

赵子龙,姚名泽,李 波. 不同灌水水平下 CROPGRO - Tomato 模型局部敏感性分析[J]. 江苏农业科学,2021,49(9):183 - 189.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.09.033

不同灌水水平下 CROPGRO - Tomato 模型局部敏感性分析

赵子龙¹,姚名泽²,李 波²

[1. 耐特菲姆(广州)农业科技有限公司,广东广州 511400;2. 沈阳农业大学水利学院,辽宁沈阳 110866]

摘要:依据辽宁沈阳地区进行的温室番茄田间试验资料,进行不同灌水水平下 CROPGRO - Tomato 模型的局部敏感性分析,在 4 个灌水处理(田间持水率为 50%、60%、70% 和 80%)条件下,采用扰动分析法分析番茄鲜果模拟产量对 6 个作物品种参数的局部敏感性。结果表明,在 4 种不同灌水处理条件下模拟产量对参数 SD - PM、LFMAX、SLAVR 和 XFRT 的敏感度为 IV ~ V,敏感度较高;其中,模拟产量对参数 FL - SH、FL - SD 和 SD - PM 敏感度的变异系数分别为 40.43%、117.1% 和 35.71%,受灌水水平影响较大。

关键词:DSSAT;CROPGRO - Tomato;番茄;局部敏感性分析;扰动分析法;日光温室

中图分类号:S274 **文献标志码:**A **文章编号:**1002 - 1302(2021)09 - 0183 - 07

许多学者对日光温室番茄节水高产的灌溉模式进行大量的研究^[1-5],但多数研究采用传统的温室试验方法,耗费了大量的时间、人力、财力,而试验结果的适用性普遍较弱。近年来,田间试验与作物生长模拟模型相结合的方法在作物生长管理中得到了应用和发展,其中农业技术转移决策支持系统(decision support system for agrotechnology transfer, DSSAT)是目前使用最广泛的作物生长模型之一。作为作物生长过程模型之一, DSSAT 模型中的公式须要进行基于现实的假设和简化,所以模型模拟结果也会随之产生不确定性^[6]。以往的研究表明, DSSAT 模型的输入参数众多,模型中不同作物的参数有所不同,在不同地区应用时参数的敏感性也会不同^[7]。敏感性分析可以量化每一个参数对于模型模拟结果的影响,是体现模型对不确定因素变化响应的重要步骤。

近年来,模型参数的敏感性分析已经成为学者的研究热点,对 DSSAT 模型中的 CERES - Wheat 模型^[7-9]、CERES - Maize 模型^[10] 和 CROPGRO - Cotton 模型^[11] 进行的敏感性分析结果表明,不同条件下输入参数的敏感性存在差异,因此提高模型在不同地区的模拟精度具有重要意义。Dejonge 等研

究表明,充分灌溉和亏水灌溉对玉米作物品种参数的敏感度有较大影响^[10];吴立峰等研究表明,不同灌水水平对棉花作物品种参数的敏感度有较大影响^[12]。从以往对 CROPGRO - Tomato 的研究来看,Boote 等研究表明,对主要温度参数进行修改会提高模型的模拟精度,这对模型的应用起着关键性作用^[13];Ventrella 等研究表明,温度条件对番茄产量影响比灌水条件更为有效^[14]。然而,对温室不同灌水水平下 CROPGRO - Tomato 模型模拟精度的研究还不是很多,因此在进行精度研究之前对模型进行局部敏感性分析的研究就显得尤为必要。

本试验以温室番茄为研究对象,采用扰动分析方法对 DSSAT - CROPGRO - Tomato 模型进行局部敏感性分析,研究不同灌水水平下温室番茄产量对品种参数的敏感性,以期对 GROPGRO - Tomato 模型参数估计和模型应用提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 CROPGRO - Tomato 模型简介

CROPGRO 系列模型集成于 DSSAT 作物模型软件中,该系列模型包括众多作物模型,如棉花、大豆、花生、番茄模型等。各作物子模型的结构基本一致,主要模块有作物品种、土壤参数、气象参数和田间管理模块。土壤参数包括土壤水分、土壤组成、土壤温度、土壤碳、氮转化量等。气象参数主要包括逐日最高最低气温、太阳辐射量、降水量、平均风速、相对湿度、大气压强等。田间管理模块主要负责各种管理措施,包括播种日期、播种方式、灌

