

CERES-Wheat 作物模型参数全局敏感性分析

姜志伟^{1,2}, 陈仲新^{1,2}*, 周清波^{1,2}, 任建强^{1,2}

(1. 农业部资源遥感与数字农业重点开放实验室, 北京 100081;

2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 作物生长模型广泛应用于区域作物估产研究与应用之中, 如何选择最佳作物模型优化参数是获得较好模拟预测结果的关键之一。研究选择河南洛阳为试验区, 应用扩展傅里叶振幅灵敏度检验 (EFAST) 法对 CERES-Wheat 模型作物参数及田间管理参数进行了全局敏感性分析。结果表明, 完成一片叶生长所需积温、最适温度条件下通过春化阶段所需天数、光周期参数、最佳条件下标准籽粒质量参数、开花期单位株冠质量的籽粒数参数等指标具有较高敏感性, 系为模型参数“本地化”的关键参数。播种日期、播种密度、施肥日期、播种深度、灌溉日期是模型区域化应用的最佳优化变量。研究表明, EFAST 敏感性分析是模型参数“本地化”和选择最佳“区域化”优化变量的有效方法。

关键词: 作物, 敏感性分析, 模型

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.01.038

中图分类号: S165+.27

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-01-0236-07

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 with English abstract)

0 引言

作物生长模型能够较好地描述土壤-作物-大气系统相互作用机理和评价农业生产管理措施对农田生态环境的影响, 被广泛应用于作物生长机理研究和农业生产管理中^[1-3]。经过多年的发展和完善, 作物模型主要形成了三大较为成熟的系列, 即荷兰瓦赫宁根 (wageningen)、美国 DSSAT (decision support system for agrotechnology transfer) 及中国作物计算机模拟优化决策系统 (crop computer simulation, optimization, decision making system, CCSODS) 作物模型系列。其中, DSSAT 模型系列是美国 IBSNAT (international benchmark sites network for agrotechnology transfer) 于 1983 年资助开发的定量评价“气候-土壤-作物-管理”系统的动力学模型, 自上世纪 80 年代中期开始在世界范围内进行广泛验证, 在作物估产、气候变化影响评价、农田水肥管理等多个领域得到广泛应用。DSSAT 模型系列中最为成熟的子模型之一为著名的 CERES 模型 (crop environment resource synthesis)。CERES 模型是针对不同禾谷类作物生长发育特点而分别开发设计的, 可分别应用 CERES-Wheat、CERES-Barley、

CERES-Maize、CERES-Millet、CERES-Rice、CERES-Sorghum 子模块模拟小麦、大麦、玉米、谷子、水稻、高粱等禾谷类作物生长发育过程, 以及对气候、土壤、管理等因子的响应。

近年来, 基于作物生长模型的遥感信息同化成为中外的研究热点^[4-9]。它将作物模型的时间连续性、机理性与遥感信息的空间连续性表达有机结合在一起, 为区域作物长势监测和估产提供了新思路。作物模型与遥感信息耦合首先需要考虑模型“本地化”和“区域化”问题, 其中, 最关键的一个环节就是模型参数的校正和优化。模型参数的敏感性分析正是解决该问题的有效方法^[10]。敏感性分析研究的是如何将模型结果的不确定性分配到不同的模型输入参数中, 从而筛选出引起模型结果不确定性的主要影响因素, 识别和选择关键控制参数^[11]。

敏感性分析方法可分为局部敏感性分析 (Local sensitivity analysis) 和全局敏感性分析 (Global sensitivity analysis) ^[12-13]。局部敏感性分析缺乏模型参数之间的相互作用对模拟结果的综合影响的考虑, 分析结果具有一定的片面性。因此, 作物模型敏感性分析越来越倾向于采用全局敏感性分析方法, 同时检测多个模型参数变化对模拟结果的全局影响。其中基于方差的定量全局敏感性分析方法广泛应用于水文模型^[14-15]、气候模型^[16-17]、地理空间分析模型^[10,18]、生态模型^[19-22]等模型的敏感性分析中, 如 Sobol'法和扩展傅里叶振幅灵敏度检验法 (extended fourier amplitude sensitivity test, EFAST)。但针对 DSSAT 系列作物生长模型进行全局敏感性分析的研究尚未见到报道。

本研究利用河南洛阳农业生态试验基地逐日气象数据、土壤剖面数据、田间管理数据, 选用 EFAST 全局敏

收稿日期: 2010-07-23

修订日期: 2011-01-16

基金项目: 农业部“948 计划”项目 (2009-Z31, 2010-S2); 国际科技合作项目 (2010DFB10030); 国家自然科学基金 (40971218)。

