

不同灌水水平下 CROPGRO 棉花模型敏感性和不确定性分析

吴立峰¹, 张富仓^{1,2*}, 范军亮^{1,2}, 周罕觅¹, 邢英英¹, 强生才¹

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 杨凌 712100; 2. 中国旱区节水农业研究院, 杨凌 712100)

摘要: 基于过程的作物模型使用大量的品种和土壤参数来模拟作物生长和土壤水分变化。对于新的作物品种或新的环境, 这些参数往往需要重新率定, 然而许多参数难以通过实测获得。敏感性分析(sensitivity analysis, SA)可以量化模型输入参数对模型输出的影响, 通过筛选出敏感性较大的参数进行率定, 而把敏感性较小的参数设为固定值, 可以极大简化参数率定过程, 提高工作效率和模型模拟精度。为了给 DSSAT-CROPGRO-Cotton 模型应用于新疆地区进行棉花灌溉制度优化提供本地化的模型参数, 对该模型进行了敏感性分析和不确定性分析。该文依据新疆石河子的棉花大田试验资料, 应用 Morris 法和扩展傅里叶幅度敏感性检验(extend Fourier amplitude sensitivity test, EFAST)法对 DSSAT-CROPGRO-Cotton 模型 3 个灌水处理(60%ET_c、80%ET_c和 100%ET_c, ET_c为作物蒸发蒸腾量 crop evapotranspiration)下 6 个输出结果(初花天数、成熟天数、籽棉产量、地上干物质量、最大叶面积指数和蒸发蒸腾量)对于品种和土壤参数进行敏感性分析, 并比较了 2 种方法的相关关系, 最后对 EFAST 法的输出结果进行不确定性分析。相关分析结果显示, 对于地上干物质量和最大叶面积指数, Morris 法和 EFAST 法相关性介于 0.87~0.93, 对于模型结果成熟天数、籽棉产量和蒸发蒸腾量, 2 种方法相关性介于 0.66~0.81。敏感性分析和不确定性分析结果显示, 模型模拟灌水处理对初花天数无明显差异, 且模拟初花天数和最大叶面积指数存在参数敏感性过于单一现象。模型参数敏感性随土层而不同: 对于成熟天数, >40~80 cm 土壤参数的敏感性更强; 对于地上干物质量和蒸发蒸腾量, >80~120 cm 土壤参数的敏感性更强, 这可能是由于该地区气候干旱, 下层土壤水分充足程度直接影响作物受到水分胁迫的程度, 进而影响作物生长发育和蒸发蒸腾量。模型输出结果最大叶面积指数和蒸发蒸腾量存在一定程度的高估。该研究可提高 CROPGRO-Cotton 模型在新疆地区的模拟效率和模拟精度。

关键词: 敏感性分析; 不确定性分析; 灌溉; CROPGRO-Cotton 模型; Morris 法; EFAST 法

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.008

中图分类号: S562

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-15-0055-10

吴立峰, 张富仓, 范军亮, 周罕觅, 邢英英, 强生才. 不同灌水水平下 CROPGRO 棉花模型敏感性和不确定性分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 55-64. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.008 http://www.tcsae.org

Wu Lifeng, Zhang Fucang, Fan Junliang, Zhou Hanmi, Xing Yingying, Qiang Shengcai. Sensitivity and uncertainty analysis for CROPGRO-cotton model at different irrigation levels[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(15): 55-64. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.008 http://www.tcsae.org

0 引言

作物生长模拟模型通过数学模型将作物的生长发育、光合生产、器官建成和产量形成等过程及其所处环境和栽培管理技术体系连接成为一个整体, 通过计算机定量计算并进行动态模拟, 成为掌握作物生长发育状况, 优化种植管理的重要手段^[1]。作为自然过程的数学表达, 模型的公式不可避免的要进行基于现实的假设和简化, 因此模型的结果不可避免的会带来不确定性^[2]。不确定性

分析(uncertainty analysis, UA)主要用于量化试验数据和参数估计的可信度^[3], 目前主要采用概率分布函数(probability distribution functions, PDFs)的方法来描述不确定性^[4]。敏感性分析(sensitivity analysis, SA)可以量化每一个不确定因子(参数或者驱动变量)对于模型输出的影响, 是理解模型对这些不确定因素变化响应的重要步骤^[5-7]。SA 可以有效的识别: 1) 影响很小的参数, 这些参数可以被设置为固定值来简化模型, 2) 影响很大的参数, 在率定过程中应重点关注这些参数, 3) 模型的不平衡性, 即个别参数的影响程度远远高于其他参数^[5-8]。和模型输出结果一样, 敏感性分析结果也会受到环境和田间管理的影响, 比如, 气候条件、土壤类型、降雨年型和灌溉制度等。因此, 在应用模型前进行敏感性分析对于模型参数本地化至关重要^[9]。

近年来, 模型参数敏感性分析已经成为作物模型研究的一个热点领域, 国内外不少学者采用多种敏感性分析方法对 EPIC 模型^[10]、DSSAT 模型(包括禾谷类作物 CERES 模型^[11-14]和豆科作物 CROPGRO 模型^[15])、

收稿日期: 2015-01-22 修订日期: 2015-07-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)(2011AA100504); 教育部高等学校创新引智计划项目(B12007); 高等学校博士学科点专项科研基金(20130204110030)

作者简介: 吴立峰, 男, 黑龙江阿城人, 博士生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100。

Email: china.sw@163.com

*通信作者: 张富仓, 男, 教授, 陕西武功人, 博士生导师, 主要从事水灌溉理论与技术研究。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100。

Email: zhangfc@nwsuaf.edu.cn

ALMANAC 模型^[16-17]、AquaCrop 模型^[7]、APSIM 模型^[18]、WOFOST 模型^[19]和 RZWQM 模型^[20-21]等模型进行了敏感性分析和不确定行分析。但针对不同灌溉制度下 DSSAT-CROPGRO-Cotton 模型 (以下简称 CROPGRO-Cotton 模型) 进行全局敏感性分析和不确定性分析的研究尚未见到报道。

因此,本研究以棉花为例,依据石河子地区的气象、土壤和不同灌溉制度下的试验数据,采用 Morris 法和扩展傅里叶幅度敏感性检验法 (extended fourier amplitude sensitivity test, EFAST) 对 CROPGRO-Cotton 模型中的作物品种参数、土壤参数对棉花关键物候期、籽棉产量、地上干物质量、最大叶面积指数和蒸发蒸腾量模拟进行敏感性分析;将 EFAST 法输出结果进行不确定性分析,用于评估模型在不同灌溉制度下的模拟结果差异。一方面为新疆北疆地区 CROPGRO-Cotton 模型灌溉制度优化提供本地化的模型参数,另一方面也为模型参数估计方法改进提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 田间试验

敏感性分析所使用的田间数据来源于 2012 年和 2013 年新疆农垦科学院节水灌溉试验站进行的灌溉施肥试验。该试验站位于石河子市境内 (44°18'52"N、85°58'50"E),属于温带大陆性干旱气候。气象数据来自于石河子气象局下属气象站资料 (站号 51356),2 a 生长季最高气温分别为 11.1~37.7 和 9~36.9℃,最低气温分别为 -0.5~24.2 和 -3.2~25.6℃,平均风速分别为 1.49 和 1.56 m/s,平均日照时数分别为 10.8 和 10.6 h,降雨量分别为 62 和 123 mm,运用经验频率法,水文年型分别为干旱年和正常年。试验区 0~40 cm 土壤为砂壤土,>40~120 cm 土壤为黏土。田间试验采用膜下滴灌种植模式,棉花品种为新陆早 33 号,种植密度为 21 万株,2 a 播种日期分别为 5 月 1 日和 4 月 27 日。