收稿日期:2020 - 08 - 14

基金项目:辽宁省自然科学基金(编号:2015020770)。

作者简介:赵子龙(1992—),男,辽宁沈阳人,硕士,从事农业节水灌溉工程设计与管理相关研究。E - mail:1016778334@qq.com。

通信作者:李 波,博士,教授,从事节水灌溉和生态环境工程相关研究。E - mail:250077704@qq.com。

水、施肥、作物残茬等。

CROPGRO 系列模型有 3 类描述作物生长发育和产量的参数:物种参数、生态型参数和品种参数,其中品种参数的敏感性分析最为重要,因此确定品种参数的敏感性也就成为模型校正和验证的关键。

1.2 CROPGRO - Tomato 模型输入数据

本研究中 CROPGRO - Tomato 模型运行所使用的气象数据、土壤数据、田间管理数据等均来源于 2016 年辽宁省沈阳市沈阳农业大学试验基地 43 号日光温室。试验区位于 41°44'N、123°27'E,年平均最高气温 29.0℃,年平均最低气温 -20.0℃,平均气温 7.0~8.1℃,年平均降水量 574.4~684.8 mm。温室内土壤剖面理化性质数据为 43 号日光温室实际测量(表 1)。模型所用气象数据来源

于沈阳农业大学 43 号日光温室内多要素自动气象站(图 1、图 2)。模型田间管理数据来源于试验监测。

试验共设 4 个处理,每个处理 3 个重复,4 个处理全生育期的灌水上限均为田间持水率,全生育期的灌水下限分别为田间持水率的 50% (W1)、60% (W2)、70% (W3)、80% (W4)。供试番茄品种为粉冠一号。番茄于 2016 年 3 月 22 日定植,此为模型开始模拟日期;播种方式为移栽,株距 40 cm,行距 50 cm,播种深度 5 cm;番茄生长过程中共计施 N 含量 179.49 kg/hm²、P₂O₅ 含量 59.83 kg/hm²、K₂O 含量 658.12 kg/hm²;其他管理措施如打叉、病虫害防治、疏果等按常规田间管理进行。

表 1 试验地土壤理化性质

土层深度 (cm)	容重 (g/cm ³)	饱和含水率 (%)	田间持水率 (%)	凋萎系数 (%)	pH 值	全氮含量 (g/kg)	全磷含量 (g/kg)	全钾含量 (g/kg)	有机质含量 (g/kg)	速效氮含量 (mg/kg)	速效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)
0~10	1.28	35	28	9	7.93	0.42	1.07	15.70	8.20	29.95	2.87	72.92
10~20	1.30	34	29	10	8.18	0.43	1.22	13.71	10.05	30.95	2.94	73.23
20~30	1.31	34	27	9	8.16	0.44	1.31	15.08	6.32	31.95	2.87	74.10
30~40	1.32	35	28	9	8.17	0.29	1.35	8.19	2.13	32.95	2.88	76.40
40~50	1.31	35	28	9	8.15	0.43	1.21	11.85	0.59	33.95	2.87	69.62

