

基于EFAST的CROPGRO-Tomato模型参数全局敏感性分析

崔金涛¹ 邵光成¹ 林洁² 丁鸣鸣³

(1. 河海大学农业工程学院, 南京 210098; 2. 南京市江宁区水务局, 南京 211100;

3. 南京市水务局, 南京 210036)

摘要: 为了定量讨论番茄生长模型(DSSAT-CROPGRO-Tomato)中各参数对模拟输出结果的影响,运用扩展傅里叶幅度检验(EFAST)法,对影响番茄物候期、生长及生产等3类模型输出的各参数敏感性进行了研究,重点探讨了模型输入中品种参数、气象及土壤参数变化对模型输出结果的影响。结果表明:影响番茄开花期、坐果期和成熟期等物候期最敏感的品种参数和气象参数分别为初花期积温、日最低温度,而土壤参数对番茄物候期的影响可以忽略。影响番茄叶面积指数和冠层高度最敏感的品种参数为初花期积温,而影响番茄根、茎生长最敏感的品种参数为干物质分配比例,日最高温度和土壤田间持水率分别是影响番茄根、茎、叶生长最敏感的气象和土壤参数。影响番茄干物质质量和总产量最敏感的品种参数为初花期积温,而影响番茄收获数量和单果质量的品种参数为最大单籽粒质量,日最高温度和土壤田间持水率也分别是影响番茄生产最敏感的气象和土壤参数。

关键词: 番茄; 敏感性分析; EFAST; DSSAT模型; 物候期; 产量

中图分类号: S641.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)01-0237-08

OSID:



Global Sensitivity Analysis of CROPGRO-Tomato Model Parameters Based on EFAST Method

CUI Jintao¹ SHAO Guangcheng¹ LIN Jie² DING Mingming³

(1. College of Agricultural Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

2. Jiangning Water Affairs Bureau, Nanjing 211100, China 3. Nanjing Water Affairs Bureau, Nanjing 210036, China)

Abstract: Sensitivity analysis plays an essential role in the processes of crop model localization. It is important to quantify the sensitivity of input parameters of model for crop model calibration and application. In order to quantify the effects of input parameters variation on the sensitivity of CROPGRO-Tomato output variables, the extended Fourier amplitude sensitivity test method was applied to perform global sensitivity analysis. The most sensitive parameters for anthesis, fruit set and maturity date were the photothermal days in the early flowering period (EMFL) among the cultivar parameters, and the average minimum air temperature among climate parameters, while the phenology of tomato was not affected by soil parameters in the model. Among the cultivar parameters, the most sensitive parameters for leaf area index and canopy height was EMFL, while the most sensitive parameters for growth of root and stem was the maximum fraction of daily growth. The growth of root, stem and leaf was affected sensitively by the average maximum air temperature (TMXD) and the soil field capacity (SDUL) among climate and soil parameters, respectively. The most sensitivity parameters for the tops weight at maturity and fresh fruit weight was EMFL, while the most sensitivity parameter for number of fruits at maturity and single fruit weight was maximum weight per seed among cultivar parameters. TMXD and SDUL were also the most sensitivity parameters for tomato production among climate and soil parameters. The research result indicated that EFAST method was a feasible way for CROPGRO-Tomato model calibration and application.

Key words: tomato; sensitivity analysis; EFAST; DSSAT model; phenology; yield

收稿日期: 2019-07-24 修回日期: 2019-08-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879072)、中央高校基本科研业务费(学生项目)(2017B688X14)和江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX17_0432)

作者简介: 崔金涛(1991—),男,博士生,主要从事节水灌溉及作物模型模拟研究,E-mail: cuijintao@hhu.edu.cn

通信作者: 邵光成(1975—),男,教授,主要从事节水灌溉理论研究,E-mail: sgcln@126.com

0 引言

基于过程的作物模型,通常借助大量数学公式动态地描述作物生长过程及其与环境的关系,涉及光合、呼吸等复杂的生化过程,模型参数众多^[1-2]。作物模型在特定区域本地化、区域化应用前,需要对模型参数进行率定和适用性验证^[3-4]。然而模型中参数并不能全部通过试验获得,其中一些需根据前人经验从文献资料中获取^[3],而且一些田间观测数据因受天气情况、土壤质地、作物品种等因素影响而具有一定变异性。因此,进行模型参数的敏感性分析,确定各个参数对输出变量的影响程度,进而可以忽略敏感性较小的参数,而仅重点校准对输出变量影响较大的参数,有助于减少模型输入量、提高模型精度,是作物模型本地化、区域化应用过程中不可或缺的一环^[5-6]。

