

基于 EPIC 模型的冬小麦生长模拟参数全局敏感性分析

吴 锦¹, 余福水², 陈仲新², 陈 晋^{1*}

(1. 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京师范大学资源学院, 北京 100875;
2. 农业部资源遥感与数字农业重点开放实验室, 北京 100081)

摘 要: 模型参数的敏感性分析是模型本地化、区域化过程中不可或缺的重要环节。局部敏感性分析忽略了参数间的相互耦合作用对模型结果的间接影响, 从而导致敏感参数选取具有一定的片面性。该研究以河北衡水冬小麦试验区为研究区, 使用全局敏感性分析方法分析 EPIC 模型在冬小麦产量模拟中的敏感参数。研究表明: 收获指数 (HI)、生长季峰值点 (DLAI)、潜在热量单位 (PHU)、最大作物高度 (HMX) 是影响模型本地化最为关键的参数 (总敏感指数 > 0.1); 作物的播种日期、收获日期及种植密度是影响区域尺度的作物产量估计最为敏感参数 (总敏感指数 > 0.1)。研究同时表明全局敏感性分析方法可用于作物生长模型本地化、区域化研究, 且优于传统局部敏感性分析方法。

关键词: EPIC 模型, 生长, 作物, 模型本地化, 区域化, 全局敏感性分析

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.07.025

中图分类号: S165+.27

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-7-0136-07

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)

0 引 言

EPIC模型 (erosion productivity impact calculator) 是美国农业部开发的定量评价“气候-土壤-作物-管理”系统的动力学模型^[1-2], 它能以天为时间步长, 通过对天气变化、养分循环、农药迁移、植物生长、土地管理等环节的模拟反映一季至上百年农田水土资源和作物生产力的动态变化。自1984年该模型首次发表以来, 经过广泛验证和多次完善, 已经在美国、法国、中国等多个国家成功地应用到作物估产、气候变化影响评价、精准农业、区域农业规划等多个领域^[3-10]。

由于EPIC模型是以美国作物品种和生长环境为基础开发, 在世界其他地方引入该作物生长模型时, 首先需要利用当地作物、气象、土壤等数据对模型参数进行适应性调整、修正及模拟效果校验^[11]; 这个过程被称为模型的本地化, 它是准确模拟当地作物生长的关键。在模型本地化基础上, 根据应用的需求进一步将作物生长模型与遥感等空间数据相结合, 从单点扩展到区域, 这一过程被称为模型的区域化或空间化。在作物生长模型本地化、区域化过程中, 由于受经费、观测仪器与条件、观测周期等因素的影响, 一般很难对模型所涉及的全部参数进行测量和标定, 而是根据当地的作物品种和生长

环境, 选择对模型模拟结果影响较大的部分参数 (即敏感参数) 进行测量、标定或作为数据同化参数, 相应地对非敏感参数进行简略处理^[12-18]。因此, 模型参数的敏感性分析即成为作物生长模型本地化、区域化过程中不可或缺的重要环节。

当前, 国内外对于作物生长模型的参数敏感性分析一般通过局部敏感性分析实现^[3, 19-20]。局部敏感性分析 (又称一次变换法) 通过改变单个参数取值而固定其他参数的方式检验单个参数的变化对模型结果的影响程度, 具有原理简单、可操作性强的特点。但需要指出局部敏感性分析只能分析参数对模型结果的直接影响, 而忽略了参数间的相互耦合作用对模型结果的间接影响。因此, 所选择敏感参数可能具有一定片面性, 进而影响到模型本地化和区域化的效果^[21]。鉴于局部敏感性法的缺陷, 近年来发展起来的全局敏感性分析则可同时检验多个参数的变化对模型运行结果的影响, 并可分析每一参数对模型结果的直接和间接影响^[22]。目前以 Sobol'法和傅立叶幅度敏感性检验扩展方法 (extended Fourier amplitude sensitivity test, EFAST) 为主的全局敏感性分析法已成功应用在水质模型^[23]、生态系统生产力模拟模型 (BEPS)^[24]、小尺度气候模型^[25]、水文模型^[26]、地理空间分析模型^[22-23, 27-29]等的参数敏感性分析中。虽然全局敏感性分析方法具有巨大的理论优势和应用潜力, 但在 EPIC 为代表的作物生长模型敏感性分析中应用案例目前却尚无报道。

基于上述需求和存在的问题, 本研究以冬小麦为例, 依据衡水冬小麦区气象、土壤和田间管理试验数据, 采

收稿日期: 2008-09-23 修订日期: 2009-02-16

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2006AA12Z103) 资助
作者简介: 吴 锦 (1985—) 男, 福建霞浦人, 博士生, 主要从事生态遥感研究。北京 北京师范大学资源学院, 100875。Email: wujin1985@ires.cn
*通信作者: 陈 晋 (1967—) 男, 博士, 教授, 从事遥感模型及应用研究。北京 北京师范大学资源学院, 100875。Email: chenjin@ires.cn

用全局敏感性分析方法分析了 EPIC 模型中作物参数、田间管理参数和土壤参数对冬小麦产量模拟的敏感性，一方面为河北衡水冬小麦试验区的 EPIC 模型的本地化服务，同时也期待对 EPIC 模型的本地化和区域化中参数敏感性分析提供方法借鉴。

