在一个适宜的范围内自由吸水,低于或高于此范围,作物会受到水分胁迫。

作物通过控制叶片气孔的开启和关闭来适应这个胁迫,从而影响光合作用,进而会影响产量。WOFOST 根据作物的遗传特征以及影响作物生长的外界条件,描述作物从出苗到开花,再到成熟的基本生理过程。模型以一天为步长,模拟作物在太阳辐射、降水、温度、作物自身特性等影响下通过光合作用的干物质积累。冠层总 CO_2 的同化

速率是干物质形成的基础,由作物叶面积和冠层吸收的太阳辐射能计算得到。通过吸收的太阳辐射和单叶片的光合速率计算出作物的日同化量,部分同化产物用于维持呼吸作用,剩余的转化为干物质存贮在根茎叶等各类储存器官中,在转化过程中一部分干物质被作物的生长和呼吸作用消耗。WOFOST 模型详细全面的理论基础见参考文献 [13]。

作物生长参数是 WOFOST 模型中的重要参数,与生物量的积累和产量的形成直接相关,但是各个参数影响产量形成的程度不同。为了保证模型模拟效果和一定的生物学意义,又适当减小计

算量,需要筛选出引起模型结果不确定性的主要因素。模型参数的敏感性分析是解决该问题行之有效的方法之一。近年来,敏感性分析已成为国内外的研究热点并且取得了突破性的进展。如马玉平等^[14]为了更好地模拟华北地区冬小麦的生长发育过程,以固城、泰安和郑州为代表站点,对 WOFOST 模型参数进行调整。为了适应山东禹城冬小麦生长模拟,郭建茂^[13]对 WOFOST 模型进行了适当改进。本研究基于前人的研究结果,最终挑选出 WOFOST 模型的 26 个作物参数进行敏感性分析,其取值范围如表 1 所示。

表 1 WOFOST 模型参数及其取值范围

Tab. 1 Ranges of input parameters for WOFOST model

参数	定义	取值范围
<i>TSUM1</i>	出苗期到开花期积温/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$)	1 300 ~ 1 500
<i>TSUM2</i>	开花期到成熟期积温/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$)	500 ~ 800
<i>TDWI</i>	初始总干物重/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	100 ~ 300
<i>LAIEM</i>	出苗时的叶面积指数/($\text{hm}^2 \cdot \text{hm}^{-2}$)	0.000 7 ~ 0.30
<i>SLATB1</i>	生育期为 0 时的比叶面积/($\text{hm}^2 \cdot \text{hm}^{-1}$)	0.001 ~ 0.004
<i>SLATB2</i>	生育期为 0.5 时的比叶面积/($\text{hm}^2 \cdot \text{hm}^{-1}$)	0.001 ~ 0.004
<i>SLATB3</i>	生育期为 1 时的比叶面积/($\text{hm}^2 \cdot \text{hm}^{-1}$)	0.001 ~ 0.004
<i>SPAN</i>	叶片衰老指数/ $^{\circ}\text{C}$	20 ~ 30
<i>EFFTB1</i>	0 $^{\circ}\text{C}$ 下单叶有效光能利用率/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{J}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}$)	0 ~ 1.0
<i>EFFTB2</i>	10 $^{\circ}\text{C}$ 下单叶有效光能利用率/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{J}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}$)	0 ~ 1.0
<i>EFFTB3</i>	20 $^{\circ}\text{C}$ 下单叶有效光能利用率/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{J}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}$)	0 ~ 1.0
<i>EFFTB4</i>	30 $^{\circ}\text{C}$ 下单叶有效光能利用率/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{J}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}$)	0 ~ 1.0
<i>EFFTB5</i>	40 $^{\circ}\text{C}$ 下单叶有效光能利用率/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{J}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}$)	0 ~ 1.0
<i>AMAX1</i>	生育期为 0 时的最大 CO_2 同化率/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	25 ~ 50
<i>AMAX2</i>	生育期 1.0 时的最大 CO_2 同化率/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	30 ~ 60
<i>AMAX3</i>	生育期 1.3 时的最大 CO_2 同化率/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	40 ~ 80
<i>AMAX4</i>	生育期 2.0 时的最大 CO_2 同化率/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	30 ~ 60
<i>TMPF1</i>	最大 CO_2 同化率在 0 $^{\circ}\text{C}$ 的校正因子	0 ~ 1.0
<i>TMPF2</i>	最大 CO_2 同化率在 10 $^{\circ}\text{C}$ 的校正因子	0 ~ 1.0
<i>TMPF3</i>	最大 CO_2 同化率在 20 $^{\circ}\text{C}$ 的校正因子	0 ~ 1.0
<i>TMPF4</i>	最大 CO_2 同化率在 30 $^{\circ}\text{C}$ 的校正因子	0 ~ 1.0
<i>TMPF5</i>	最大 CO_2 同化率在 40 $^{\circ}\text{C}$ 的校正因子	0 ~ 1.0
<i>CVL</i>	叶片同化物的转化效率/($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.5 ~ 1.0
<i>CVO</i>	贮存器官同化物的转化效率/($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.5 ~ 1.0
<i>CVR</i>	根的同化物转化效率/($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.5 ~ 1.0
<i>CVS</i>	茎的同化物转化效率/($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.5 ~ 1.0