根据参数维度,敏感性分析方法分为局部敏感性分析和全局敏感性分析。局部敏感性分析主要计算单个参数变化对模型结果的影响程度,仅能分析参数对模型结果的直接影响,而忽略了参数间交互作用对模型的间接影响。全局敏感性分析则同时考虑多个参数变化及其参数之间相互作用对模型结果的影响,适用于输入参数较多的非线性模型。目前,常用的全局敏感性分析方法主要有 Morris 参数筛选法^[7]、傅里叶幅度检验法(FAST)^[8]、Sobol 法^[9]和扩展傅里叶幅度检验法(EFAST)^[10]等。EFAST 法由于融合了 FAST 和 Sobol 法的优点,不仅能够计算参数相互作用的影响,而且计算高效、准确^[11]。近年来,不少学者将 EFAST 全局敏感性分析方法应用到作物生长模型敏感性分析中,取得了良好的效

果^[2,12-15]。然而,针对以 CROPGRO - Tomato 为代表的番茄生长模型敏感性分析的研究尚未见报道。且已有研究大多集中在品种参数、土壤及田间管理参数上,对气象因素的敏感性分析鲜有涉及。

因此,本研究以 DSSAT - CROPGRO - Tomato 中自带的番茄模拟范例为基础,依据当地气象、土壤和田间管理试验数据,采用 EFAST 全局敏感性分析方法分析 CROPGRO - Tomato 模型中品种参数、土壤及气象参数对番茄产量、地上生物量等模拟结果的敏感性,以期为 CROPGRO - Tomato 模型的本地化中参数敏感性分析提供技术支撑,也为作物模型参数校正和模型应用提供方法借鉴。

1 材料与方法

1.1 CROPGRO - Tomato 模型及参数

CROPGRO - Tomato 模型是 DSSAT - CROPGRO 模型中的一个子模块,是在 SOYGR0 模型(大豆生长模型)的基础上发展起来的^[16]。CROPGRO - Tomato 模型以天为步长,可以动态模拟番茄在不同的气候、土壤及灌溉、施肥等情况下的生长发育过程,模型模拟需要输入数据包括气象数据、土壤属性、作物参数和田间管理 4 部分^[17]。

本研究所需的试验数据来源于 DSSAT - CROPGRO - Tomato 模型中自带编码为 UFGA0701 的试验。选取的模型番茄品种参数代码、含义及取值范围如表 1 所示,品种参数的上下限主要根据 DSSAT 模型 GLUE 调参工具中设置的番茄品种参数的上下限确定。试验模拟所需的气象、土壤参数代码、含义及取值范围如表 2 所示,气象参数的上下限设置为模型的设定值上下浮动 10%,通过模型中环

表 1 选取的 CROPGRO - Tomato 模型作物参数

Tab.1 Definition and intervals of cultivar parameters in CROPGRO - Tomato model

参数	下限值	上限值
出苗到初花期的积温(EMFL)/(°C·d ⁻¹)	10	35
初花期到第 1 个番茄产生的积温(FLSH)/(°C·d ⁻¹)	1	10
初花期到第 1 个籽粒产生的积温(FLSD)/(°C·d ⁻¹)	15	30
第 1 个籽粒产生到生理成熟的积温(SDPM)/(°C·d ⁻¹)	45	55
初花期到叶片停止扩展的积温(FLLF)/(°C·d ⁻¹)	45	55
最适条件下叶片最大光合速率(LFMAX)/(mg·m ⁻² ·s ⁻¹)	1.0	1.5
比叶面积(SLA VR)/(cm ² ·g ⁻¹)	280	320
单叶面积(SIZLF)/cm ²	280	320
干物质分配比例(XFRT)	0.5	0.9
最大单籽粒质量(WTPSD)/g	0.003	0.005
番茄果实膨大所需积温(SFDUR)/(°C·d ⁻¹)	20	30
正常条件下单个番茄平均籽粒数(SDPDV)	280	320
番茄膨大所需积温(PODUR)/(°C·d ⁻¹)	40	60
籽粒质量与番茄质量比(THRSH)	7	10

表 2 选取的 DSSAT 模型气象及土壤参数

Tab.2 Definition and intervals of climate and soil parameters in DSSAT model

参数	下限值	上限值	
气象参数	有效辐射强度 (SRAD)/(MJ·m ⁻² ·d ⁻¹)	-10% 设定值	+10% 设定值
	日最高温度 (TMXD)/°C	-10% 设定值	+10% 设定值
	日最低温度 (TMND)/°C	-10% 设定值	+10% 设定值
	降雨量 (PRED)/mm	-10% 设定值	+10% 设定值
土壤参数	地表反照率 (SALB)	0.15	0.19
	最大蒸发量 (SLU1)/mm	5.40	6.60
	排水比率 (SLDR)	0.36	0.44
	径流曲线数 (SLRO)	57.6	70.4
	土壤凋萎含水率 (SLLL)/(cm ³ ·cm ⁻³)	0.06	0.08
	土壤田间持水率 (SDUL)/(cm ³ ·cm ⁻³)	0.13	0.16
	土壤饱和含水率 (SSAT)/(cm ³ ·cm ⁻³)	0.33	0.40
	根系影响因子 (SRGF)	0.90	1.10
	土壤饱和和导水率 (SSKS)/(cm·h ⁻¹)	18.90	23.10
	土壤容重 (SBDM)/(g·cm ⁻³)	1.44	1.76
	有机碳含量 (SLOC)/%	1.27	1.55
	黏粒含量 (SLCL)/%	1.35	1.65
	砂粒含量 (SLSI)/%	1.35	1.65