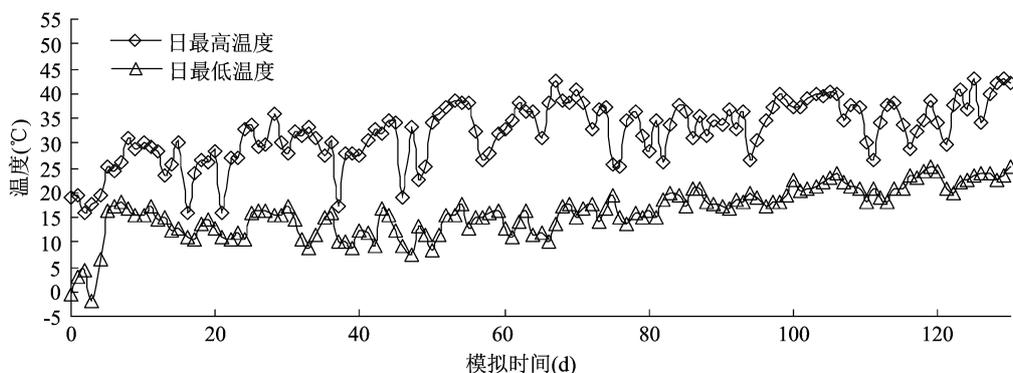


图1 模型模拟时段番茄温室内逐日最高、最低气温

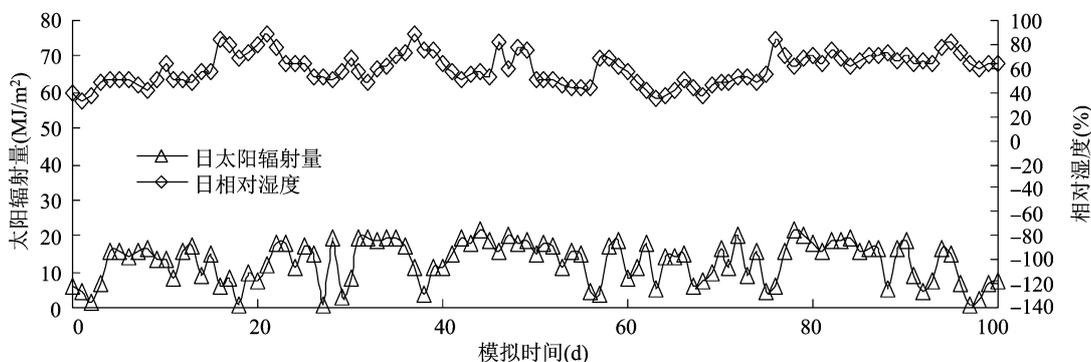


图2 模型模拟时段内逐日番茄温室内太阳辐射量及相对湿度

1.3 模型模拟精度分析方法

本研究对沈阳农业大学科研实践基地 43 号日光温室 2016 年番茄试验进行模拟。在现有模型参数基础上,通过 DSSAT 作物模型软件自带 GLUE 调参程序包对作物品种参数进行调整,将番茄鲜果产量(kg/hm²)、成熟期叶面积指数(LAI)和地上干物质量(kg/hm²)的观测数据与模拟结果进行对比分析,以此检验模型的误差。模型评价指标采用绝对相对误差(absolute relative error, ARE)、标准均方根误差(normalized root mean square error, nRMSE)、平均误差(E)、预报效率(accuracy of forecasting, EF)和一致性指数(index of agreement, d)对模拟结果进行评价,评价指标范围 nRMSE < 10% 为无差异, 10% ≤ nRMSE < 20% 为较小差异, 20% ≤ nRMSE < 30% 为中等差异, nRMSE ≥ 30% 为较大差异^[15]。指标计算公式如下:

$$ARE = \frac{|M_i - O_i|}{O_i} \times 100\%; \quad (1)$$

$$nRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}}{\bar{O}} \times 100\%; \quad (2)$$

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - M_i)}{n}; \quad (3)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}; \quad (4)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|O_i - \bar{O}| + |M_i - \bar{O}|)^2} \quad (5)$$

式中: E 为平均误差; M_i 为第*i*个模拟值; O_i 为第*i*个观测值; n 为数据个数; \bar{O} 为观测值的平均值。

1.4 参数敏感性分析方法

本研究筛选出 6 个对模型输出结果有重要影响的关键作物品种参数(表 2),分别在 4 种不同的灌水处理条件下进行局部敏感性分析。研究采用基于扰动分析的相对敏感性分析方法^[16-17],即在其余参数不变的情况下,仅使 1 个参数在一定范围内进行扰动(扰动幅度为 -20.0%、-15%、-10.0%、-5.0%、0.5%、10%、15%、20%),逐次模拟,最终计算出参数相对敏感度(S)以及扰动结果变化率(β):

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (M_{i+1} - M_i) / M_a}{n - 1}; \quad (6)$$

$$\beta = \frac{M_p - M_b}{M_b} \quad (7)$$

式中: P_{i+1} 和 P_i 分别为第 $i+1$ 次和第 i 次参数输入值; P_a 为 2 次输入参数的均值; M_{i+1} 和 M_i 分别为第 $i+1$ 次和第 i 次模型产量模拟值; M_a 为 2 次模型产量模拟值的均值; M_p 为扰动后模型产量模拟值; M_b 为基准参数下模型产量模拟值。根据 S 值的范围可将参数相对敏感度划分为 5 个级别(表 3)^[18]。