积温是衡量作物生长发育的重要指标,从作用时间和强度 2 个方面表征温度与作物生长发育速度间的关系。在 WOFOST 模型中,*TSUM1* 和

TSUM2 分别代表出苗-开花和开花-成熟 2 个发育阶段的有效积温。结合藁城气象站点获取的实际气象数据,计算冬小麦在出苗-开花和开花-成熟 2

个生育期内日平均气温大于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的有效温度总和,进而确定 $TSUM1$ 和 $TSUM2$ 的取值范围。

不同阶段的比叶面积大小以及叶片重量直接影响 LAI 的增长。 $SLATB$ 值在早期的研究中通常取为常数,忽略了其变化对作物产量形成的影响。马玉平等为了解决这一问题,利用多年试验数据计算华北地区冬小麦不同发育阶段的比叶面积,最终确定 $SLATB$ 取值 $0.001 \sim 0.004\text{ hm}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。为了书写和表述方便,用 $SLATB1$, $SLATB2$ 和 $SLATB3$ 代表 $DVS=0$, $DVS=0.5$ 和 $DVS=2.0$ 3个生育期的 $SLATB$ 。

$35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时叶面积的生长周期 $SPAN$ 是表征叶片在日平均气温为 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境下生长所能存活的天数,是计算叶龄的主要参数。实际上,在生长中后期日平均气温达到 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上就开始对小麦有逼熟作用。因此,WOFOST 模型中的默认值 ($31.3\text{ }^{\circ}\text{C}$) 明显偏高,采用该值会导致中后期 LAI 的模拟值普遍偏高。本文结合研究区的实际情况,将 $SPAN$ 的取值范围确定为 $20 \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

在高光照强度和通常 CO_2 体积分数下的叶片光合作用最大速率 $AMAX$ 是表征作物光合速率的参数,影响干物质的形成。本文利用国外学者的研究结果,将其数值取为 $25 \sim 80\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ [15],分别记 $DVS=0$, $DVS=1.0$, $DVS=1.3$ 和 $DVS=2.0$ 4个生育期的 $AMAX$ 为 $AMAX1$, $AMAX2$, $AMAX3$ 和 $AMAX4$ 。

$TMPF$ 和 $EFFTB$ 是受温度影响的 2 个光合特征参数。光合作用是在酶的催化下进行的,温度直接影响酶的活性,进而影响光合作用的速率,最终影响同化物和产量的形成。因此,分析 $TMPF$ 和 $EFFTB$ 对产量形成的敏感性是必要的。为了保证分析的精度,将 $TMPF$ 和 $EFFTB$ 的取值范围扩大为 $0 \sim 1.0$,分别记 $0, 10, 20, 30, 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下的 $TMPF$ 和 $EFFTB$ 为 $TMPF1$, $TMPF2$, $TMPF3$, $TMPF4$, $TMPF5$ 和 $EFFTB1$, $EFFTB2$, $EFFTB3$, $EFFTB4$ 和 $EFFTB5$ 。

每一时刻植物通过光合作用得到的同化产物将按一定规律分配到各器官中,随着器官增长特别是叶的增长又继续影响到下一时刻的光合等生理过程。同化产物在各器官间的分配是一个复杂的动态过程。同化物转化效率直接影响,与产量的形成密切相关,所以对叶 CVL , CVO , CVR 和 CVS 进行敏感性分析的意义重大。