作者简介: 姜志伟 (1981—) 男, 内蒙古赤峰人, 博士生, 主要从事农业遥感应用研究。北京 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 100081。Email: zhiweijt@163.com

*通信作者: 陈仲新 (1970—) 男, 河北唐山人, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事 GIS 及农业遥感应用、信息农业和数字农业、农业生态等方面研究。北京 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 100081。Email: zxchen@mail.caas.net.cn

感性分析方法对 DSSAT 系列作物生长模型中的 CERES-Wheat 子模型进行定量敏感性分析。研究主要考虑冬小麦生态型和品种型参数、土壤和田间管理参数对产量的敏感性,旨在为 CERES-Wheat 作物生长模型参数“本地化”服务,同时也为模型区域化的应用提供某些选择最佳优化变量的方法。

1 模型与方法

1.1 CERES-Wheat 作物生长模型

作为 DSSAT 模型系列中较为成熟的子模型之一, CERES-Wheat 模型是专门为小麦类作物开发的生长模拟模型。该模型以模块的形式运行在 DSSAT CSM(Cropping system model) 公共平台上,并调用气象和土壤数据库以及土壤水分、氮素和碳素平衡模块,以天为时间步长模拟小麦生长发育、产量形成、氮碳水平平衡过程等^[23-26]。CERES-Wheat 模型在天气数据驱动下完成作物生长发育的模拟,其基本模拟策略如图 1。模拟过程涉及光截获和光合作用动力学、营养吸收和根系活动动力学、干物质分配、水分吸收和蒸腾、生长和呼吸、叶面积增长、发育和器官形成、衰老、田间管理措施等。

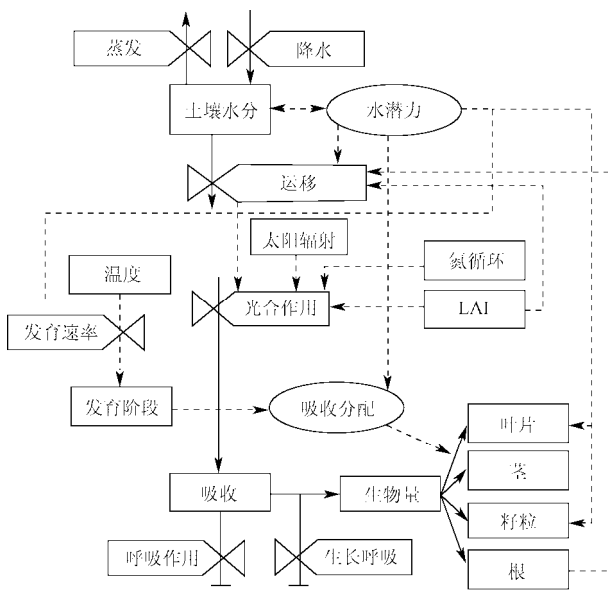


图 1 CERES-Wheat 模型基本模拟机理
Fig.1 Basic scheme of CERES-Wheat model

CERES-Wheat 作物生长模型运行需输入气象数据、作物参数(表 1)、土壤参数、田间管理参数(表 2)等驱动数据。

研究所需的气象驱动数据为 1961—2007 年洛阳孟津逐日最低和最高温度、降水量、日照时数、风速、相对湿度等,来源于中国气象局国家气象信息中心。模型所必需的日太阳辐射量 Q 则根据经验公式计算^[27]

$$Q = Q_0(0.105 + 0.708 \times \frac{S}{S_0}) \quad (1)$$

式中, Q 为太阳总辐射量, MJ/m^2 ; Q_0 为天文辐射量, MJ/m^2 ; S 为实测太阳日照时数, h ; S_0 为太阳可照时数, h 。农田土壤剖面理化性状数据来源于洛阳农业生态试

验基地测量和《洛阳土壤》。土壤类型为黄土质褐土,主要测定项目为土壤名称、土壤质地、土壤剖面的土层厚度、土壤剖面中黏粒、粉砂粒、砂粒、 $>2 \text{ mm}$ 石砾及土壤有机碳含率, %、土壤体积质量, g/cm^3 、阳离子交换量, cmol/kg 等。

模型所需作物播种与收获日期、播种密度与深度、播种行间距、灌水日期与灌水量、施肥日期与施肥量、作物物候期、产量、生物量、籽粒重等田间管理数据来源于试验基地观测和调查。

