

基于 EFAST 的不同生产水平下 WOFOST 模型参数敏感性分析

兴安¹ 卓志清¹ 赵云泽¹ 李勇¹ 黄元仿^{1,2}

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193; 2. 自然资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京 100035)

摘要: 为探讨参数敏感性分析结果在区域尺度上表现出的不确定性问题,在温带季风气候类型黄淮海平原旱作区不同积温区内选取黄骅、商丘和驻马店 3 个站点,基于气象和作物生育期数据以及土壤实测数据,采用 EFAST (Extended Fourier amplitude sensitivity test) 方法,对 WOFOST 模型冬小麦和夏玉米参数进行全局敏感性分析,并对 2 种作物在不同生产水平和不同气候条件下的参数敏感性排序进行一致性检验。结果表明:冬小麦产量在潜在生产水平下主要敏感参数有叶龄的低温阈值 (TBASE)、储存器官同化物转化效率 (CVO)、总同化速率在低温 3℃ 时的校正因子 (TMNFTB₃) 等,在水分限制生产水平下主要敏感参数有蒸散速率修正因子 (CFET) 和储存器官同化物转化效率 (CVO) 等;夏玉米在 2 种生产水平下产量敏感参数差异不大,主要为总同化速率低温 10℃ 时的校正因子 (TMNFTB₁₀)、每日温度为 40℃ 时单叶片同化 CO₂ 的初始光能利用效率 (EFFTB₄₀)、35℃ 时叶片生命周期 (SPAN) 等;冬小麦、夏玉米在不同生产水平下的 TDCC 系数 (Top-down concordance coefficient) 分别为 0.82 和 0.98, *P* 均小于 0.01,参数敏感性排序的一致性均较高;冬小麦和夏玉米在不同气候条件下潜在生产水平 TDCC 系数分别为 0.92 和 0.98, *P* 均小于 0.01,一致性较高,水分限制生产水平 TDCC 系数分别为 0.61 和 0.86, *P* 均小于 0.01,一致性较差。WOFOST 模型不同作物间参数敏感性差异明显,不同生产水平对参数敏感性的影响较小,但受水分胁迫程度的影响,不同气候条件对参数敏感性影响较大,且对不同生产水平下参数敏感性的影响不同,这主要与不同时空下的气候条件差异有关。

关键词: WOFOST 模型; 全局敏感性分析; 生产水平; 气候条件; 一致性检验

中图分类号: S126; S165+.27 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)02-0161-11 OSID: 

Sensitivity Analysis of WOFOST Model Crop Parameters under Different Production Levels Based on EFAST Method

XING An¹ ZHUO Zhiqing¹ ZHAO Yunze¹ LI Yong¹ HUANG Yuanfang^{1,2}

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China

2. Key Laboratory of Agricultural Land Quality, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China)

Abstract: Aiming to investigate the uncertainty of parameter sensitivity analysis results at the regional scale due to management measures, climatic conditions, etc., three stations, including Huanghua, Shangqiu and Zhumadian under temperate monsoon climate were selected in different accumulated temperature zones in the Huang – Huai – Hai dry farming region, and extended Fourier amplitude sensitivity test (EFAST) method was used for analyzing the sensitivity of winter wheat and summer corn parameters in WOFOST model based on the data from agricultural meteorological stations and field sampling, and then the consistency test of the sensitivity ranking of the two crops under different production levels and different climatic conditions were performed. The results showed that the main sensitive parameters of winter wheat yield at the potential production level were the lower threshold temperature for aging of leaves (TBASE), efficiency of conversion into storage (CVO), and the reduction factor of gross assimilation rate at 3℃ (TMNFTB₃), while the parameters related to the evapotranspiration correction factor (CFET) and efficiency of conversion into storage (CVO) affected

收稿日期: 2019-09-24 修回日期: 2019-12-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300801)和国家自然科学基金项目(41571217)

作者简介: 兴安(1990—),男,博士生,主要从事农业生产力与土地利用研究, E-mail: brjg_xingan@163.com

通信作者: 黄元仿(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事计量土壤学和数字农业研究, E-mail: yfhuang@cau.edu.cn

considerably simulated yield under water limited production level. There was no significant difference in the sensitivity parameters of summer maize yield at the two production levels, which involved the reduction factor of gross assimilation rate at 10℃ (TMNFTB₁₀), light-use efficiency of single leaf as daily mean temperature at 40℃ (EFFTB₄₀), life span of leaves growing at 35℃ (SPAN); the top-down concordance coefficient (TDCC) values of winter wheat and summer maize at different production levels were 0.82 and 0.98, respectively, *P* values were less than 0.01, indicated that the parameter sensitivity ranking had good consistency; under potential production levels, the TDCC values of winter wheat and summer maize with different climatic conditions were 0.92 and 0.98, respectively, and the *P* values were all less than 0.01, the TDCC values under the water limited production levels were 0.61 and 0.86, respectively, and the *P* values were all less than 0.01. The results indicated that the WOFOST model simulated yield had obvious differences in sensitivity among different crop parameters, different production levels had little effect on parameter sensitivity, but it was affected by the degree of water stress, different climatic conditions had a great influence on the sensitivity of parameters, and had different effects on the sensitivity of parameters under different production levels, which were mainly related to the differences in climatic conditions and time and space.

Key words: WOFOST model; global sensitivity analysis; production levels; climate condition; consistency test

0 引言

目前,作物模型在生产潜力评价、气候变化影响评估、作物生长监测、作物产量预报、农业风险评估、农业管理决策等诸多领域的应用越来越广泛^[1-6],其中模型参数校正和优化仍然是模型本地化应用的关键过程,而敏感性分析是进行参数校正和优化的重要前提^[7-9]。敏感性分析能够将不确定性结果分配至不同的模型参数,量化模型参数对输出结果的影响,识别并筛选出模型中的关键参数,从而降低参数优化过程中的工作量和输出结果的不确定性^[10]。敏感性分析通常分为局部敏感性分析方法和全局敏感性分析方法^[11],其中,全局敏感性分析方法有 EFAST 方法^[12-13]、Morris 方法^[14]、Sobol' 方法^[15]等,均在作物模型敏感性分析中得到了广泛的应用^[16-20]。

作物模型中参数的重要性不仅与模型结构有关,还受到其他参数和输入数据的影响。特别是在区域尺度上,气候、土壤以及管理条件的复杂性导致区域尺度上参数敏感性分析结果存在一定的不确定性^[21-22]。因此,许多研究针对不同区域年份的气候、土壤、管理条件的差异和作物参数取值范围进行了参数敏感性的影响分析^[22-24]。如文献[25]选取不同气候类型下的 4 个冬小麦代表性站点,对 APSIM - Wheat 模型品种参数、土壤参数在不同气候类型及不同产量水平下的敏感性差异进行分析,结果表明,不同气候区间产量和生育期蒸散对参数的敏感性分析结果存在差异,不同产量水平间差异不大;文献[26]采用 Morris 和 Sobol' 方法,分别计算了欧洲 5 个国家的主要水稻种植区及代表不同大陆