境因子修正工具实现气象参数变化输入;土壤参数的上下限为设定值上下浮动 20%。本研究考虑模型的 3 类输出,即番茄物候期、生长指标及生产指标,其中物候期包括番茄初花期 (ADAP)、坐果期 (PD1P)、籽粒产生期 (PDFP) 及果实成熟期 (MDAP),生长指标包括番茄叶面积指数 (LAIX)、冠层高度 (CHTD)、叶质量 (LWAD)、茎质量 (SWAD) 及根质量 (RWAD),生产指标包括番茄数量 (H#AM)、地上干物质量 (CWAM)、番茄收获时鲜质量 (FPWAD) 及单果质量 (AFPWD) 等。

1.2 EFAST 方法

扩展傅里叶幅度检验 (EFAST) 法是 SALTELLI 等^[10]在 FAST 法的基础上,结合 Sobol 法的优点改进的一种基于方差分解的全局敏感性分析方法。其算法简单介绍如下:

设有模型 $y=f(x_1, x_2, \dots, x_m)$, 通过合适的转换函数可将其转换为 $y=f(s)$ 。转换函数为

$$x_i = 0.5 + \frac{\arcsin(\sin(\omega_i s + \varphi_i))}{\pi} \quad (1)$$

$$y = f(s) = \sum_{p=-\infty}^{\infty} (A_p \cos(ps) + B_p \sin(ps)) \quad (2)$$

其中 $A_p = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(px) dx \quad (3)$

$$B_p = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(px) dx \quad (4)$$

式中 ω_i ——每个参数 x_i 的振荡频率, $i=1, 2, \dots, m$
 φ_i ——每个参数 x_i 的随机初相位, 取值范围为 $[0, 2\pi]$
 s ——标量变量, 取值范围为 $[-\pi, \pi]$

p ——变换参数, $p \in Z$

A_p, B_p ——傅里叶振幅

傅里叶级数的频谱定义为

$$A_p = A_p^2 + B_p^2 \quad (5)$$

参数 x_i 变化引起的模型输出方差 V_i 为

$$V_i = \sum_{p \in Z} A_p \omega_i = 2 \sum_{p=1}^{\infty} A_p \omega_i \quad (6)$$

其中 $p \in Z = \{-\infty, \dots, -1, 1, \dots, +\infty\}$

模型总方差为

$$V = \sum_{p \in Z} A_p = 2 \sum_{p=1}^{\infty} A_p \quad (7)$$

对标量 s 在 $[-\pi, \pi]$ 中等间隔取样, 傅里叶振幅 A_p 和 B_p 近似计算式为

$$A_p \approx \frac{1}{N_s} \sum_{k=1}^{N_s} f(s_k) \cos(p's_k) \quad (8)$$

$$B_p \approx \frac{1}{N_s} \sum_{k=1}^{N_s} f(s_k) \sin(p's_k) \quad (9)$$

式中 N_s ——取样总数

p' ——变化参数, $p' \in \left\{ -\frac{N_s-1}{2}, \dots, -1, 0, 1, \dots, \frac{N_s-1}{2} \right\}$

s_k ——标量 s 的第 k 个取样值

模型总方差可分解为

$$V = \sum_{1 \leq i \leq m} V_i + \sum_{1 \leq i < j \leq m} V_{i,j} + \sum_{1 \leq i \leq j \leq k \leq m} V_{i,j,k} + \dots + V_{1,2,\dots,m} \quad (10)$$

式中 V_i ——参数 x_i 变化自身引起的模型方差

$V_{i,j}$ ——参数 x_i 通过参数 x_j 作用贡献的方差

$V_{1,2,\dots,m}$ ——参数 x_1 通过其余 $m-1$ 个参数相互作用贡献的方差

通过归一化处理,参数 x_i 的一阶敏感性指数 S_i 可表示其对模型输出总方差的直接贡献,即

$$S_i = \frac{V_i}{V} \quad (11)$$

总敏感性指数为

$$S_{Ti} = \frac{V - V_{-i}}{V} \quad (12)$$

式中 V_{-i} ——不包括参数 x_i 的所有参数方差之和

1.3 模型参数敏感性分析方案

敏感性分析借助敏感性和不确定性分析软件 SimLab (Version 2.3) 实现;使用 RStudio 编写程序,调用 CROPGRO 模型进行批量运算,并进行结果统计。具体方案如下:

