

不同水分条件下 APEX 模型参数的 敏感性评价和不确定性分析

侯靳锦, 孙筱璐*, 王碧胜, 杨晓慧, 徐梦杰, 房全孝*
(青岛农业大学, 山东 青岛 266109)

摘要: 【目的】评估不同水分条件下 APEX (Agricultural Policy/Environmental eXtender) 模型参数的敏感性和不确定性。【方法】基于冬小麦水分控制试验, 基于 Sobol 法、Morris 法和 FAST 法分析了不同水分条件下 APEX 模型参数的敏感性, 探讨了灌溉管理、降水年型及地下水位对模型参数敏感性的影响。【结果】在地下水位为 1.25 m 的条件下, 影响冬小麦生物量、产量及蒸散量的最敏感参数均为 RDMX (最大根深度), 影响叶面积指数的最敏感的参数为 DMLA (最大潜在叶面积指数); 当地下水位为 5 m 时, 影响蒸散量、产量和生物量的敏感性参数为 PARM38 (水分胁迫计算权重系数) 和 RWPC1 (萌发期根系生物量占比)。随着灌水量的增加, RDMX 参数敏感性总体降低, 而 DMLA、DLAI (叶面积生长达到最高点的生育时期) 和 WA (潜在光能利用率) 参数敏感性总体升高。RDMX 在干旱年份的敏感性指数高于湿润年份。模型不确定性分析表明, 冬小麦生物量、产量和蒸散量观测值均分布在模拟值的 5%~95% 置信区间内, 模拟结果具有较高的可信度。【结论】3 种分析方法筛选的最敏感参数具有较好的一致性, 但其敏感性在不同灌溉、降水年型或地下水位条件下差异明显, 考虑到计算效率和准确性, Morris 法更适用于 APEX 模型的参数敏感性分析。

关键词: APEX 模型; 敏感性分析; 水分胁迫; Sobol 法; Morris 法; FAST 法; 不确定性分析

中图分类号: S512.1

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022514

OSID:



侯靳锦, 孙筱璐, 王碧胜, 等. 不同水分条件下 APEX 模型参数的敏感性评价和不确定性分析[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(8): 34-40, 54.

HOU Jinjin, SUN Xiaolu, WANG Bisheng, et al. Sensitivity and Uncertainty Analysis of the APEX Model to Water Status[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(8): 34-40, 54.

0 引言

【重要意义】作物生长受环境因素影响, 基于田间试验确定作物对环境因子的响应机制不仅费时费力, 更存在较高的不确定性。随着信息技术在农业领域的推广, 作物模型逐渐成为农业管理与决策的重要工具^[1-2]。目前主流的作物模型包括: EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator)^[3]、WOFOST (World Food Studies)^[4]、DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer)^[5]、RZWQM (Root Zone Water Quality Model)^[6], 这些模型系统考虑了作物

的生物学特性、生长过程与产量形成机制、环境因素对作物生长的胁迫机制。其中, APEX 模型是 EPIC 模型的扩展^[7-8], 需要结合当地的作物、气象、土壤和田间管理实践对模型参数进行适应性调整^[9-10]。如何在实际生产条件下验证和评价模型的适应性, 获取合理、有效的模型参数是 APEX 模型应用的前提。

【研究进展】敏感性分析一般可分为局部敏感性分析和全局敏感性分析^[11-14]。局部敏感性分析主要用来判断单个参数变化对模型输出变量的影响^[11], 如傅立叶幅度灵敏度检验法 (FAST)^[11-12]。全局敏感性分析考虑了参数间的相互影响, 更适合参数复杂的作物模型^[13-14]。主要的全局敏感性分析方法包括 Morris 法^[13]、Sobol 法^[14]和扩展傅立叶幅度灵敏检验法 (EFAST)^[13]。这些敏感性分析方法在准确性、敏感性以及计算量方面存在差异。因此, 对比分析不同敏感性分析方法的结果, 更有利于总结模型的敏感性参数^[11]。杨靖民等^[15]对 DSSAT 模型中的农业管理措施进行了敏感性分析, 发现玉米产量和作物叶面积指数对种植日期、播种密度、施肥量、施肥时间较为敏感; 张静潇等^[16]利用 EFAST 法对 CERES-Wheat 模型的作

