

基于Morris和EFAST的CERES - Wheat模型敏感性分析*

宋明丹¹ 冯浩^{2,3} 李正鹏^{1,3} 高建恩^{1,2}

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所,陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所,陕西杨凌 712100;
3. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院,陕西杨凌 712100)

摘要: 依据在陕西杨凌获得的冬小麦试验资料,用 Morris 法和 EFAST (extended Fourier amplitude sensitivity test) 法分析了 CERES - Wheat 模型输出变量中小麦开花期、成熟期、产量、地上生物量对品种和生长参数的敏感性,并分析比较了两种方法的一致性。结果表明,光周期影响因子 (PID)、出苗-穗分化期积温 (P1)、穗分化-挑旗期积温 (P2) 和春化影响因子 (VEFF) 均对开花期和成熟期较敏感,灌浆期积温 (P5) 对成熟期有较大影响;挑旗前、后的光能利用率 (PARUE, PARU2)、PID、P1 和 P2 均对产量和生物量有较大影响;最适条件下标准籽粒质量 (G2) 和开花期单位地上生物量的籽粒数 (G1) 对冬小麦产量有较大影响,第一标准叶的比叶面积 (SLAS) 对地上生物量有较大影响。Morris 法和 EFAST 法得到的参数敏感性结果具有较高的相关性,表明计算工作量较小的 Morris 法较适于筛选模型敏感参数。

关键词: 作物模型 TDCC 相关系数 全局敏感性分析

中图分类号: S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298 (2014) 10-0124-08

引言

作物模型是描述作物生长过程及其与环境间定量关系的计算机程序或数学方程。因其具有省时、省力、可重现的特点,在作物栽培、水肥管理、气候变化等方面发挥着日益重要的作用^[1-4]。作物模型应用于某一特定区域时,需要对参数进行率定和适用性验证^[5-6],但因参数众多,难以实现对所涉及的全部参数进行测量和率定,而敏感性分析则为参数的筛选提供了便利。

敏感性分析可以确定参数对模型模拟结果影响的大小,通过仅校正影响较大的参数而固定影响较小或者无影响的参数,从而减少模型校正的工作量。参数敏感性分析方法主要分为局部敏感性分析和全局敏感性分析。局部敏感性仅分析单参数的改变对模型输出结果的影响,全局敏感性能够分析整个参数空间对模型结果的影响^[7]。全局敏感性分析方法主要有 Morris 法^[8]、回归法^[9]、Sobol's 法^[10]、EFAST 法^[11]等。Morris 法是针对局部敏感性分析方法存在的不足而进行的改进,通过微分的方法来计算逐个参数的敏感性,所需计算量较小。Sobol's 法与 EFAST 法是将模型模拟结果的方差分解为各

个参数的方差和参数间的方差,所需计算量较大。针对这两种敏感性分析方法在 CERES - Wheat 作物模型中的比较研究尚未见报道。且作物模型的敏感性分析研究多集中于作物产量^[12-15],而对作物生长过程和其他输出变量的关注较少^[16]。因此,本研究采用 Morris 法和 EFAST 法 (extended Fourier amplitude sensitivity test) 两种敏感性分析方法,研究 DSSAT4.5 (decision support system for agrotechnology transfer) 模型中 CERES - Wheat 子模型的品种和生长参数对小麦的开花期、成熟期、产量和地上生物量 4 个模型输出变量的影响,为提高参数的率定效率和模型的本地化应用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 CERES - Wheat 模型输入参数

CERES - Wheat 模型是 DSSAT4.5 系列模型中的一个子模型,以天为步长模拟小麦的生长和发育,综合考虑气候、土壤、品种、灌溉施肥等对小麦生长的影响^[17]。小麦的生产潜力通过作物冠层截获的有效光合辐射计算,并通过温度、水分和氮素胁迫因子计算实际的生物产量^[18]。

本研究所需的试验基本数据来源于西北农林科

收稿日期: 2014 - 02 - 21 修回日期: 2014 - 04 - 20

* 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 资助项目 (2013AA102904) 和高等学校学科创新引智计划 (111 计划) 资助项目 (B12007)

作者简介: 宋明丹, 博士生, 主要从事农业生态系统模拟研究, E-mail: mingdan86@sina.com

通讯作者: 冯浩, 研究员, 博士生导师, 主要从事水土资源高效利用研究, E-mail: nercwsi@vip.sina.com

技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室试验田 (108.05°E, 34.24°N; 海拔高度 521 m)。该地区属于温带大陆性季风气候, 年平均降水量约为 610 mm, 多集中于 8—10 月。该地区冬小麦生长季为 10 月一次年 6 月, 生长季内月平均最高气温为 15.7℃, 月平均最低气温为 5.3℃, 总太阳辐射量为 3 206 MJ/m², 降水量为 296 mm。

模型所需的气象数据来源于杨凌气象站, 距试验地 100 m 左右。观测数据包括日最高气温、最低气温、降水量、日照时数等。模型所需的太阳辐射量由埃斯曲郎公式根据日照时数估算得到^[19], 即

$$R_s = \left(a + b \frac{n}{N} \right) R_a \tag{1}$$

表 1 陕西杨凌试验地土壤理化性状

Tab.1 Physical and chemical properties of the soil at the experimental site in Yangling, Shaanxi Province