该地区普遍采用轮灌工作制度,灌水间隔约为 10 d,根据前人^[22]在该地区多年试验以水面蒸发量确定的棉花蒸腾量 (crop evapotranspiration, ET_C) 测定方法,设置 3 个灌水量水平: 60% ET_C (W_1)、80% ET_C (W_2)、100% ET_C (W_3),灌水间隔均为 10 d,遇到降雨推后灌溉。蒸发蒸腾量 ET_C 计算如下^[22]:

$$ET_C = E_P \cdot K_{CP} \quad (1)$$

$$K_{CP} = K_P \cdot K_C \quad (2)$$

式中: E_P 为自由水面蒸发量, mm; 在大田由直径为 20 cm 蒸发皿 (ADM7 型) 实测获得; K_P 为蒸发皿系数; K_C 为作物系数; K_{CP} 为棉花不同生育阶段的蒸发皿-作物系数,根据文献^[22],分别取 0.15 (苗期)、0.4 (现蕾期)、0.7 (开花期)、0.25 (吐絮期),由于该地区棉花农业生产中为了控制苗期过快生长,在苗期末期才开始灌水,加上该地区为井灌区,采取轮灌工作制度,灌水间隔为 10 d 左右,苗期取 0.15 时,低灌水水平 (W_1) 可能会使棉花产生严重的水盐胁迫,影响到后期试验处理,因此本研究中苗期 K_{CP} 取 0.2。降雨时用公式 (3)^[22]对蒸发量进

行修正:

$$\Delta E_P = 0.4 P_r / K_{CP} - 0.8 P_r \quad (3)$$

式中: ΔE_P 为允许蒸发量, mm; P_r 为降雨量, mm。首先设定不考虑降雨时的允许蒸发量值,如果有降雨发生,则按公式 (3) 对设定的允许蒸发量值进行修正^[22]。研究共设置 3 个处理,进行完全区组设计,每个处理设 3 次重复。各处理灌水日期相同,每年 6 月初开始灌水,8 月下旬结束灌水,灌水量为 2 次灌水间隔的水面蒸发量,经式 (1)~(3) 计算整理获得,经计算,2 a 的 3 个滴灌水量水平分别为 291、368、445 和 267、329、392 mm。具体灌溉施肥以及田间管理情况见文献^[23]。

1.2 CROPGRO-Cotton 模型简介

CROPGRO-Cotton 模型是 DSSAT-CROPGRO 系列模型的 1 个子模块^[24],CROPGRO 系列模型是在 SOYGR0 (Soybean grow) 模型^[24] (大豆生长模型) 基础上发展起来的,现已被集成于 DSSAT 软件包中。CROPGRO 系列模型下各作物子模型结构基本相同,主要包含作物、土壤、气象、土壤—植物—大气和管理模块。土壤模块集成了 4 个子模块: 土壤水分、土壤温度、土壤碳和氮动态模块。土壤剖面采用一维代表,包含若干个垂直的土壤层。气象模块的主要功能是读取或生成模型所需的每日气象数据,包括最高最低气温、太阳辐射量和降雨量等。土壤—植物—大气模块计算每日土壤蒸发和植株蒸腾,而管理模块执行各种管理措施如播种、移栽、收获、施肥、灌水和作物残留和有机质的变化等。

CROPGRO 系列模型有 3 个描述作物生长、发育和产量的参数集: 物种、生态型和品种参数集^[24]。品种参数用于区分特定的品种,生态型参数用于描述一系列品种,而各品种的物种参数则是共用的。一般而言,品种参数对于敏感性分析是至关重要的。

1.3 模型输入参数与输出结果

本研究选取了 14 个棉花品种参数和 19 个土壤参数,参数取值范围参考了文献^[25-30]。敏感性分析试验假定土壤分为 3 层,第 1 层为砂壤土,第 2、3 层为黏土,每层厚度均为 40 cm。模型输出结果为初花天数、成熟天数、籽棉产量、地上干物质量、最大叶面积指数和蒸发蒸腾量。具体输入参数取值范围见表 1。

1.4 敏感性分析方法

1.4.1 Morris 法

Morris 法也叫单元效应 (elementary effects) 方法^[31],适合用于大量输入因子或者计算成本很高的模型敏感性分析,该方法能较好的兼顾效率和精度^[32]。Morris 方法能够在很小的样本条件下,区分出参数对输出结果的影响,包括: 无影响或可忽略、线性影响和非线性影响或与其他参数交互作用^[32]。这种方法计算只有 1 个不同参数的 2 组参数的输出结果的变化率作为该参数的单元效应 d , 其计算式为:

$$d(x_1, \dots, x_k, \Delta) = \frac{y(x_1, \dots, x_{i-1}, x_i + \Delta, x_{i+1}, \dots, x_k) - y(x_1, \dots, x_k)}{\Delta} \quad (4)$$

式中: $y(x)$ 为模型输出, x_1, \dots, x_k 为 k 个参数变量, Δ 为参数变化值, 其值为 $1/(p-1)$ 的整数倍, p 为水平数量相当于参数分布的分位数。然后计算每一个参数单元效应的均值的绝对值 (μ^*) 和标准差 (σ), μ^* 可反映参数的总体敏感程度, σ 可反映参数的非线性和参数间的交互作用^[33]。

表 1 CROPGRO-Cotton 模型敏感性分析输入和输出参数
Table 1 Sensitivity analysis input and output parameters of CROPGRO-Cotton

参数类型 Parameter types	名称 Name	描述 Description	下限 Lower limit	上限 Upper Limit
品种输入参数 Species input parameters	EMFL	出苗到初花期的光热时间/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)	28	43
	FLSH	初花期到第 1 个棉铃产生的光热时间/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)	10	13
	FLSD	初花期到第 1 个籽粒产生的光热时间/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)	12	22
	SDPM	第 1 个籽粒产生到生理成熟的光热时间/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)	38	50
	FLLF	初花期到叶片停止扩展的光热时间/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)	60	90
	LFMAX	最适条件下叶片最大光合速率/($\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$), 以 CO_2 计	0.7	1.2
	SLAVR	比叶面积/($\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	90	250
	SIZLF	单叶面积/ cm^2	170	230
	XFRT	每日分配给棉铃的干物质量的最大比例	0.5	0.9
	WTPSD	最大单籽粒质量/g	0.18	0.3
	SFDUR	种子填充棉铃仓的持续时间/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)	31	38
	SDPDV	正常条件下单个棉铃平均籽粒数	27	30
	PODUR	最优条件下最终棉铃负载所需时间/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)	5	10
土壤输入参数 Soil input parameters	THRSH	籽棉质量与棉铃质量的比值/%	75	80
	SALB	地表反照率	0.1	0.35
	SLU1	最大蒸发量/cm	5	12
	SLDR	排水比率	0	1
	SLRO	径流曲线数	65	95
	SLLL1	第 I 层土壤凋萎含水量	0.066	0.133
	SDUL1	第 I 层土壤田间持水量	0.194	0.293
	SSAT1	第 I 层土壤饱和含水量	0.348	0.499
	SSKS1	第 I 层土壤饱和导水率/($\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$)	2	15
	SBDM1	第 I 层土壤体积密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1.14	1.65
	SLLL2,3	第 II、III 层土壤凋萎含水量	0.156	0.218
	SDUL2,3	第 II、III 层土壤田间持水量	0.282	0.374
	SSAT2,3	第 II、III 层土壤饱和含水量	0.417	0.5
输出 Output	SSKS2,3	第 II、III 层土壤饱和导水率/($\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$)	0.3	2
	SBDM2,3	第 II、III 层土壤体积密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1.24	1.5
	ADAS	初花天数/d		
	MDAS	成熟天数/d		
	YIELD	籽粒产量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)		
	CWAM	地上干物质量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)		
	LAIX	最大叶面积指数/($\text{cm}^2\cdot\text{cm}^{-2}$)		
	ET	蒸发蒸腾量/mm		