表 1 小麦生态型和品种型参数
Table 1 Wheat ecotype and cultivar parameters

代码	描述	取值范围
作物生态型参数		
AWNS	芒长等级	0~10
GRNMN	籽粒最少含氮率/%	0~0
GRNS	标准籽粒含氮率/%	1~3
HTSTD	标准冠层生长高度/cm	50~150
KCAN	光合有效辐射消光系数	0.425~1.275
LA1S	第一片正常叶片面积/ cm^2	2.5~7.5
LARS	生殖生长阶段叶片面积/ cm^2	10~30
LAVS	营养阶段叶片面积/ cm^2	5~15
LAWR2	营养生长末期叶片面积质量比率/($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	90~270
LAWRS	第一片正常叶片面积质量比率/($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	110~330
LLIFE	营养阶段叶片寿命/叶龄	2~6
LT50H	耐冷温度/ $^{\circ}\text{C}$	-20~-10
NFGL	氮素生长胁迫下限系数	0~0
NFGU	氮素生长胁迫上限系数	1~1
NFPL	氮素光合作用胁迫下限系数	0~0
NFPU	氮素光合作用胁迫上限系数	1~1
P1	叶尖露出叶鞘到叶片定长所需积温/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$)	175~525
P1DPE	出苗前日长系数	0~1
P2	叶片定长至叶片生长末期所需积温/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$)	142.5~427.5
P3	叶片生长结束至穗生长结束所需积温/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$)	120~360
P4	穗粒生长结束至籽粒灌浆结束所需积温/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$)	150~450
P4SGE	茎生长结束参数	2.225~6.675
PARUR	完成最后叶片生长后光合有效辐射转换为干物质比率/($\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}$)	1.4~4.2
PARUV	完成最后叶片生长前光合有效辐射转换为干物质比率/($\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}$)	1.4~4.2
RDGS1	前期根深生长比率/($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$)	1.5~4.5
RDGS2	后期根深生长比率/($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$)	1~3
RSFRS	茎吸收储存系数	0.15~0.45
TBGF	籽粒灌浆积温/ $^{\circ}\text{C}$	0~0
TIILF	分蘖阈值	2.25~6.75
WFGU	水分生长胁迫上限系数	1~2
WFPGF	籽粒灌浆期基因型水分胁迫敏感系数	0~1
WFPU	光合作用水分胁迫上限系数	0.75~2.25
作物品种型参数		
P1V	最适温度条件下通过春化阶段所需天数/d	19.25~57.75
P1D	光周期参数/%	29.2~87.6
P5	籽粒灌浆期积温/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$)	225~675
G1	开花期单位株冠质量的籽粒数/(粒· g^{-1})	13.75~41.25
G2	最佳条件下标准籽粒质量/mg	18.2~54.6
G3	成熟期非胁迫下单株茎穗标准干质量/g	0.695~2.085
PHINT	完成一片叶生长所需积温/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$)	38.5~115.5

表 2 土壤和田间管理参数
Table 2 Soil and field management parameters

代码	描述	取值范围
土壤参数		
SALB	反照率	0.09~0.17
SLU1	蒸发上限/mm	2~12
SLDR	排水率	0.01~0.85
SLRO	径流曲数	61~94
SLNF	矿化系数	0~1
SLPF	土壤光合作用系数	0~1
SLLL	土壤排水下限/(cm ³ ·cm ⁻³)	0.055~0.123
SDUL	土壤排水上限/(cm ³ ·cm ⁻³)	0.123~0.348
SSAT	土壤饱和上限/(cm ³ ·cm ⁻³)	0.348~0.547
SRGF	根生长系数	0~1
SSKS	土壤饱和水力传导率/(cm·h ⁻¹)	0.06~21
SBDM	土壤容质量/(g·cm ⁻³)	1~1.4
SLOC	有机碳含量/%	0.348~5
SLCL	土壤黏粒含量 (<0.002 mm) /%	0~15
SLSI	土壤沙粒含量 (0.05~0.002 mm) /%	30~45
SLNI	土壤总氮含量/%	0.05~0.30
SLHW	土壤溶液 pH 值	6.5~7.5
SCEC	土壤阳离子交换量/(cmol·kg ⁻¹)	1~30
田间管理参数		
PDATE	播种日期	10.1~11.1
PPOP	播种密度/(株·m ⁻²)	100~800
PLRS	行间距/cm	5~40
PLDP	播种深度/cm	2~10
IDATE	灌溉日期	3.15~5.15
IRVAL	灌溉量/mm	0~120
FDATE	施肥日期	3.15~5.15
FAMN	施氮量/(kg·km ⁻²)	0~300
FDEP	施肥深度/cm	0~15