(1) 品种参数敏感性分析。在试验数据及文献数据的基础上,取各试验测量参数的平均值为 CROPGRO-Tomato 模型输入值,以 DSSAT 指导手册和已有研究结果中番茄品种参数取值范围为取样区间进行敏感性分析。

(2) 模型气象参数敏感性分析。以 DSSAT 模型中已验证的作物品种参数为模型品种参数输入值,以试验实测气象数据为基准上下浮动 10% 作为模型气象输入参数取值的上下限,其他土壤及其田间管理参数保持不变。

(3) 模型土壤参数敏感性分析。以 DSSAT 模型中自带的作物品种参数为模型品种参数输入值,以试验实测土壤数据为基准上下浮动 20% 作为模型土壤输入参数取值的上下限,其他气象及其田间管理参数保持不变。

以上所有变量都服从均匀分布,在对参数随机取样的过程中,EFast 法认为采样次数大于参数个数 65 倍的分析结果才有意义,本研究中每次采样次数为参数数量的 80 倍。

2 结果与分析

2.1 品种参数敏感性分析

番茄 14 个品种参数对物候期的一阶敏感性指数和全局敏感性指数分析结果如表 3 所示。EMFL 是影响番茄 ADAP、PD1P 最为敏感参数,EMFL 的一阶敏感性指数分别为 0.40 和 0.95,全局敏感性指数为 0.92 和 0.97,即 EMFL 可解释初花期和坐果期变化方差的 92% 和 97%。对于 PDFP、EMFL 和 FLSD 为大于 0.10 的一阶敏感性指数,也是前两个最大的全局敏感性指数,其平均全局敏感性指数分

别为 0.90 和 0.12,其他因子影响较小。对于 MDAP,平均全局敏感性指数最大的前 5 个因子分别为 EMFL、SDPM、WTPSD、FLSH、PODUR。

表 3 作物品种参数对番茄物候期的敏感性指数

Tab.3 Global sensitivity index of cultivar parameters for phenology of tomato

参数	ADAP		PD1P		PDFP		MDAP	
	一阶	全局	一阶	全局	一阶	全局	一阶	全局
EMFL	0.40	0.92	0.95	0.97	0.88	0.90	0.28	0.84
FLSH	0.08	0.60	0.01	0.03		0.02	0.02	0.27
FLSD	0.08	0.60	0.03	0.06	0.10	0.12		
SDPM	0.08	0.60		0.02		0.02	0.20	0.77
FLLF	0.08	0.60		0.02		0.02		
LFMAX		0.02		0.02		0.02	0.01	0.14
SLAVR		0.02		0.02		0.02		
SIZLF		0.02		0.02		0.03		
XFRT	0.08	0.60		0.02		0.02		
WTPSD	0.08	0.60		0.03		0.03	0.09	0.64
SFDUR	0.08	0.60		0.02		0.02	0.01	0.14
SDPDV	0.08	0.60		0.02		0.02	0.01	0.14
PODUR		0.02		0.03		0.03	0.02	0.27
THRSH	0.08	0.60		0.02		0.02		

品种参数对番茄 LAIX、CHTD、LWAD、SWAD、RWAD 的一阶敏感性指数和全局敏感性指数如表 4 所示。对 LAIX,平均一阶敏感性指数最大的前 2 个因子为 EMFL 和 XFRT,其他因子很小,均不大于 0.05;平均全局敏感性指数最大的前 2 个因子也是 EMFL 和 XFRT,平均值分别为 0.51 和 0.21。对于 CHTD,仅有 EMFL 为大于 0.10 的一阶敏感性指数,也是最大的全局敏感性指数。EMFL 和 XFRT 均是影响番茄叶质量、净质量和根质量最为敏感的参数,其他因子的敏感性指数均小于 0.10。

品种参数对番茄生产中 H#AM、CWAM、FPWAD 和 AFPWD 的一阶敏感性指数和全局敏感性指数如表 5 所示。对 H#AM,平均一阶敏感性指数大于 0.10 的因子为 WTPSD 和 XFRT,而平均全局敏感性指数大于 0.1 的因子有 WTPSD、XFRT、SFDUR、FLSH、FLLF、FLSD、FLMAX、PODUR 和 THRSH。对于 CWAM 及 FPWAD 而言,EMFL 和 LFMAX 的一阶敏感性指数和全局敏感性指数均超过了 0.10,是影响最大的 2 个品种参数。而对于 AFPWD,平均全局敏感性指数最大的前 3 个因子分别为 WTPSD、LFMAX 和 FLSD,平均值分别为 0.78、0.25 和 0.23。