性气候条件的 3 个年份下的 WARM 模型参数敏感性,结果表明,模型对作物参数的敏感性在不同气候条件下并不总是一致的;文献[27]采用 Morris 和 EFAST 方法对欧洲不同气候条件(包括未来气候变化)下 WOFOST 模型不同作物参数的敏感性进行了分析,结果表明,敏感性分析受气候条件,尤其是极端气候条件的影响,从而表现出不同的结果,但整体上最敏感参数趋于一致。以上研究均强调了在区域尺度和长时间序列上进行参数敏感性分析的必要性,从结果上看,在较大时空尺度上敏感性分析结果因气候类型的多样性及复杂性而存在较大差异,而在较小尺度相同气候类型下,不同气候条件对参数敏感性的影响还有待进一步探讨。此外,WOFOST 模型作为应用最广泛的机理作物模型之一,其参数敏感性分析也是目前的研究热点。然而,大部分研究在进行参数敏感性分析^[24,27-29]和参数校验^[3-4,30-32]时未考虑蒸散速率修正因子(CFET)和土壤水分消耗作物群数量(DEPNR)等作物水分利用相关品种参数,而这些参数能够表征作物对水分胁迫的响应,这会影响模型模拟精度,尤其是水分限制生产水平下的作物生长模拟。同时 WOFOST 模型对所有作物生长的描述相同,在同一种植制度、不同作物间的参数敏感性差异分析有助于进一步理解模型运作过程。

本文选取温带季风气候类型的黄淮海平原旱作区不同积温区内的 3 个站点,基于农业气象试验站点数据以及实地采样数据,采用 EFAST 方法分析 WOFOST 模型冬小麦和夏玉米产量在不同生产水平、不同气候条件下的参数敏感性及其排序一致性,并探讨敏感性差异形成的原因,为后续区域尺度模

型参数标定和验证提供基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄淮海平原旱作区^[33-34]是我国重要旱作作物种植区及商品粮基地,其大部分属温带季风气候,年均温度 14~16℃,年均降雨量 500~1 200 mm,土壤类型主要为潮土、褐土和砂浆黑土,主要种植粮食作物为冬小麦和夏玉米,冬小麦播种时间一般为 10 月,次年 5 月下旬或 6 月上、中旬成熟,夏玉米常年播种在 6 月,9 月上、中旬成熟。

本研究基于黄淮海旱作区 2000—2015 年日平均温度大于等于 10℃ 的年均积温数据,以 200℃ 为间隔划分不同积温区^[35],在积温为 4 600~4 800℃、4 800~5 000℃、5 200℃ 以上的积温区中选取黄骅、商丘和驻马店 3 个农业气象试验站点作为研究地区(图 1),其基本信息和气候特征见表 1。

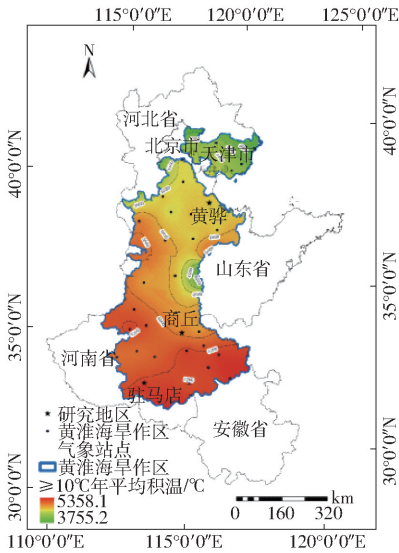


图 1 黄淮海平原旱作区分布图

Fig. 1 Distribution map of dry farming region in Huang-Huai-Hai Plain

表 1 3 个代表站点的气候基本特征

Tab. 1 Basic climate characteristics of three-representative station

气象 站点	纬度/ (°)	经度/ (°)	海拔/ m	多年平均 降雨量/ mm	多年大于 等于 10℃ 年 平均积温/℃
黄骅	38.37N	117.35E	6.6	564	4 688
商丘	34.45N	115.67E	50.1	776	4 955
驻马店	33N	114.02E	82.7	959	5 249

1.2 WOFOST 模型

WOFOST 模型由荷兰瓦赫宁根大学和世界粮食研究中心(CWFS)共同开发研制,以逐日气象数据为驱动,通过土壤、管理和作物参数限制与调整作物

生长过程的动态解释性模型,可以模拟潜在、水分限制和养分限制 3 种水平下的作物生长。WOFOST 模型中物候期用无量纲的状态变量——生长阶段(Development stage, DVS)来描述,DVS 为 0 表示出苗期、1 表示开花期、2 表示成熟期^[36]。

模型运行所需的气象数据(逐日最高气温、最低气温、降雨量)、管理数据(播种日期、出苗期、成熟期)从中国气象数据网(<http://data.cma.cn/site/index.html>)获取,逐日辐射、早晨水汽压、地上 2 m 处平均风速采用 FAO 提出的 Angstrom 公式将从中国气象数据网获取的日照时数、平均相对湿度以及平均风速进行转换获取。土壤数据(土壤含水率、田间持水量、萎蔫系数、水分特征曲线、饱和导水率)由旱作区取样数据和农业气象站数据获取,土样取于 2017 年 5—6 月,采用重铬酸钾外加热法、环刀法测定土壤有机质含量和容重,采用激光粒度仪测定土壤颗粒组成,并采用 Soil Water Characteristics 软件^[37]计算转换为所需土壤参数。

1.3 研究方法

1.3.1 参数选取及取值范围

根据冬小麦和夏玉米不同生长发育特点以及前人关于 WOFOST 模型作物参数敏感性分析结果^[24,27,29],选取初始、绿叶、同化、同化物转化、呼吸作用、干物质分配、死亡、根系以及水分利用相关参数进行敏感性分析,2 种作物参数各 50 个,其中生育期积温参数未考虑,运行模型时各生育期参数根据农业气象站点数据中的实际生育期计算获取。模型作物参数缺省值基础上浮动 ±10% 并考虑模型参数默认范围作为参数的取值范围,敏感性分析中将所有参数的分布假定为均匀分布,详见表 2。表 2 中 TDWI 为初始总干物质质量;LAIEM 为出苗时叶面积指数;RGRLAI 为叶面积指数最大增长率;SLATB 为不同生育期的比叶面积;SPAN 为 35℃ 时叶片生命周期;TBASE 为叶龄的低温阈值;KDIFTB 为不同生育期散射光消光系数;EFFTB 为日平均气温为 0℃ 或 40℃ 时单叶同化 CO₂ 的光能利用效率;AMAXTB 为单叶最大 CO₂ 同化速率;TMPFTB 为最大同化速率在不同均温条件下的校正因子;TMNFTB 为总同化速率低温校正因子;CVL 为叶同化物转化效率;CVO 为储存器官同化物转化效率;CVR 为根同化物转化效率;CVS 为茎同化物转化效率;Q₁₀ 为温度变化 10℃ 时呼吸作用变化率;RML 为叶维持呼吸速率;RMO 为储存器官的维持呼吸速率;RMR 为根的维持呼吸速率;RMS 为茎的维持呼吸速率;RFSETB 为不同生育期衰老校正因子;FRTB 为不同生育期茎干物质的分配系数;FLTB 为