2.2 EFAST 方法

EFAST 法是 Saltelli 提出的基于方差的定量

全局敏感性分析方法,基于 Sobol' 法对 FAST 方法进行改进,综合了两者的优势,即计算效率高、成本低以及稳定性好等 [9]。该方法是基于模型输入参数的变化所引起的模拟结果的方差表征输入参数的重要性和对模拟结果变化的影响程度。输入的各参数 x_i 及参数间相互作用的方差构成了模拟结果 Y 的总方差 $V(Y)$,可分解为:

$$V(Y) = \sum_i V_i + \sum_{i \neq j} V_{ij} + \sum_{i \neq j \neq m} V_{ijm} + V_{1,2,\dots,k} \quad (5)$$

式中: $V(Y)$ 为模拟结果 Y 的总方差; V_i 为参数 x_i 的方差; $V_{ij} \dots V_{1,2,\dots,k}$ 为参数间相互作用的方差。

$$V_i = V[E(Y/x_i)] \quad (6)$$

式中: $E(Y/x_i)$ 为 Y 对 x_i 的条件期望; $V[E(Y/x_i)]$ 为 Y 对 x_i 条件期望的方差。

$$V_{ij} = V[E(Y/x_i, x_j)] - V_i - V_j \quad (7)$$

式中: $E(Y/x_i, x_j)$ 为 Y 对 x_i, x_j 的条件数学期望; $V[E(Y/x_i, x_j)]$ 为 $E(Y/x_i, x_j)$ 的方差。

条件期望的方差反映参数 x_i 对模拟结果 Y 方差的影响程度,一阶敏感性指数 S_i 表示参数 x_i 其模型输出结果的直接影响,可定义为

$$S_i = \frac{V_i}{V} \quad (8)$$

同理,二阶和三阶敏感性指数可表征参数 x_i 和其他参数相互作用的影响,定义为

$$S_{ij} = \frac{V_{ij}}{V} \quad S_{ijm} = \frac{V_{ijm}}{V} \quad (9)$$

各阶敏感性指数之和,即总敏感性指数,表示独立参数 x_i 和参数间的相互影响。

$$S_{T_i} = S_i + S_{ij} + S_{ijm} + \dots + S_{1,2,\dots,i,\dots,k} \quad (10)$$

式中: S_{T_i} 为参数 x_i 的总敏感性指数; $S_i \dots S_{1,2,\dots,i,\dots,k}$ 为参数 x_i 一阶至 k 阶的敏感性指数。

参数 x_i 的敏感性指数越大,说明对模型结果 Y 的变化方差贡献较大,越能表示对模拟结果的影响较大。EFAST 方法将模型输出总方差进行分解,定量计算参数的各阶敏感性指数以及总敏感指数,进而分析参数变化对模拟结果变化的影响程度。

3 结果与分析

WOFOST 模型中冬小麦作物参数的研究是基于 Simlab 2.2 软件 [16],主要包括样本数据产生、分析方法选择、执行模拟过程及得出分析结果等 4 部分流程。Simlab 2.2 软件由内部和外部 2 种模型构成,前者常用于操作简单的经验模型,后者

适用于比较繁琐的复杂模型。WOFOST 模型是机理性模型,需要输入众多参数,因此,在进行敏感性分析时选取外部模型。首先,采用均匀分布的方法对 26 个参数进行插值,得到 $5\,000 \times 26$ 个样本数据。其次,将采样的参数组输入 WOFOST 模