1.2 EFAST 法

EFAST 法^[13]是 Saltelli 等人结合 Sobol'法和傅立叶振幅敏感性检验法 (Fourier amplitude sensitivity test, FAST) 的优点所提出的全局敏感性分析方法。该方法是基于方差的定量全局敏感性分析方法,即应用因模型输入参数变化而产生的模型结果的方差来反映研究参数的重要性(或敏感度)和对模型结果变化的贡献程度。模型结果 Y 的总方差 $V(Y)$ 由各参数 x_i 及参数间相互作用的方差得到,模型结果的总方差 $V(Y)$ 可分解为

$$V(Y) = \sum_i V_i + \sum_{i \neq j} V_{ij} + \sum_{i \neq j \neq m} V_{ijm} + V_{12 \dots k} \quad (2)$$

式中, $V(Y)$ 为模型结果 Y 的总方差; V_i 为参数 x_i 的方差; $V_{ij} \sim V_{12 \dots k}$ 为各参数相互作用的方差。

$$V_i = V[E(Y/x_i)] \quad (3)$$

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

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

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

条件期望的方差称为主影响 (main effect), 可反映参数 x_i 对模型结果 Y 方差的显著性。因此, 各参数及参

数相互作用的方差与总方差的比值, 即敏感性指数, 能很好的说明各参数对模型结果变化的贡献。参数 x_i 的一阶敏感性指数 S_i 反映了参数 x_i 对模型结果总方差的直接贡献率, 可定义为

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

式中 S_i 为参数 x_i 的一阶敏感性指数。

同理, 参数 x_i 的二阶及三阶敏感性指数可定义为

$$S_{ij} = \frac{V_{ij}}{V}, S_{ijm} = \frac{V_{ijm}}{V} \quad (6)$$

式中, S_{ij} 为参数 x_i 的二阶敏感性指数; S_{ijm} 为参数 x_i 的三阶敏感性指数。

独立参数 x_i 和参数间的相互影响可用总敏感性指数来表示, 即各阶敏感性指数之和

$$S_{T,i} = S_i + S_{ij} + S_{ijm} + \dots + S_{12 \dots i \dots k} \quad (7)$$

式中, $S_{T,i}$ 为参数 x_i 的总敏感性指数; $S_i \sim S_{12 \dots i \dots k}$ 为参数 x_i 的一阶至 k 阶敏感性指数。

参数 x_i 的敏感性指数越大, 说明该参数直接和间接(与其他参数相互作用)对模型结果 Y 的影响(或贡献)越大, 也越能解释模型结果变化方差。作物生长模型中包含非线性多参数耦合过程。因此, 应用 EFAST 方法通过对模型结果方差的分解, 可定量地获得每一个参数各阶及总敏感指数, 从而检验和分析各参数的变化对作物模型模拟结果的直接和间接影响。

1.3 CERES-Wheat 敏感性分析方案

准备好模型运行所必需的气象、土壤、田间管理和作物参数数据后, 根据全局敏感性分析的原理设计如下分析方案:

1) CERES-Wheat 模型作物参数敏感性分析。分析冬小麦 26 个生态型和 7 个品种型参数对模拟产量的敏感性, 筛选关键敏感参数, 为实现模型“本地化”提供参数调整依据, 也是顺利实施方案 2) 的必要前提。各作物参数在设定取值范围(表 1)内均匀分布。

2) CERES-Wheat 模型土壤和田间管理参数敏感性分析。考虑到作物模型由单点扩展到区域尺度时存在空间异质性问题, 该方案应用方案 1) 确定的作物品种参数对土壤和田间管理参数(表 2)进行全局敏感性分析, 旨在为区域作物估产中优化变量选择、空间插值、模拟精度评价提供依据。研究区域内气候变化相对稳定, 该方案未考虑气象要素变化对模型结果的敏感性。

研究应用蒙特卡罗方法随机对冬小麦作物参数和区域化参数(土壤和田间管理参数)分别采样。将采样的参数组输入模型获得冬小麦模拟产量, 利用 EFAST 方法对各个参数进行敏感性分析。本研究应用 SimLab^[28]软件实现敏感性分析。