不同生育期叶干物质的分配系数;FOTB 为不同生育期储存器官干物质的分配系数;RDRRTB 为不同生育期根相对死亡速率;RDRSTB 为不同生育期茎

相对死亡速率;CFET 为蒸散速率修正因子;DEPNR 为土壤水分消耗作物群数量;RDI 为初始根深;RRI 为根深最大日增加量;RDMCR 为最大根深。

表 2 WOFOST 模型冬小麦-夏玉米参数取值范围

Tab.2 Range of winter wheat – summer corn parameters in WOFOST

参数	冬小麦		夏玉米		参数	冬小麦		夏玉米	
	下限	上限	下限	上限		下限	上限	下限	上限
TDWI/(kg·hm ⁻²)	180	220	45	55	CVR/(kg·kg ⁻¹)	0.65	0.763 4	0.65	0.759
LAIEM/(hm ² ·hm ⁻²)	0.122 85	0.150 15	0.043 524	0.053 196	CVS/(kg·kg ⁻¹)	0.63	0.728 2	0.63	0.723 8
RGRLAI/(hm ² ·hm ⁻² ·d ⁻¹)	0.007 353	0.008 987	0.026 46	0.032 34	Q ₁₀	1.8	2.0	1.8	2.0
SLATB _{0.00} /(hm ² ·kg ⁻¹)	0.001 908	0.002 332	0.002 34	0.002 86	RML/(kg(CH ₂ O)·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)	0.027	0.030	0.027	0.030
SLATB _{0.50} /(hm ² ·kg ⁻¹)	0.001 908	0.002 332	0.001 08	0.001 32	RMO/(kg(CH ₂ O)·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)	0.009	0.011	0.009	0.011
SLATB _{0.78} /(hm ² ·kg ⁻¹)	0.001 908	0.002 332	0.001 08	0.001 32	RMR/(kg(CH ₂ O)·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)	0.013 5	0.015 0	0.013 5	0.015 0
SPAN/d	28.17	34.43	29.70	36.30	RMS/(kg(CH ₂ O)·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)	0.015 0	0.016 5	0.015 0	0.016 5
TBASE/℃	-2	2	8	10	RFSETB _{0.00}	0.9	1.0		
KDIFTB _{0.00}	0.54	0.66	0.54	0.66	RFSETB _{1.75}			0.675	0.825
KDIFTB _{2.00}	0.54	0.66	0.54	0.66	RFSETB _{2.00}			0.250	0.275
EFFTB ₀ /(kg·hm ⁻² ·h ⁻¹ ·J ⁻¹ ·m ² ·s)	0.405	0.495	0.405	0.495	FRTB _{0.00} /(kg·kg ⁻¹)	0.45	0.55	0.36	0.44
EFFTB ₄₀ /(kg·hm ⁻² ·h ⁻¹ ·J ⁻¹ ·m ² ·s)	0.405	0.495	0.405	0.495	FRTB _{0.50} /(kg·kg ⁻¹)	0.117	0.143		
AMAXTB _{0.00} /(kg·hm ⁻² ·h ⁻¹)	32.247	39.413	63.000	70.000	FRTB _{0.70} /(kg·kg ⁻¹)			0.135	0.165
AMAXTB _{1.30} /(kg·hm ⁻² ·h ⁻¹)	32.247	39.413			FRTB _{0.90} /(kg·kg ⁻¹)	0.027	0.033	0.054	0.066
AMAXTB _{1.50} /(kg·hm ⁻² ·h ⁻¹)	32.247	39.413	56.700	69.300	FLTB _{0.00} /(kg·kg ⁻¹)	0.585	0.715	0.558	0.682
AMAXTB _{1.75} /(kg·hm ⁻² ·h ⁻¹)			44.1	53.9	FLTB _{0.25} /(kg·kg ⁻¹)	0.63	0.77		
AMAXTB _{2.00} /(kg·hm ⁻² ·h ⁻¹)	4.032	4.928	18.900	23.100	FLTB _{0.33} /(kg·kg ⁻¹)			0.558	0.682
TMPFTB ₀	0.009	0.100			FLTB _{0.5} /(kg·kg ⁻¹)	0.45	0.55		
TMPFTB ₁₀	0.54	1.00			FLTB _{0.646} /(kg·kg ⁻¹)	0.27	0.33		
TMPFTB ₁₅	0.9	1.0			FLTB _{0.88} /(kg·kg ⁻¹)			0.135	0.165
TMPFTB ₁₆			0.72	0.88	FLTB _{1.10} /(kg·kg ⁻¹)			0.09	0.11
TMPFTB ₂₀			0.9	1.0	FOTB _{1.00} /(kg·kg ⁻¹)	0.9	1.0		
TMPFTB ₂₅	0.9	1.0			FOTB _{1.10} /(kg·kg ⁻¹)			0.45	0.55
TMPFTB ₃₀			0.9	1.0	RDRRTB _{1.5001} /(kg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)	0.018	0.02	0.018	0.02
TMPFTB ₃₅	0	0.1			RDRRTB _{2.00} /(kg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)	0.018	0.02	0.018	0.02
TMPFTB ₃₆			0.855	1.000	RDRSTB _{1.5001} /(kg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)	0.018	0.022	0.018	0.022
TMPFTB ₄₂			0.504	0.616	RDRSTB _{2.00} /(kg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)	0.018	0.022	0.018	0.022
TMNFTB ₀	0	0.1			CFET	0.9	1.1	0.9	1.1
TMNFTB ₃	0.9	1.0			DEPNR	4.05	4.95	4.05	4.95
TMNFTB ₈			0.9	1.0	RDI/cm	10	12	10	12
CVL/(kg·kg ⁻¹)	0.616 5	0.753 5	0.612 0	0.748 0	RRI/(cm·d ⁻¹)	1.08	1.32	1.98	2.42
CVO/(kg·kg ⁻¹)	0.638 1	0.779 9	0.603 9	0.738 1	RDMCR/cm	112.5	137.5	90.0	110.0

1.3.2 敏感性分析方法

EFAST 法是 SALTELLI 等^[13] 在傅里叶幅度敏感性检验法 (Fourier amplitude sensitivity test, FAST) 的基础上, 结合 Sobol’ 法的优点所提出的一种基于方差分解的全局敏感性分析方法, 具有稳定、计算快速等特点。EFAST 法原理是选取合适的搜索曲线在多维参数空间中运行, 将一组非线性相关的整数频率分配给模型的所有输入参数, 并对模型中选取的参数引入一个具有共同独立参数的函数, 使模型作为独立参数的周期函数, 将多维积分降为一维积分。通过把目标函数转换成傅里叶级数, 得

到各频率的傅里叶频谱曲线, 由频谱曲线可计算由参数 x_i 引起的模型输出方差和总方差, 其比值即为该参数的敏感度, 具体算法详见文献[13, 38 – 39], 其简单算法公式为

$$V = \sum_i V_i + \sum_{i \neq j} V_{ij} + \cdots + \sum_{i \neq j \neq \cdots \neq k} V_{ij \cdots k} \quad (1)$$

$$S_i = \frac{V_i}{V} \quad (2)$$

$$S_{ij} = \frac{V_{ij}}{V} \quad (3)$$

$$S_{Ti} = S_i + S_{ij} + \cdots + S_{ij \cdots k} \quad (4)$$

式中 V ——模型总方差

- V_i —— x_i 输入变化单独引起的模型方差
- V_{ij} —— x_i 通过 x_j 作用贡献的耦合方差
- $V_{ij\cdots k}$ —— x_i 通过与 $x_j, \cdots, x_k$ 相互作用贡献的耦合方差
- S_i —— x_i 的一阶敏感性指数
- S_{ij} —— x_i 的二阶敏感性指数
- $S_{ij\cdots k}$ —— x_i 的多阶敏感性指数
- S_{Ti} —— x_i 的总敏感性指数