土层深度 /cm	土壤粒径比例/%			容积密度 /(g·cm ⁻³)	有机碳 质量分数/%	全氮 质量分数/%	pH 值	土壤含水率/(cm ³ ·cm ⁻³)		
	砂粒	粉粒	粘粒					凋萎含水率	田间持水率	饱和含水率
10	1	72	27	1.25	1.06	0.08	8.0	0.152	0.241	0.453
20	1	72	27	1.26	0.88	0.08	8.2	0.176	0.231	0.419
40	1	71	28	1.31	0.79	0.05	8.2	0.188	0.268	0.419
60	1	71	28	1.31	0.68	0.05	8.2	0.175	0.288	0.489
80	1	71	28	1.32	0.57	0.05	8.2	0.162	0.285	0.353
120	1	65	34	1.35	0.45	0.04	8.2	0.126	0.241	0.304
160	1	65	34	1.35	0.48	0.04	8.2	0.126	0.252	0.355
200	1	74	25	1.35	0.48	0.03	8.2	0.091	0.272	0.343

模型所需的田间管理数据来源于试验的观测和调查。试验小区长 12.5 m, 宽 10 m, 处理为节水灌溉模式, 共设 6 个重复。冬小麦于每年的 10 月 15 日播种, 播前用铧式犁耕翻土地, 播种方式为机械条播, 行距 15 cm, 播深 5 cm, 播种密度为 400 粒/m², 播前施尿素 375 kg/hm², 磷酸二铵 375 kg/hm², 小麦生长季冬灌一次 75 mm, 其他管理措施如除草、病虫害防治等按正常田间管理进行。小麦品种为关中主栽的小偃 22。

1.2 敏感性分析方法

参数的敏感性分析主要是研究参数的变化方差对模型输出结果变化方差的贡献率^[23]。全局敏感性分析因其能够分析多个参数的变化对模型结果产生的总影响, 具有分析每一个参数及参数之间相互作用对模型结果影响的特点, 而被日益广泛地应用到作物模型中。

1.2.1 Morris 法

Morris 法最早由 Morris 于 1991 年提出, 随后经 Campolongo 等进行改进^[8, 24]。此法是基于一次变化法的试验设计, 对于分析参数众多且运算负荷较

式中 R_s ——太阳总辐射量, MJ/m²
 R_a ——天文辐射量, MJ/m²
 n ——实测太阳日照时数, h
 N ——理论日照时数, h
 a 、 b ——经验系数, 应用最小二乘法对邻近的西安气象站的日照时数和太阳辐射量数据进行拟合, 得到 $a = 0.2$, $b = 0.5$

模型所需的土壤剖面数据主要来自《陕西土壤》^[20]、《中国土壤》^[21]、《中国土种志》^[22]以及田间试验的实测数据。土壤类型为壤土, 所需的土壤参数主要有各土层的质地、容积密度、有机碳质量比、全氮质量比以及土壤水力学参数等, 具体数据如表 1 所示。

大的模型具有很好的适用性, 是准确性和效率折衷的一种选择^[24]。Morris 法计算公式为

$$R_i(x_1, x_2, \cdots, x_n, \Delta) = \frac{y(x_1, x_2, \cdots, x_{i-1}, x_i + \Delta, x_{i+1}, \cdots, x_n) - y(x_1, x_2, \cdots, x_n)}{\Delta} \tag{2}$$

令 $X = (x_1, x_2, \cdots, x_n)$
式中 $R_i(X, \Delta)$ ——参数 i 的敏感性指数
 $y(X)$ ——模型输出结果
 X ——待分析参数的 n 维向量
 Δ ——介于 $\frac{1}{p-1}$ 到 $1 - \frac{1}{p-1}$ 的数值
 p ——参数的水平

Morris 法先将每个参数取值范围映射到 0 - 1, 并将其离散化为 p 个水平, 构成 n 维 p 水平的采样空间, 依据一次变化法的试验设计对参数进行随机采样。由于 Morris 法的随机性, 很容易在一次随机取样及随机化过程中出现误差, 所以需进行 t 次重复。最后计算每个参数 R_i 的平均值 μ^* 和标准差 σ , 模型运行次数为 $t(n + 1)$ 次。 μ^* 反映参数对输出变量敏感性的强弱, 其值越大, 说明参数的敏感性

越强,而 σ 值表示的是参数间交互作用的强弱或参数的非线性效应,其值越高,参数交互作用越强。

1.2.2 EFAST 法

EFAST 法^[11]是由 Saltelli 等结合 Sobol’s s 法^[10]和傅里叶振幅灵敏度检验法^[25](Fourier amplitude sensitivity test,FAST)的优点提出的基于方差分解的全局敏感性分析方法。该方法通过搜索函数对模型的每个参数引入一个共同独立参数 s 的函数,并给每个输入参数定义一个整数频率,最后使模型成为独立参数 s 的周期函数,对模型的输出结果进行傅里叶分析,获得傅里叶级数的频谱曲线,通过该频谱曲线分别得到由每个参数及参数的相互作用所引起模型结果的方差^[14, 26]。模型的总方差由各参数及参数间相互作用共同得到,将模型总方差分解为

$$V(Y) = \sum_{i=1}^n V_i + \sum_{i < j \leq n} V_{ij} + \cdots + V_{(1,2,\cdots,n)} \quad (3)$$

$$V_{ij} = V[E(Y|x_i, x_j)] - V_i - V_j \quad (4)$$

$$S_i = \frac{V_i}{V(Y)} \quad (5)$$

$$S_{T_i} = \frac{V(Y) - V_{-i}}{V(Y)} \quad (6)$$

式中 $V_{ij} \sim V_{(1,2,\cdots,n)}$ ——参数间相互作用的方差
 V_{-i} ——不包括参数 x_i 的所有参数方差之和
 S_i ——参数 x_i 的一阶敏感指数,表示参数 x_i 的方差对 Y 的方差的直接贡献率
 S_{T_i} ——参数 x_i 的全局敏感性指数,表示参数 x_i 及其与其他参数的相互作用对方差 Y 的贡献率