型,获得 5 000 个冬小麦模拟产量数据(TWSO)。利用 EFAST 方法筛选出对模拟产量 TWSO 变化影响较大的参数。

图 3 表示 WOFOST 模型中 26 个作物参数对产量的全局(全局敏感性分析)和一阶敏感性指

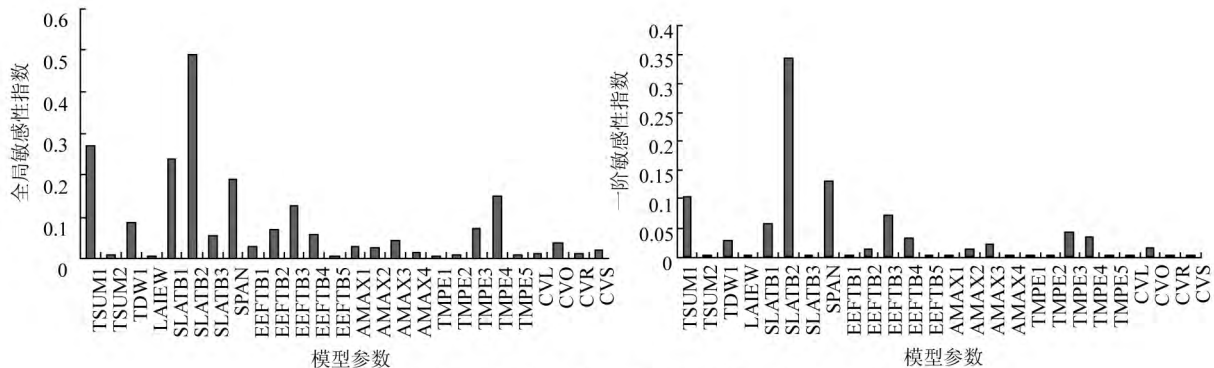


图 3 WOFOST 模型作物参数全局和一阶敏感指数

Fig.3 Global and first-order sensitivity indexes of crop parameters in WOFOST

数(局部敏感性分析),两者分析结果的总体趋势基本一致。相较于局部敏感性分析,全局敏感性分析不仅考虑了参数自身对模拟结果的直接影响,而且还涉及参数间相互作用的间接影响,得到了参数对模拟结果变化的总体影响,是模型改进和优化的基础。在选取的 26 个作物参数中有 6 个参数比较敏感,敏感性指数均超过 0.10,结果与马玉平、郭建茂等的研究结果高度一致。其中,生育期为 0.5 和 1.0 时的比叶面积 *SLATB1* 和 *SLATB2* 对模拟结果的影响显著,总敏感性指数分别为 0.237 和 0.49,说明对模拟产量有 23.7% 和 49.0% 的贡献。这是因为比叶面积 *SLATB* 是控制叶片生长的关键参数,一般与光照强弱程度直接相关,反映作物对不同环境的适应特征。已有研究表明,*SLATB* 与叶片的净光合速率成正相关,*SLATB1* 和 *SLATB2* 的敏感性指数较大,变相说明光合作用的程度较强,有利于干物质的形成和 *LAI* 的增长,这就解释了比叶面积对产量形成贡献最大的原因。出苗期到开花期的有效积温 *TSUM1* 解释冬小麦产量变化方差的 27.1%,与干物质的分配以及 *LAI* 的动态变化密切相关,WOFOST 模型中作物的发育进程由累计温度与 *TSUM1* 的比值表征,因此,开花到成熟期的积温 *TSUM2* 对产量变化的影响较小,总敏感性指数只达 0.009 1。另外,叶片衰老指数 *SPAN* 的敏感指数也达到了 0.191,它是计算叶龄的重要参数,叶龄是表征作物生长发育进程的外部形态诊断指标,是影响作物光合作用的内部因素之一。20℃

时单叶有效光能利用率 *EEFTB3* 和最大 CO_2 同化率在 30℃ 的校正因子 *TMPE4* 也比较敏感,分别对产量变化有 12.6% 和 14.9% 的贡献,这 2 个参数与叶片光合速率有关,叶片中酶的活性受温度的影响,进而影响光合速率的大小,最终影响生物量的形成。

敏感性分析方法很好地表征出 WOFOST 模型作物参数对模拟结果较为敏感的因子,为了实现 WOFOST 模型“本地化”,以上 6 个参数需要优先考虑调整和优化。剩余敏感性指数不足 0.10 的 20 个参数,本研究认为其对产量的形成影响较小,通过查阅文献或者实测计算等方法获取。

4 结论与展望

在 WOFOST 模型参数的“本地化”过程中,调整 6 个对产量敏感的参数,即 *TSUM1*,*SLATB1*,*SLATB2*,*SPAN*,*EEFTB3* 和 *TMPE4* 等,为基于作物生长模型的遥感信息同化奠定了基础。同时,证明 EFAST 全局敏感性分析方法在实现模型参数“本地化”方面具有较大的应用前景。

土壤参数的变化相对稳定,此次着重讨论了 WOFOST 模型的作物参数。但是土壤参数对 WOFOST 模型模拟具有影响,另外输入参数的取值范围和分布特征对敏感性分析的结果具有一定影响。因此,增加土壤参数和合理地确定参数取值是下一步研究的重要方向。