1.3.3 敏感性分析方案

基于农业气象试验站点多年降雨量数据,选取 2000 年(丰水)、2007 年(平水)、2013 年(枯水)为研究年份,采用 EFAST 方法,分别对黄骅、商丘、驻马店等站点冬小麦和夏玉米不同生产水平下的产量进行参数敏感性分析,旨在分析不同气候条件下和不同生产水平下参数敏感性的差异。模型产量的输出结果为总储存器官干物质量(Total dry weight of living storage organs, TWSO),不同气候条件由不同站点(不同积温区)和不同年份(不同降水年型)下的气候条件来表征,即本研究中共考虑 9 个不同气候条件下的参数敏感性,不同生产水平考虑潜在和水分限制生产水平。全局敏感性分析试验借助软件 Simlab2.2 的 EFAST 模块实现。EFAST 方法认为采样个数大于等于 65 倍的参数个数为有效,本研究采样数取 73,总采样数为 3 650,能够满足 EFAST 方法基本要求。模型 3 年 3 站点 2 种作物共需运行 $3\,650 \times 3 \times 3 \times 2 = 65\,700$ 次,本研究全部的模型运算通过编写 Python 程序实现。

通过对不同气候条件下各参数敏感性指数进行平均,计算出各参数总敏感指数,采用参数敏感性指数大于或等于 0.10 作为界定主要敏感参数的标准^[40]。

1.3.4 一致性检验方法

不同生产水平、气候条件的敏感性排序的一致性由 TDCC (Top-down concordance coefficient) 系数来衡量^[41]。

假设有排序矩阵 R_{ij} ,其中有 m 个因子, n 个观测值。 r_{nm} 为变量 m 在所有 n 个观测值的排序序号。在本研究中, m 为不同生产水平或不同气候条件, n 为待分析的参数个数。

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1m} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \tag{5}$$

计算排序矩阵 R_{ij} 的 savage 得分

$$s_{ij} = \sum_{q=r_{ij}}^n \frac{1}{q} \tag{6}$$

并代入 TDCC 系数计算公式

$$C_{TDCC} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^m s_{ij} \right)^2 - m^2 n}{m^2 \left(n - \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} \right)} \tag{7}$$

式中 C_{TDCC} ——TDCC 系数
 C_{TDCC} 的显著性 P 值由统计值 T 计算,计算式为
 $T = m(n-1)C_{TDCC}$ (8)

T 为自由度 $n-1$ 的 χ^2 分布。一般认为, C_{TDCC} 越接近 1,且 P 值小于 0.05,表明各变量排序具有显著的一致性。

2 结果分析

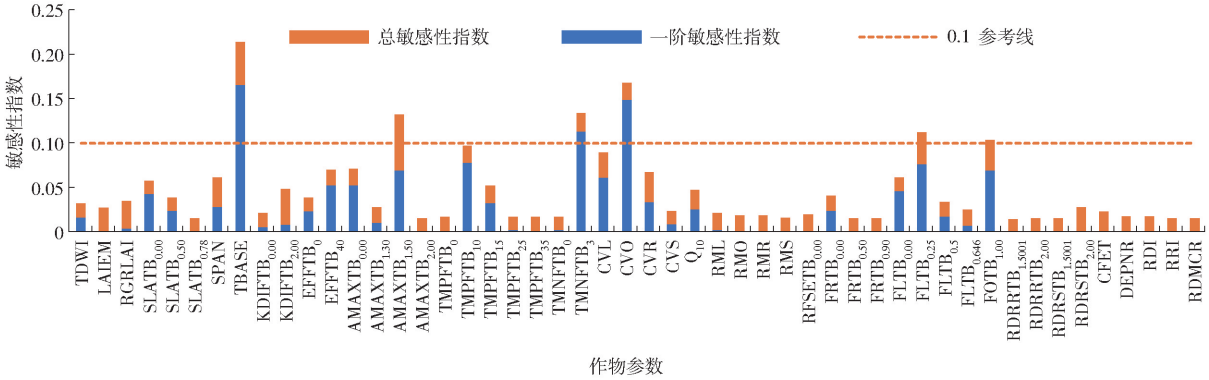
2.1 冬小麦-夏玉米参数敏感性

2.1.1 冬小麦参数敏感性

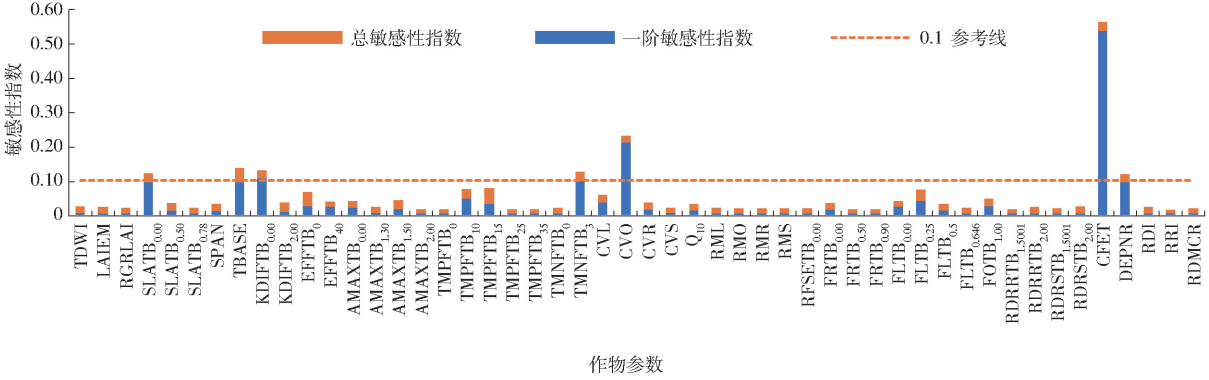
WOFOST 模型冬小麦产量在 2 种不同生产水平下的参数敏感性分析结果如图 2 所示。潜在生产水平下产量主要敏感参数有 TBASE、CVO、TMNFTB₃、AMAXTB_{1.50}、FLTB_{0.25}、FOTB_{1.00}等,其中 TBASE 和 CVO 的全局敏感性指数最高,为 0.21 和 0.17。水分限制生产水平下对产量敏感的冬小麦参数有 CFET、CVO、TBASE、KDIFTB_{0.00}、TMNFTB₃、SLATB_{0.00}、DEPNR 等,其中 CFET 为最敏感的参数,其全局敏感性指数为 0.56。由此可发现,2 种生产水平下的主要敏感参数有所区别,潜在生产水平下,冬小麦的生长发育主要受温度和太阳辐射影响,因此温度相关的参数如叶龄低温阈值与总同化速率低温校正因子有较高的敏感性;而水分限制生产水平下,冬小麦所需水分仅由降水提供,当降水不足导致水分亏缺会影响冬小麦的正常生长发育,因此产量对蒸散速率修正因子等作物水分利用相关参数高度敏感。

2.1.2 夏玉米参数敏感性

夏玉米产量在不同生产水平下的参数敏感性分析结果如图 3 所示。潜在生产水平下,夏玉米产量主要敏感参数有 TMNFTB₁₀、EFFTB₄₀、FLTB_{0.33}、SPAN、CVL、SLATB_{0.00}、AMAXTB_{1.75}以及 FLTB_{0.00}等,其中最敏感的参数为 TMNFTB₁₀和 EFFTB₄₀,其全局敏感性指数分别为 0.88 和 0.54。水分限制生产水平下,夏玉米作物参数敏感性分析结果与潜在生产水平差异不大,除了上述潜在生产水平主要敏感参数以外,RDI 和 SLATB_{0.78}也表现较高的敏感性,其中 TMNFTB₁₀依然是最敏感的参数,其全局敏感性指数为 0.69。该结果表明,在潜在和水分限制生产水平下,受温度影响的同化速率相关参数是影响夏玉米产量的主要敏感参数,而水分则没有对夏玉米生长发育起到太大的限制作用。