收稿日期: 2022-09-16 修回日期: 2023-04-12 网络出版日期: 2023-05-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31671627); 山东省自然科学基金青年项目 (ZR2021QC113); 青岛农业大学博士启动基金项目 (6631118021)

作者简介: 侯靳锦 (1996-), 女, 硕士研究生, 主要从事作物耗水过程模拟与高效利用研究。E-mail: houjinjin0812@163.com

通信作者: 房全孝 (1976-), 男, 教授, 主要从事农田水分调控与模拟研究。E-mail: fqx01@163.com

孙筱璐 (1988-), 女, 讲师, 主要从事农田水分循环与作物高效用水研究。

E-mail: sun_xiaolu@126.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

物、土壤和田间管理参数进行了敏感性分析，确定了影响小麦产量的敏感性参数；吴立峰等^[17]在不同灌溉条件下分析了 CROPGRO 棉花模型的参数敏感性和不确定性，发现初花天数在不同灌水处理下无显著差异，但成熟天数差异显著；吴锦等^[18]利用 EFAST 方法分析了 EPIC 模型的参数敏感性，发现收获指数、生长季峰值、潜在热量单位、最大作物高度是影响模型的关键参数。【切入点】以往研究多采用单一敏感性分析方法，缺少对多种敏感性分析方法的对比研究，因此无法全面评价模型参数的敏感性和不确定性。同时，以往研究多在当地管理条件下进行，而针对不同管理、气候或土壤条件下的模型参数敏感性分析甚少，不利于揭示环境因素对模型参数敏感性的影响机制。【拟解决的关键问题】鉴于此，本研究基于胶东地区冬小麦水分控制试验，采用 3 种敏感性分析方法（Sobol 法、Morris 法和 FAST 法），在不同灌溉管理、降水年型及地下水位条件下，评价 APEX 模型关键参数对冬小麦叶面积指数、生物量、产量及蒸散量模拟结果的敏感性及其不确定性，为不同水分条件下 APEX 模型参数敏感性分析提供理论和技术支持。

1 材料与方法

1.1 APEX 模型

APEX 模型是美国农业部开发的农场尺度模型^[7]。该模型通过对气象因子、养分循环、农药迁移、植物生长和田间管理等要素的模拟，可以定量评价“气候-土壤-作物-管理”系统的动态变化过程。APEX 模型包含 11 个子模块：天气模块、水文模块、侵蚀模块、养分模块、农药模块、作物生长模块、耕作模块、经济模块、碳循环模块、氮循环模块和磷循环模块^[7]，能够实现农场和小流域尺度的农业系统模拟^[3,7]。

1.2 数据来源和试验设计

APEX 模型所需的气象数据、土壤数据、田间管理数据均来源于 2016—2019 年青岛农业大学胶州示范园水分控制试验。冬小麦灌溉制度设计如表 1 所示，相关管理措施详见王志军等^[19]。2016—2019 年期间 3 个冬小麦生育期的平均气温分别为 9.5、8.8、9.5 °C；平均日太阳辐射量分别为 14.6、13.8、13.6 MJ/(m²·d)；累积降水量分别为 89.7、183.6、158.1 mm。试验区地下水位埋深较浅，常年在 1.0~2.0 m 范围内波动，对农田蒸散量有一定的补充作用^[20]。从气象站获取的每日观测气象数据（太阳辐射、降水、最高气温、最低气温、风速）是模型的主要输入数据。

表 1 冬小麦灌溉制度设计

处理	冬小麦生育期			灌水总量
	返青期	拔节期	开花期	
T1	0	0	0	0
T2	0	40	0	40
T3	0	0	40	40
T4	0	40	40	80
T5	40	40	40	120

注 T1—T4 为田间水分控制试验处理，T5 为模型中增加的处理，返青期、拔节期、开花期各灌水 40 mm。

1.3 APEX 模型参数和输出结果选择

结合前人研究^[7,18]和本试验观测结果，在模型中选取了与冬小麦生长发育、水分利用过程密切相关的 35 个参数，主要包括作物参数、土壤参数以及模型其他参数（表 2）。APEX 模型的输出变量选择与作物生长和耗水密切相关的指标包括蒸散量、叶面积指数、地上部生物量和产量。