1 模型与方法

1.1 EPIC 模型介绍及所用数据

EPIC 模型是一个多作物生长通用模型^[1-2]，可用于模拟大田作物、牧草及树木的生长过程。该模型以各种作物的共性生理生态过程为主体框架，结合各种作物的生长特性参数和田间管理参数进行参数调整和模拟。本研究采用的 EPIC 版本为 EPIC8120。该 EPIC 模型对作物生长与产量形成过程及其对环境响应进行定量模拟的基本过程如图 1 所示。

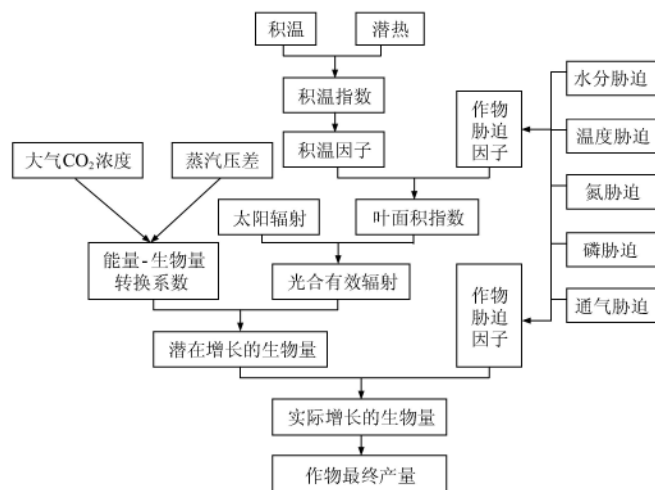


图 1 EPIC 模型作物产量计算流程图

Fig.1 Flow chart for yield estimation of EPIC model

1) 模型在逐日气象数据的驱动下模拟作物叶面积动态变化，并进而计算光合有效辐射。

2) 考虑叶片、大气间水汽压差（VPD）和大气的 CO₂ 浓度，计算作物光能利用率（能量—生物量转换系数）。

3) 通过光合有效辐射与光能利用率的关系，计算作物潜在增长生物量。在此基础上考虑水分胁迫、温度胁迫、氮磷营养胁迫等因子对作物生物量和叶面积的影响效应，计算作物实际增长生物量。

4) 估算作物一定时期内实际增长生物量，计算分配到地上部和根系的干物质数量，估算根系分布深度和根系密度，进而计算作物根系对土壤水分和养分吸收利用情况。通过水分胁迫、氮磷营养胁迫等进一步反馈到过程 1) 和 3)。

5) 通过作物生长临界期的水分、养分亏缺状况估算实际收获指数。最后通过地上部生物量和收获指数计算可供收获的作物经济产量。

EPIC 模型运行需要逐日的气象数据、作物参数（见表 1）、土壤参数（见表 2）、田间管理参数（见表 3）驱动。

表 1 作物参数表

Table 1 Crop parameters in EPIC model

参数及其定义（英）	参数定义（中）
WA (potential radiation use efficiency)	能量—生物量转换系数(潜在光能利用率)
HI (normal harvest index)	收获指数
TB (optimal temperature)	最适温度
TG (base temperature)	基点温度
DMLA (maximum potential leaf area index)	最大潜在叶面积指数
DLAI (point in the growing season when leaf area begins to decline due to leaf senescence)	生长季峰值点
DLP1 (crop parameter control leaf area growth of the crop under non-stressed condition)	无胁迫下叶面积生长参数 1
DLP2 (crop parameter control leaf area growth of the crop under non-stressed condition)	无胁迫下叶面积生长参数 2
RLAD (leaf-area-index decline rate parameter)	叶面积下降率
RBMD (biomass-energy decline rate parameter)	生物量—能量转换系数下降率
GSI (the maximum stomata conductance at high solar radiation and low vapor pressure deficit)	强太阳辐射、低水汽压下的最大气孔导度
CAF(critical aeration factor-fraction of soil porosity where poor aeration starts limiting plant growth)	土壤通气性因子
SDW (normal planting rate)	正常播种率
HMX (maximum crop height)	最大作物高度
RDMX (maximum root depth)	最大根深度
WAC2 (an "S" curve parameter used to describe the effect of CO ₂ concentration on the crop parameter WA)	CO ₂ 浓度对潜在光能利用率影响系数
CVM (minimum value of water erosion C factor)	水蚀因子最小值
CNY (normal fraction nitrogen in yield)	产量中 N 的百分比
CPY (normal fraction of P in yield)	产量中 P 的百分比
WSFY (lower limit of harvest index)	收获指数底线
PST (pest damage factor)	病虫害损害因子
WCY (fraction of water in yield)	产量中水分含量
BN1 (normal fraction of N in crop biomass at emergence)	萌发期作物生物量正常 N 含量
BN2 (normal fraction of N in crop biomass at mid-season)	生长中期作物生物量正常 N 含量
BN3 (normal fraction of N in crop biomass at maturity)	成熟期作物生物量正常 N 含量
BP1 (normal fraction of P in crop biomass at emergence)	萌发期作物生物量正常 P 含量
BP2 (normal fraction of P in crop biomass at mid-season)	生长中期作物生物量正常 P 含量
BP3 (normal fraction of P in crop biomass at maturity)	成熟期作物生物量正常 P 含量
BW1 (wind erosion factor for standing live biomass)	直立活体作物风蚀因子
BW2 (wind erosion factor for standing dead crop residue)	直立死亡作物风蚀因子
BW3 (wind erosion factor for flat residue)	倒伏作物风蚀因子
FIRST1 (one point on the frost damage curve)	霜冻破坏曲线端点 1
FIRST2 (the other point on the frost damage curve)	霜冻破坏曲线端点 2
WAVP (the rate of decline in WA)	潜在光能利用率的下降率
VPTH (leaf conductance is insensitive to VPD until VPD exceeds the threshold value, VPTH)	叶传导率对水汽压差（VPD）的敏感阈值
VPD2 (a double parameter in which the number on the left of the decimal is some value of VPD above VPTH, and the number on the right of decimal is corresponding fraction of the maximum leaf conductance at value of VPD)	双参数，小数点左边数字是 VPD 超过 VPTH 的数值；小数点右边数字是 1 个小数，它表示在 VPD 取该值时，占最大叶导率的比例
RWPC1 (fraction of root weight at emergence)	萌发时根质量百分比
RWPC2 (fraction of root weight at maturity)	收获时根质量百分比
GMHU (accumulated heat units required for germination)	萌发所需的累积热量单位（积温）
PHU (potential heat units)	成熟所需的最大热量单位（积温）