EFAST 最重要的特点是通过搜索函数对参数进行采样,减轻了计算机的运算负荷。其分析结果基于大量的参数采样,不仅能给出参数间敏感性的相对大小,还可以定量地计算各参数对于模型结果变化方差的贡献率。Morris 法所需的计算量较小,在进行敏感性分析时可优先考虑,尤其是在区域应用时,可大大节省计算工作量。EFAST 法是一种定量评价方法,可进行不确定性分析,其研究的范围更广泛,精确度更高。

1.3 敏感性分析方案

本研究以田间试验采集的气候、土壤、田间管理等参数作为输入数据,采用 Morris 法和 EFAST 法分析 CERES – Wheat 模型中小麦的开花期、成熟期、产量和地上生物量 4 个模型输出项对 23 个输入参数(7 个品种参数和 16 个生长参数)的敏感性。参数的敏感性与设置的模拟情景有关,本文选取杨凌 2007—2010 年 3 个冬小麦生长季为研究时段,分析作物参数在潜在产量水平(光温为限制条件)、可获

得产量水平(光温水为限制条件)和实际产量水平(光温水肥为限制条件)下的敏感性,共 9 个情景,旨在分析不同年份和产量水平下参数敏感性的差异。参数及目标输出变量在模型中的代码、含义及取值范围如表 2 所示,试验区 2007—2010 年主要的气象要素如表 3 所示。

表 2 选取的 CERES – Wheat 模型作物参数和输出变量
Tab.2 Selected crop parameters and output variables
in CERES – Wheat model

参数	参数定义	数值
作物生长参数		
P1	出苗-穗分化积温/℃	100 ~ 500
P2	穗分化-挑旗积温/℃	100 ~ 500
P2FR1	穗分化-拔节占 P2 的比例	0 ~ 0.6
P3	挑旗-抽穗积温/℃	120 ~ 360
P4	抽穗-灌浆初期积温/℃	150 ~ 450
P4FR1	抽穗-开花占 P4 的比例	0.15 ~ 0.35
P4FR2	开花过程占 P4 的比例	0.05 ~ 0.25
VEFF	春化影响因子	0 ~ 1.0
LAFV	营养阶段叶片潜在增长比例	0.01 ~ 0.8
LAFR	生殖阶段叶片潜在增长比例	0.1 ~ 3.0
SLAS	标准第一叶的比叶面积/(cm ² ·g ⁻¹)	100 ~ 600
PARUE	挑旗前有效光合辐射(PAR)利用率/(g·MJ ⁻¹)	1 ~ 6
PARU2	挑旗后 PAR 利用率/(g·MJ ⁻¹)	1 ~ 6
KCAN	PAR 消光系数	0.65 ~ 0.95
RS% S	茎储存系数	10 ~ 60
AWNS	芒长等级	0 ~ 10
作物品种参数		
G1	开花期单位地上生物量的籽粒数/(粒·g ⁻¹)	10 ~ 50
G2	最适条件下粒质量/mg	10 ~ 70
G3	无胁迫条件下标准单穗质量/g	1 ~ 3
P5	灌浆期积温(不包括灌浆前期)/℃	225 ~ 700
P1V	最适条件下通过春化的天数/d	5 ~ 60
P1D	光周期影响因子/%	30 ~ 200
PHINT	叶热间隔/℃	70 ~ 110
输出变量		
ADAP	开花期/序日	
MDAP	生理成熟期/序日	
HWUM	产量/(kg·hm ⁻²)	
CWAM	地上生物量/(kg·hm ⁻²)	

全局敏感性分析试验借助专业敏感性分析软件 Simlab^[27]和 PEST(Parameter estimation software)中的 SENSAN 模块协同完成^[28]。Simlab 进行全局敏感性分析主要分为 4 步:

(1) 定义输入变量的取值范围和分布形式。作物参数的取值范围参考 DSSAT 手册^[29]和前人研究结果^[13, 30],并假设参数在取值范围内均匀分布。

(2) 对多维的参数空间进行采样。Morris 法设置 $t = 10$,共采样 250 组。EFAST 法认为每个参数的采样次数大于 65 的分析结果有效,设置每个参数取

表 3 杨凌 2007—2010 年小麦生长季气象要素
Tab.3 Climate feature during wheat growing season 2007—2010

气象要素	年份	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	平均值	总和
最高气温/℃	2007—2008	17.3	14.2	6.0	1.0	6.4	17.8	21.2	28.9	30.9	16.0	
	2008—2009	18.9	13.0	8.8	5.7	9.5	15.8	21.6	24.5	32.7	16.7	
	2009—2010	21.7	9.7	5.8	6.8	9.2	14.3	19.5	25.4	30.9	15.9	
	多年平均	18.9	12.3	6.4	5.0	8.2	13.9	20.3	25.6	30.9	15.7	
最低气温/℃	2007—2008	9.7	3.5	-1.4	-5.5	-3.9	5.1	9.5	14.1	18.5	5.5	
	2008—2009	10.3	3.2	-3.1	-5.4	2.4	4.7	10.1	14.4	18.7	6.1	
	2009—2010	11.4	-0.2	-3.6	-4.4	-0.5	4.3	7.7	14.3	18.6	5.3	
	多年平均	9.7	2.7	-3.0	-4.5	-1.6	3.2	8.8	13.6	18.6	5.3	
太阳辐射量/(MJ·m ⁻²)	2007—2008	257.7	256.5	157.9	188.5	306.4	416.1	444.5	578.5	464.7		3 071
	2008—2009	264.2	233.2	233.9	253.2	200.5	387.4	480.5	501.4	589.0		3 143
	2009—2010	326.7	232.7	220.0	247.4	259.9	355.9	443.5	478.4	533.7		3 098
	多年平均	304.6	245.9	225.8	241.5	272.0	378.7	455.3	534.7	548.0		3 206
降水量/mm	2007—2008	50.0	1.6	5.3	19.7	5.3	17.2	37.4	12.7	50.5		200
	2008—2009	74.6	6.6	0.0	0.7	21.4	32.2	15.0	92.6	67.4		311
	2009—2010	25.3	43.1	4.2	0.0	14.7	39.2	40.7	49.5	30.8		248
	多年平均	60.1	22.8	4.9	6.1	10.1	27.1	44.5	62.6	58.0		296