2 结果与分析

2.1 作物参数敏感性分析

冬小麦 33 个作物参数(26 个生态型和 7 个品种型参数)对产量的总敏感性指数(全局敏感性分析)和一阶

敏感性指数(局部敏感性分析)结果(图 2)表明,局部敏感性分析因缺乏综合考虑参数自身及参数间相互作用对模拟结果的影响,不能很好地反映各参数对模型模拟结果的敏感度和影响程度。而全局敏感性分析则给出各参数变化对模拟结果影响的总贡献,筛选和提取的敏感参数更有利于模型结果改进和优化。CERES-Wheat 作物生长模型 33 个作物参数中有 11 个总敏感性指数大于 0.1,其中 5 个为品种型参数,6 个为生态型参数。完成一片叶生长所需积温(PHINT)参数是影响冬小麦产量最为敏感的作物参数,可解释作物产量变化方差的 68.7%。这是因为 PHINT 值描述的是第一片叶发育至第二片叶所需要的积温,该值反映了叶片发育的速率,影响小麦整个生长发育进程。最适温度条件下通过春化阶段所需天数参数(P1V)和光周期参数(P1D)描述的是小麦感温感光特性,控制小麦从营养生长过渡到生殖生长所必须经历的春化阶段和光照阶段,未经过这 2 个阶段的小麦会一直停留在分蘖丛生状态,不能正常抽穗结实完成生育周期^[29]。因此,这 2 个参数变化对模型结果较为敏感,其敏感性指数分别为 0.238、0.153。最佳条件下标准籽粒质量参数(G2)和开花期单位株冠质量的籽粒数参数(G1)对产量变化有 15.1%和 13.7%的贡献。这 2 个参数是对不同冬小麦品种产量特性最直接的描述,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。以上 5 个作物品种参数最能显著体现不同作物品种间的特征差异,尤其是对冬小麦物候期和产量的表达,是 CERES-Wheat 模型作物参数“本地化”时首要考虑调整和优化的作物品种参数。

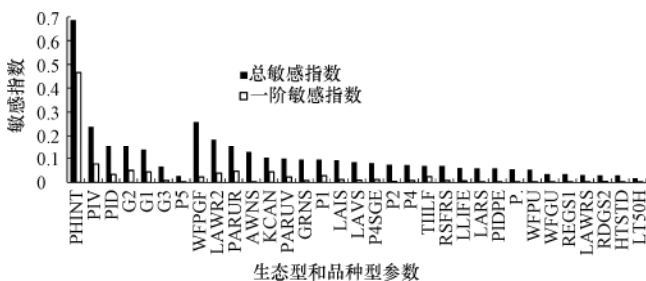


图 2 CERES-Wheat 模型生态型和品种型参数全局和一阶敏感指数

Fig.2 Global and first order sensitivity indexes of wheat ecotype and cultivar parameters in CERES-Wheat

应用 EFAST 全局敏感性分析法筛选出 6 个敏感性指数大于 0.1 的生态型参数,即籽粒灌浆期基因型水分胁迫敏感系数(WFPGF)、营养生长末期叶片面积质量比率(LAWR2)、完成最后叶片生长前后的光合有效辐射转换为干物质比率(PARUV、PARUR)、光合有效辐射消光系数(KCAN)、芒长等级参数(AWNS)。WFPGF 的总敏感性指数为 0.257,是对模拟产量影响最大的生态型参数。该参数描述的是不同作物品种(如耐旱品种)对水分胁迫的适应能力,尤其是小麦在灌浆期对水分胁迫的敏感度将直接影响小麦的成产状况。LAWR2 描述的是冬小麦由营养生长向生殖生长过渡时叶片的发育状况,

直接与生育期 LAI 的变化相关联,也反映了冬小麦生殖生长阶段光合作用及其生物量累积的潜在能力,对模拟产量变化有 18.4%的贡献。PARUV、PARUR 描述的是冬小麦完成所有叶片生长后将光能转化为干物质的能力,与干物质分配和成产息息相关,对模拟产量的敏感性指数分别为 0.101 和 0.152。KCAN 决定了叶片吸收有效太阳辐射的能力,直接影响冬小麦的生长发育及产量和品质的形成,对产量变化方差的贡献为 10.3%。实际上,该系数也是作物对光合有效辐射的利用受到作物种植株形态、叶片寿命和水分胁迫等多方面因素影响的反映。不同的植株冠层叶角、叶片卷曲度、叶面积、穗型等群体形态影响光合有效辐射的空间分布,进而影响对光能的有效利用。这也是描述冬小麦穗型的 AWNS 参数具有较高的敏感性指数(为 0.128)的原因之一。同时,AWNS 值大小在一定程度上也影响到穗粒干物质的分配。

CERES-Wheat 模型作物参数敏感性分析结果很好地指示出对模拟产量较为敏感和影响较大的作物参数,将有助于快速实现模型作物参数“本地化”。事实上,对研究区冬小麦产量最敏感的作物参数主要集中在品种型参数中,是最直接反映冬小麦物候期和产量特征的关键参数,不同品种的参数值会有明显差别。而生态型参数更侧重于描述小麦具有的细节生理形态特性,相对比较稳定,不同品种间的生态型参数值变化相对较小。因此,在“本地化”模型作物参数时以调整品种型参数为主,并根据实际应用的小麦品种生理生态特征适当调整对产量敏感性较高的几个生态型参数。模型各作物参数敏感性会受到区域气候、土壤、田间管理等条件差异的影响。如对于较为干旱的区域来说,与水分胁迫相关的作物参数(如 WFPU、WFGU、WFPGF)对产量的敏感性必然会增加。因此,针对不同区域进行作物模型敏感性分析筛选出的作物敏感参数仅适用于所研究区域。