表 2 CROPGRO - Tomato 作物品种参数输入范围

参数	定义	取值	
		上限	下限
FL - SH	第一花序开花到第一花序坐果的光热时间(°C · d)	9.00	7.00
FL - SD	第一花序开花到第一花序籽粒产生的光热时间(°C · d)	20.00	15.00
SD - PM	第一花序籽粒产生到生理成熟的光热时间(°C · d)	55.00	45.00
LFMAX	最适条件下叶片最大光合速率[mg/(m ² · s),以 CO ₂ 计]	1.40	1.00
SLAVR	比叶面积(cm ² /g)	380.00	320.00
XFRT	每天分配给果实的干物质量的最大比例	0.85	0.65

表 3 相对敏感度分级

级别	S 值范围	敏感程度
I	S < 0.10	不敏感
II	0.10 ≤ S < 0.25	弱敏感
III	0.25 ≤ S < 0.50	一般敏感
IV	0.50 ≤ S < 1.00	比较敏感
V	S ≥ 1.00	特别敏感

2 结果与分析

2.1 模型模拟精度分析

作物品种参数的调试结果:FL - SH, 7.59; FL - SD, 15.03; SD - PM, 48.60; LFMAX, 1.39; SLAVR, 379.6; XFRT, 0.845。番茄鲜果产量和地上干物质量模型模拟值和观测值之间的 ARE 分别为 6.50%

和 10.83%，误差较小；标准均方根误差 $nRMSE$ 分别为 6.78%（无差异）和 14.26%，差异较小（表 4）。如图 3 所示，不同灌水水平下 W1 和 W2 处理的 $nRMSE$ 均大于 30%（较大差异），W3 和 W4 处理的 $nRMSE$ 均大于 20% 且小于 30%（中等差异）；所有处理的 E 值均大于 0，表明观测值普遍比模拟值偏大；从不同处理的 EF 和 d 值可以看出叶面积指数

在 W3 和 W4 等 2 个灌水水平条件下的模拟偏差较小、吻合度较高；但总体模拟精度较差。其主要原因可能是 CROPGRO - Tomato 模型模拟时会低估叶面积指数的变化，导致模拟精度有所下降。总体而言，CROPGRO - Tomato 模型在温室内对番茄鲜果产量进行模拟的精度较高，可以进行相关的敏感性分析。

表 4 CROPGRO - Tomato 模型模拟温室番茄生长过程的精度分析

处理	鲜果产量				地上干物质量			
	模拟值 (kg/hm ²)	观测值 (kg/hm ²)	ARE (%)	$nRMSE$ (%)	模拟值 (kg/hm ²)	观测值 (kg/hm ²)	ARE (%)	$nRMSE$ (%)
W1	71 761.00	68 838.68	4.25	6.78	6 570.00	6 750.00	2.67	14.26
W2	75 636.00	69 808.03	8.35		6 798.00	6 498.00	4.62	
W3	110 199.00	103 337.35	6.64		9 263.00	7 546.00	22.75	
W4	92 749.00	86 857.91	6.78		8 059.00	7 115.00	13.27	
平均值			6.50				10.83	