1.4.2 扩展傅里叶幅度敏感性检验法

扩展傅里叶幅度敏感性检验法^[34] (extended Fourier amplitude sensitivity test, EFAST) 是 Saltelli 等结合傅里叶幅度敏感性检验法 (FAST)^[35] 和 Sobol's 法^[36] 的优点提出的一种基于方差分解的敏感性分析方法。与其他基于方差的敏感性分析方法不同, EFAST 法是由傅里叶变

换获得傅里叶级数的频谱曲线, 通过该曲线分别得到由每一个参数及参数相互作用所引起的模型结果的方差, 其计算式^[31]为:

$$V(Y) = \sum_{i=1}^k V_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} V_{ij} + \dots + V_{1\dots k} \quad (5)$$

式中: $V(Y)$ 为所有参数的总方差; Y 为输出结果; k 为参数个数; V_i 为第 i 个参数的方差; V_{ij} 为第 i 和 j 参数相互作用引起输出结果的方差; $V_{1\dots k}$ 为所有参数相互作用所引起的输出结果的方差。

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

其中, $E(Y|x_i)$ 为对于确定参数 x_i 所对应 Y 的期望。再根据各参数的方差计算一阶敏感指数 (S_i) 和总敏感指数 (ST_i), 其计算式^[31]如下:

$$S_i = \frac{V_i}{V(Y)} \quad (7)$$

$$ST_i = \frac{V(Y) - V_{-i}}{V(Y)} \quad (8)$$

式中: V_{-i} 为除第 i 个参数以外的所有参数的方差。

此外, 使用频率分布和累积频率曲线和对不同灌水处理的 EFAST 法生成的模型各输出结果进行不确定性分析。

1.5 模型模拟和对比

使用 Simlab 软件^[37] 实现参数组生成和统计结果分析, 使用 C# 程序设计语言编写 DSSAT 软件的调参工具实现作物模型的 DSSAT 批处理和品种参数和多层的土壤参数修改。本研究中 Morris 方法共抽样 2040 次, 其中包括 2 a 各 3 个处理, 每个处理抽样次数为 340 ($r \cdot (k+1)$); EFAST 方法共抽样 99000 次, 其中包括 2 a 各 3 个处理, 每个处理抽样次数为 16500 ($N \cdot k$), 其中 $r=10$, $k=33$, $N=500$, 其中 r 为 Morris 方法重复次数, k 为参数个数, N 为 EFAST 方法的重复次数。使用斯皮尔曼等级相关分析方法^[3] 来检验 Morris 方法和 EFAST 方法参数敏感性排序的相关程度。

1.6 测定项目与方法

在棉花生长期, 在灌水前后 2 d 内在每个小区内膜中、膜间和裸地 3 个位置分别用土钻取土 (0~120 cm), 每 10 cm 取 1 次, 采用烘干法, 测定土壤水分, 每 40 cm 取平均值乘以该层土壤容重作为该小区的土壤体积含水率 (%), 2012 和 2013 年各测定 16 次, 取其平均值作为土壤平均含水率, 并分别用实测值与模拟值计算偏差和均方根误差 (root mean square error, RMSE), 其计算式分别为:

$$D = (S_i - O_i) / O_i \quad (9)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (10)$$

式中: D 为偏差, n 为样本容量, S_i 为模拟值, O_i 为观测值。其他指标测定方法见文献^[23]。

2 结果与分析

2.1 Morris 方法敏感性分析结果

Morris 方法对初花天数、成熟天数、籽棉产量、地

上干物质量、最大叶面积指数和蒸发蒸腾量的敏感性分析结果见表 2。如前所述, μ^* 值较大表示输入参数的总体敏感程度大, σ 值较大表明输入参数的交互作用或者非线性效应较强。本研究选取各参数 μ^* 的平均值 (μ^*_{average}) 敏感程度的阈值^[13], 即 $\mu^* > \mu^*_{\text{average}}$ 时, 认为该参数敏感。由于影响初花时间的参数只有 EMFL, 且其他参数的 μ^*

均为 0, 可见模型并未考虑水分等因素对开花的影响, 因此在模拟初花天数模型存在不平衡性。影响成熟天数的参数中, EMFL、FLSD、SDPM 和 SLDR 的 μ^* 和 σ 均高于其他参数, 排在前 4 位。说明影响棉花成熟的因素主要是各阶段的光热时间, 而排水比率变化会影响土壤水分供应能力变化, 进而促进棉花成熟。

表 2 基于 Morris 方法不同灌水处理下的品种和土壤参数对各输出结果重要性排名

Table 2 Morris sensitivity analysis rankings of cultivar and soil texture parameters for each output response under different irrigation treatments

参数 Parameters	成熟天数 Mature day			籽棉产量 Seed cotton yield			地上干物质量 Above ground dry mass			最大叶面积指数 Maximum leaf area index			蒸发蒸腾量 Evapotranspiration		
	W1	W2	W3	W1	W2	W3	W1	W2	W3	W1	W2	W3	W1	W2	W3
EMFL	1	1	1	2	2	5	-	-	-	2	2	3	8	-	7
FLSH	-	-	-	6	3	3	-	-	-	-	-	8	-	-	-
FLSD	3	2	2	7	5	2	11	9	7	-	-	-	-	-	-
SDPM	2	3	3	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-
FLLF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-	-	-
LFMAX	-	-	-	11	8	4	4	3	3	4	4	4	-	-	-
SLAVR	-	-	-	12	12	10	7	7	8	1	1	1	-	-	-
SIZLF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	-	-	-
XFRT	-	-	-	1	1	1	9	10	11	5	3	2	-	-	-
WTPSD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-
THRSH	-	-	-	-	-	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SLDR	4	4	4	3	4	6	1	1	1	3	5	5	5	5	4
SLLL1	-	-	-	5	7	11	3	4	5	9	-	-	4	4	5
SDUL1	-	-	-	8	10	7	8	8	6	-	-	-	7	7	6
SLLL2	-	-	-	10	11	13	6	6	9	7	-	-	2	3	2
SDUL2	-	-	-	13	-	-	10	11	12	-	-	-	6	6	8
SLLL3	-	-	-	9	9	9	5	5	4	8	7	-	3	2	3
SDUL3	-	-	-	4	6	8	2	2	2	6	6	-	1	1	1

注: 表中只列入 $\mu^* > \mu^*_{\text{average}}$ 的参数^[13], μ^* 表示单元效应平均值, μ^*_{average} 为同一输出结果各参数 μ^* 的平均值; W1、W2 和 W3 分别表示 60% ET_C、80% ET_C 和 100% ET_C。下同。

Note: Parameters with $\mu^* > \mu^*_{\text{average}}$ are present^[13], μ^* is the average of element effect, μ^*_{average} is average of all μ^* under same output response; W1, W2 and W3 means 60% ET_C, 80% ET_C and 100% ET_C, respectively. The same as below.