2.2 土壤和田间管理参数敏感性分析

完成方案 1) CERES-Wheat 模型作物参数“本地化”后,方案 2) 应用“本地化”作物参数,进一步试验研究当地气候条件下模型土壤和田间管理参数变化对模拟产量的敏感性。土壤和田间管理参数敏感性分析表明,对模拟产量具有较高敏感性的参数主要集中于土壤参数(图 3)。土壤排水上限(SDUL)、矿化系数(SLNF)、排水率(SLDR)、有机碳含率(SLOC)、总氮含率(SLNI)、蒸发上限(SLU1)参数的总敏感性指数均在 0.1 以上,是引起产量变化最关键的土壤参数,特别是土壤排水上限对产量变化的贡献达 61.4%。这几个参数是描述土壤水肥和养分交换吸收的关键土壤参数,对作物生长发育影响较大。而田间管理参数中以灌溉日期(总敏感性指数 0.281)和播种日期(总敏感性指数 0.10)较为敏感。这 2 个参数变化改变了作物物候期和水分分布,对作物生长发育和成产影响较大,特别是干旱地区。

实际上,在作物模型区域化应用中,土壤和田间管理参数并不一定同时发生变化,往往其中之一是相对稳定的。在这种情况下土壤或田间管理参数的敏感性分析

则显得十分必要，这将有助于模型结果的改善。同时也可明确土壤和田间管理参数对模拟产量影响的差异。

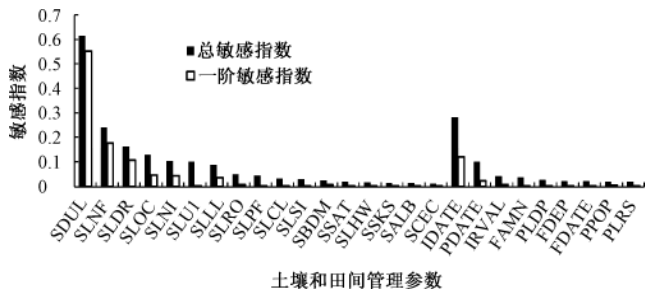


图3 CERES-Wheat 模型土壤和田间管理参数全局和一阶敏感指数

Fig.3 Global and first order sensitivity indexes of soil and field management parameters in CERES-Wheat

为此，研究进一步将土壤和田间管理参数进行分解，独立分析各自的敏感性。在田间管理参数确定情况下，对模拟冬小麦产量影响较大的土壤参数与综合考虑土壤和田间管理参数相互作用试验所筛选的敏感参数结果一致，主要为 SDUL、SLDR、SLNF、SLLL，其敏感指数依次为 0.542、0.241、0.191、0.154（图 4a）。确保这 4 个参数值的合理性将会有效改善模型结果。而这一点在土壤参数确定，田间管理参数变化的试验结果中得到了很好的体现。

在土壤参数确定情况下，对模拟冬小麦产量较为敏感的田间管理参数为播种日期（PDATE）、播种密度（PPOP）、施肥日期（FDATE）、播种深度（PLDP）和灌溉日期（IDATE）。这 5 个参数的敏感指数均在 0.1 以上，尤其是播种日期变化可解释产量变化方差的 76.9%（图 4b）。

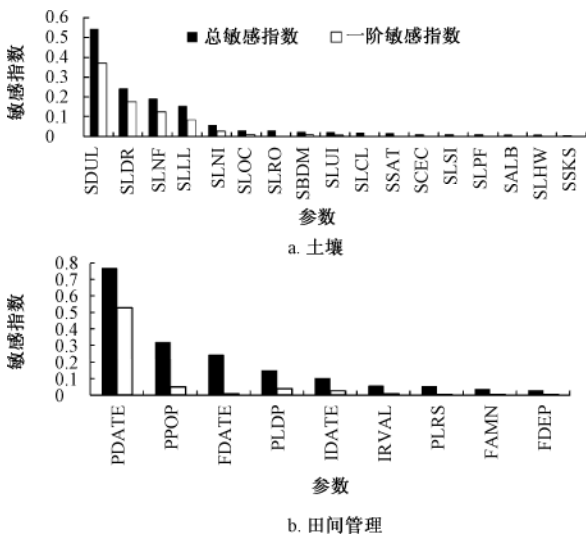


图4 CERES-Wheat 模型土壤参数 (a) 和田间管理参数 (b) 全局和一阶敏感指数

Fig.4 Global and first order sensitivity indexes of soil (a) and field management (b) parameters in CERES-Wheat