2.2 气象参数敏感性分析

气象参数对番茄物候期的敏感性分析结果表明,仅有 TMXD、TMND 对番茄初花期、坐果期、籽粒形成期和成熟期的一阶敏感性指数和全局敏感性指

表 4 作物品种参数对番茄生长指标模拟的敏感性指数

Tab. 4 Global sensitivity index of cultivar parameters for growth indexes of tomato

参数	LAIX		CHTD		LWAD		SWAD		RWAD	
	一阶	全局	一阶	全局	一阶	全局	一阶	全局	一阶	全局
EMFL	0.49	0.51	0.97	0.99	0.41	0.42	0.25	0.27	0.10	0.13
FLSH		0.02		0.02		0.02		0.02	0.01	0.03
FLSD	0.01	0.03		0.03	0.01	0.03	0.02	0.04	0.03	0.05
SDPM		0.02		0.02	0.02	0.06	0.02	0.09		0.03
FLLF	0.03	0.04		0.02	0.02	0.04		0.02	0.01	0.03
LFMAX	0.02	0.04		0.02	0.03	0.04	0.03	0.05	0.05	0.06
SLAVR	0.05	0.08		0.02		0.03		0.03		0.03
SIZLF		0.02		0.03		0.02		0.03		0.03
XFRT	0.18	0.21		0.03	0.31	0.34	0.55	0.57	0.77	0.80
WTPSD		0.02		0.02		0.02		0.02		0.02
SFDUR		0.02		0.02		0.02		0.03	0.01	0.03
SDPDV		0.02		0.03		0.02		0.02		0.02
PODUR	0.01	0.03		0.03	0.02	0.06	0.08	0.14	0.05	0.10
THRSH	0.01	0.02		0.02	0.01	0.02	0.01	0.03	0.01	0.03

表 5 作物品种参数对番茄生产指标模拟的敏感性指数

Tab. 5 Global sensitivity index of cultivar parameters for production indexes of tomato

参数	H#AM		CWAM		FPWAD		AFPWD	
	一阶	全局	一阶	全局	一阶	全局	一阶	全局
EMFL	0.07	0.17	0.59	0.62	0.84	0.95	0.03	0.10
FLSH	0.02	0.27		0.03		0.03	0.03	0.16
FLSD	0.01	0.19		0.02		0.02	0.14	0.23
SDPM		0.06		0.04		0.03	0.06	0.15
FLLF	0.01	0.21		0.02		0.03	0.01	0.19
LFMAX	0.08	0.18	0.11	0.13	0.33	0.37		0.25
SLAVR		0.06		0.02		0.02		0.13
SIZLF		0.10		0.04		0.03		0.07
XFRT	0.22	0.44	0.03	0.04	0.12	0.15	0.01	0.10
WTPSD	0.74	0.86		0.02		0.02	0.68	0.78
SFDUR	0.02	0.30		0.02		0.02	0.01	0.11
SDPDV		0.05		0.02		0.02	0.01	0.05
PODUR	0.02	0.14		0.03		0.02	0.02	0.07
THRSH	0.06	0.12		0.02		0.04	0.04	0.10

表 7 气象参数对番茄生长指标模拟的敏感性指数

Tab. 7 Global sensitivity index of climate parameters for growth indexes of tomato

参数	LAIX		CHTD		LWAD		SWAD		RWAD	
	一阶	全局	一阶	全局	一阶	全局	一阶	全局	一阶	全局
SRAD	0.01	0.09	0.08	0.16	0.01	0.09	0.01	0.09	0.01	0.09
TMXD	0.88	0.97	0.49	0.57	0.90	0.99	0.88	0.97	0.89	0.98
TMND	0.02	0.10	0.37	0.45		0.09	0.03	0.10	0.01	0.09
PRED	0.01	0.07	0.01	0.06	0.01	0.09	0.01	0.07	0.01	0.08

气象参数对番茄生产指标的敏感性分析结果如表 8 所示。4 个气象因子对番茄生产指标 H#AM、CWAM、FPWAM 和 AFPWD 的敏感度均较高,其中

数超过 0.10,其他因子 SRAD 和 PRED 的影响均可忽略不计(表 6)。

表 6 气象参数对番茄物候期的敏感性指数

Tab. 6 Global sensitivity index of climate parameters for phenology of tomato

参数	ADAP		PD1P		PDFP		MDAP	
	一阶	全局	一阶	全局	一阶	全局	一阶	全局
SRAD	0.01	0.08	0.01	0.08	0.01	0.07	0.01	0.07
TMXD	0.27	0.34	0.30	0.40	0.20	0.27	0.21	0.23
TMND	0.67	0.75	0.61	0.73	0.73	0.82	0.75	0.86
PRED	0.01	0.05	0.01	0.05	0.01	0.05	0.01	0.05