样 257 次,共采样 5 911 组。

(3) 将采样的参数组合输入模型,并运行计算。PEST 通过 DSSAT 模型的输入和输出文件与模型建立联系,把参数组合写入模型输入文件,利用 SENSAN 模型实现批量运行和批量读取模型的输出文件。

(4) 估算每个参数对模型输出结果的影响。将 PEST 运行模型所得结果整理为 Simlab 可识别格式,点击分析按钮,Simlab 自动完成敏感性分析过程。

同种方法不同情景敏感性分析结果的一致性用 TDCC (Top-down concordance coefficient) 系数衡量^[31]。TDCC 通过为每个参数赋 Savage 分数来计算,强调敏感参数的重要性,降低不敏感参数的重要性^[32]。TDCC 值越接近于 1 表明其一致性越好。如

果 TDCC 检验的 P 值小于 0.05,则认为参数排序一致^[33]。不同方法参数敏感性结果的一致性用 Pearson 相关系数表示。

2 结果与分析

2.1 Morris 法敏感性分析结果

Morris 法敏感性分析结果表明对于开花期和成熟期,敏感指数大于 0 的参数仅有 9 个,所以不同产量水平和年份间 TDCC 的计算采用 9 个参数。而产量和地上生物量敏感性排序的 TDCC 采用全部参数计算。应用 Morris 法对不同年份和不同产量水平下得到的参数敏感性进行排序,其 TDCC 值均大于等于 0.96, P 值均小于 0.05,说明不同产量水平和年份下参数敏感性排序一致,无显著差异(表 4)。以下以可获得产量水平下的参数敏感性为例进行分析。

表 4 不同冬小麦产量水平和生长季节下 Morris 法敏感性分析的 TDCC 和 P 值
Tab.4 TDCC and P -value under different scenarios based on the results from Morris method

	年份						产量水平					
	2007—2008		2008—2009		2009—2010		潜在产量水平		可获得产量水平		实际产量水平	
	TDCC	P 值	TDCC	P 值	TDCC	P 值	TDCC	P 值	TDCC	P 值	TDCC	P 值
开花期	1.00	3.80×10^{-3}	1.00	3.80×10^{-3}	0.99	4.10×10^{-3}	0.99	4.30×10^{-3}	0.99	4.30×10^{-3}	0.99	4.30×10^{-3}
成熟期	1.00	3.80×10^{-3}	1.00	3.80×10^{-3}	1.00	3.90×10^{-3}	1.00	3.90×10^{-3}	1.00	3.90×10^{-3}	0.99	4.10×10^{-3}
产量	0.96	1.60×10^{-5}	1.00	7.70×10^{-6}	0.97	1.30×10^{-5}	1.00	7.30×10^{-6}	0.98	1.00×10^{-5}	0.98	1.20×10^{-5}
地上生物量	0.97	1.30×10^{-5}	0.97	1.30×10^{-5}	0.99	9.50×10^{-6}	0.99	8.10×10^{-6}	0.98	1.00×10^{-5}	0.97	1.40×10^{-5}

如图 1a 所示,小麦开花期对 P1D 最敏感,其 μ^* 和 σ 均最大的,与其他参数的交互作用或非线性效应较强。P1D 反映冬小麦出苗 - 穗分化阶段对光周期的敏感性,表示低于临界日长对发育的延缓比例。冬小麦出苗-穗分化阶段营养生长与生殖生长并存,

主要完成成花诱导和花形成,对开花起决定性作用。P1 为开花期的第 2 个敏感参数,P1 表示出苗 - 穗分化期的积温,此阶段受春化作用和光周期作用影响。P2 是开花期的第 3 个敏感参数,表示穗分化 - 挑旗期的积温,此阶段满足后,冬小麦进入抽穗开花

期。VEFF 为开花期的第 4 个敏感因子,为春化作用效应因子,与其它参数的交互作用很强,表示在不适宜春化条件下的相对发育速率,与 P1D、P1 共同决定出苗 - 穗分化期的天数。P1D、P1、P2 和 VEFF 共同决定冬小麦出苗 - 穗分化 - 挑旗期的天数,是开花期最敏感的参数。其次为 P3 和 P1V, P3 为挑旗 - 抽穗完成的积温, P1V 为春化作用因子,对冬小麦开花期有一定影响,但不是最关键的参数。冬小麦成熟期敏感性分析结果与开花期相似(图 1b),各参数影响开花期,必然也会对成熟期造成影响。除上述参数外, P5 在成熟期敏感参数中居第 3 位。P5 描述整个灌浆期所需的积温,此阶段的所需的积温直接决定了成熟期。