表 2 APEX 模型敏感性分析所选取的参数

参数	参数定义	下限值	上限值
作物参数			
WA	能量-生物量转换系数 (潜在光能利用率)/(kg·hm ⁻² ·MJ ⁻² ·m ⁻⁴)	36.2	45
TOP	植物生长最佳温度/°C	15.5	27.5
TBS	植物生长最低温度/°C	1	5.1
DMLA	最大潜在叶面积指数(m ² ·m ⁻²)	4	7.5
DLAI	叶面积生长达到最高点的生育时期	0.5	0.8
DLAP1	最佳叶面积生长 S 形曲线的参数 1	15.005	15.2
DLAP2	最佳叶面积生长 S 形曲线的参数 2	50.85	50.99
RLAD	叶面积指数衰减速率参数	0.2	2.11
RBMD	太阳辐射转化为生物质的衰减速率参数	0.2	2.11
RDMX	最大根深度/m	1.0	2.0
RWPC1	萌发期根系生物量占比	0.15	0.50
RWPC2	成熟期根系生物量占比	0.05	0.25
PPLP1	作物群体动态曲线上的第 1 点	125.25	125.75
PPLP2	作物群体动态曲线上的第 2 点	250.85	250.99
土壤参数			
PAW	田间持水量和萎蔫系数之差 (可获得水量)/(cm ³ ·cm ⁻³)	0.075	0.25
KSAT	土壤饱和导水率/(cm·h ⁻¹)	0.25	10
其他参数			
SCR2_1	不同土壤深度水分对土壤蒸发的影响参数	10.35	10.85
SCR2_2	(S 形曲线方程)	100.75	100.95
SCR10_1	水分胁迫对收获指数的影响	10.02	10.15
SCR10_2	(S 形曲线方程)	50.75	50.95
SCR17_1	基于土壤含水量的水分胁迫指数	20.05	20.15
SCR17_2	(S 形曲线方程)	50.8	50.99
SCR22_1	基于土壤水势的水分胁迫指数	100.005	100.015
SCR22_2	(S 形曲线方程)	1 000.85	1 000.97
PARM1	影响彭曼-蒙蒂斯公式中冠层阻力的因子	1	1.2
PARM2	土壤强度对根系生长的阻碍作用	1	2
PARM5	0.5 m 土层含水量最低限度 (基于萎蔫系数)/mm	0.2	1
PARM12	0.2 m 土层土壤蒸发速率/(g·cm ³ ·s ⁻¹)	1.5	2.5
PARM17	降低植物覆盖对土壤蒸发的影响	0.01	0.5
PARM38	水分胁迫计算的权重系数	0.55	0.85
PARM61	土壤水向上流动极限	0.50	0.95
PARM82	垂直渗透指数	1	6
PARM87	地下水位衰退减缓系数	0.001	0.95
PARM88	每日地下水位移动极限	0.001	0.95
PARM89	1 年中某 1 天的地下水位衰退指数	0.010	0.90

1.4 APEX 参数敏感性分析方法

本研究选取的全局敏感性分析方法为 Sobol 法^[14]、Morris 法^[13,21]，局部敏感性分析方法为 FAST 法^[11]。Sobol 法将模型视为单一参数及参数间相互组合的函数，通过分析得到一阶和全局敏感度，可同时反映参数的直接效应和交互效应，但计算量相对较大^[14]；Morris 法通过计算随机采样^[13,21]的模型参数灵敏程度分布的平均值 (μ) 和标准差 (σ) 确定参数的敏

感性^[13]，该方法对于分析参数众多且运算负荷较大的模型具有较好的适用性^[21-23]；FAST 法利用周期取样法和傅里叶变换将模型输出结果的总方差分解为不同参数的方差，参数的敏感性为各部分方差与总方差的比值，该方法只估测了影响模型参数的一阶敏感性，操作简单，计算效率高，但计算结果忽略了参数间相互作用的影响^[11]。3 种敏感性分析方法的特点见表 3。