表 2 土壤参数表

Table 2 Soil parameters in EPIC model

参数及其定义 (英)	参数定义 (中)
<i>SALB</i> (soil albedo)	土壤反照度
<i>Z</i> (depth to bottom of layer)	土层厚度
<i>BD</i> (bulk density)	土壤容重
<i>FC</i> (water content at field capacity)	田间持水量
<i>SAN</i> (%san)	土壤中沙粒质量百分比
<i>SIL</i> (%silt)	土壤中黏土质量百分比
<i>PH</i> (soil pH)	土壤 pH 值
<i>CBN</i> (organic carbon concentration)	土壤中有机碳质量百分比
<i>CAC</i> (calcium carbonate content of soil)	土壤中 CaCO_3 质量百分比

表 3 田间管理参数表

Table 3 Field management parameters in EPIC model

参数及其定义 (英)	参数定义 (中)
<i>PD</i> (planting day)	播种日期
<i>HD</i> (harvesting day)	收获日期
<i>FD</i> (fertilizing day)	施肥日期
<i>ID</i> (irrigation day)	灌溉日期
<i>FAP</i> (fertilizer application rate)	施肥率 (kg/hm^2)
<i>IA</i> (irrigation volume)	灌溉量 (mm/hm^2)
<i>PP</i> (plant population)	种植密度 ($\text{株}/\text{m}^2$)

结合本试验研究区域河北衡水冬小麦试验区 ($37^{\circ}21' \sim 38^{\circ}15' \text{N}$, $115^{\circ}22' \sim 116^{\circ}20' \text{E}$), 试验驱动数据包括覆盖衡水地区 11 个市、县的 28 个采样点, 其中以衡水农业生态实验站 ($37^{\circ}47'47'' \text{N}$, $115^{\circ}51'25'' \text{E}$) 为代表站点, 进行单点作物生长模型本地化研究。

气象数据来自衡水农业生态实验站 17 a 观测气象数据 (1990—2006 年), 包括日最高温度、最低温度、日降水、日平均风速、日照时数和日平均相对湿度, 并被用来作为运行 EPIC 模型的气象数据输入。由于实验站缺少太阳辐射观测数据, 根据适用于华北平原的经验公式, 利用日照时数和天文辐射量计算太阳辐射值。

$$Q = Q_0(0.105 + 0.708 \frac{n}{N}) \quad (1)$$

式中: Q_0 ——天文辐射量, 以各月 15 日的天文辐射总量为代表; n ——每日日照时数; N ——各月平均日照时数。

土壤数据主要参考衡水生态实验站实测数据和《中国土壤志》获得, 田间管理数据主要来自衡水试验区 28 个采样点 2004—2006 年各生育时期田间实测、调查数据。

1.2 EFAST 法

EFAST 法是 Saltelli 等人结合 Sobol' 法和傅立叶幅度敏感性检验法 (fourier amplitude sensitivity test, FAST) 的优点所提出的全局敏感性分析方法。该方法基于模型方差分析的思想设计, 认为: 模型结果的方差可反映模型结果对输入参数的敏感性, 模型结果的方差由各单个输入参数及参数间的相互作用所导致。因此, 分解模型方差可以反求出各参数及参数间耦合作用对该方差的贡献量, 亦即获得各参数的敏感性指数^[21,24,28,30]。

现假定有一模型 $Y=f(x)$, 输入参数 $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 。

每个参数都有一定的变化范围及分布形式, 构成了 1 个多维参数空间 (见图 2 所示)。则利用 EFAST 法对该模型的全局敏感性分析的过程如下

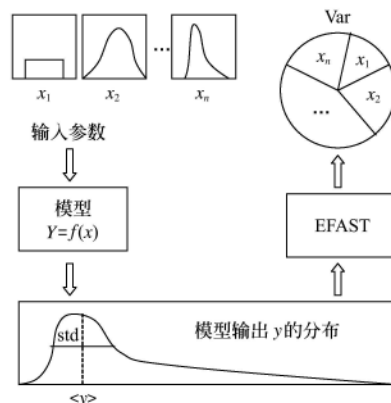


图 2 全局敏感性分析框架图

Fig.2 Frame diagram of global sensitivity analysis

首先根据适合的转换函数 G_i ^[21,30], 将模型 $Y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 转化为 $Y=f(s)$ 。这里, 转换函数 G_i 与参数 x_i 的概率密度分布函数有关

$$x_i(s) = G_i(\sin w_i s), \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