籽棉产量敏感性分析表明, 每日分配给棉铃的干物质量的最大比例 (XFRT) 的 μ^* 最大。此外, 灌水处理对参数排序有明显影响 (表 2), 例如, FLSD、最适条件下叶片最大光合速率 (LFMAX) 随灌水量增加, 排名逐渐提高, 敏感性增强。其中 FLSD 参数是决定棉铃潜在籽粒数的参数, 该阶段越长潜在籽粒数越多, 产量越高, 水分亏缺会影响籽粒数的增加, 进而影响产量, 而 LFMAX 是表示潜在光合能力的参数, 在水分胁迫条件下, 棉花很难达到最大光合速率, 因此呈现高水处理这 2 个参数比低水处理更敏感。SLDR、SLLL1、SLLL2、SDUL3 随灌水量增加, 排名逐渐降低, 敏感性变弱。THRSH 仅在高水处理下敏感, SDUL2 仅在低水处理下敏感。结合表 3 可以看出, 灌水量越高处理土壤含水量越高, 同一处理中土层越深土壤含水量越高, 这可能与不同灌溉处理的土壤供水层次或供水能力差异有关。

地上干物质量的敏感性分析表明, 参数中排水比率 (SLDR) 的 μ^* 最大, 说明降雨和灌溉中总有效水量是影响地上干物质量的最重要参数; 其次是 SDUL3, 说明深层土壤的供水能力决定了地上干物质量的增加。尽管不同灌水处理下, LFMAX、SLLL1 和 SLLL3 排名略有差异, 但均排在前 5 位。此外, FLSD 随灌水量增加, 排名逐渐升高, 而 XFRT 和 SDUL2 随灌水量增加, 排名逐渐降低, 以上参数对地上干物质量的敏感性与籽棉产量相似。SDPM 仅在高水处理下敏感, 这是由于水分充足会

延长棉花生长期时间, 地上干物质量也会随之增加。

最大叶面积指数的敏感性分析表明, 参数中比叶面积 (SLAVR) 的 μ^* 最大, 其定义为叶的单面面积与其干重之比。XFRT 随灌水量增加, 排名逐渐升高, 敏感性变强, 这可能是由于棉花属于无限生长作物, 在生殖生长期, 叶片仍在生长, 水分胁迫会限制叶片生长。棉花品种参数中最大单籽粒质量 (WTPSD)、FLSH、初花期到叶片停止扩展的光热时间 (FLLF) 和单叶面积 (SIZLF) 仅在高水处理敏感, 其中, WTPSD、FLSH 和 FLLF 可能与 XFRT 共同作用使干物质量向籽棉产量分配, 从而造成叶面积指数变化更剧烈。土壤参数中 SLLL1 和 SLLL2 仅在低水处理敏感, SLLL3 和 SDUL3 在低水和中水敏感, 说明在灌水量不足时, 供水能力是限制叶面积指数的主要参数。

土壤参数是影响蒸发蒸腾量的主要因素, 结合表 3 可以看出, 各层土壤含水量均存在不同程度低估, 各灌水处理 0~40 cm 土壤水分模拟值偏差最大, 平均偏差 18% 以上, RMSE 也在 0.04 以上。参数中各层的凋萎含水量和饱和含水量均为敏感参数, 其中 SDUL3 的 μ^* 值最大, SLLL2 和 SLLL3、SLLL1 和 SLDR 在不同灌水处理下略有差异, 但均排在第 2~5 位, 说明土壤供水能力不同是造成蒸发蒸腾量变化的主要原因。EMFL 参数在不同灌水处理介于敏感参数和不敏感参数之间, 可能是由于该参数改变了成熟天数, 进而增加或减少了生育期蒸发蒸腾量。

表 3 各灌水处理土壤含水量模拟值与实测值对比

Table 3 Comparison of measured and simulated value of soil water content for different irrigation treatments

处理 Treatment	土层深度 Soil depth/cm	模拟值 Simulation value/%	实测值 Measurement value /%	偏差 Deviation/%	均方根 误差 RMSE/%
W1	0~40	18.1	21.5	-18.8	5.3
	>40~80	21.8	25.3	-16.1	3.9
	>80~120	23.7	26.2	-10.5	2.8
W2	0~40	19.5	23.1	-18.5	4.4
	>40~80	23.3	26.5	-13.7	3.2
	>80~120	25.4	27.4	-7.9	2.4
W3	0~40	20.5	24.2	-18.0	4.1
	>40~80	25.2	27.7	-9.9	3.1
	>80~120	26.3	28.1	-6.8	2.2

注：模拟土壤含水量为与实测土壤含水量相对应的抽样次数 340 次（Morris 法）的平均值。
Note: Simulation of soil water content in the table was to correspond to the measured soil moisture content of average of the sampling frequency of 340 times base on Morris method.

表 4 基于 EFAST 方法的不同灌水处理下品种和土壤参数对各输出结果重要性排名

Table 4 EFAST sensitivity analysis rankings of cultivar and soil texture parameters for each output response under different irrigation treatments

参数 Parameters	成熟天数 Mature day			籽棉产量 Seed cotton yield			地上干物质量 Above ground dry mass			最大叶面积指数 Maximum leaf area index			蒸发蒸腾量 Evapotranspiration		
	W1 W2 W3			W1 W2 W3			W1 W2 W3			W1 W2 W3			W1 W2 W3		
	W1	W2	W3	W1	W2	W3	W1	W2	W3	W1	W2	W3	W1	W2	W3
EMFL	1	1	1	4	6	8	-	-	8	2	2	2	-	-	11
FLSH	-	-	17	8	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FLSD	2	2	3	15	4	2	-	-	5	-	-	-	12	11	3
SDPM	3	3	2	-	22	18	-	-	-	-	-	-	-	-	12
FLLF	-	-	-	17	13	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LFMAX	-	-	-	12	10	5	4	3	2	5	5	-	-	-	-
SLAVR	-	-	7	19	17	14	-	-	12	1	1	1	-	-	-
SIZLF	5	14	13	-	25	22	-	-	-	4	3	4	-	-	-
XFRT	-	13	-	1	1	1	8	9	11	-	4	3	-	-	-
WTPSD	-	-	-	-	-	-	11	11	-	-	-	-	11	12	-
SDPDV	-	8	-	6	7	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PODUR	-	-	12	13	20	26	-	-	-	-	-	-	-	-	-
THRSH	-	-	15	9	12	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SALB	-	-	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SLU1	-	6	11	-	21	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SLDR	-	-	-	2	2	6	1	1	1	3	-	-	6	5	4
SLRO	-	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SLLL1	-	-	-	5	8	16	5	5	7	-	-	-	4	3	5
SDUL1	-	11	-	14	14	20	7	7	6	-	-	-	8	7	9
SSAT1	-	-	-	-	24	21	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SSKS1	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SBDM1	-	-	8	20	19	19	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SLLL2	-	4	-	16	16	15	6	6	9	-	-	-	3	4	6
SDUL2	-	-	5	7	11	12	-	-	-	-	-	-	7	8	10
SSAT2	4	12	4	10	9	4	10	10	13	-	-	-	5	6	7
SSKS2	-	15	18	18	15	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SBDM2	6	7	14	-	-	27	-	-	-	-	-	-	9	9	8
SLLL3	-	5	10	11	18	23	3	4	4	-	-	-	2	2	2
SDUL3	-	-	-	3	5	7	2	2	3	6	-	-	1	1	1
SSAT3	-	-	9	-	-	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SSKS3	-	10	-	-	-	28	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SBDM3	-	-	-	21	23	24	9	8	10	-	-	-	10	10	13

对籽棉产量敏感的参数随灌水量增加而增加，其中低水、中水和高水分别为 21、25 和 27 个参数。与 Morris 法相同，XFRT 是籽棉产量最敏感的参数，其总敏感指数最大。随灌水量增加，排名逐渐降低的土壤参数有 SDUL3、SLLL1、SDUL2、SLLL3 和第 3 层土壤容重（SBDM3），可见在水分亏缺条件下，土壤供水能力是影响产量模拟的主要参数，分层进行参数优化是很有必要的。而随灌水量增加，排名逐渐降低的品种参数有正常条件下单个棉铃平均籽粒数（SDPDV）、最优条件下最