在当地气候背景下，应用“本地化”作物品种参数，对以上 3 种情况土壤和田间管理参数敏感性分析结果表

明，在模型区域化应用中应综合考虑作物品种、土壤、田间管理以及气候条件的相互作用，重点优化对模型结果影响较大的关键敏感参数，折中考虑区域内各参数相对合理性和准确性，尽可能改善模拟结果的不确定性。实际上，土壤参数在相当一段时间内是相对稳定的，且各参数指标均通过实测获得。因此，在保证土壤参数具有较高准确性条件下，更多地考虑田间管理参数的区域差异性所引起的模型结果的不确定性更有实际意义。

3 结论

1) EFAST 全局敏感性分析方法能够有效地筛选出 CERES-Wheat 模型中对模拟产量变化较为敏感的参数，在快速实现模型参数“本地化”和“区域化”中具有较大的应用潜力。

2) CERES-Wheat 模型参数“本地化”过程中，以调整品种型参数为主（PHINT、PIV、PID、G2、G1），并根据实际作物品种的生理形态特征适当调整 WFPGF、LAWR2、PARUV、PARUR、KCAN、AWNS 等对产量较为敏感的作物生态型参数。

3) 考虑到土壤参数变化的相对稳定性，CERES-Wheat 模型在区域化应用时将更多地考虑区域内或区域间田间管理参数的不确定性对模拟产量的影响。PDATE、PPOP、FDATE、PLDP、IDATE 对模拟产量敏感性较高，是模型区域化应用时选择的最佳优化变量。

[参 考 文 献]

- [1] Donatelli M, Van Ittersum M K, Bindi M, et al. Modelling cropping systems: highlights of the symposium and preface to the special issues[J]. European Journal of Agronomy. 2002, 18(1/2): 1-11.
- [2] Gervois S, de Noblet-Ducoudré N, Viovy N, et al. Including croplands in a global biosphere model: methodology and evaluation at specific sites[J]. Earth Interactions. 2004, 8(16): 1-25.
- [3] Tixier P, Malzieux E, Dorel M, et al. Rpest: An indicator linked to a crop model to assess the dynamics of the risk of pesticide water pollution: Application to banana-based cropping systems[J]. European Journal of Agronomy. 2007, 26(2): 71-81.
- [4] De Wit A J W, Van Diepen C A. Crop model data assimilation with the ensemble kalman filter for improving regional crop yield forecasts[J]. Agricultural and Forest Meteorology. 2007, 146(1/2): 38-56.
- [5] De Wit A. Regional Crop Yield Forecasting using Probabilistic Crop Growth Modelling and Remote Sensing Data Assimilation[D]. Wageningen University, 2007.
- [6] Dente L, Satalino G, Mattia F, et al. Assimilation of leaf area index derived from ASAR and MERIS data into CERES-Wheat model to map wheat yield[J]. Remote Sensing of Environment. 2008, 112(4): 1395-1407.
- [7] Fang Hongliang, Liang Shunlin, Hoogenboom G, et al. Corn-yield estimation through assimilation of remotely sensed data into the CSM-CERES-Maize model[J]. International Journal of Remote Sensing. 2008, 29(10): 3011-3032.