其中: s ——标量, 且 $-\infty < s < +\infty$; $\{w_i\}$ ——参数 x_i 所定义的整数频率; $\forall i = 1, 2, \dots, n$ 。对 $f(s)$ 进行傅立叶变换得

$$y = f(s) = \sum_{p=-\infty}^{+\infty} [A_p \cos ps + B_p \sin ps] \quad (3)$$

其中

$$A_p = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) \cos ps ds, \quad B_p = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) \sin ps ds \quad (4)$$

则傅立叶级数的频谱曲线定义为

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

其中: p ——傅立叶变换参数, $p \in Z = \{-\infty, \dots, -1, 0, 1, \dots, +\infty\}$, $A_{-p} = A_p$, $B_{-p} = B_p$, $\wedge_{-p} = \wedge_p$ 。则由参数 x_i 输入变化所引起的模型结果方差 V_i 可表示为

$$V_i = \sum_{p \in Z^0} \wedge_p w_i = 2 \sum_{j=1}^{+\infty} \wedge_j w_i \quad (6)$$

其中 $Z^0 = Z - \{0\}$, 为非零整数。模型总的方差 V 为

$$V = \sum_{p \in Z^0} \wedge_p = 2 \sum_{j=1}^{+\infty} \wedge_j \quad (7)$$

对 s 在区间 $[-\pi, \pi]$ 内等间隔取样, 把取样值通过转换函数转换为每一个参数的取值, 输入模型, 多次运行模型, 由如下方程可近似获得 A_p 和 B_p :

$$A_p = \frac{1}{Ns} \sum_{k=1}^{Ns} f(s_k) \cos(js_k), \quad B_p = \frac{1}{Ns} \sum_{k=1}^{Ns} f(s_k) \sin(js_k) \quad (8)$$

式中: $p \in \bar{Z} = \{-\frac{Ns-1}{2}, \dots, -1, 0, 1, \dots, +\frac{Ns-1}{2}\} \subset Z$,

Ns ——取样数。由 A_p 和 B_p 及参数 x_i 所对应的频率 w_i 通

过式(6)、(7)即可获得每一个参数所引起的方差 V_i 及模型结果的总方差 V 。鉴于模型的总方差是由各参数及参数间耦合作用共同得到的, 现将模型输出方差 V 分解如下

$$V = \sum_i V_i + \sum_{i \neq j} V_{ij} + \sum_{i \neq j \neq m} V_{ijm} + \cdots + V_{12 \cdots k} \quad (9)$$

式中: V_{ij} ——参数 x_i 通过参数 x_j 作用所贡献的方差(耦合方差); V_{ijm} ——参数 x_i 通过参数 x_j 、 x_m 所贡献的方差; $V_{12 \cdots k}$ ——参数 x_i 通过参数 $x_{1,2, \cdots, k}$ 作用所贡献的方差。因此, 通过归一化处理, 参数 x_i 的一阶敏感性指数 S_i 可定义如下

$$S_i = \frac{V_i}{V} \quad (10)$$

该敏感指数反映的是参数对模型输出总方差的直接贡献率。同理, 参数 x_i 的二阶及三阶敏感性指数可定义为

$$S_{ij} = \frac{V_{ij}}{V}, \quad S_{ijm} = \frac{V_{ijm}}{V} \quad (11)$$

对于一个多参数耦合模型而言, 参数 x_i 的总敏感性指数即为各阶敏感性指数之和, 可表示如下

$$S_{Ti} = S_i + S_{ij} + S_{ijm} + \cdots + S_{12 \cdots i \cdots k} \quad (12)$$

总敏感指数反映了参数直接贡献率和通过参数间的交互耦合作用间接对模型输出总方差的贡献率之和, 并在参数间无耦合作用时, S_{ij} 、 S_{ijm} 等项均为 0, S_{Ti} 等于 S_i , EFAST 分析等同于局部敏感性分析。由于 EPIC 模型中包含非线性多参数耦合过程, 显然, 局部敏感性分析方法并不适合 EPIC 模型的参数敏感性分析, 而 EFAST 方法通过对模型输出方差的分解, 可定量地获得每一个参数各阶及总敏感指数。这就使得 EFAST 方法不仅可以同时检验多个参数的变化对 EPIC 模型结果的影响, 并且可分析每一个参数变化对模型结果的直接和间接影响。

1.3 试验设计

本试验的目的是为 EPIC 模型的本地化和区域化选择敏感参数, 试验方案设计如下

方案一: 该方案为模型的本地化服务。在衡水农业生态实验站已测量较准确气象、土壤和田间管理参数的基础上, 主要考察作物参数的敏感性, 故以衡水农业生态实验站已测量的气象、土壤和田间管理参数为输入, 对作物参数进行全局敏感性分析。