2.2 EFAST 方法敏感性分析结果

EFAST 方法对初花天数敏感性结果表明（数据未列出），只有 EMFL 对初花天数敏感性显著，这是由于不少棉花品种已经被培育成光周期钝化品种，模型模拟只考虑温度对开花的影响，故在各灌水处理下一阶敏感指数在 0.96 左右，总敏感指数均为 1，故未对初花天数的各参数进行重要性排名。EFAST 方法对成熟天数、籽棉产量、地上干物质量、最大叶面积指数和蒸发蒸腾量的敏感性分析结果见表 4。对成熟天数敏感的参数随灌水量增加而增加，其中低水处理仅有 6 个敏感参数，而中水和高水则分别为 15 和 18 个，但最敏感的 3 个参数（EMFL、FLSD 和 SDPM）与 Morris 法结果相同。

终棉铃负载所需时间（PODUR）和 EMFL，其中 SDPDV 代表了籽粒形成过程对水分亏缺的响应，而水分亏缺还会让棉花提前成熟，PODUR 正是反映这一现象的参数，而 EMFL 参数在低水处理更敏感可能是由于当出苗到开花的较为漫长时，会大量消耗土壤水分，使棉花在开花后进入严重水分胁迫状态，进而产量会受到较大影响。随灌水量增加，排名逐渐升高的参数有 FLSD、LFMAX、SLAVR、SSAT2，其中 FLSD 和 LFMAX 与 Morris 法相同，不再赘述；SLAVR 是影响叶面积指数的参数，即该

参数可以影响作物光合能力, 进而影响产量; SSAT2 参数在水分充足时更加敏感可能是由于土壤第 2 层水分在生育期内变化较大, 当 SSAT2 较小时可能影响根系透气性, 进而限制作物产量。

与 Morris 法相同, SLDR 是地上干物质量最敏感的参数; 其次是 LFMAX, 其排名随灌水量增加而升高。此外, 各层土壤的凋萎含水量 (SLLL) 和田间持水量 (SDUL) 也比较敏感。

对于最大叶面积指数 EFAST 法的敏感参数不足 5 个, 比 Morris 法少 2~4 个敏感参数, 其中与 Morris 法相似, SLAVR 和 EMFL 是最敏感的参数。

除高水处理 FLSD 参数外, 蒸发蒸腾量的敏感参数主要为土壤参数, 其中 SDUL3 和 SLLL3 的总敏感指数排在前 2 位, 结合表 3 可以看出, 土壤水分在各层均存在不同程度低估, 到了棉花生育后期, 前 2 层土壤水分消耗较大, 第 3 层土壤的供水能力是影响蒸发蒸腾量的主要因素。此外, SDUL2、SLLL2 和 SSKS2 排名随灌水量增加而降低, 说明当水分亏缺时, 第 2 层土壤的持水能力非常重要, 而 SLDR 和 FLSD 排名随灌水量增加而升高, 前者是由于总供水量增加, 排水比率的重要性会降低; 而 FLSD 是影响成熟天数的主要参数, 在耗水强度变化不大的情况下, 随着生育期的延长, 蒸发蒸腾量也随之增加。

2.3 两种方法对比

输出结果为初花天数时, Morris 法和 EFAST 法均能得出 EMFL 参数是最敏感参数, 且其他参数均不敏感 (表 4)。两种方法各输出结果的敏感参数数量不同, 输出结果为最大叶面积指数时 Morris 法敏感参数数量多于 EFAST 法, 而对于成熟天数、籽棉产量、地上干物质量

和蒸发蒸腾量, EFAST 法敏感参数多于 Morris 法。使用斯皮尔曼等级相关方法对 Morris 法和 EFAST 法敏感性分析输出结果 (成熟天数、籽棉产量、地上干物质量、最大叶面积指数和蒸发蒸腾量) 的参数进行相关分析表明 (表 5), 输出结果为地上干物质量和最大叶面积指数时, 两种方法等级相关性较高 ($r=0.87$)。而输出结果为成熟天数、蒸发蒸腾量和籽棉产量时, 两种方法的相关性较低, 仅能解释 66%~81% 的参数相关性。由于 Morris 法在取样次数上比 EFAST 法少 40 多倍, 当研究内容对籽棉产量模拟精度要求较高时, EFAST 法敏感参数更多, 可能是更稳健的方法。

表 5 Morris 和 EFAST 敏感性分析方法输入参数斯皮尔曼等级相关系数

Table 5 Spearman ranking correlations between corresponding input parameters used in Morris and EFAST global sensitivity analysis

处理 Treatment	成熟 天数 Maturity day	籽棉产量 Seed cotton yield	地上 干物质量 Above ground dry mass	最大叶面积 指数 Maximum leaf area index	蒸发 蒸腾量 Evapotrans- piration
W1	0.73**	0.70**	0.87**	0.93**	0.66**
W2	0.66**	0.81**	0.91**	0.91**	0.67**
W3	0.66**	0.73**	0.93**	0.89**	0.74**

注: **为 t 检验 $P<0.01$ 。
Note: **means $P<0.01$ of t -test.

2.4 不确定性分析

不确定分析结果表明, 模型模拟的不同灌水处理对初花天数没有任何影响 (表 6), 而实测结果表明, W1 处理比 W2 和 W3 初花天数提前 2 d, W3 处理下, 初花天数的 95%置信区间介于 46~69 d, 但模拟初花天数主要集中在 52~62 d (图 1a), 其出现频率均在 1 700 次以上。

表 6 基于 EFAST 方法模拟不同灌水处理的输出结果不确定性分析
Table 6 Uncertainty analysis statistics for different irrigation treatments as determined from EFAST global sensitivity analysis

输出结果 Output response	处理 Treatment	实测值 Measurement value	中位值 Medium value	95%置信区间下限 95% confidence interval lower limit	95%置信区间上限 95% confidence interval upper limit	标准差 Standard deviation
初花天数 First flower day /d	W1	59	57	46	69	6
	W2	61	57	46	69	6
	W3	61	57	46	69	6
成熟天数 Maturity day/d	W1	122	136	114	163	12
	W2	129	138	115	166	13
	W3	131	141	116	170	14
籽棉产量 Seed cotton yield/(kg·hm ²)	W1	4541	2737	531	5064	1156
	W2	5605	4292	1654	6939	1348
	W3	5867	5735	2987	8354	1369
地上干物质量 Aboveground dry mass/(kg·hm ²)	W1	11065	9031	5553	12451	1760
	W2	13424	11532	7858	15170	1865
	W3	14910	14190	10597	17753	1825
最大叶面积指数 Maximum leaf area index	W1	2.9	4.7	1.7	7.9	1.6
	W2	3.7	5.1	1.9	8.5	1.7
	W3	4.2	5.5	2	9.1	1.8
蒸发蒸腾量 Evapotranspiration/mm	W1	301	491	429	551	31
	W2	352	553	491	613	31
	W3	401	617	556	678	31