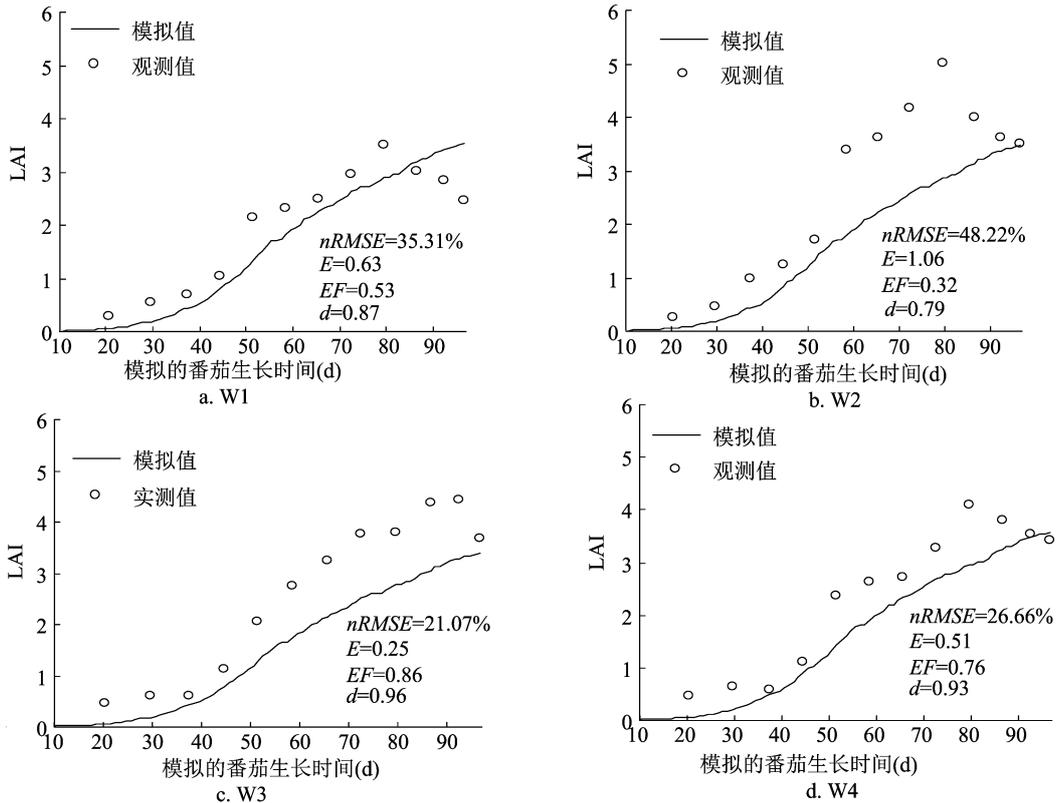


图 3 不同灌水水平下番茄 LAI 动态模拟

2.2 不同灌水水平下各参数扰动结果

SD - PM 参数在 W1、W2 和 W3 灌水水平下参数变化率在 -20% ~ 0 之间模拟产量变化幅度最为明显，而参数变化率在 0 ~ 20% 之间模拟产量变化幅度较小，在 W4 灌水水平下模拟产量变化幅度最大；FL - SD 参数在 W1、W2 和 W3 灌水水平下模拟产量变化率随着参数变化率的增加而减少，在 W4

灌水水平下模拟产量变化率随着参数变化率的增加而增加)；FL - SH 参数在 4 种灌水水平下模拟产量变化率随着参数变化率的增加而减少；LFMAX、SLAVR 和 XFRT 参数在 4 种灌水水平下模拟产量变化率随着参数变化率的增加而增加(图 4)。

W1 水平下各参数扰动变化对模拟产量的影响幅度依次为 LFMAX(模拟变化率最大值 + 最小值 =

48.98%,下同)、XFRT(47.77%)、SD-PM(38.66%)、SLAVR(30.54%)、FL-SH(12.00%)和FL-SD(7.62%)(图4-a);W2水平下各参数扰动变化对模拟产量的影响幅度依次为XFRT(59.71%)、LFMAX(48.97%)、SD-PM(34.53%)、SLAVR(25.27%)、FL-SH(14.61%)和FL-SD(8.12%)(图4-b);W3水平下各参数扰动变化对模拟产量的影响幅度依次为XFRT(38.93%)、LFMAX(36.93%)、SD-PM(30.40%)、

SLAVR(23.21%)、FL-SH(6.05%)和FL-SD(6.54%)(图4-c);W4水平下各参数扰动变化对模拟产量的影响幅度依次为SD-PM(69.41%)、LFMAX(43.08%)、SLAVR(36.47%)、XFRT(32.33%)、FL-SD(16.55%)和FL-SH(6.69%)(图4-d)。由上述可知,参数扰动变化对模拟产量的影响幅度随着灌水水平不同发生较大变化,其中LFMAX、XFRT、SD-PM和SLAVR参数对模拟产量的影响程度较高。