表 3 3 种敏感性分析方法对比

Table 3 Comparison of three sensitivity analysis methods

方法	局部或全局性分析	敏感性评价标准	取样次数	优缺点
Sobol 法	全局性分析	$0.01 < S < 1$	9 216	能区分参数独立和相互作用的敏感性，稳定，精度高，但计算量较大。
Morris 法	全局性分析	μ 值越大参数越敏感 σ 值越大参数交互作用越强	6 912	计算量小，适用于敏感参数个数远小于全部参数的模型。
FAST 法	局部分析	$0.01 < S < 1$	7 500	操作简单，计算效率高，但忽略了参数间相互作用，模型适用性低。

1.5 APEX 模型参数敏感性分析的具体流程

本研究利用 Salib 软件^[24]中的 Sobol 法、Morris 法、FAST 法对不同水分条件下 APEX 模型参数敏感性进行分析。首先根据 APEX 模型参数取值范围(表 2)随机取样 6 000~10 000 次(表 3)；然后在当地地下水位(1.25 m)与低地下水位(5 m)条件下分别模拟不同灌水处理和不同降水年型下的蒸散量、叶面积指数、地上生物量和产量；最后分别从以下 3 个方面评价模型参数的敏感性：①利用多处理、多年输出结果的平均值分析 APEX 模型参数在该地区的整体敏感性；②利用不同灌水处理和不同年份的输出结果，评价不同水分条件对 APEX 模型参数敏感性的影响；③结合①、②对比分析 3 种参数敏感性分析方法的差异。在参数敏感性分析过程中，Sobol 法和 FAST 法按照参数敏感度排序，敏感度在 0.01~1 之间的参数为敏感性参数^[21]，Morris 法按照参数敏感程度分布的 μ 进行排序，对所有敏感参数 μ 累加求得平均值 $\mu_{average}$ ， $\mu > \mu_{average}$ 则说明该参数敏感^[13]。

2 结果与分析

2.1 APEX 模型参数敏感性整体评价

对于蒸散量的模拟(图 1)，Sobol 法中的敏感性参数有 RDMX(最大根深度)、TBS(植物生长最低温度)、DLAP1(最佳叶面积生长 S 形曲线的参数)、DMLA(最大潜在叶面积指数)、RWPC1(萌芽期根系生物量占比)。其中，RDMX 参数敏感性的直接效应和交互效应均高于其他参数，而 RWPC1 参数敏感性的交互效应明显高于其直接效应。Morris 法中的敏感性参数有 RDMX、RWPC1、TBS、DMLA、SCR2_1(不同土壤深度水分对土壤蒸发的影响参数)。其中，RDMX 和 RWPC1 参数敏感性的直接效应和交互效应较高，而 TBS 参数敏感性的直接效应显著低于

其交互效应。FAST 法中的敏感参数有 RDMX、TBS、RWPC1、DLAP1、DMLA。APEX 模型对农田蒸散量模拟最敏感的参数为 RDMX，其次是 RWPC1(Morris 法)和 TBS(Sobol 法和 FAST 法)。