方案二: 该方案为在完成模型本地化基础上进行模型区域化服务, 主要考察 EPIC 模型对区域范围内土壤、田间管理参数空间异质性的敏感性, 从而为土壤、田间管理参数的数据采样设计、空间插值方法、遥感数据应用等数据处理方案提供依据。故试验方案固定方案一所确定的作物参数, 对土壤、田间管理参数进行全局敏感性分析。由于研究区内地形平坦, 气象站点较多且分布均匀, 可认为气象数据精度可满足 EPIC 模型要求, 故不进行参数敏感性分析。

全局敏感性分析试验借助敏感性和不确定性分析专业软件 Simlab2.3 的 EFAST 模块实现。Simlab2.3 是一款

非商业软件, 它是基于蒙特卡罗方法设计的。因为蒙特卡罗模拟取决于模型参数的选择、参数取值范围及分布形式的定义, 根据 EPIC 模型特点及研究区 28 个采样点数据特征, 模型参数取值范围定义为: 1) 作物参数以 EPIC 模型默认的冬小麦作物参数为期望值, 参数取值在期望值的 0.8~1.2 倍之间均匀分布; 2) 土壤参数及田间管理参数则根据在河北衡水试验区内各采样点(28 个)获取的相关数据, 求取最大值、最小值, 参数取值在最大值、最小值限定的范围内均匀分布。

根据上述获取的 EPIC 模型作物参数(39 个)及土壤和田间管理参数(14 个)的取值范围和分布形式, 分别利用蒙特卡罗方法随机采样 6 000 次和 3 000 次(EFAST 法认为采样次数大于参数个数×65 的分析结果有效); 并将采样的参数组合输入 EPIC 模型获得模型输出——冬小麦模拟产量。统计模型输出方差, 并利用 EFAST 对方差进行分解, 即可获得各个参数一阶敏感指数和总敏感指数。

2 结果与分析

2.1 模型本地化敏感参数

图 3 显示了 EFAST 方法对衡水农业生态站冬小麦作物参数全局敏感性分析结果, 其中图 3a 为一阶敏感指数, 图 3b 为总敏感指数。从图 3b 可看出收获指数(HI)是影响作物产量最为敏感参数, HI 的总敏感指数为 0.498, 即该参数可解释作物产量变化方差的 49.8%, 这是因为在 EPIC 模型作物产量计算公式中作物的产量是根据作物地上生物量与收获指数的乘积得到^[1-2]。影响作物产量的其他敏感参数(>0.1)分别为: 生长季峰值点(DLAI)、潜在热量单位(PHU)、最大作物高度(HMX)。参数 DLAI 影响着整个作物生长季 LAI 的生长曲线形状, 进而影响到作物的光合作用能力及其生物量的累积, 因对作物产量的变化方差有较大的贡献(29.8%)。参数 PHU 则是控制作物生长所需热量的关键参数, 对作物产量的变化方差的贡献量达 13.7%。参数 HMX 为作物潜在最大生长高度, 影响着作物生物量在根茎叶中的分配, 也对作物产量的变化有 10.7%的贡献。若只从一阶敏感指数分析(见图 3a), 影响作物产量最为敏感(>0.1)的指数只有 HI(0.439, 可解释作物产量变化方差的 43.8%)、DLAI(0.141, 可解释作物产量变化方差的 14.1%), 而其他作物参数的影响都在 0.06 以下。通过一阶敏感性指数(局部敏感性分析)与总敏感指数(全局敏感性分析)对比, 表明全局敏感性分析可以综合考虑参数自身及参数间耦合行为对模型输出的影响, 因而提取的敏感参数更为全面。

2.2 模型区域化敏感参数

图 4 是使用 EFAST 方法对河北衡水冬小麦试验区区域化参数(土壤参数和田间管理参数)全局敏感性分析的结果。可以看出影响区域尺度作物产量估计的敏感参数(>0.1)来自田间管理参数的作物播种日期(PD)、收获日期(HD)及种植密度(PP), 其中以播种日期最为敏感, 总敏感指数达 0.629。作物的生长一般都遵循特