对生物量影响敏感的参数按其敏感性大小依次为 PARUE、PARU2、P1D、P2、P1、VEFF 和 SLAS (图 1d)。PARUE、PARU2 分别是冬小麦挑旗前、后将光能转化为干物质的能力,直接决定潜在地上生

物量的多少, PARUE 的敏感性大于 PARU2,这是因为前期主要完成小麦的营养生长,其生长决定后期生殖生长中源的大小,可见前期光能利用能力对最终地上生物量的影响更大。P1D、P1、P2、VEFF 对产量的影响,主要通过影响开花期和成熟期间接作用于最终地上生物量,开花前时间的延长,更有利于地上生物量的积累。SLAS 是比叶面积,直接影响分配至叶片的干物质转化成绿叶,从而截获光能的量,影响光合作用的产物。

地上生物量直接影响同化物在茎、叶、籽粒器官的分配,因此对生物量影响较大的参数对产量的影响也较大(图 1c)。另外,参数 G2 和 G1 的变化对产量的影响很敏感,分别排第 4 位和第 5 位, G2 是最佳条件下标准籽粒质量, G1 是开花期单位地上生物量的籽粒数,这 2 个参数影响籽粒的灌浆速率和最终籽粒干物质分配,因此对产量的影响较大。

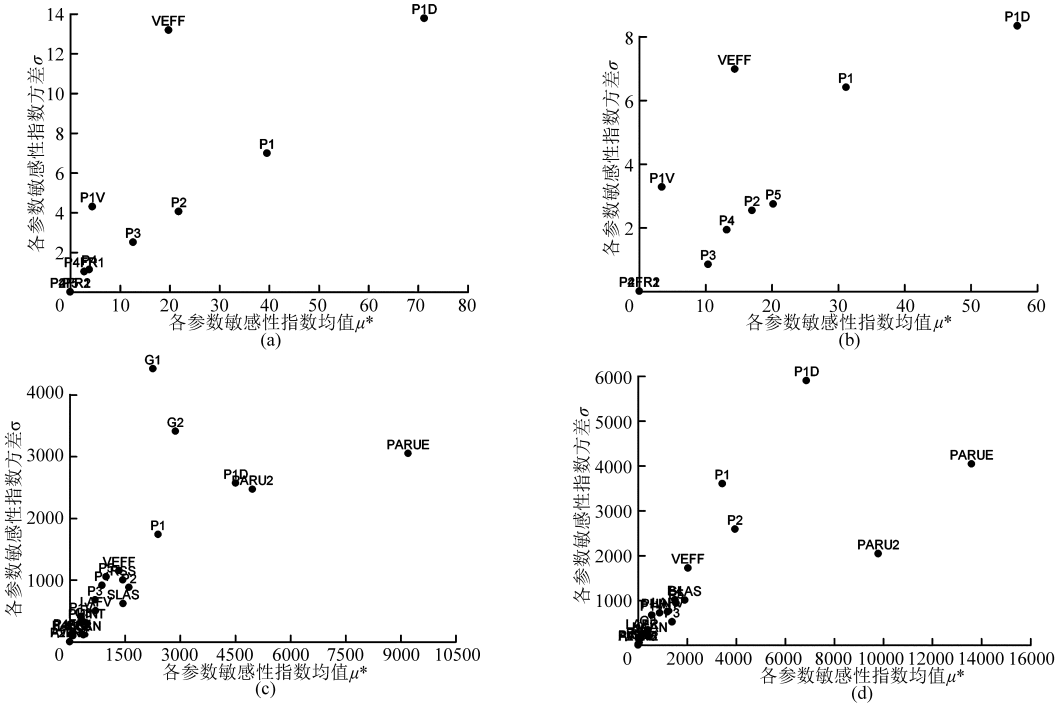


图 1 基于 Morris 法的 CERES - Wheat 模型的敏感性分析结果
Fig.1 Sensitivity analysis results based on Morris method for CERES - Wheat
(a) 开花期 (b) 成熟期 (c) 产量 (d) 地上生物量

2.2 EFAST 法敏感性分析结果

通过 EFAST 法得出不同产量水平和不同年份下各参数敏感性排序计算得到的 TDCC 值均高于 0.87, P 值均低于 0.05,表明不同产量水平和年份下参数敏感性排序无显著差异,虽然其 TDCC 值略低,但与 Morris 法得出的结论一致(表 5)。以下以可获得产量水平下的参数敏感性为例对各输出变量的敏感性进行分析。

根据 EFAST 法的全局敏感指数结果(图 2),开

花期与成熟期均对 P1D 最敏感,可解释其变化方差的 42% 和 36%,且 P1D 与其他参数的交互作用较小。其次是 P2,可解释开花期和成熟期变化方差的 21% 和 20%,参数的交互作用较强,占总效应的 60%。P1 可解释开花期和成熟期变化方差的 16% 和 14%,其直接效应占主导。VEFF 可解释开花期和成熟期变化方差的 12% 和 8%,参数的交互作用占主导。对成熟期影响敏感的参数还有 P5,排第 4 位,解释成熟期差异的 10%,几乎与其他参数无交

表 5 不同冬小麦产量水平和生长季节下 EFAST 法敏感性分析的 TDCC 和 P 值
Tab.5 TDCC and P-value under different scenarios based on the results from EFAST method