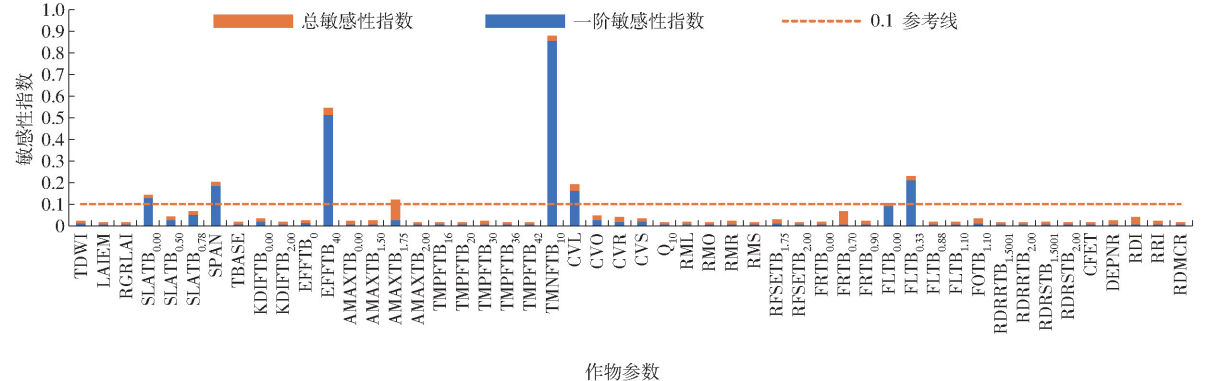
(a) 潜在生产水平



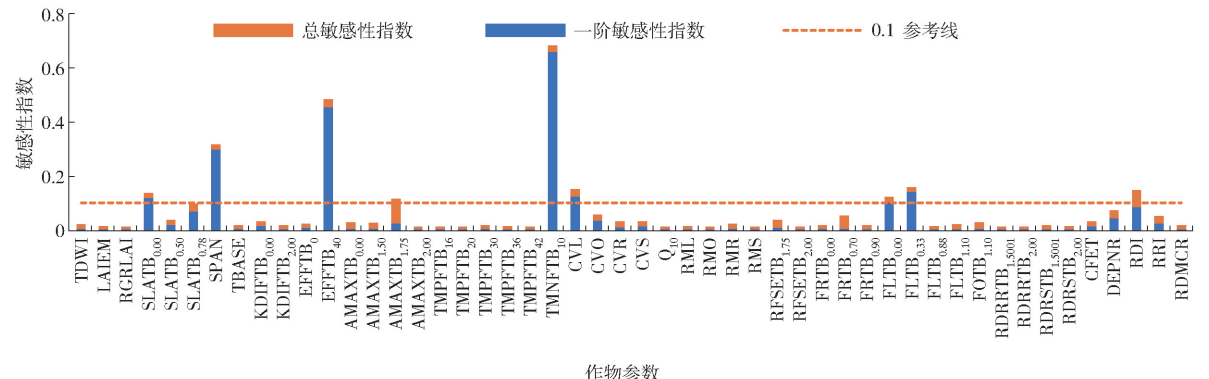
(b) 水分限制生产水平

图 2 冬小麦参数敏感性分析结果

Fig. 2 Sensitivity analysis results of winter wheat parameter



(a) 潜在生产水平



(b) 水分限制生产水平

图 3 夏玉米参数敏感性分析结果

Fig. 3 Sensitivity analysis results of summer maize parameter

2.2 冬小麦-夏玉米参数敏感性排序一致性

2.2.1 不同生产水平

采用 TDCC 系数量化冬小麦和夏玉米产量在不同生产水平作物参数敏感性的排序一致性,结果表明冬小麦和夏玉米不同生产水平 TDCC 系数分别为 0.82 和 0.98, P 均小于 0.01。可见冬小麦和夏玉米在不同生产水平下参数敏感性排序均有较高的显著一致性,但相较于夏玉米,冬小麦不同生产水平 TDCC 系数较低,其不同生产水平间敏感性差异较夏玉米大,这与上述冬小麦和夏玉米参数敏感性分析结果相一致。

2.2.2 不同气候条件

不同气候条件冬小麦作物参数敏感排序一致性检验结果如表 3 所示,潜在生产水平下由不同站点和年份组成的不同气候条件的总排序一致性较好,TDCC 系数为 0.92,不同站点和不同年份上也均表现出较高的一致性,TDCC 系数最低达 0.91,最高达 0.97, P 均小于 0.01,说明不同气候条件下潜在生产水平参数敏感性排序具有显著的一致性,不同气候条件对参数敏感性的影响较低。而水分限制生产水平下不同气候条件排序一致性较差,TDCC 系数仅为 0.61,同时在不同站点和不同年份参数敏感排序一致性检验结果中可发现,2000、2007、2013 年各年份不同站点间 TDCC 系数分别为 0.84、0.94 和 0.77,黄骅、商丘、驻马店各站点不同年份间 TDCC 系数为 0.60、0.70 和 0.78,表明各站点在不同年份间的一致性较差,而同一年份在不同站点间的一致性较好,可见不同气候条件对水分限制生产水平下的参数敏感性有较大的影响,且不同降水年型气候条件差异造成的敏感性差异较大。

表 3 不同气候条件下冬小麦参数敏感性的排序一致性
Tab.3 Ranking consistency of winter wheat parameter sensitivity under different climate conditions

气候条件	潜在生产水平		水分限制生长水平	
	TDCC	P	TDCC	P
站点间	2000 年	0.96 3.02×10^{-11}	0.84 9.03×10^{-9}	
	2007 年	0.94 7.14×10^{-11}	0.94 7.13×10^{-11}	
	2013 年	0.95 5.01×10^{-11}	0.77 1.87×10^{-7}	
年份间	黄骅	0.95 3.34×10^{-11}	0.60 1.20×10^{-4}	
	商丘	0.91 2.69×10^{-10}	0.70 2.70×10^{-6}	
	驻马店	0.97 1.68×10^{-11}	0.78 1.12×10^{-7}	
	总排序一致性	0.92 4.30×10^{-58}	0.61 3.70×10^{-32}	

不同气候条件夏玉米参数敏感性的排序一致性检验结果如表 4 所示,潜在生产水平下夏玉米参数敏感性 TDCC 系数为 0.98,在不同年份和不同站点间 TDCC 系数均在 0.97 以上, P 均小于 0.01,表明

潜在生产水平下夏玉米参数敏感性排序在不同气候条件下具有显著的一致性。而在水分限制生产水平下,其 TDCC 系数为 0.86,与潜在生产水平相比,不同气候条件下夏玉米水分限制生产水平参数敏感性排序一致性相对较差。不同年份和不同站点的一致性检验表明商丘和驻马店站点在 3 个不同年份和 2013 年 3 个不同站点 TDCC 系数较低,参数敏感性排序一致性较差,可见不同气候条件对水分限制生产水平下的参数敏感性有影响,其中不同降水年型间气候条件差异是造成总体一致性较差的主要原因。

表 4 不同气候条件下夏玉米参数敏感性的排序一致性
Tab.4 Ranking consistency of summer maize parameter sensitivity under different climate conditions