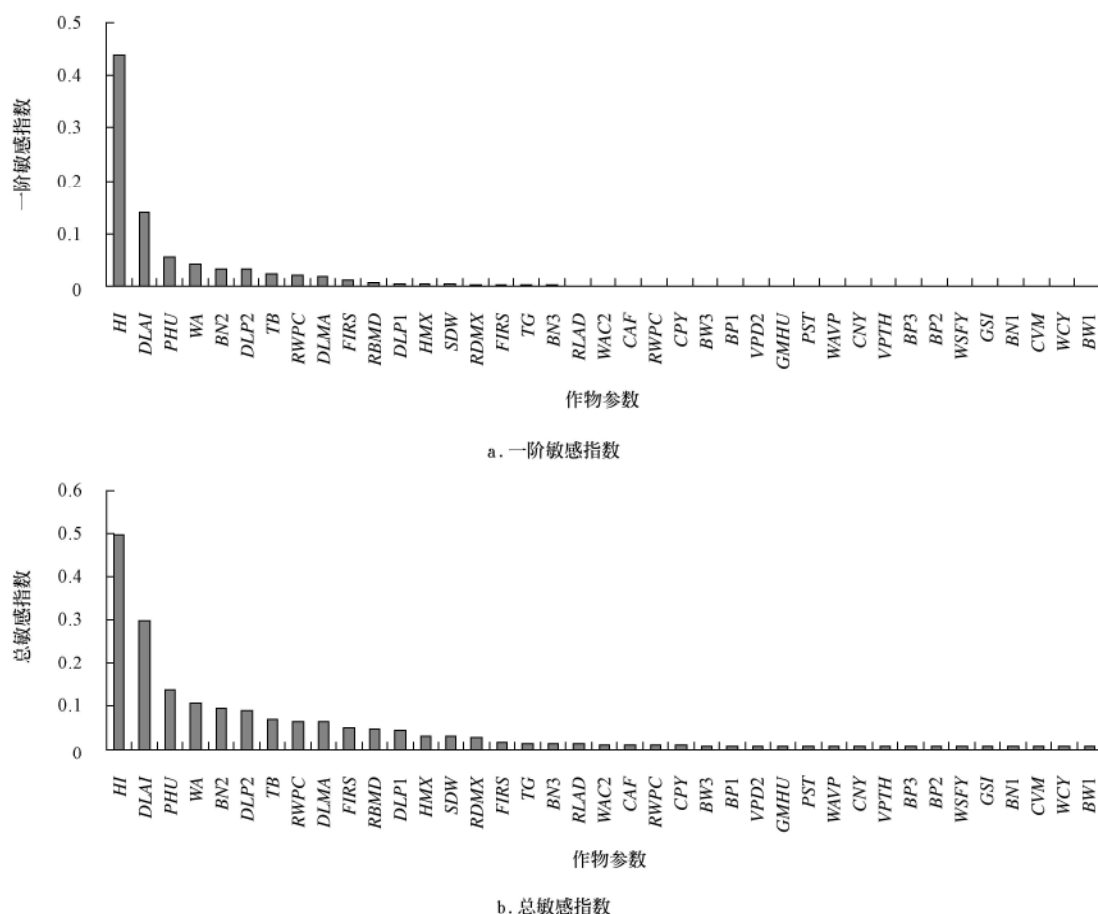


图3 衡水农业生态实验站冬小麦作物参数敏感指数

Fig.3 Sensitivity indices of crop parameters of winter wheat in Hengshui agricultural ecosystem experimental station

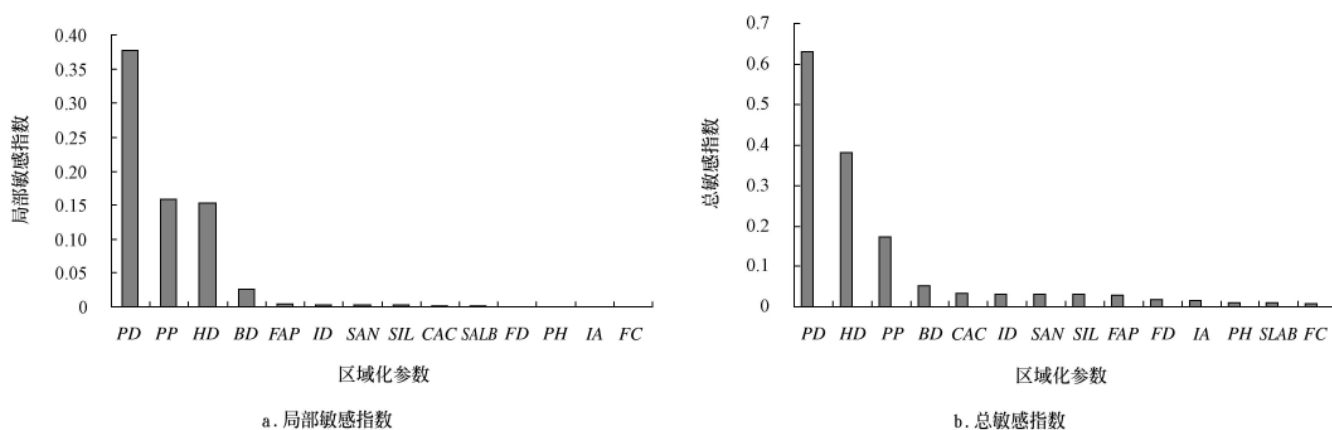


图4 衡水冬小麦试验区区域化敏感指数

Fig.4 Sensitivity indices of field management and soil parameters in Hengshui experimental area of winter wheat

定的物候规律,如果田间管理者错过最佳的作物播种期,就可能直接影响作物最终产量。收获日期也是影响作物产量模拟的重要参数;若田间管理者在麦穗刚成熟之时或之前就收割,则会因为穗粒不饱满而影响作物产量,而田间管理者若错过麦穗收割期,也会因为穗粒脱落造成作物产量减产。此外,作物的种植密度也与最终产量直接相关,这也是经典的农学预报法用于作物估产的重要依据^[31]。对比图 4a 与图 4b 发现通过一阶敏感性指数所选择的敏感参数与总敏感指数基本一致,为播种日期、

种植密度及收获日期。但收获日期的敏感度略低于种植密度。本研究的上述结果与相关研究的结论具有一定的相似性,如:闫岩等在 CERES-Wheat 模型标定后,利用局部敏感性分析法确定冬小麦播种日期、种植密度、追肥日期和追肥量为区域化的敏感参数^[20];Fang 等人利用局部敏感性分析方法,选定了种植日期、种植密度、作物间距及氮肥施肥量为区域化的敏感参数^[21]。