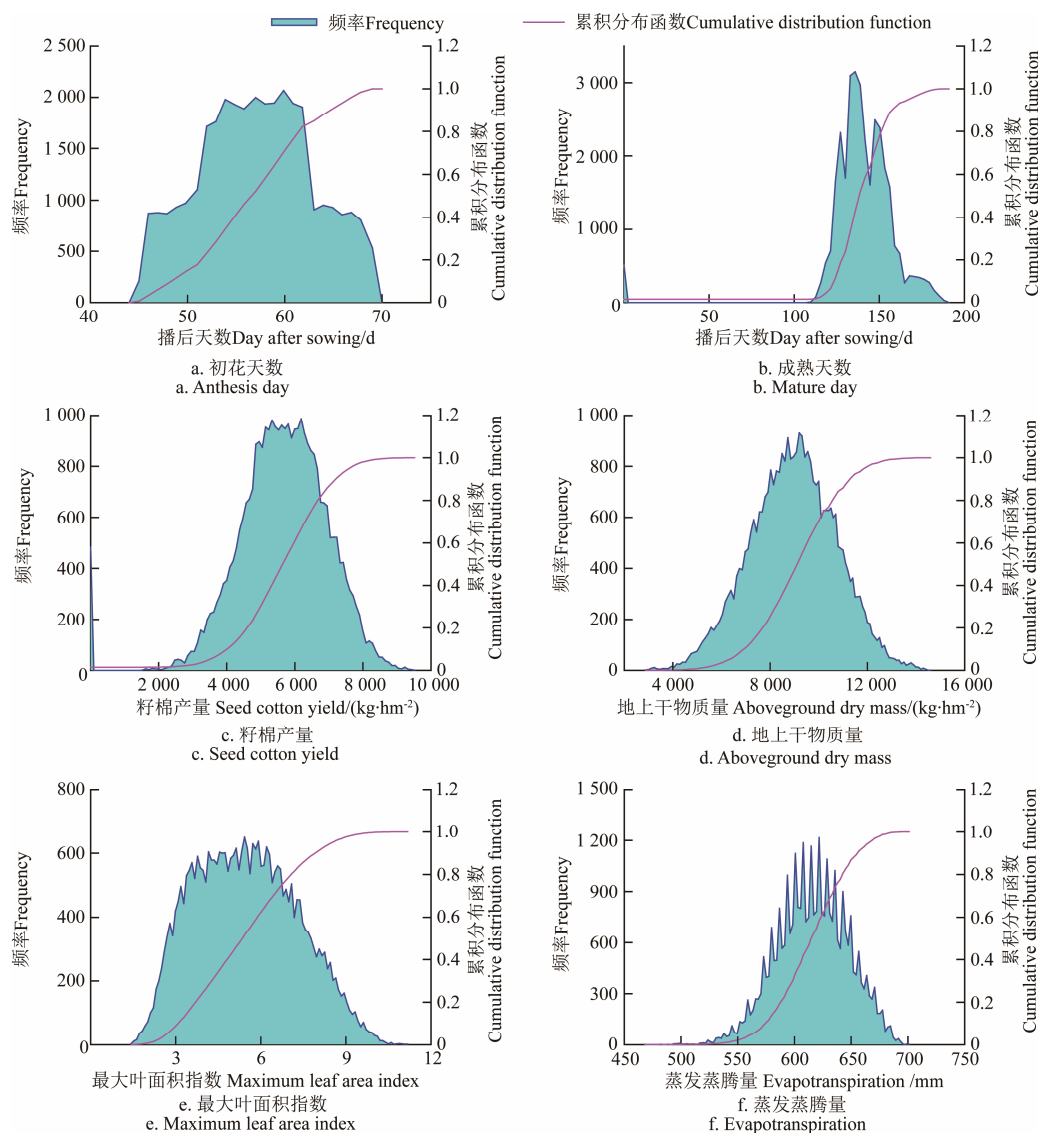


图 1 CROPGRO-Cotton 模型 W3 处理下各输出结果不确定分析概率密度分布和累积分布函数

Fig.1 Uncertainty analysis probability density distribution and cumulative distribution functions for CROPGRO-Cotton model under W3 treatment

模型模拟的成熟天数,与低水处理相比,中水和高水处理成熟天数的 95%置信区间下限、上限分别增加 1、3 和 2、7 d。模拟的成熟天数随灌水量增加略有增加。实测值在模拟值的 95%置信区间内,表明模型能够模拟出不同灌水条件下的成熟天数变化趋势。此外,模型模拟成熟天数为 0 的频率约为 400 次左右(图 1b),与之相对应同样有约 400 次模拟产量为 0,即大约有 400 次模拟棉花并未形成产量(图 1c),约占总模拟次数的 2.4%。

模型模拟的籽棉产量随灌水量增加而升高,与低水处理相比,中水和高水处理籽棉产量 95%置信区间下限提高 1 123 和 2 456 kg/hm²,上限提高 1 875 和 3 290 kg/hm²。低水和中水处理,模拟中位值与实测值相比偏低 40%和 23%,如果以高水处理进行模型参数率定时,可能会造成水分亏缺时产量低估。

不同灌水处理下,地上干物质量的模拟结果与籽棉产量相似,且其模拟结果基本呈正态分布(图 1d)。在低水、中水和高水处理下最大叶面积指数 95%置信区间

上限均在 7.9 以上,中位值也在 4.7 以上,考虑到 2 a 田间实测最大叶面积指数在 2.9~4.2,模拟最大叶面积指数存在一定程度偏大的现象。模型模拟蒸发蒸腾量随灌水量增加而升高,与低水相比,中水和高水处理蒸发蒸腾量 95%置信区间下限和上限均提高 62 和 127 mm,而高水处理蒸发蒸腾量的中位值为 617 mm,考虑到 2 a 田间实测最大耗水量为 301~401 mm,模型可能在整体上高估了蒸发蒸腾量。

3 讨论

宋明丹等^[13]和 Dejonge 等^[14]分别应用 CERSE-Wheat 和 CERSE-Maize 模型对 Morris 法和 EFAST 法进行了比较,结果表明 2 种方法参数敏感性高度相关, Morris 法可以单独使用。Vanuytrecht 等^[7]应用 2 种方法对 AquaCrop 模型多种作物的产量进行敏感性分析,结果显示 2 种方法结果相似,但是参数的排序不同。Campolongo 等^[38]对比了 Morris 法和 Sobol'法的 GSK 模型模拟海洋藻类产

生二甲基硫醚的敏感性分析, 结果表明 2 种方法相关性较低。本研究中, 对 CROPGRO-Cotton 模型的输出结果地上干物质质量和最大叶面积指数, Morris 法和 EFAST 法相关系数在 0.87 以上, 但输出结果为成熟天数、籽棉产量和蒸发蒸腾量时, 2 种方法相关性介于 0.66~0.81, Morris 法敏感参数普遍少于 EFAST 法, 可能会出现参数过度简化的问题。尽管 2 种方法得出的参数敏感性存在着一定的差异, 但某些参数在 2 种方法对于所有结果均不敏感时, 可以将这些参数作为定值, 例如 SFDUR 参数, 此外当对成熟天数模拟精度要求不高时: SALB、SLU1、SSKS 等参数可以作为定值。

敏感性分析结果显示, 灌水处理对初花天数无影响, 这是由于模型并未考虑水分胁迫会使棉花提前开花, 这一结果与一些试验结果相违背: Farre 等^[39]研究发现水分胁迫会推迟玉米的开花期和成熟期; Melgar 等^[40]也发现冬季干旱胁迫会推迟甜橙的开花时间。Pathak 等^[15]分别对灌溉和雨养条件下 CROPGRO-Cotton 模型进行了局部和全局敏感性分析, SDPM 和 FLSD 是对成熟天数最敏感的参数, 而 EMFL 则不敏感; SLAVR 是对干物质质量最敏感的参数。本研究中, EMFL 是对成熟天数最敏感的参数, 其次是 SDPM 和 FLSD; SLDR 是对地上干物质质量最敏感的参数, 而 SLAVR 是对最大叶面积指数最敏感的参数。Dejonge 等^[14]CERSE-Maize 研究表明, 限量灌溉处理输出结果为叶面积指数、产量和蒸发蒸腾量, SLLL 和 SDUL 有重要影响。本研究中, 由于各层土壤水分存在低估, 土壤供水能力是影响蒸发蒸腾量的主要因素, 第 2 层土壤 (>40~80 cm) 的 SLLL、SDUL 和 SSAT 的对蒸发蒸腾量敏感性排名随灌水量增加而下降。