气候条件	潜在生产水平		水分限制生长水平		
	TDCC	P	TDCC	P	
站点间	2000 年	0.98	8.42×10^{-12}	0.95	3.95×10^{-11}
	2007 年	0.99	5.27×10^{-12}	0.98	9.08×10^{-12}
	2013 年	0.99	6.59×10^{-12}	0.80	4.58×10^{-8}
年份间	黄骅	0.99	4.50×10^{-12}	0.96	2.37×10^{-11}
	商丘	0.98	1.06×10^{-11}	0.80	4.71×10^{-8}
	驻马店	0.97	1.23×10^{-11}	0.88	9.86×10^{-10}
总排序一致性	0.98	7.72×10^{-63}	0.86	6.32×10^{-53}	

2.3 不同气候条件下水分限制生产水平参数敏感性差异

对于冬小麦产量而言,2000、2013 年所有站点产量对 CFET、DEPNR 等水分利用相关参数高度敏感,而 2007 年所有站点产量对 CFET、DEPER 等参数不敏感,相反 TBASE 等受温度影响的同化速率相关参数是其主要敏感参数。夏玉米相较于冬小麦,在不同气候条件下的参数敏感性差异不大,在 2013 年商丘和驻马店站点夏玉米主要敏感参数为 SPAN、CFET、DEPNR、RDI 等叶片和水分利用相关参数,而其余站点、年份主要敏感的参数均为 TMNFTB₁₀、EFFTB₄₀等(图 4,图中站点年份编号中,HH 表示黄骅,SQ 表示商丘,ZMD 表示驻马店,后面数字表示年份)。总体而言,水分限制生产水平下不同气候条件对参数敏感性的影响有以下 2 种表现形式:降水不足、水分胁迫程度较大时(枯水年),作物产量对 CFET、DEPER、RDI 等水分利用和根系相关参数敏感;降水较充足、水分胁迫程度较低时(丰水年和平水年),作物产量表现出对 TBASE、TMNFTB₁₀及 EFFTB₄₀等受温度影响的同化速率和光能利用效率相关参数敏感,这与潜在和水分限制生产水平下的参数敏感性分析结果相似。此外,2000 年虽为丰水年,但因 1999 年(枯水年)降雨量仅为

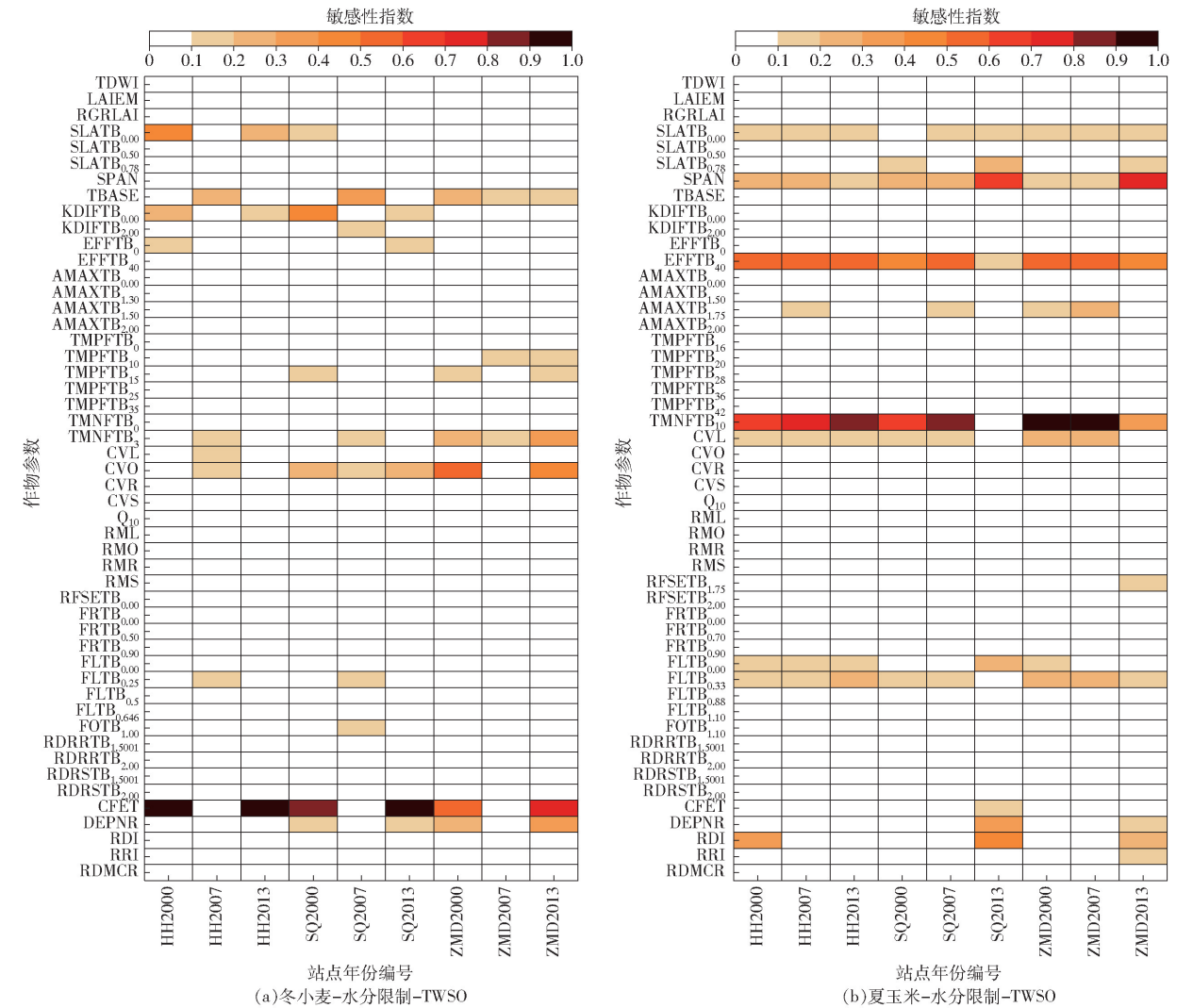


图 4 不同气候条件下水分限制生产水平参数敏感性指数

517.3 mm,冬小麦生育期前期水分胁迫程度较大,因此也会对 CFET 和 DEPER 等参数有较大的敏感性。

3 讨论

3.1 参数全局敏感性

上述研究表明冬小麦潜在和水分限制生产水平下产量主要敏感参数有所区别。潜在生产水平下主要对 TBASE、TMNFTB₃、CVO 等参数敏感,其中前 2 个参数表征冬小麦低温条件下进入越冬期同化速率减慢或停止的过程,CVO 表示的是同化物转化为储存器官物质的效率,这些过程均对作物生长有着重要的影响,文献[27,30,42]等研究中也表明了这些参数的敏感性和重要性。冬小麦在水分限制生产水平下主要敏感参数为 CFET、CVO、TBASE、TMNFTB₃等,其中敏感性指数最高的 CFET 参数表征作物面对水分胁迫时的响应^[43]。目前大部分研究在进行敏感性分析时对参数 CFET 的考虑较少,但该参数在本研究中表现出对水分限制生产水平下

产量有较大的影响,该参数准确校验可能对黄淮海旱作区作物产量模拟有重要意义。

夏玉米潜在和水分限制生产水平下的产量主要敏感参数相一致,主要为 TMNFTB₁₀、EFFTB₄₀、SPAN,当水分充足或水分胁迫较小时,作物产量形成主要由光温影响,因此在低温或高温下产量对光能利用效率和最大同化速率有较高的敏感性。但文献[24,27-28]关于夏玉米参数敏感性的研究表明,除 EFFTB₄₀、SPAN 等参数外,夏玉米产量还对 CVO、TBASE、FOTB_{1.10}、FLTB_{0.88}、SLATB_{0.00}和 SLATB_{0.5}等参数有着较高的敏感性,其中部分参数在本研究中并没有表现出很强的敏感性,可能的原因是参数的取值范围、区域尺度、模拟的气象条件、环境或田间管理措施等因素不同^[44],这也说明了在特定操作环境下运用模型之前进行敏感性分析的重要性^[27]。