气象参数对番茄生长指标的敏感性指数与物候期略有不同(表 7)。对 LAIX、LWAD、SWAD 和 RWAD 而言,仅有 TMXD 的一阶敏感性指数和全局敏感性指数超过了 0.10,是引起这些生长指标变化的最关键的气象参数。对于 CHTD,气象参数中的 TMXD、TMND 和 SRAD 是影响 CHTD 最重要的 3 个因子,一阶敏感性指数和全局敏感性指数均超过了 0.10。

最敏感的是温度因子(TM XD 和 TMND)。虽然 PRED 对所有的生产指标一阶敏感性指数小于 0.10,但是其全局敏感性指数均超过了 0.10,表明

表8 气象参数对番茄生产指标模拟的敏感性指数

Tab.8 Global sensitivity index of climate parameters for production indexes of tomato

参数	H#AM		CWAM		FPWAD		AFPWD	
	一阶	全局	一阶	全局	一阶	全局	一阶	全局
SRAD	0.02	0.06	0.13	0.21	0.02	0.09	0.02	0.18
TMXD	0.50	0.68	0.27	0.37	0.87	0.96	0.62	0.87
TMND	0.25	0.43	0.34	0.44	0.01	0.09	0.10	0.30
PRED	0.01	0.21	0.12	0.01	0.10	0.10	0.01	0.18

PRED对番茄生产指标的影响主要通过其他因子的交互作用实现。

2.3 土壤参数敏感性分析

土壤参数对番茄物候期的敏感性分析结果表明,所选取的土壤参数中,番茄初花期仅SLU1、SSAT和SLOC3个参数的敏感度较高,全局敏感性指数分别为0.18、0.18和0.22;但是其一阶敏感性指数仅为0.01~0.02,说明此3个参数主要通过与其他参数的交互作用影响番茄初花期。而对于PD1P、PDFP和MDAP,土壤参数对其的一阶敏感性

指数和全局敏感性指数均可忽略不计。

土壤参数对番茄叶面积指数、冠层高度、叶质量、茎质量、根质量的一阶敏感性指数和全局敏感性指数如表9所示。对于LAIX,平均一阶敏感性指数大于0.10的因子为SDUL、SLLL,而平均全局敏感性指数大于0.10的因子有SDUL、SLLL、SALB、SLDR、SLSI、SLRO、SLCL、SBDM和SRGF。对于CHTD,仅有SDUL的一阶敏感性指数大于0.10,但是所有土壤参数的全局敏感性指数均超过了0.10,表明除SDUL外,土壤各参数均通过交互作用影响番茄冠层高度的变化。叶质量、茎质量2项生长指标的敏感性分析结果类似,平均全局敏感性指数最大的前5个因子均为SDUR、SLLL、SLDR、SALB和SLRO;对于根质量而言,平均全局敏感性指数最大的前5个因子为SLRO、SDUL、SLDR、SALB和SLLL。虽然影响叶质量、茎质量和根质量的土壤因子相同,但是全局敏感性指数排序不同,表明对各土壤因子的敏感程度也不同。

表9 土壤参数对番茄生长指标的敏感性指数

Tab.9 Global sensitivity index of soil parameters for growth indexes of tomato

参数	LAIX		CHTD		LWAD		SWAD		RWAD	
	一阶	全局	一阶	全局	一阶	全局	一阶	全局	一阶	全局
SALB	0.09	0.38	0.03	0.16	0.16	0.26	0.13	0.22	0.11	0.78
SLU1		0.08	0.01	0.16		0.08		0.06		0.07
SLDR	0.03	0.22	0.01	0.31		0.27		0.23	0.15	0.8
SLRO	0.01	0.19	0.01	0.27	0.03	0.22	0.01	0.14	0.11	0.89
SLLL	0.12	0.69	0.04	0.36	0.12	0.71	0.13	0.69	0.13	0.73
SDUL	0.30	0.84	0.50	0.96	0.27	0.85	0.30	0.86	0.26	0.85
SSAT		0.08	0.02	0.19		0.08		0.07		0.08
SRGF	0.01	0.12	0.01	0.19		0.05		0.05	0.02	0.19
SSKS	0.01	0.09	0.01	0.12	0.01	0.09	0.01	0.07	0.01	0.09
SBDM	0.02	0.13	0.03	0.21		0.09		0.07	0.01	0.22
SLOC		0.09		0.15		0.10		0.07		0.08
SLCL	0.01	0.14	0.02	0.15	0.01	0.17	0.01	0.13	0.01	0.17
SLSI	0.02	0.21	0.02	0.24	0.03	0.21		0.13	0.05	0.52

对于番茄生产指标而言,一阶敏感性指数和全局敏感性指数结果表明,SDUL和SLLL均是对H#AM、CWAM和FPWAM最为敏感的两个土壤参数(表10)。对于AFPWD,平均全局敏感性指数最大的前5个因子为SLSI、SDUL、SLDR、SLLL和SALB,其平均值分别为0.89、0.87、0.69、0.68和0.60。