不确定性分析结果表明, 模型输出结果最大叶面积指数和蒸发蒸腾量存在一定的高估, 这可能是由于模型模拟出了更大的叶面积, 而又没有考虑覆膜对降低土壤水分蒸发强度的影响, 进而高估潜在蒸发能力, 这是在新疆地区应用 CROPGRO 系列模型需要改进的一个地方。

4 结 论

本研究应用 Morris 法和 EFAST 法对 CROPGRO-Cotton 模型的 6 个输出结果 (初花天数、成熟天数、籽棉产量、地上干物质质量、最大叶面积指数和蒸发蒸腾量) 的 33 个参数 (品种参数和 3 层土壤参数) 进行了全局敏感性分析和不确定性分析, 得到结果如下:

1) 对于地上干物质质量和最大叶面积指数, Morris 法和 EFAST 法相关性较高, 相关系数在 0.87 以上, 对于成熟天数、籽棉产量和蒸发蒸腾量, 两种方法相关性介于 0.66~0.81。

2) 模型模拟灌水处理对初花天数无明显差异, 且模拟初花天数和最大叶面积指数存在参数敏感性过于单一现象。模型输出结果最大叶面积指数和蒸发蒸腾量存在一定的高估, 这是在新疆地区应用该模型需要改进的一个模块。

3) 各层土壤对模型不同输出结果影响不同。对于成熟天数, >40~80 cm 土壤参数敏感性更强, 对于地上干

物质质量和蒸发蒸腾量, >80~120 cm 土壤参数的敏感性更强。

4) 2 种敏感性分析方法结果表明, 模型模拟成熟天数的主要敏感参数为 EMFL、FLSD 和 SDPM; 籽棉产量的最敏感参数为 XFRT; 干物质质量的最敏感参数为 SLDR 和 SDUL3; 最大叶面积指数的最敏感参数为 SLAVR 和 EMFL; 蒸发蒸腾量的最敏感参数为 SDUL3。

5) SFDUR 对 6 个输出结果均不敏感, 可以设为定值。SALB、SLRO、SSKS1 仅对成熟天数敏感, 当研究内容对成熟天数要求较低时, 可以将以上参数设为定值。

[参 考 文 献]

- [1] 曹卫星, 罗卫红. 作物系统模拟及智能管理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [2] Saltelli A, Tarantola S, Campolongo F. Sensitivity analysis as an ingredient of modeling[J]. Statistical Science, 2000, 15(4): 377—395.
- [3] Marino S, Hogue I B, Ray C J, et al. A methodology for performing global uncertainty and sensitivity analysis in systems biology[J]. Journal of Theoretical Biology, 2008, 254: 178—196.
- [4] Munoz-Carpena R, Zajac Z, Kuo Y M. Global sensitivity and uncertainty analyses of the water quality model VFSMOD-W[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(5): 1719—1732.
- [5] Cariboni J, Gatelli D, Liska R, et al. The role of sensitivity analysis in ecological modelling[J]. Ecological Model, 2007, 203: 167—182.
- [6] Confalonieri R, Bellocchi G, Bregaglio S, et al. Comparison of sensitivity analysis techniques: A case study with the rice model WARM[J]. Ecological Model, 2010, 221: 1897—1906.
- [7] Vanuytrecht E, Raes D, Willems P. Global sensitivity analysis of yield output from the water productivity model[J]. Environmental Modelling & Software, 2014, 51(1): 323—332.
- [8] Refsgaard J C, van der Sluijs J P, Hojberg A L, et al. Uncertainty in the environmental modelling process—a framework and guidance[J]. Environmental Modelling & Software, 2007, 22(11): 1543—1556.
- [9] Confalonieri R, Bellocchi G, Tarantola S, et al. Sensitivity analysis of the rice model WARM in Europe: exploring the effects of different locations, climates and methods of analysis on model sensitivity to crop parameters[J]. Environmental Modelling & Software, 2010, 25(4): 479—488.
- [10] 吴锦, 余福水, 陈仲新, 等. 基于 EPIC 模型的冬小麦生长模拟参数全局敏感性分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 136—142.
Wu Jin, Yu Fushui, Chen Zhongxin, et al. Global sensitivity analysis of growth simulation parameters of winter wheat based on EPIC model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(7): 136—142. (In Chinese with English abstract)
- [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 Zhiwei, Chen Zhongxin, Zhou Qingbo, et al. Global sensitivity analysis of CERES-Wheat model parameters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural

- Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(1): 236—242. (In Chinese with English abstract)
- [12] 张静潇, 苏伟. 基于 EFAST 方法的 CERES-Wheat 作物模型参数敏感性分析[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(5): 149—154.
Zhang Jingxiao, Su Wei. Sensitivity analysis of CERES-Wheat model parameters based on EFAST method[J]. Journal of China Agricultural University, 2012, 17(5): 149—154. (In Chinese with English abstract)
- [13] 宋明丹, 冯浩, 李正鹏, 等. 基于 Morris 和 EFAST 的 CERES-Wheat 模型敏感性分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 124—131, 166.
Song Mingdan, Feng Hao, Li Zhengpeng, et al. Global sensitivity analyses of DSSAT—CERES—Wheat model using Morris and EFAST method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2014, 45(10), 124—131, 166. (In Chinese with English abstract)
- [14] Dejonge K C, Ascough J C, Ahmadi M, et al. Global sensitivity and uncertainty analysis of a dynamic agroecosystem model under different irrigation treatments[J]. Ecological Modelling, 2012, 231: 113—125.
- [15] Pathak T B, Fraisse C W, Jones J W, et al. Use of global sensitivity analysis for CROPGRO Cotton model development[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(6): 2295—2302.
- [16] Xie Yun, Kiniry J R, Williams J R. The ALMANAC model's sensitivity to input variables[J]. Agricultural Systems, 2003, 78(1): 1—16.
- [17] 刘刚, 谢云, 高晓飞, 等. ALMANAC 作物模型参数的敏感性分析[J]. 中国农业气象, 2008, 29(3): 259—263.
Liu Gang, Xie Yun, Gao Xiaofei, et al. Sensitivity analysis on parameters of ALMANAC crop model[J]. Chinese journal of agrometeorology, 2008, 29(3): 259—263. (In Chinese with English abstract)
- [18] Zhao Gang, Bryan B A, Song Xiaodong. Sensitivity and uncertainty analysis of the APSIM-wheat model: Interactions between cultivar, environmental, and management parameters[J]. Ecological Modelling, 2014, 279: 1—11.
- [19] Wang Jing, Li Xin, Lu Ling. Parameter sensitivity analysis of crop growth models based on the extended Fourier Amplitude Sensitivity Test method[J]. Environmental Modelling & Software, 2013, 48(8): 171—182.
- [20] Esmaeili S, Thomson N R, Tolson B A, et al. Quantitative global sensitivity analysis of the RZWQM to warrant a robust and effective calibration[J]. Journal of Hydrology, 2014, 511(1): 567—579.
- [21] 房全孝. 根系水质模型中土壤与作物参数优化及其不确定性评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 118—123.
Fang Quanxiao. Optimizing and uncertainty evaluation of soil and crop parameters in root zone water quality model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(10): 118—123. (in Chinese with English abstract)
- [22] 张寄阳, 段爱旺, 申孝军, 等. 基于蒸发量的膜下滴灌棉花灌溉预警装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 56—59, 89.
Zhang Jiyang, Duan Aiwang, Shen Xiaojun, et al. Design and experiment of scheduling irrigation device based on pan evaporation for drip-irrigated cotton under plastic mulch[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 56—59, 89. (in Chinese with English abstract)
- [23] 吴立峰, 张富仓, 周罕觅, 等. 滴灌施肥对北疆棉花水分利用率和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 137—146.
Wu Lifeng, Zhang Fucang, Zhou Hanmi, et al. Effect of drip irrigation and fertilizer application on water use efficiency and cotton yield in North of Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(20): 137—146. (In Chinese with English abstract)
- [24] Jones J W, Hoogenboom G, Porter C H, et al. The DSSAT cropping system model[J]. European Journal Agronomy, 2003, 18(3): 235—265.
- [25] Wilkerson G G, Jones J W, Boote K J, et al. SOYGR0 V5.0: Soybean Crop Growth and Yield Model[M]. Gainesville: University of Florida, 1985: 253.
- [26] Boote K J, Jones J W, Batchelor W D, et al. Genetic coefficients in the CROPGRO-Soybean model: Links to field performance and genomics[J]. Agronomy journal, 2003, 95(1): 32—51.
- [27] Diomides S Zamora, Shibu Jose, James W Jones, et al. Modeling cotton production response to shading in a pecan alley cropping system using CROPGRO[J]. Agroforestry Systems, 2009, 76(2): 423—435.
- [28] Ortiz B V, Hoogenboom G, Vellidis G, et al. Adapting the CROPGRO-Cotton model to simulate cotton biomass and yield under southern root-knot nematode parasitism[J]. Transactions of the ASABE, 2009, 52(6): 2129—2140.
- [29] Pathak T B, Jones J W, Fraisse C W, et al. Uncertainty analysis and parameter estimation for the CSM-CROPGRO-Cotton model[J]. Agronomy Journal, 2012, 104(5): 1363—1373.
- [30] Soler C M T, Hoogenboom G. Determining irrigation scheduling for cotton and peanut using cropping system models[C]. Proceedings of the 2007 World Environmental and Water Resources Congress: Restoring Our Natural Habitat. Reston: ASCE, 2007: 1—10.
- [31] Jagtap S S, Lal U, Jones J W, Gijsman A J, et al. Dynamic nearest-neighbor method for estimating soil water parameters[J]. Transactions of ASAE, 2004, 47(5): 1437—1444.
- [32] Morris M D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments[J]. Technometrics, 1991, 33(2): 161—174.
- [33] Campolongo F, Cariboni J, Saltelli A. An effective screening design for sensitivity analysis of large models[J]. Environmental Model & Software, 2007, 22(10): 1509—1518.
- [34] 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.
- [35] Cukier R, Levine H, Shuler K. Nonlinear sensitivity analysis of multi-parameter model systems[J]. Journal of Computational Physics, 1978, 26(1): 1—42.
- [36] Sobol I M. Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models[J]. Mathematical Modelling and Computational Experiments, 1993, 1(4): 407—414.
- [37] Saltelli A, Tarantola S, Campolongo F, et al. Sensitivity Analysis in Practice: A Guide to Assessing Scientific Models[M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2004.

- [38] Campolongo F, Saltelli A. Sensitivity analysis of an environment model: An application of different analysis methods[J]. Reliability Engineering & System Safety, 1997, 57(1): 49–69.
- [39] Farre I, Faci J M. Comparative response of maize(*Zea mays* L.) and sorghum(*Sorghum bicolor* L. Moench) to deficit irrigation in a Mediterranean environment[J]. Agricultural Water Management, 2006, 83(1/2): 135–143.
- [40] Melgar J C, Dunlop J M, Albrigo L G, et al. Winter drought stress can delay flowering and avoid immature fruit loss during late-season mechanical harvesting of ‘Valencia’ oranges[J]. Hort Science, 2010, 45(2): 271–276.

Sensitivity and uncertainty analysis for CROPGRO - cotton model at different irrigation levels

Wu Lifeng¹, Zhang Fucang^{1,2*}, Fan Junliang^{1,2}, Zhou Hanmi¹, Xing Yingying¹, Qiang Shengcai¹

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Yangling 712100, China)

Abstract: Process-based crop models use a large number of variety and soil parameters to simulate dynamic changes of crop growth and soil moisture. Many of the parameters are difficult to measure directly for different crop varieties or environments, recalibrations are often needed. Determining the importance of specific parameters to the model outputs is helpful to simplify the crop model calibrations. Sensitivity analysis (SA) can quantify the impact of input parameters on the model outputs and is helpful for model parameterizations. This study aimed to obtain model parameters of DSSAT-CROPGRO-Cotton model for irrigation schedule optimization of cotton in Xinjiang, China through sensitivity and uncertainty analyses. Based on the field cotton experiments in Shihezi Region of Xinjiang Uygur autonomous region, the Morris method and extended Fourier amplitude sensitivity test (EFAST) method were applied to analyze the sensitivity of six outputs of the CROPGRO-Cotton model to the variety and soil parameters at three irrigation levels. The model outputs included days of initial flowering and maturing, seed cotton yield, aboveground dry biomass, maximum leaf area index and evapotranspiration. In addition, the correlation between the two methods was analyzed and the uncertainty analysis was conducted for the model outputs from the EFAST method. Results showed that EFAST method was better than Morris method in sensitivity test. The Spearman rank correlation analysis showed that the correlation coefficient was between 0.87 and 0.93 for the aboveground dry biomass and maximum leaf area index, and between 0.66 and 0.81 for the days of maturing, seed cotton yield and evapotranspiration. The numbers of sensitive parameters was smaller from Morris method than EFAST method, indicating that Morris method may oversimplify sensitivity problem. Sensitivity and uncertainty analyses indicated that irrigation levels had no significant effects on the days of initial flowering and a simplistic parameter sensitivity issue existed for simulation of the days of initial flowering and maximum leaf area index. Soil parameters in different soil layers had different effects on the model outputs. The days of maturing were more sensitive to the soil parameters in soil layer of 40-80 cm, but the aboveground dry biomass and evapotranspiration were more sensitive to the soil parameters in soil layer of 80-120 cm. The maximum leaf area index and evapotranspiration were both overestimated to a certain extent, it was necessary to make an improvement so as to enhance the simulation accuracy before this model could be applied in Xinjiang. The most sensitive parameters for cotton mature days simulation was time between plant emergence and flower appearance (EMFL), time between the first flower and first seed (FLSD) and time between the first seed and physiological maturity (SDPM). The most sensitive parameters for seed cotton yield simulation was maximum fraction of daily growth that was partitioned to seed and shell (XFRT) and the most sensitive parameters for aboveground dry mass are drainage rate (SLDR) and field capacity in soil layer from 80 to 120 cm (SDUL3). The most sensitive parameters for evapotranspiration simulation was SDUL3. The parameter of seed filling duration for pod cohort at standard growth conditions (SFDUR) was not sensitive for all outputs and thus could be set as constant values. Surface albedo (SALB), runoff curve number (SLRO) and saturated hydraulic conductivity (SSKS1) were only sensitive to mature days. The results above would help to improve simulation efficiency and precision of CROPGRO-Cotton model in Xinjiang region.

Key words: sensitivity analysis; uncertainty analysis; irrigation; CROPGRO-Cotton model; Morris; EFAST