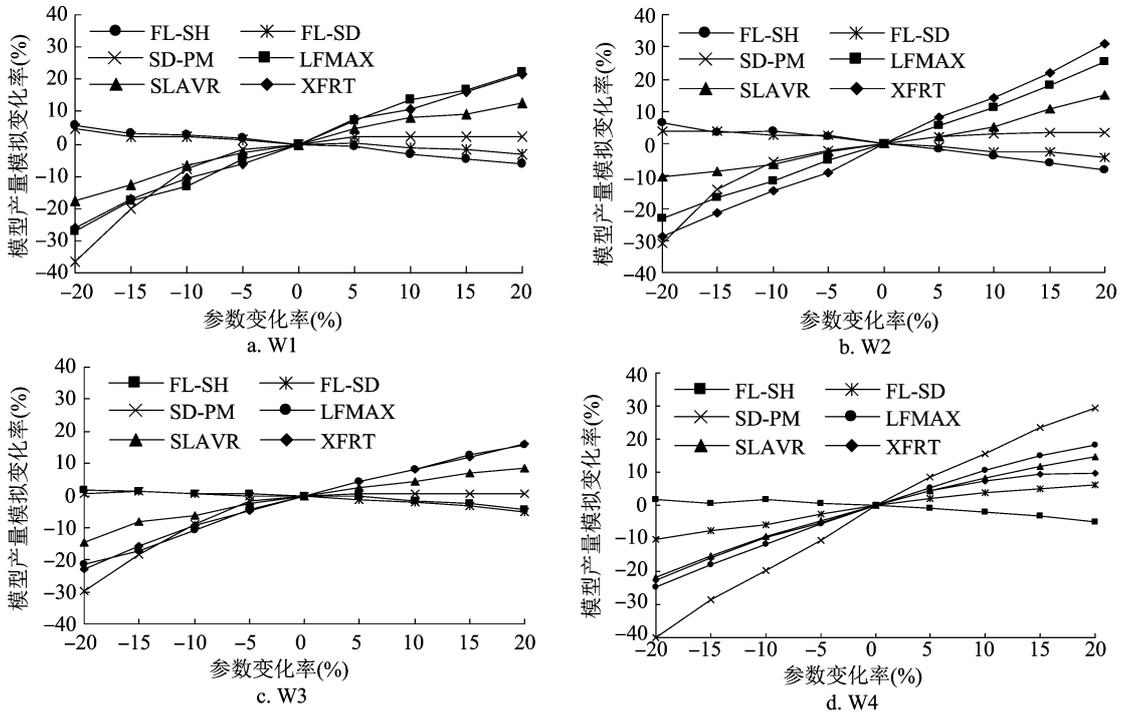


图4 不同灌水水平下各参数扰动结果变化率

2.3 不同灌水水平下各参数相对敏感度分布

如图5所示,W1水平下,6个参数敏感度大小依次为LFMAX(敏感度1.24,下同)、XFRT(1.20)、SD-PM(1.03)、SLAVR(0.76)、FL-SH(0.30)和FL-SD(0.19);在W2水平下,6个参数的敏感度大小依次为XFRT(1.42)、LFMAX(1.17)、SD-PM(1.01)、SLAVR(0.65)、FL-SH(0.38)和FL-SD(0.04);在W3水平下,6个参数的敏感度大小依次为XFRT(1.00)、LFMAX(0.98)、SD-PM(0.91)、SLAVR(0.65)、FL-SH(0.16)和FL-SD(0.03);在W4水平下,6个参数的敏感度大小依次为SD-PM(1.82)、LFMAX(1.13)、SLAVR(0.97)、XFRT(0.93)、FL-SD(0.50)和FL-SH(0.18)。由上述可知,参数的敏感度随着灌水水平不同也会发生较大变化,其中LFMAX、XFRT、SD-PM和SLAVR

参数的敏感度较高。

2.4 不同灌水水平下各参数敏感性及变异性分析

根据表5可知,参数FL-SH和FL-SD在4种不同水分条件下的敏感性均相对较低,说明在不同灌水水平下这2个参数对模拟产量的影响均较小,这可能是由于它们主要影响作物的物候期,所以对模拟产量的影响不明显。参数SD-PM、LFMAX、SLAVR和XFRT在4种不同水分条件下的敏感度级别都较高,说明这4个参数为影响CROPGRO-Tomato模型模拟产量的主要参数。从变异系数可以看出,不同灌水水平对SD-PM、SLAVR和XFRT参数的敏感度影响较大,因此在进行作物品种参数估计时应该注意不同灌水水平对模型参数敏感度的影响。