	年份						产量水平					
	2007—2008		2008—2009		2009—2010		潜在产量水平		可获得产量水平		实际产量水平	
	TDCC	P 值	TDCC	P 值	TDCC	P 值	TDCC	P 值	TDCC	P 值	TDCC	P 值
开花期	0.93	9.90×10^{-6}	0.97	3.90×10^{-6}	0.96	4.50×10^{-6}	0.96	4.10×10^{-6}	0.96	4.10×10^{-6}	0.87	3.70×10^{-5}
成熟期	0.94	7.20×10^{-6}	0.96	4.50×10^{-6}	0.96	4.80×10^{-6}	0.94	7.50×10^{-6}	0.94	7.50×10^{-6}	0.88	3.30×10^{-5}
产量	0.92	1.20×10^{-5}	0.98	2.80×10^{-6}	0.97	3.50×10^{-6}	1.00	1.90×10^{-6}	0.98	2.80×10^{-6}	0.91	1.60×10^{-5}
地上生物量	0.94	8.30×10^{-6}	0.97	3.50×10^{-6}	0.97	3.80×10^{-6}	1.00	1.80×10^{-6}	0.99	2.30×10^{-6}	0.93	9.20×10^{-6}

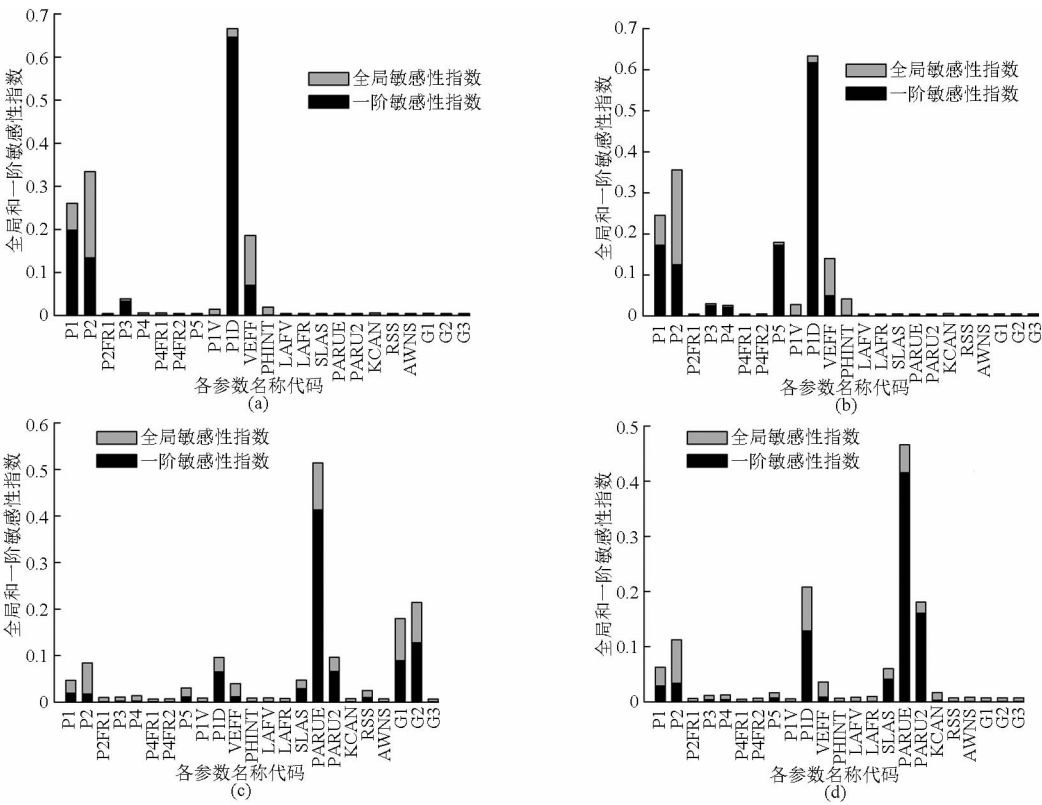


图 2 EFAST 法计算的 CERES - Wheat 模型作物参数的敏感性分析

Fig.2 Sensitivity analysis results based on EFAST method for CERES - Wheat
(a) 开花期 (b) 成熟期 (c) 产量 (d) 地上生物量

互作用(图 2a、2b)。

产量和地上生物量均对 PARUE 最敏感,可解释其变化方差的 35% 和 36%,而且参数间的交互效应较小,参数的直接影响分别占总效应的 80% 和 90%(图 2c、2d)。地上生物量敏感的第 2 和第 3 个参数分别为 P1D 和 PARU2,分别解释变化方差的 16% 和 14%,其中 PARU2 的直接影响占总效应的 90%。P2、P1 和 SLAS 解释地上生物量变化方差的 9%、5%、5%,P2 的交互作用占总效应的 70%。对产量敏感的第 2 和第 3 个参数分别为 G2 和 G1,分别解释变异的 14% 和 16%,参数间的交互作用较强,占总效应的将近一半。PARU2、P1D 和 P2 均解释产量变化方差的 6%,其中 P2 的交互作用较强,占总效应的 80%。

2.3 Morris 法与 EFAST 法比较

目前,对于敏感参数的划定标准尚无定论,本研究根据前人研究和专家推荐的 Morris 法界定 $\mu^*_{\text{average}} < \mu^* < \mu^*_{\text{max}}$ 的参数为敏感参数,EFAST 法中界定 $S_{T_i} > 0.05$ 为敏感参数^[34-35]。由前面的分析结果可知不同年份和产量水平下的参数敏感性差异不显著,因此将 2007—2010 年 3 个产量水平下,利用 Morris 法和 EFAST 得到的 μ^* 和 S_{T_i} 进行加和平均。由这 2 种敏感性分析方法得出的开花期、成熟期、产量和地上生物量这 4 个输出变量的敏感参数如表 6 所示,敏感参数基本一致,但各个参数的重要程度略有不同。在开花期、成熟期和产量的敏感性分析中,Morris 法均低估了 P2 的敏感性,这是由于 P2 与其它参数的交互作用较强,而 μ^* 不能将参数的交互和非线性效