- [8] Ines A V M, Honda K, Das Gupta A, et al. Combining remote sensing-simulation modeling and genetic algorithm optimization to explore water management options in irrigated agriculture[J]. *Agricultural Water Management*. 2006, 83(3): 221–232.
- [9] Ma Yuping, Wang Shili, Li Zhang, et al. Monitoring winter wheat growth in north china by combining a crop model and remote sensing data[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2008, 10(4): 426–437.
- [10] Crosetto M, Tarantola S, Saltelli A. Sensitivity and uncertainty analysis in spatial modelling based on GIS[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2000, 81(1): 71–79.
- [11] Saltelli A, Tarantola S, Campolongo F, et al. *Sensitivity Analysis in Practice: A Guide to Assessing Scientific Models*[M]. John Wiley and Sons., 2004.
- [12] 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 with English abstract)
- [13] 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.
- [14] James W. Jawitz R M S M. Development, Testing, and Sensitivity and Uncertainty Analyses of a Transport and Reaction Simulation Engine (TaRSE) for Spatially Distributed Modeling of Phosphorus in South Florida Peat Marsh Wetlands: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2008-5029, 109p[R]. 2008.
- [15] Tang Y, Reed P, van Werkhoven K, et al. Advancing the identification and evaluation of distributed rainfall-runoff models using global sensitivity analysis[J]. *Water Resour. Res.* 2007, 43(6): W6415.
- [16] Ziehn T, Tomlin A S. Global sensitivity analysis of a 3D street canyon model – Part I: The development of high dimensional model representations[J]. *Atmospheric Environment*. 2008, 42(8): 1857–1873.
- [17] Mészáros R, Zsély I G, Szinyei D, et al. Sensitivity analysis of an ozone deposition model[J]. *Atmospheric Environment*. 2009, 43(3): 663–672.
- [18] Crosetto M, Tarantola S. Uncertainty and sensitivity analysis: tools for GIS-based model implementation[J]. *International Journal of Geographical Information Science*. 2001, 15(5): 415–437.
- [19] Confalonieri R. Monte Carlo based sensitivity analysis of two crop simulators and considerations on model balance[J]. *European Journal of Agronomy*. 2010, 33(2): 89–93.
- [20] L-Pelzer E, Aubertot J N, Bousset L, et al. SIPPOM-WOSR: A simulator for integrated pathogen population management of phoma stem canker on winter oilseed rape: ii. sensitivity analysis[J]. *Field Crops Research*. 2010, 118(1): 82–93.
- [21] 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.
- [22] 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 with English abstract)
- [23] 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.
- [24] 姜志伟, 武雪萍, 华璐, 等. 洛阳旱地夏玉米生产潜力长周期定量模拟与评价[J]. *生态学报*. 2009, 29(1): 315–324.
Jiang Zhiwei, Wu Xueping, Hua Luo, et al. Long-period quantitative simulation and evaluation of summer maize potential productivity in Luoyang dryland[J]. *Acta Ecologica Sinica*. 2009, 29(1): 315–324. (in Chinese with English abstract)
- [25] 姜志伟, 武雪萍, 华璐, 等. 洛阳孟津冬小麦生产潜力长周期定量模拟与评价[J]. *中国生态农业学报*. 2009, 17(5): 984–991.
Jiang Zhiwei, Wu Xueping, Hua Luo, et al. Long-term quantitative simulation and evaluation of potential productivity of winter wheat in Mengjin, Luoyang[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*. 2009, 17(5): 984–991. (in Chinese with English abstract)
- [26] 姜志伟, 武雪萍, 华璐, 等. 洛阳孟津农业技术转移决策支持系统数据库组建[J]. *首都师范大学学报: 自然科学版*. 2009, 30(3): 71–76.
Jiang Zhiwei, Wu Xueping, Hua Luo, et al. Databases creation of decision support system for agro-technology transfer DSSAT 4.0 in Mengjin in Luoyang City[J]. *Journal of Capital Normal University: Natural Sciences Edition*. 2009, 30(3): 71–76. (in Chinese with English abstract)
- [27] 李克煌. 河南作物生产潜力的估算和分析[J]. *中国农业气象*. 1980: 6–11.
- [28] SimLab v3.2.5 User Manual 2009. POLIS-JRC/ISIS, Ispra, Italy. [EB/OL] <http://simlab.jrc.ec.europa.eu/docs/html/index.html>.
- [29] 王树安. 作物栽培学各论[M]. 中国农业出版社, 1996.

Global sensitivity analysis of CERES-Wheat model parameters

Jiang Zhiwei^{1,2}, Chen Zhongxin^{1,2*}, Zhou Qingbo^{1,2}, Ren Jianqiang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Resources Remote Sensing and Digital Agriculture, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China;

2. Chinese Academy of Agricultural Sciences, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Beijing 100081, China)

Abstract: Crop growth models have been applied extensively in the regional crop yield prediction and estimation. It is very important to select the most sensitive model parameters for the model optimization and better model output. The Extend Fourier Amplitude Sensitivity Test (EFAST) was used to analyze the sensitivity of CERES-Wheat model parameters in a study region in Luoyang, Henan province. The sensitivity of crop and field management parameters were analyzed. The results show that these parameters including the interval between successive leaf tip appearances, days at optimum vernalizing temperature required to complete vernalization, percentage reduction in development rate in a photoperiod 10 hour shorter than the threshold relative to that at the threshold, standard kernel size under optimum conditions, kernel number per unit canopy weight at anthesis are the key sensitive parameters which should be firstly selected for the model localization. The optimal parameters selected for application of model in regional scale are planting date, planting density, fertilization date, planting depth and irrigation date. The research showed that the global sensitivity analysis in EFAST is effective for parameter selection in the crop growth model optimization to improve its performance at regional scale.

Key words: crops, sensitivity analysis, models