根据图6可知,参数SD-PM和SLAVR在W4

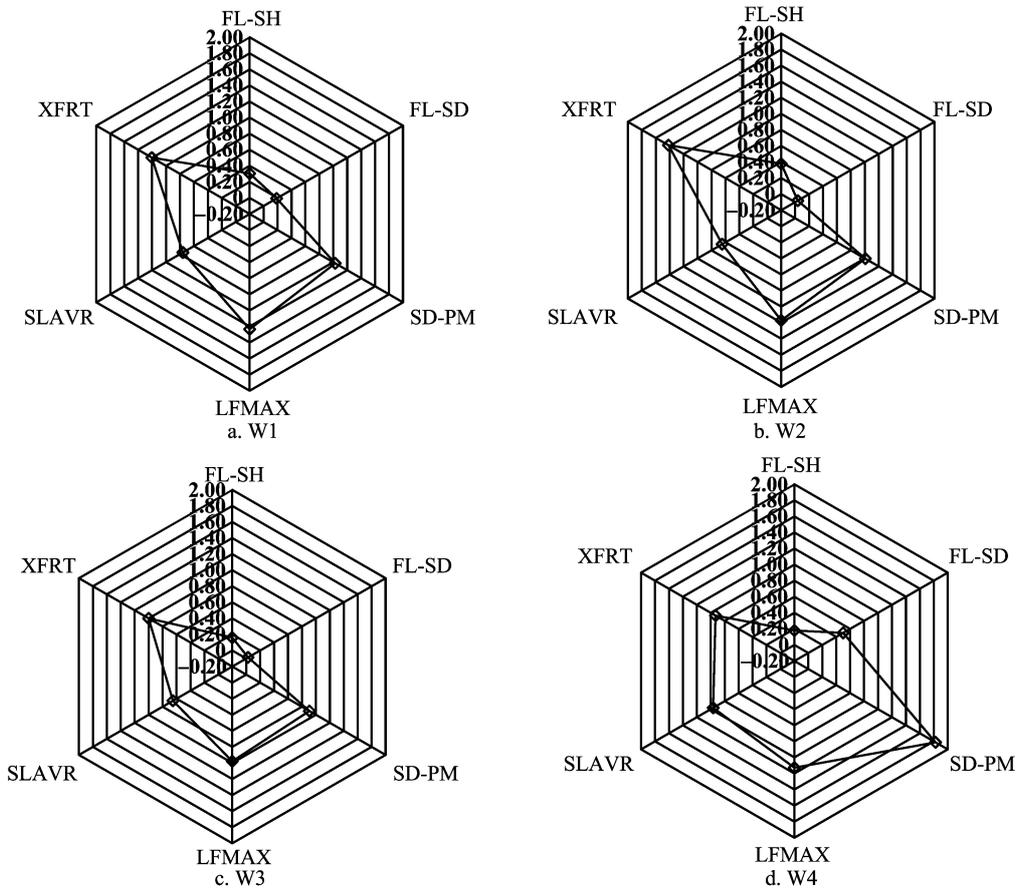


图5 不同灌水水平下各参数相对敏感度

表5 不同灌水水平下各参数相对敏感度级别及其变异情况

参数	相对敏感度级别				变异系数 (%)
	W1	W2	W3	W4	
FL - SH	III	III	II	II	40.43
FL - SD	II	I	I	III	117.10
SD - PM	V	V	IV	V	35.71
LFMAX	V	V	IV	V	9.64
SLAVR	IV	IV	IV	IV	19.76
XFRT	V	V	V	IV	19.27

条件下的敏感度最高,大于其余3个灌水处理,说明这2个参数在充分灌溉条件下对模型模拟产量的影响较大;参数XFRT在W1和W2条件下的敏感度要大于其余2个灌水处理,说明这2个参数在中度和重度亏水条件下对模型模拟产量的影响较大。虽然SD-PM、LFMAX、SLAVR和XFRT这4个参数的敏感度级别均较高,但是在4种不同灌水处理条件下体现出的敏感度排名却略有差异。