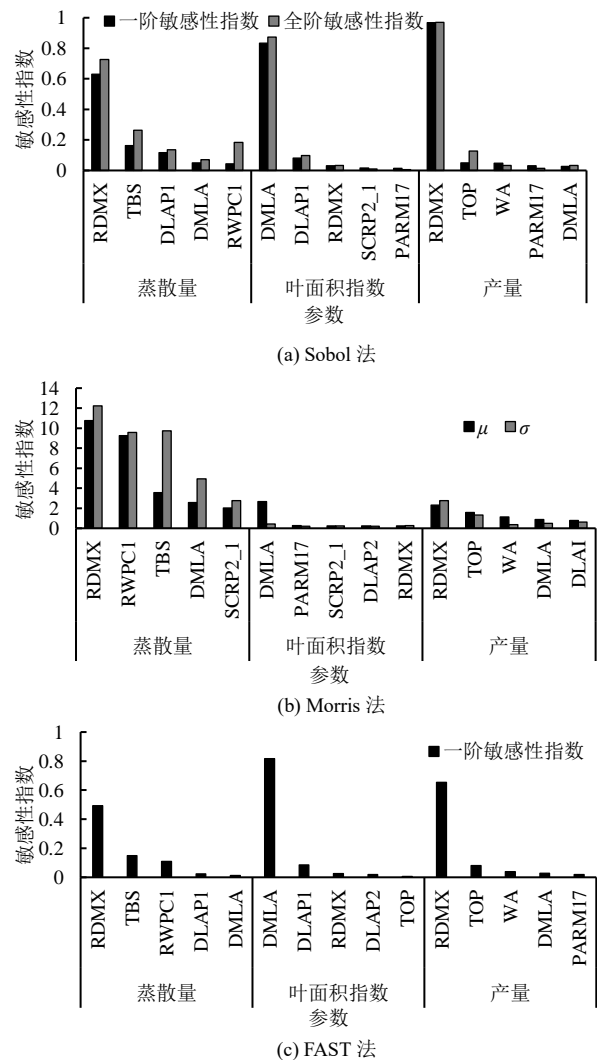


图 1 APEX 模型参数对蒸散量、叶面积指数和产量模拟的敏感性分析

Fig.1 The sensitivity analysis of the APEX parameters to evapotranspiration, leaf area index and yield

对于叶面积指数的模拟，Sobol 法中的敏感性参数有 DMLA、DLAP1、RDMX、SCR2_1、PARM17。其中，DMLA 参数敏感性的直接效应和交互效应均高于其他参数。Morris 法中的敏感性参数有 DMLA、PARM17、SCR2_1、DLAP2、RDMX，其中 DMLA 参数敏感性的直接效应高于交互效应，其他参数敏感性差异不显著。FAST 法中的敏感性参数有 DMLA、DLAP1、RDMX、DLAP2、TOP。APEX 模型对叶面积指数模拟的最敏感参数是 DMLA，其次是 DLAP1（Sobol 法和 FAST 法）和 PARM17（Morris 法），这些参数与叶片生长发育密切相关。

模拟生物量和产量时的敏感性参数一致。以产量模拟为例，Sobol 法中的敏感性参数有 RDMX、TOP、WA、PARM17、DMLA，其中 RDMX 参数敏感性的直接效应和交互效应均高于其他参数。Morris 法中的

敏感性参数有 RDMX、TOP、WA、DMLA、DLAI，其中 RDMX 参数敏感性的直接效应和交互效应高于其他参数，而 WA 和 DMLA 参数敏感性的直接效应高于其交互效应。FAST 法中的敏感性参数有 RDMX、TOP、WA、DMLA、PARM17。APEX 模型对产量和生物量模拟的敏感性参数为 RDMX、TOP 和 WA。

地下水位设置为 5 m 时的参数敏感性分析结果与地下水为 1.25 m 时的结果差异显著（表 4）。对于蒸散量的模拟，地下水位为 5 m 时的 3 种敏感性分析方法中的最敏感参数均为 RWPC1，而地下水位为 1.25 m 时，3 种敏感性分析方法均表明 RDMX 为最敏感参数。对于叶面积指数的模拟，2 个地下水位条件下的最敏感参数均为 DMLA。对于生物量和产量的模拟，地下水位为 5 m 时的最敏感参数为 PARM38，其次为 PAW，与 1.25 m 地下水位条件下的结果差异明显。

表 4 Sobol 法、Morris 法和 FAST 法分析 APEX 模型参数整体敏感性结果对比

Table 4 Comparisons of APEX parameter sensitivity analysis based on the three methods

输出变量	敏感性方法	筛选的敏感性参数	
		1.25 m 地下水位	5 m 地下水位
农田蒸散量	Sobol 法	RDMX、TBS、DLAP1、DMLA、RWPC1	RWPC1、RWPC2、DMLA、DLAP1、WA
	Morris 法	RDMX、RWPC1、TBS、DMLA、SCR2_1	RWPC1、RLAD、DMLA、PARM5、TBS
	FAST 法	RDMX、TBS、RWPC1、DLAP1、DMLA	RWPC1、TBS、RLAD、RWPC2、DLAI
叶面积指数	Sobol 法	DMLA、DLAP1、RDMX、SCR2_1、PARM17	DMLA、KSAT、DLAP1、SCR2_1、PARM38
	Morris 法	DMLA、PARM17、SCR2_1、DLAP2、RDMX	DMLA、KSAT、SCR2_1、PARM38、TBS
	FAST 法	DMLA、DLAP1、RDMX、DLAP2、TOP	DMLA、KSAT、DLAP1、SCR2_1、PARM38
产量或生物量	Sobol 法	RDMX、TOP、WA、PARM17、DMLA	PARM38、PAW、SCR2_1、DLAI、WA
	Morris 法	RDMX、TOP、WA、DMLA、DLAI	PARM38、PAW、WA、SCR2_1、DLAI
	FAST 法	RDMX、TOP、WA、DMLA、PARM17	PARM38、PAW、SCR2_1、WA、DLAI