值得注意的是本研究区域内的土壤参数变化对作物估产影响不显著,其原因可能是所选样区在空间范

围内土壤特性变化较小。

3 结 论

传统上使用局部敏感性分析提取模型敏感参数时,往往因忽视参数间的耦合作用的影响,弱化了某些关键参数,进而给模型本地化带来误差。全局敏感性分析方法(EFAST 法)可有效克服上述缺点,在作物生长模型本地化、区域化研究中具有较大的应用潜力。

基于 EPIC 模型,利用 EFAST 方法对衡水农业生态实验站冬小麦作物参数敏感性分析表明:收获指数(HI)、生长季峰值点(DLAI)、潜在热单位(PHU)、最大作物高度(HMX)是影响模型本地化最为关键的参数(总敏感指数>0.1)。而对衡水冬小麦试验区区域化敏感性分析则表明:在实现模型本地化并对影响作物品种关键参数标定后,作物的播种日期、收获日期及种植密度是影响区域尺度的作物产量估计最为敏感参数;上述敏感参数的判明,将为野外实测工作方案设计、作物生长模型同化算法中同化参数选取提供直接依据。

需要指出的是 EPIC 模型是一个多作物生长通用模型,包含了 70 余种不同作物。不同种类作物的最敏感参数可能并不相同,本研究以河北衡水冬小麦试验区为为例,使用全局敏感性分析方法分析 EPIC 模型在冬小麦产量模拟中的敏感参数。本文所获得敏感参数不能代表其他种类作物,当 EPIC 模型适用于其他作物类型时,参数的敏感性分析仍然是必须的,但本文所提出方法和思路可以提供借鉴。

[参 考 文 献]

- [1] Williams J R. The EPIC model[R]. Temple: USDA-ARS, grassland, soil and water research laboratory, 1997.
- [2] Williams J R, Jones C A, Kiniry J R, et al. The EPIC crop growth model[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32: 497—511.
- [3] Huang M, Gallichand J, Dang T, et al. An evaluation of EPIC soil water and yield components in the gully region of Loess Plateau, China[J]. Journal of Agricultural Science, 2006, 144(4): 339—348.
- [4] Izaurre R C, Rosenberg N J, Brown R A, et al. Integrated assessment of Hadley Center (HadCM2) climate-change impacts on agricultural productivity and irrigation water supply in the conterminous United States - Part II. Regional agricultural production in 2030 and 2095[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2003, 117(1/2): 97—122.
- [5] Brown R A, Rosenberg N J. Sensitivity of crop yield and water use to change in a range of climatic factors and CO₂ concentrations: A simulation study applying EPIC to the central USA[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1997, 83(3/4): 171—203.
- [6] Jones C A, Dyke P T, Williams J R, et al. EPIC - An operational model for evaluation of agricultural sustainability [J]. Agricultural systems, 1991, 37(4): 341—350.
- [7] Phillips D L, Lee J J, Dodson R F. Sensitivity of the US corn belt to climate change and elevated CO₂: 1. Corn and soybean yields[J]. Agricultural Systems, 1996, 52(4): 481—502.
- [8] Favismortlock D T, Evans R, Boardman J, et al. Climate change, winter-wheat yield and soil-erosion on the English south downs[J]. Agricultural Systems, 1991, 37(4): 415—433.
- [9] 刘布春, 王石立, 马玉平. 国外作物模型区域应用研究进展[J]. 气象科技, 2002, 30(4): 193—203.
- [10] 熊伟, 林而达, 杨婕, 等. 作物模型区域应用两种参数校准方法的比较[J]. 生态学报, 2008, 28(5): 2140—2148. Xiong Wei, Lin Erda, Yang Jie, et al. Comparison of two calibration approaches for regional simulation of crop model [J]. Acta Ecological Sinica, 2008, 28(5): 2140—2148. (in Chinese with English abstract)
- [11] 马玉平, 王石立, 张黎, 等. 基于遥感信息的华北冬小麦区域生长模型及模拟研究[J]. 气象学报, 2005, 63(2): 204—215. Ma Yuping, Wang Shili, Zhang Li, et al. Study on winter wheat regional simulation model based on remote sensing data and its simulations in North China[J]. Acta Meteorological Sinica, 2005, 63(2): 204—215. (in Chinese with English abstract)
- [12] Cavero J, Plant R E, Shennan C, et al. Application of EPIC model to nitrogen cycling in irrigated processing tomatoes under different management systems[J]. Agricultural Systems, 1998, 56(4): 391—414.
- [13] 高晓飞, 谢云. 用 ALMANAC 作物生长模型模拟冬小麦生长[J]. 自然资源学报, 2003, 18(4): 505—510. Gao Xiaofei, Xie Yun. Simulation of winter wheat growth by using ALMANAC crop growth model[J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(4): 505—510. (in Chinese with English abstract)
- [14] 李军. 作物生长模型 ALMANAC 的验证与应用初探[J]. 干旱地区农业研究, 1997, 15(4): 99—104. Li Jun. The validation and application of crop model ALMANAC[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1997, 15(4): 99—104. (in Chinese with English abstract)
- [15] 郭定荣, 欧阳竹, 赵小敏, 等. 作物生长模型 WOFOST 在华北平原的适用性研究[J]. 植物生态学报, 2003, 27(5): 594—602. Wu Dingrong, Ouyang Zhu, Zhao Xiaomin, et al. The applicability research of Wofost model in North China Plain [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2003, 27(5): 594—602. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王宗明, 梁银丽. 应用 EPIC 模型计算黄土塬区作物生产潜力的初步尝试[J]. 自然资源学报, 2002, 17(4): 481—487. Wang Zongming, Liang Yinli. The application of EPIC model to calculate crop productive potentialities in loessic yuan region[J]. Journal of Natural Resources, 2007, 17(4): 481—487. (in Chinese with English abstract)
- [17] 马玉平, 王石立, 张黎, 等. 基于遥感信息的作物模型重新初始化/参数化方法研究初探[J]. 植物生态学报, 2005, 29(6): 918—926. Ma Yuping, Wang Shili, Zhang Li, et al. Parameterization of a Crop Model based on Remote Sensing Data [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2005, 29(6): 918—926. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张艳红, 马永良, 廖树华. CERES-maize 模拟模型中品种参数优化方法研究[J]. 中国农业大学学报, 2004, 9(4): 24—29. Zhang Yanhong, Ma Yongliang, Liao Shuhua. Method of