应分开。在产量敏感性分析中,Morris 法低估了 G2 和 G1 的敏感性,也是由于 G2 和 G1 的非线性效应或者参数间交互作用较强引起。Morris 法中综合考

虑 μ^* 和 σ ,得到的结果与 EFAST 法更接近。如表 7 所示,两种方法得到的敏感性指数的相关系数均大于 0.76($P<0.001$),显著相关。

表 6 Morris 法与 EFAST 法得出的敏感参数
Tab.6 Sensitive crop parameters screened by Morris and EFAST methods

输出变量	敏感性方法	敏感参数					
开花期	Morris 法	P1D	P1	P2	VEFF		
	EFAST 法	P1D	P2	P1	VEFF		
成熟期	Morris 法	P1D	P1	P5	P2	VEFF	
	EFAST 法	P1D	P2	P1	P5	VEFF	
产量	Morris 法	PARUE	PARU2	P1D	G2	P1	G1
	EFAST 法	PARUE	G2	G1	PARU2	P1D	P2
生物量	Morris 法	PARUE	PARU2	P1D	P2	P1	
	EFAST 法	PARUE	P1D	PARU2	P2	P1	SLAS

表 7 Morris 法与 EFAST 法的相关系数
Tab.7 Correlation coefficients between Morris μ^* and EFAST S_{T_i}

输出变量	潜在产量水平	可获得产量水平	实际产量水平	平均
开花期	0.903	0.903	0.923	0.910
成熟期	0.839	0.839	0.878	0.852
产量	0.761	0.769	0.811	0.780
生物量	0.937	0.911	0.908	0.919

从以上分析结果可知,Morris 法与 EFAST 法均可以筛选出对目标变量影响较大的作物参数。Morris 法所需的模型运行次数较少,省时省力,在模型本地化应用中操作性更强。而 EFAST 法精度较高,定量分析各个参数的一阶和全局敏感指数,在进行参数的不确定性分析方面更有优势。

3 结论

(1) 在 2007—2010 年 3 个冬小麦产量水平下,

参数的敏感性排序一致性较高。
(2) P1D、P1、P2、VEFF 均为冬小麦开花期和成熟期的敏感参数;成熟期对 P5 较敏感;冬小麦产量和地上生物量均对 PARUE、PARU2、P1D、P1、P2 敏感;另外产量对 G2 和 G1 也敏感,而地上生物量对 SLAS 较敏感。
(3) Morris 法与 EFAST 法得出的敏感参数基本一致,说明 2 种方法在一定程度上是可以替代的。需要注意的是本研究 CERES - Wheat 模型中作物参数敏感性分析是在特定的气候、土壤、田间管理条件下进行,筛选出的作物敏感参数仅适用于本研究区域,在其他差异较大的生产条件下应用 CERES - Wheat 模型,应进行类似的敏感性分析来选择需要校正的参数。

参 考 文 献

1 Soler C M T, Sentelhas P C, Hoogenboom G. Application of the CSM-CERES - Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment[J]. European Journal of Agronomy, 2007, 27(2 - 4):165 - 177.

2 Abeledo L G, Savin R, Slafer G A. Wheat productivity in the Mediterranean Ebro Valley: analyzing the gap between attainable and potential yield with a simulation model[J]. European Journal of Agronomy, 2008, 28(4):541 - 550.

3 Malone R W, Jaynes D B, Ma L, et al. Soil-test N recommendations augmented with PEST-optimized RZWQM simulations[J]. Journal of Environment Quality, 2010, 39(5):1711 - 1723.

4 López-Cedrón Francisco Xavier, Kenneth J Boote, Benigno Ruiz-Nogueira, et al. Testing CERES - Maize versions to estimate maize production in a cool environment[J]. European Journal of Agronomy, 2005, 23(1):89 - 102.

5 Liu S, Yang J Y, Zhang X Y, et al. Modelling crop yield, soil water content and soil temperature for a soybean - maize rotation under conventional and conservation tillage systems in Northeast China[J]. Agricultural Water Management, 2013, 123:32 - 44.

6 Houles V, Mary B, Guerif M, et al. Evaluation of the ability of the crop model STICS to recommend nitrogen fertilisation rates according to agro-environmental criteria[J]. Agronomie, 2004, 24(6 - 7):339 - 349.

7 Saltelli A, Ratto M, Andres T, et al. Global sensitivity analysis: the primer[M]. Hoboken: Wiley-Interscience, 2008:98 - 105.