2.2 灌溉制度和降水年型对 APEX 模型参数敏感性的影响

对于不同水分条件下的蒸散量进行模拟(图 2(a)、图 2(d)、图 2(g))，2016—2017 年和 2018—2019 年期间，3 种敏感性分析方法中的最敏感参数均为 RDMX，而在 2017—2018 年，低灌水量处理(T1 处理和 T2 处理)条件下的最敏感参数为 DLAP1 (Sobol 法)、RWPC1 和 RDMX (Morris 法和 FAST 法)，高灌水量处理(T4 处理和 T5 处理)条件下的最敏感参数为 TBS (Sobol 法和 FAST 法)和 RWPC1 (Morris 法)。随着灌水量的增加，RDMX、DLAP1 和 SCR2_1 敏感性指数呈降低趋势，而 TBS、RWPC1 和 PAW 敏感性指数呈升高趋势。

对于不同水分条件下的叶面积指数模拟(图 2(b)、图 2(e)、图 2(h))，3 种敏感性分析方法表明最敏感参数均为 DMLA，且不同降水年型差异较小，其他次敏感性参数受降水年型和灌水量的影响明显。随着灌水量的增加，RDMX、DLAP1、DLAP2、PARM17 和 SCR2_1 的敏感性指数呈降低趋势，而 DMLA 和 TOP 的敏感性指数呈升高趋势。

不同水分条件下生物量和产量的模型参数敏感

性评价结果一致。以产量为例(图 2(c)、图 2(f)、图 2(i))，3 种敏感性分析方法表明，低灌水量条件下(T1—T4 处理)的最敏感参数均为 RDMX，但在不同降水年型的敏感性存在一定差异。Sobol 法中，2018—2019 年的 RDMX 敏感性高于 2016—2017 年，而 Morris 法中 2017—2018 年的 RDMX 敏感性低于其他年份。在高灌水量条件下(T5 处理)，参数 TOP 的敏感性指数显著提高，为最敏感参数或次敏感参数。随着灌水量的增加，RDMX、PARM17 和 SCR2_1 的敏感性指数呈降低趋势，而 WA、TOP 和 TBS 的敏感性指数呈升高趋势。

当地下水位设置为 5 m 时，3 种方法均表明 RDMX 不再是敏感性参数(表 4)。对于蒸散量的模拟，在高灌水量条件下，最敏感参数分别为 RWPC1，且随着灌水量的增加，其敏感性指数呈升高趋势。对于叶面积指数模拟结果，最敏感参数为 DMLA，随着灌水量的增加，其敏感性指数呈升高趋势。对于产量和生物量的模拟，最敏感参数为 PARM38，其敏感性指数在 2018—2019 年高于 2016—2018 年，且随着灌水量的增加，敏感性指数呈降低趋势。在 1.25 m 地下水位条件下，3 种敏感性分析方法的最敏感参数