3 讨论

局部敏感性分析仅仅考虑单个参数对模型输出结果的影响,往往因忽视参数间的交互作用而弱化了部分关键因子,从而导致模型的本地化结果不尽如人意^[3]。扩展傅里叶幅度检验法作为全局敏感

性分析方法的一种,不仅考虑了参数间的交互作用,而且可以量化各参数对输出结果的主效应和交互效应^[10]。本研究通过使用EFAST法对CROPGRO-Tomato模型的品种参数、气象及土壤参数进行了全局敏感性分析。从全局敏感性分析来看,对番茄物候期最敏感的参数是与积温有关的参数。出苗到初花期的积温对开花期、坐果期及成熟期都最为敏感。吴立峰等^[12]关于CROPGRO-Cotton模型的全局敏感性也证实了初花期和成熟期的最主要敏感参数为EMFL、FLSD和SDPM等与积温有关的因子。然而,在不同的灌溉方式下,也有研究表明,CROPGRO模型中EMFL对作物成熟期并不敏感^[18]。在DSSAT模型中,对作物物候期的确定主要根据积温和光周

表 10 土壤参数对番茄生产指标的敏感性指数
Tab. 10 Global sensitivity index of soil parameters
for production indexes of tomato

参数	H#AM		CWAM		FPWAD		AFPWD	
	一阶	全局	一阶	全局	一阶	全局	一阶	全局
SALB	0.13	0.21	0.12	0.20	0.12	0.20	0.10	0.60
SLU1		0.08		0.07		0.08		0.06
SLDR		0.23		0.23		0.23	0.13	0.69
SLRO		0.13		0.13		0.12		0.10
SLLL	0.13	0.69	0.12	0.70	0.12	0.70	0.15	0.68
SDUL	0.29	0.86	0.29	0.86	0.29	0.86	0.29	0.87
SSAT		0.07		0.08		0.08		0.07
SRGF		0.04		0.04		0.04	0.02	0.13
SSKS	0.01	0.08	0.01	0.08	0.01	0.08	0.01	0.08
SBDM		0.07		0.07		0.07	0.02	0.35
SLOC		0.08		0.09		0.09		0.07
SLCL	0.01	0.13	0.01	0.15	0.01	0.15	0.01	0.15
SLSI		0.11		0.11		0.11	0.11	0.89

期来计算,与作物积温直接相关因子为作物生长过程中日最高温度和最低温度,这也解释了 TMXD 和 TMND 是气象参数中对番茄物候期最为敏感的参数。土壤参数中仅有 SLOC、SSAT 和 SLU1 对初花期有影响,且主要是通过其他参数的交互作用引起的,其主效应引起的变化可以忽略不计。其他土壤参数对番茄初花期、坐果期及成熟期等物候期没有影响,因为模型中物候期的模拟基本上不考虑土壤因子的作用,这也与同样基于积温设计的 APSIM 模型敏感性分析结果一致^[1]。

对于番茄生长指标而言,在品种参数中,与积温有关的 EMFL 和番茄干物质分配有关的 XFRT 均对番茄生长有较强的敏感性,表明模拟番茄生长状况不仅考虑了初花期的影响,而且考虑了番茄光合作用生成干物质质量的分配情况^[12]。气象参数中番茄生长受日最高温度影响的敏感性要强于日最低温度,这可能是因为模型计算积温时依据温度超过作物模型设定的最低温度才启动计算积温导致的。在土壤参数中,田间持水率和凋萎系数是影响番茄生长的最敏感因子,主要通过影响各层土壤蒸发蒸腾

量而影响各层土壤水分,进而影响作物根系吸水及生长状况^[12]。

作物生产力及产量模拟是作物模型应用的一个重要方面^[19-20]。对于番茄生产力指标而言,同番茄生长指标类似,在 14 个品种参数中,地上干物质量及番茄总产量对番茄初花的积温最敏感,而番茄收获数量及单果质量对番茄最大单籽粒质量最敏感。番茄产量的模拟实质上是番茄干物质生产及后期分配过程的模拟^[21],这也解释了日最高温度是影响番茄产量及干物质量最敏感参数的原因。在土壤参数中,与土壤含水率有关的参数(田间持水率、凋萎系数和排水比率)是影响番茄生产指标最敏感的因素。吴立峰等^[12]在 CROPGRO - Cotton 模型中也证实田间持水率和排水比率是影响干物质量模拟的最敏感参数。DSSAT 模型中干旱胁迫主要以土壤含水率参数进行计算,土壤含水率降低导致番茄模拟产量降低也与现实中一些亏缺灌溉试验结果相符^[22-23]。