3.2 参数敏感性一致性检验

冬小麦和夏玉米不同生产水平参数敏感性分析

结果表明冬小麦不同生产水平主要敏感参数有所差别,而夏玉米则差异不大,冬小麦不同生产水平一致性相对于夏玉米较差。这主要是由 2 种作物生育期内降雨量的不同所导致,冬小麦生长期主要为 10 月至次年 6 月,在黄淮海旱作地区正是降水较少时期,水分缺乏情况下会提高作物水分利用相关参数的敏感性,而夏玉米生育期为 6 月至 10 月,这期间雨水较充足,基本能够满足作物生长发育需求,夏玉米生长发育主要受光温条件限制,因此其不同生产水平的参数敏感排序一致性较高,主要敏感参数间差异不大。

冬小麦和夏玉米参数敏感在不同气候条件下的排序一致性检验结果表明:在不同气候条件下 WOFOST 模型潜在生产水平下的产量对作物参数的敏感性有较高的一致性和稳定性,而在水分限制生产水平下一致性较差。这可能是由于在黄淮海平原旱作区处于同一气候类型区,光温条件差异并不大,模型对外界光温条件的响应较为一致,因此会导致不同气候条件下潜在生产水平敏感性参数有较高的一致性。相反,研究区内无论年际间或是不同地区降水差异均较大,从而增加了不同气候条件下水分限制生产水平参数敏感性差异。本研究的 TDCC 系数相对低于文献[17]的研究结果,其主要原因可能在于本研究计算一致性时考虑了全部的参数,而文献[17]选取前 9 个敏感参数进行一致性检验;而不同气候条件参数敏感性 TDCC 系数高于文献[25]的研究结果,这主要是由于文献[25]的研究主要是针对大区域尺度,选取的 4 个站点分属不同的气候类型,气候条件相差较大,因此各气候区间敏感参数 TDCC 系数较低。同时,本研究中不同生产水平间参数敏感性 TDCC 系数高于前人的研究结果,其原因可能是由于本研究只考虑了潜在和水分限制生产水平,如果考虑养分限制甚至是实际产量,其影响因素更加复杂,相应的敏感性分析结果可能差异更大。由此可进一步明确作物模型是通过作物参数来表达作物对不同外界条件的不同响应,不同外界条件会

导致不同的参数敏感性,考虑的外界条件越复杂,参数敏感性的差异会越大。因此,在特定环境下运用模型时进行敏感性分析是不可缺少的过程,同时,多种生产水平及更为复杂的影响因素下的模型敏感性分析可能是进一步了解模型并提高区域上应用的有效措施之一。

4 结论

- (1) WOFOST 模型冬小麦 2 种生产水平的 TDCC 系数为 0.82,主要敏感参数间有所差别,潜在生产水平下的主要敏感参数有叶龄的低温阈值(TBASE)、储存器官同化物转化效率(CVO)、总同化速率在低温 3℃时的校正因子(TMNFTB₃)等,而冬小麦水分限制生产水平下蒸散速率修正因子(CFET)和土壤水分消耗作物群数量(DEPNR)等水分利用相关参数以及储存器官同化物转化效率(CVO)等参数表现出较大的敏感性。
- (2) WOFOST 模型夏玉米 2 种生产水平 TDCC 系数为 0.98,主要敏感参数间差异不大,主要为总同化速率低温 10℃时的校正因子(TMNFTB₁₀)、每日温度为 40℃时单叶片同化 CO₂的初始光能利用效率(EFFT_{B40})、35℃时叶片生命周期(SPAN)等。
- (3) 相同气候类型下不同气候条件对不同生产水平下的参数敏感性的影响不同。潜在生产水平下冬小麦和夏玉米不同气候条件 TDCC 系数分别为 0.92 和 0.98,不同气候条件对潜在生产水平下影响较小,而水分限制生产水平下 2 种作物不同气候条件 TDCC 系数分别为 0.61 和 0.86,不同气候条件对水分限制生产水平影响较大,其中冬小麦水分限制生产水平下由不同气候条件引起的参数敏感性差异相对较大,这均与气候条件在不同时空上的差异有关。
- (4) 作物模型是通过作物参数来表达作物对不同外界条件的响应,不同外界条件会导致不同的参数敏感性,外界条件越复杂,参数敏感性差异越大。因此,在特定环境下运用模型时进行敏感性分析是不可缺少的过程。

参 考 文 献

[1] 孙扬越,申双和. 作物生长模型的应用研究进展[J]. 中国农业气象, 2019, 40(7): 444-459.
SUN Yangyue, SHEN Shuanghe. Research progress in application of crop growth models [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2019, 40(7): 444-459. (in Chinese)

[2] 黄川容,刘洪. 气候变化对黄淮海平原冬小麦与夏玉米生产潜力的影响[J]. 中国农业气象, 2011, 32(增刊): 118-123.
HUANG Chuanrong, LIU Hong. The effect of the climate change on potential productivity of winter wheat and summer maize in the Huang-Huai-Hai Plain[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2011, 32(Supp.): 118-123. (in Chinese)

[3] 黄健熙,贾世灵,马鸿元,等. 基于 WOFOST 模型的中国主产区冬小麦生长过程动态模拟[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 222-228.
HUANG Jianxi, JIA Shiling, MA Hongyuan, et al. Dynamic simulation of growth process of winter wheat in main production areas of China based on WOFOST model[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(10): 222-228. (in Chinese)