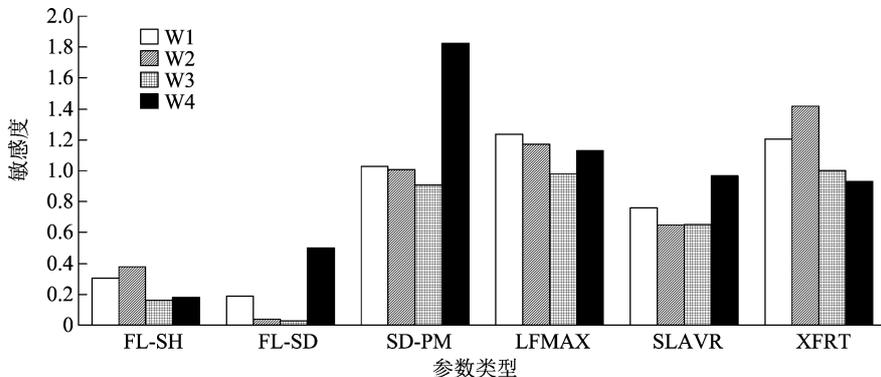


图6 不同处理各参数敏感性分析

3 讨论

宋利兵等在不同灌水水平下 CERES - Maize 模型调参验证研究中表明,各处理的 LAI 均是生育前期模拟较好,生育后期出现较大偏差,其中高灌水水平处理下的 LAI 模拟精度优于低灌水水平^[19],这与本研究结果相似,但本研究引起 LAI 模拟进度较差的主要原因可能是 CROPGRO - Tomato 模型模拟时会低估叶面积指数的变化,导致模拟精度有所下降。吴立峰等对不同灌水水平下 CROPGRO - Cotton 模型敏感性的研究表明,产量最敏感参数为 XFRT^[12],这与本研究提出的主要影响参数略有差异,主要原因是模拟作物不同,从而模拟产量对作物品种参数的敏感性发生变化。Dejonge 等的研究^[12]表明,在不同灌水水平下模型参数的敏感性变化较大^[10,12],这与本研究提出的参数敏感度会较大程度上受灌水水平影响的结果一致。总体而言,通过对 CROPGRO - Tomato 模型的敏感性分析得出最敏感以及受灌水水平影响较大的几个品种参数,为辽宁省日光温室番茄生产的模型模拟和产量预测提供理论依据。

4 结论

不同灌水水平下参数 SD - PM、LFMAX、SLAVR 和 XFRT 的敏感度级别均 IV ~ V,敏感性较高,这 4 个品种参数是模拟产量的主要影响参数。

参数 FL - SH、FL - SD 和 SD - PM 敏感度变异系数分别为 40.43%、117.1% 和 35.71%,受灌水水平影响较大。

在日光温室内应用 CROPGRO - Tomato 模型进行参数局部敏感性分析研究成果,为模型调参验证奠定了基础,对辽宁日光温室番茄进行作物模型模拟、产量预测和模型验证具有指导意义。

参考文献:

[1] 王克全,郑国玉,马军勇,等. 不同滴灌量对新疆温室土壤水分、番茄产量及品质的影响[J]. 河南农业科学,2015,44(10): 113 - 116.

[2] 郑国保,孔德杰,张源沛,等. 不同灌水量对日光温室番茄产量、品质 and 水分利用效率的影响[J]. 北方园艺,2011(11):47 - 49.

[3] 王峰,杜太生,邱让建,等. 亏缺灌溉对温室番茄产量与水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(9):46 - 52.

[4] 张辉,张玉龙,虞娜,等. 温室膜下滴灌灌水控制下限与番茄产量、水分利用效率的关系[J]. 中国农业科学,2006,39(2): 425 - 432.

[5] 詹汉,白清俊,董正阳,等. 扶埂开沟膜下灌对土壤水分分布的影响[J]. 排灌机械工程学报,2020,38(5):511 - 516.

[6] Saltelli A, Tarantola S, Campolongo F. Sensitivity analysis as an ingredient of modeling[J]. Statistical Science,2000,15(4):377 - 395.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

[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.

[13] Boote K J, Rybak M T, Scholberg Johan M S, et al. Improving the CROPGRO - Tomato model for predicting growth and yield response to temperature[J]. Hort Science,2012,47(8):1038 - 1049.

[14] Ventrella D, Charfeddine M, Moriondo M, et al. Agronomic adaptation strategies under climate change for winter durum wheat and tomato in southern Italy: irrigation and nitrogen fertilization[J]. Regional Environmental Change,2012,12:407 - 419.

[15] Jones J W, Hoogenboom G, Porter C H, et al. The DSSAT cropping system model[J]. European Journal Agronomy,2003,18(3/4): 235 - 265.

[16] Choi J Y, Choi C H. Sensitivity analysis of multilayer perceptron with differentiable activation functions[J]. IEEE Transactions on Neural Networks,1992,3(1):100 - 107.

[17] 杨靖民,杨靖一,Hoogenboom G. DSSAT 作物模型的统计和图形校验方法[J]. 植物营养与肥料学报,2012,18(5):1064 - 1072.

[18] 席庆,李兆富,罗川. 基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析[J]. 环境科学,2014,35(5): 1773 - 1780.

[19] 宋利兵,陈上,姚宁,等. 基于 GLUE 和 PEST 的 CERES - Maize 模型调参与验证研究[J]. 农业机械学报,2015,46(11): 95 - 111.