4 结论

(1) 对于番茄物候期,初花期积温是影响番茄开花期、坐果期及成熟期最敏感的品种参数,日最低温度是影响番茄开花期、坐果期及成熟期最敏感的气象参数,而土壤参数对番茄物候期影响不大。

(2) 对于番茄生长指标,初花期积温是影响番茄叶面积指数、冠层高度及叶质量最敏感的品种参数,干物质分配比例是影响番茄茎质量和根质量最敏感的品种参数,日最高温度和田间持水率分别是影响番茄生长最敏感的气象和土壤参数。

(3) 对于番茄生产指标,最大单籽粒质量是影响番茄收获数量及单果质量最敏感的品种参数,而初花期积温是影响番茄干物质量和总产量最敏感的品种参数,日最高温度是影响番茄收获数量、总产量和单果质量最敏感的气象参数,田间持水率是影响番茄收获产量、干物质量及单果质量最敏感的土壤参数。

参 考 文 献

- [1] 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, 2015,31(14):148 - 157.
HE Liang, ZHAO Gang, JIN Ning, et al. Global sensitivity analysis of APSIM - Wheat parameters in different climate zones and yield levels[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(14):148 - 157. (in Chinese)
- [2] 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/OL]. 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 methods[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(10):124 - 131, 166. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20141020. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.020. (in Chinese)

- [3] 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 CSAE, 2009, 25(7): 136-142. (in Chinese)
- [4] 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 CSAE, 2012, 28(10): 118-123. (in Chinese)
- [5] 谭君位. 作物模型参数敏感性和不确定性分析方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- [6] 邢会敏, 相诗尧, 徐新刚, 等. 基于 EFAST 方法的 AquaCrop 作物模型参数全局敏感性分析[J]. 中国农业科学, 2017, 50(1): 64-76.
XING Huimin, XIANG Shiyao, XU Xin'gang, et al. Global sensitivity analysis of AquaCrop crop model parameters based on EFAST method[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(1): 64-76. (in Chinese)
- [7] MORRIS M D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments[J]. Technometrics, 1991, 33(2): 161-174.
- [8] CUKIER R I, LEVINE H B, SHULER K E. Nonlinear sensitivity analysis of multiparameter model systems[J]. Journal of Computational Physics, 1978, 26(1): 1-42.
- [9] SOBOL I M. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2001, 55(1): 271-280.
- [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] WANG Jing, LI Xin, LU Ling, et al. Parameter sensitivity analysis of crop growth models based on the extended Fourier Amplitude Sensitivity Test method[J]. Environmental Modelling & Software, 2013, 48: 171-182.
- [12] 吴立峰, 张富仓, 范军亮, 等. 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.
WU Lifeng, ZHANG Fucang, FAN Junliang, et al. Sensitivity and uncertainty analysis for CROPGRO-cotton model at different irrigation levels[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(15): 55-64. (in Chinese)
- [13] 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 CSAE, 2011, 27(1): 236-242. (in Chinese)
- [14] 何亮, 侯英雨, 赵刚, 等. 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, 2016, 32(2): 169-179.
HE Liang, HOU Yingyu, ZHAO Gang, et al. Parameters optimization of WOFOST model by integration of global sensitivity analysis and Bayesian calibration method[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(2): 169-179. (in Chinese)
- [15] 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.
- [16] JONES J W, HOOGENBOOM G, PORTER C H, et al. The DSSAT cropping system model[J]. European Journal of Agronomy, 2003, 18(3-4): 235-265.
- [17] HOOGENBOOM G, PORTER C H, SHELIA V, et al. Decision support system for agrotechnology transfer (DSSAT) version 4.7.5[M]. Gainesville: DSSAT Foundation, 2019.
- [18] 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.
- [19] HE Jianqiang, DUKES M D, HOCHMUTH G J, et al. Identifying irrigation and nitrogen best management practices for sweet corn production on sandy soils using CERES - Maize model[J]. Agricultural Water Management, 2012, 109: 61-70.
- [20] HE Jianqiang, CAI Huanjie, BAI Jiangping. Irrigation scheduling based on CERES - Wheat model for spring wheat production in the Minqin Oasis in Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2013, 128: 19-31.
- [21] BOOTE K J, RYBAK M R, SCHOLBERG J M S, et al. Improving the CROPGRO - Tomato model for predicting growth and yield response to temperature[J]. Horticultural Science, 2012, 47(8): 1038-1049.
- [22] PULUPOL L U, BEHBOUDIAN M H, FISHER K J. Growth, yield, and postharvest attributes of glasshouse tomatoes produced under deficit irrigation[J]. Horticultural Science, 1996, 31(6): 926-929.
- [23] CHEN Jinliang, KANG Shaozhong, DU Taisheng, et al. Quantitative response of greenhouse tomato yield and quality to water deficit at different growth stages[J]. Agricultural Water Management, 2013, 129(11): 152-162.