[4] 马鸿元,黄健熙,黄海,等. 基于历史气象资料和 WOFOST 模型的区域产量集合预报[J/OL]. 农业机械学报, 2018,

- 49(9):257-266.
 MA Hongyuan, HUANG Jianxi, HUANG Hai, et al. Ensemble forecasting of regional yield of winter wheat based on WOFOST model using historical metrological dataset[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9):257-266. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180930&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.030. (in Chinese)
- [5] 王涛,吕昌河,于伯华. 基于 WOFOST 模型的京津冀地区冬小麦生产潜力评价[J]. 自然资源学报, 2010, 25(3): 475-487.
 WANG Tao, LÜ Changhe, YU Bohua. Assessing the potential productivity of winter wheat using WOFOST in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(3): 475-487. (in Chinese)
- [6] 张建平,王靖,何永坤,等. 基于 WOFOST 作物模型的玉米区域干旱影响评估技术[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(3):451-459.
 ZHANG Jianping, WANG Jing, HE Yongkun, et al. Evaluation of regional drought disaster to maize using WOFOST crop growth model[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(3): 451-459. (in Chinese)
- [7] 梁浩,胡克林,李保国. 基于 PEST 的土壤-作物系统模型参数优化及灵敏度分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 78-85.
 LIANG Hao, HU Kelin, LI Baoguo. Parameter optimization and sensitivity analysis of soil-crop system model using PEST[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(3): 78-85. (in Chinese)
- [8] 刘峻明,潘佩珠,王鹏新,等. 基于 SCE-UA 算法的小麦穗分化期模拟模型参数优化[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4):232-240.
 LIU Junming, PAN Peizhu, WANG Pengxin, et al. Parameters optimization of wheat spike differentiation stages model based on SCE-UA algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 232-240. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180426&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.026. (in Chinese)
- [9] 孙美,张晓琳,冯绍元,等. 基于 PEST 的 RZWQM2 模型参数优化与验证[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 146-153.
 SUN Mei, ZHANG Xiaolin, FENG Shaoyuan, et al. Parameter optimization and validation for RZWQM2 model using PEST method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 146-153. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141123&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.023. (in Chinese)
- [10] TAN Junwei, CUI Yuanlai, LUO Yufeng. Global sensitivity analysis of outputs over rice-growth process in ORYZA model[J]. Environmental Modelling & Software, 2016, 83: 36-46.
- [11] 蔡毅,邢岩,胡丹. 敏感性分析综述[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2008, 44(1): 9-16.
 CAI Yi, XING Yan, HU Dan. On sensitivity analysis[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2008, 44(1):9-16. (in Chinese)
- [12] 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.
- [13] SALTELLI A, BOLADO R. An alternative way to compute Fourier amplitude sensitivity test (FAST)[J]. Computational Statistics and Data Analysis, 1998, 26(4): 445-460.
- [14] MORRIS M D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments[J]. Technometrics, 1991, 33(2): 161-174.
- [15] SOBOL I M. Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models[J]. Math Modeling & Computational Experiment, 1993, 1(4): 407-413.
- [16] EWEYS O A, ELWAN A A, BORHAM T I. Integrating WOFOST and Noah LSM for modeling maize production and soil moisture with sensitivity analysis, in the east of the Netherlands[J]. Field Crops Research, 2017, 210: 147-161.
- [17] 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?flag=1&file_no=20141020&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.020. (in Chinese)
- [18] 王连喜,张阳,李琪,等. 作物模型参数敏感性分析现状与展望[J]. 气象科技, 2018, 46(2): 382-389.
 WANG Lianxi, ZHANG Yang, LI Qi, et al. Current status and prospects of sensitivity analysis of crop model parameter[J]. Meteorological Science and Technology, 2018, 46(2): 382-389. (in Chinese)
- [19] 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)
- [20] 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)
- [21] 杨伟才,毛晓敏. 气候变化影响下作物模型的不确定性[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(9): 874-879.
 YANG Weicai, MAO Xiaomin. Uncertainty of crop models under influence of climate change[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(9): 874-879. (in Chinese)
- [22] ZHAO Gang, BRYAN B A, SONG Xiaodong. Sensitivity and uncertainty analysis of the APSIM-wheat model: interactions between cultivar, environmental, and management parameters[J]. Ecological Modelling, 2014, 279: 1-11.
- [23] TAN Junwei, CUI Yuanlai, LUO Yufeng. Assessment of uncertainty and sensitivity analyses for ORYZA model under different ranges of parameter variation[J]. European Journal of Agronomy, 2017, 91: 54-62.
- [24] 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.
- [25] 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)
- [26] 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.
- [27] GILARDELLI C, CONFALONIERI R, CAPPELLI G A, et al. Sensitivity of WOFOST-based modelling solutions to crop parameters under climate change[J]. *Ecological Modelling*, 2018, 368: 1 – 14.
- [28] 陈艳玲,顾晓鹤,宫阿都. 基于EFAST方法的WOFOST作物模型参数敏感性分析[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 37(3): 72 – 78.
- CHEN Yanling, GU Xiaohe, GONG Adou. Global sensitivity analysis of WOFOST model parameters based on EFAST method[J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2018, 37(3): 72 – 78. (in Chinese)
- [29] 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)
- [30] MA Guannan, HUANG Jianxi, WU Wenbin, et al. Assimilation of MODIS – LAI into the WOFOST model for forecasting regional winter wheat yield[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2013, 58(3 – 4): 634 – 643.
- [31] 黄健熙,黄海,马鸿元,等. 基于MCMC方法的WOFOST模型参数标定与不确定性分析[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(16): 113 – 119.
- HUANG Jianxi, HUANG Hai, MA Hongyuan, et al. Markov Chain Monte Carlo based WOFOST model parameters calibration and uncertainty analysis[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(16): 113 – 119. (in Chinese)
- [32] 孙琳丽,侯琼,马玉平,等. WOFOST模型在内蒙古河套灌区模拟玉米生长全程的适应性[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(3): 800 – 807.
- SUN Linli, HOU Qiong, MA Yuping, et al. Adaptability of WOFOST model to simulate the whole growth period of maize in Hetao irrigation region of Inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(3): 800 – 807. (in Chinese)
- [33] 孙忠祥,李勇,赵云泽,等. 旱作区土壤有机碳密度空间分布特征与其驱动力分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(1): 255 – 262.
- SUN Zhongxiang, LI Yong, ZHAO Yunze, et al. Analysis on spatial distribution characteristics and driving forces of soil organic carbon density in dry farming region[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(1): 255 – 262. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190128&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.028. (in Chinese)
- [34] 卓志清,兴安,孙忠祥,等. 东北旱作区农业生态系统协同发展与权衡分析[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(6): 892 – 902.
- ZHUO Zhiqing, XING An, SUN Zhongxiang, et al. Synergies and trade-offs of agro-ecosystem in dry-farming areas in Northeast China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(6): 892 – 902. (in Chinese)
- [35] 白彩云,李少昆,柏军华,等. 我国东北地区不同生态条件下玉米品种积温需求及利用特征[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(9): 2337 – 2342.
- BAI Caiyun, LI Shaokun, BO Junhua, et al. Characteristics of accumulated temperature demand and its utilization of maize under different ecological conditions in Northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(9): 2337 – 2342. (in Chinese)
- [36] BOOGAARD H L, VAN D C A, RÖTTER R P, et al. User's guide for the WOFOST Control Centre 2.1 and WOFOST 7.1. 7 crop growth simulation model[Z]. Alterra, Wageningen University & Research Centre, 2014.
- [37] SAXTON K E, RAWLS W J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(5): 1569 – 1578.
- [38] 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 method[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2012, 17(5): 149 – 154. (in Chinese)
- [39] 李艳,黄春林,卢玲. 基于EFAST方法的SEBS模型参数全局敏感性分析[J]. *遥感技术与应用*, 2014, 29(5): 719 – 726.
- LI Yan, HUANG Chunlin, LU Ling. Global sensitivity analysis of SEBS model parameters based on EFAST method[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2014, 29(5): 719 – 726. (in Chinese)
- [40] 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.
- [41] IMAN R L, CONOVER W J. A measure of top-down correlation[J]. *Technometrics*, 1987, 29(3): 351 – 357.
- [42] 马玉平,王石立,张黎. 针对华北小麦越冬的WOFOST模型改进[J]. *中国农业气象*, 2005(3): 145 – 149.
- MA Yuping, WANG Shili, ZHANG Li. Study on improvement of WOFOST against over winter of wheat in North China[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2005(3): 145 – 149. (in Chinese)
- [43] 孙琳丽,景元书,马玉平,等. 基于Downhill – Simplex算法的观测数据与作物生长模型同化方法研究[J]. *中国农业气象*, 2012, 33(4): 555 – 566.
- SUN Linli, JING Yuanshu, MA Yuping, et al. Assimilation scheme of observation data and crop growth model based on Downhill – Simplex algorithm[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2012, 33(4): 555 – 566. (in Chinese)
- [44] 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.
- TAN Junwei. Study on parameter sensitivity and model uncertainty analysis of crop model[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017. (in Chinese)