- optimizing maize variety parameters in the CERES-maize simulation model[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2004, 9(4): 24—29. (in Chinese with English abstract)
- [19] 闫岩, 柳钦火, 刘强, 等. 基于遥感数据与作物生长模型同化的冬小麦长势监测与估产方法研究[J]. *遥感学报*, 2006, 10(5): 804—811.
Yan Yan, Liu Qinhua, Liu Qian, et al. Methodology of winter wheat yield prediction based on assimilation of remote sensing data with crop growth model[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(5): 804—811. (in Chinese with English abstract)
- [20] Hongliang F, Shunlin L, Gerrit H, 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.
- [21] 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)
- [22] Crosetto M, Tarantola S, Saltelli A. Sensitivity and uncertainty analysis in spatial modeling based on GIS[J]. *Agricultural Ecosystem Environment*, 2000, 81(1): 71—79.
- [23] Pastres R, Chan K, Solidoro C, et al. Global sensitivity analysis of a shallow water 3-D eutrophication model[J]. *Computer Physics Communications*, 1999, 117(1): 62—74.
- [24] Bunkei M, Ming X, Jin C, et al. Estimation of regional net primary productivity (NPP) using a process-based ecosystem model: How important is the accuracy of climate data?[J]. *Ecological Modeling*, 2004, 178(3/4): 371—388.
- [25] Ziehn T, Tomlin A S. Global sensitivity analysis of a 3-dimensional street canyon model - Part I: The development of high dimensional model representations[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(8): 1857—1873.
- [26] 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 Resources Research*, 2007, 43(6): w06415.
- [27] Crosetto M, Ruiz JAM, Crippa B. Uncertainty propagation in models driven by remotely sensed data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76(3): 373—385.
- [28] Crosetto M, Tarantola S. Uncertainty and sensitivity analysis: Tools for GIS-based model implementation[J]. *INT J Geogr Inform Sci*, 2001, 15(5): 415—437.
- [29] Tarantola S, Giglioli N, Jesinghaus J, et al. Can global sensitivity analysis steer the implementation of models for environmental assessments and decision making?[J]. *Stochastic Environment Resource Risk Assessment*, 2002, 16(1): 63—76.
- [30] 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.
- [31] 黄敬峰, 王人潮, 王秀玖, 等. 冬小麦遥感估产多种模型研究[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 1992, 5(5): 519—523.
Huang Jingfeng, Wang Renchao, Wang Xiuzhen, et al. Study on multiple yield estimation models of winter wheat using remote sensing data[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural University (AGRIC & LIFE SCI)*, 1992, 5(5): 519—523. (in Chinese with English abstract)

Global sensitivity analysis of growth simulation parameters of winter wheat based on EPIC model

Wu Jin¹, Yu Fushui², Chen Zhongxin², Chen Jin^{1*}

(1. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education of China, College of Resource Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Key Laboratory of Resources Remote Sensing and Digital Agriculture, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)

Abstract: Sensitivity analysis of model parameters is a very important step in the process of model localization and regionalization. Local sensitivity analysis neglected the indirect effect of interactions among parameters on the model results, which resulted in the one-sidedness of choosing sensitive parameters. Sensitive parameters of winter wheat yield simulation in EPIC model were analyzed by global sensitivity analysis in Hengshui experimental area. The results showed that normal harvest index (*HI*), point in the growing season when leaf area begins to decline due to leaf senescence (*DLAI*), potential heat units (*PHU*) and maximum crop height (*HMX*), with a total sensitivity index exceeding 0.1, were the key parameters which effected the model localization. And planting date, harvesting date, and planting population, with a total sensitivity index above 0.1, were the most sensitive parameters which effected the yield estimation of winter wheat at regional scale. The study suggests that global sensitive analysis is more effective for model localization and regionalization than the local sensitivity analysis.

Key words: EPIC model, growth, crops, model localization, regionalization, global sensitivity analysis