8 Morris M D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments[J]. Technometrics, 1991, 33(2):161 - 174.

9 Venables W N, Ripley B D. Modern applied statistics with S-PLUS[M]. New York: Springer, 1994: 57 - 66.

- 10 Sobol I M. Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models[J]. Mathematical Modelling and Computational Experiments, 1993, 1(4):407 - 414.
- 11 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.
- 12 黄敬峰, 陈拉, 王秀珍. 水稻生长模型参数的敏感性及其对产量遥感估测的不确定性[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19):119 - 129.
- Huang Jingfeng, Chen La, Wang Xiuzhen. Sensitivity of rice growth model parameters and their uncertainties in yield estimation using remote sensing data[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(19):119 - 129. (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 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.
- 15 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)
- 16 Lamboni M, Makowski D, Lehuger S, et al. Multivariate global sensitivity analysis for dynamic crop models[J]. Field Crops Research, 2009, 113(3):312 - 320.
- 17 Jones J W, Hoogenboom G, Porter C H, et al. The DSSAT cropping system model[J]. European Journal of Agronomy, 2003, 18(3):235 - 265.
- 18 Ritchie J T, Godwin D C, Otter-Nacke S. CERES - Wheat: a simulation model of wheat growth and development[R]. College Station: Texas A&M University Press, 1988: 58 - 66.
- 19 Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. FAO irrigation and drainage paper No. 56[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998:26 - 40.
- 20 陕西省土壤普查办公室. 陕西土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 62 - 67.
- 21 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 296 - 301.
- 22 全国土壤普查办公室. 中国土种志(第五卷)[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994: 244 - 254.
- 23 Saltelli A, Chan K, Scott E M. Sensitivity analysis[M]. New York: Wiley, 2000: 58 - 66.
- 24 Campolongo F, Cariboni J, Saltelli A. An effective screening design for sensitivity analysis of large models[J]. Environmental Modelling & Software, 2007, 22(10):1509 - 1518.
- 25 Cukier R, Levine H, Shuler K. Nonlinear sensitivity analysis of multiparameter model systems[J]. Journal of Computational Physics, 1978, 26(1):1 - 42.
- 26 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 Chonggang, Hu Yuanman, Chang Yu, et al. Sensitivity analysis in ecological modeling[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(6):1056 - 1062. (in Chinese)
- 27 Giglioli N, Saltelli A, JRC European Commission. Simlab software package for uncertainty and sensitivity analysis[EB/OL]. [2011-08-31] <http://simlab.jrc.ec.europa.eu>.
- 28 Doherty J. PEST: a unique computer program for model-independent parameter optimisation[R]. Water Down Under 94', 1994: 551 - 554.
- 29 Hoogenboom G, Jones J W, Porter C H, et al. DSSAT 4.0 Vol.1 [R]. Honolulu: University of Hawaii, 2004: 13 - 24.
- 30 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 model[J]. Journal of China Agricultural University, 2012, 17(5):149 - 154. (in Chinese)
- 31 Iman Ronald L, Conover W J. A measure of top-down correlation[J]. Technometrics, 1987, 29(3):351 - 357.
- 32 Savage I R. Contributions to the theory of rank order statistics-the two-sample case [J]. The Annals of Mathematical Statistics, 1956, 27(3):590 - 615.
- 33 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.
- 34 Haythem B T, Lardy R, Barra V, et al. Screening parameters in the pasture simulation model using the Morris method[J]. Ecological Modelling, 2013, 266:42 - 57.
- 35 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.

experiments, in order to compare the effects of irrigation water quality on the distributions of soil water, soil salt and soil water repellency. The results showed that the curves of cumulative infiltration, wetting front and infiltration rate for sand 1 and wettable saline-alkali soil were all smooth after saline water irrigation. But those for sand 2 and hydrophobic saline-alkali soil were not so smooth, and their infiltration process were much slower than those of sand 1 and wettable saline-alkali soil. The increase of irrigation water mineral degree affected the infiltration process of saline-alkali soil more than that of sand. Philip model and Kostiakov equation were both good for fitting the infiltration curves of wettable soils. After saline water irrigation, the water drop penetration time (WDPT) along the profile increased both for sand 1 and san 2, but the maximal increment was only 3.6 s. The increment of WDPT for saline-alkali soil was obvious and the maximal increment value was 19 s. The increase of irrigation mineral degrees affected electrical conductivity, concentration of Ca^{2+} and concengtration of Cl^- . In conclusion, this study indicated that saline water irrigation affected not only the distributions of soil water and salt, but also that of hydrophobicity.

Key words: Saline water irrigation Soil water and soil salt movement Soil hydrophobicity Infiltration

~~~~~

(上接第 131 页)

**Global Sensitivity Analyses of DSSAT – CERES – Wheat Model  
Using Morris and EFAST Methods**

Song Mingdan<sup>1</sup>   Feng Hao<sup>2,3</sup>   Li Zhengpeng<sup>1,3</sup>   Gao Jianen<sup>1,2</sup>

(1. *Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China*

2. *Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China*

3. *Institute of Water Saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

**Abstract:** Parameter sensitivity analysis is crucial to the process of model localization. In this study, both the Morris and EFAST (extended Fourier amplitude sensitivity test) methods were applied to test the sensitivities of outputs of CERES – Wheat model to its cultivar and ecotype parameters. The wheat crop planted during 2007—2010 was simulated under the potential, attainable and actual yield level at Yangling, Shaanxi Province. CERES – Wheat outputs of interest included anthesis date, maturity date, yield and above-ground biomass. The results showed that the anthesis and maturity dates were highly influenced by photoperiod response (P1D), accumulated temperature in the duration of emergence stage to terminal spike differentiation stage (P1), accumulated temperature in the duration of terminal spike differentiation stage to flag leaf stage (P2), and vernalization effect (VEFF). Moreover, maturity date was sensitive to grain filling phase duration (P5). Yield and above-ground biomass were highly influenced by PAR before and after flag leaf stage (PARUE, PARU2), P1D, P1 and P2. Moreover, biomass was sensitive to standard kernel size (G2) and kernel number per unit canopy weight at anthesis (G1). The correlation coefficient between the Morris mean and the EFAST total sensitivity index was high, indicating that the Morris method with less computation could be used to select the sensitive model parameters.

**Key words:** Crop model   Top-down concordance coefficient   Correlation coefficient   Goble sensitivity analysis