参考文献:

- [1] 任建强, 陈仲新, 唐华俊. 基于 MODIS-NDVI 的区域冬小麦遥感估产: 以山东省济宁市为例[J]. 应用生态学报, 2006, 17(12): 2371-2375.
REN J Q, CHEN Z X, TANG H J. Regional scale remote sensing-based yield estimation of winter wheat by using MODIS-NDVI data: A case study of Jining City in Shandong province [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(12): 2371-2375.
- [2] DE WIT A J W, VAN DIEPEN C A. Crop model data assimilation with the ensemble Kalman filter for improving regional crop yield forecasts [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 146(1-2): 38-56.
- [3] DE WIT A. Regional crop yield forecasting using probabilistic crop growth modelling and remote sensing data assimilation[D]. Wageningen: Wageningen University, 2007.
- [4] DENTE L, SATALINO G, MATTIA F, et al. Assimilation of leaf area index derived from ASAR and MERIS data into CERES-Wheat model to map wheat yield [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(4): 1395-1407.
- [5] FANG H L, LIANG S L, HOOGENBOOM G, et al. Corn-yield estimation through assimilation of remotely sensed data into the CSM-CERES-Maize model [J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(10): 3011-3032.
- [6] INES A V M, HONDA K, DAS GUPTA A, et al. Combining remote sensing-simulation modeling and genetic algorithm optimization to explore water management options in irrigated agriculture [J]. Agricultural Water Management, 2006, 83(3): 221-232.
- [7] MA Y P, WANG S L, LI Z, et al. Monitoring winter wheat growth in north China by combining a crop model and remote sensing data [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geo-information, 2008, 10(4): 426-437.
- [8] CROSETTO M, TARANTOLA S, SALTELLI A. Sensitivity and uncertainty analysis in spatial modelling based on GIS [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2000, 81(1): 71-79.
- [9] 徐崇刚, 胡远满, 常禹, 等. 生态模型的灵敏度分析 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(6): 1056-1062.
XU C G, HU Y M, CHANG Y, et al. Sensitivity analysis in ecological modeling [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(6): 1056-1062.
- [10] SALTELLI A, TARANTOLA S, CHAN K P S. A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output [J]. Technometrics, 1999, 41(1): 39-56.
- [11] 姜志伟, 陈仲新, 周清波, 等. CERES-wheat 作物模型参数全局敏感性分析 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 236-242.
JIANG Z W, CHEN Z X, ZHOU Q B, et al. Global sensitivity analysis of CERES-Wheat model parameters [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 236-242.
- [12] 何亮, 赵刚, 靳宁, 等. 不同气候区和不同产量水平下 APSIM-Wheat 模型的参数全局敏感性分析 [J]. 农业工程学报, 2015, 35(14): 148-157.
HE L, ZHAO G, JIN N, et al. Global sensitivity analysis of APSIM-Wheat parameters in different climate zones and yield levels [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 35(14): 148-157.
- [13] 郭建茂. 基于遥感与作物生长模型的冬小麦生长模拟研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2007.
GUO J M. Simulation of winter wheat growth based on remote sensing and crop growth model [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2007.
- [14] 马玉平. 基于遥感信息的华北冬小麦区域生长模型及其模拟研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2004.
MA Y P. Study on winter wheat regional simulation model based on remote sensing data and its simulations in North China [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2004.
- [15] PENNING DE VRIES F W T. 几种一年生作物生长的生态生理过程模拟 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1991.
PENNING DE VRIES F W T. Penning de Vries et al. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops [M]. ZHUDE, CHENGSH. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1991.
- [16] [S. l.]. Simlabv3.2.5 User Manual 2009 [M/OL]. Ispra, Italy: POLIS-JRC/ISIS, 2009. <http://simlab.jrc.ec.europa.eu/docs/html/index.html>.
- [17] 李玉霖, 崔建垣, 苏永中. 不同沙丘生境主要植物比叶面积和叶干物质含量的比较 [J]. 生态学报, 2005, 25(2): 304-311.
LI Y L, CUI J Y, SU Y Z. Specific leaf area and leaf dry matter content of some plants in different dune habitats [J]. ACTA ECOLOGICA SINICA, 2005, 25(2): 304-311.

(责任编辑 杨延麟)