筛选结果一致，次敏感参数的筛选结果存在一定差异（表4）。

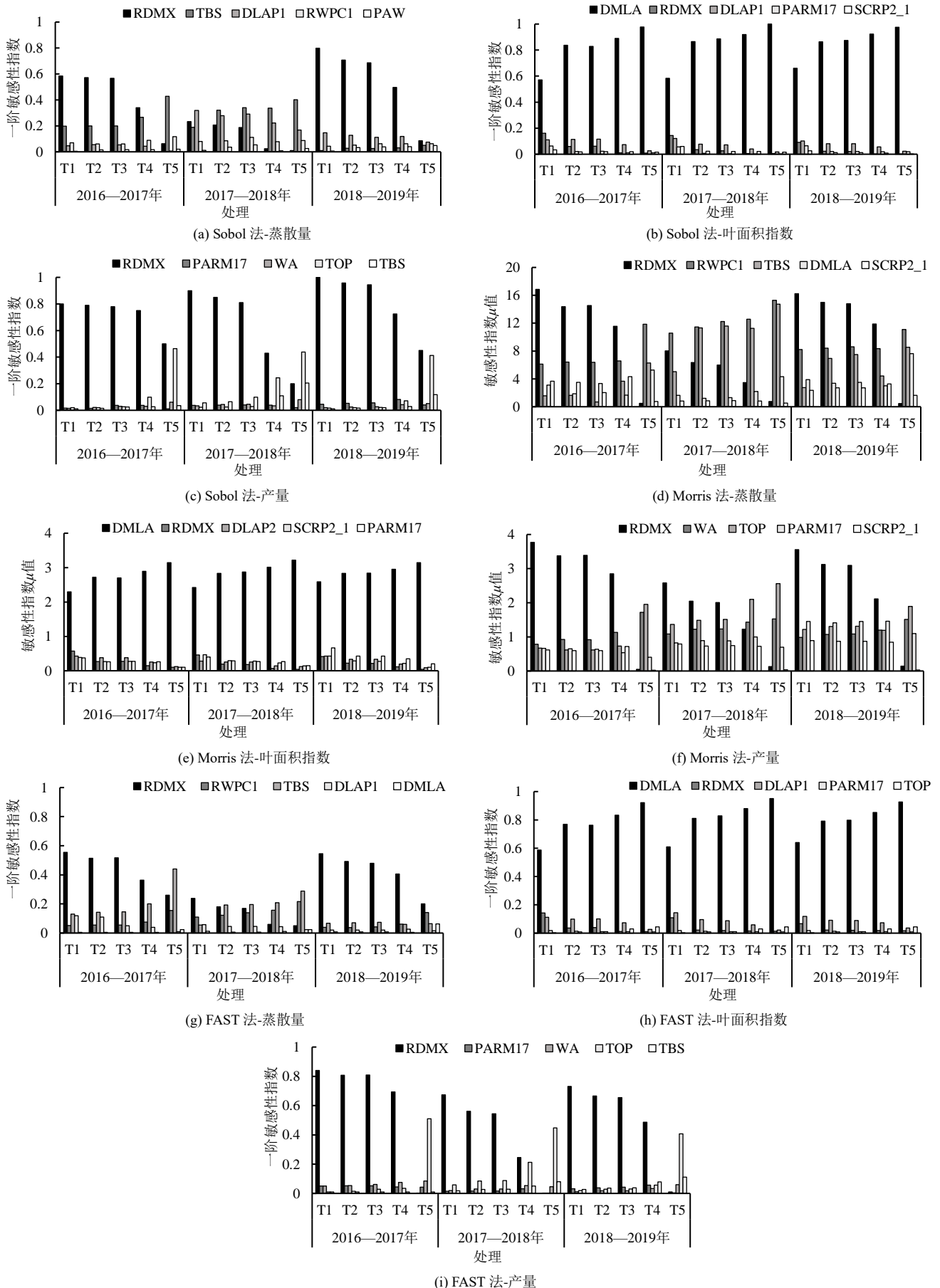


图2 不同水分条件下 APEX 模型参数对蒸散量、叶面积指数和产量模拟的敏感性分析

Fig.2 Sensitivity analysis of APEX model parameters to evapotranspiration, leaf area index and yield under different irrigation treatment and years (irrigation treatment and rainfall year)

2.3 APEX 模型输出结果的不确定性分析

基于3种敏感性分析方法计算的 APEX 模型的不确定性结果一致。以 Morris 法为例（表 5），对于冬小麦产量和生物量的模拟结果，实测值均分布于 5%~95% 的模拟置信区间内。随着灌水量的增加，冬小麦产量模拟结果的 5%~95% 置信区间呈升高趋势，说明模型可以较好地反映不同灌溉处理对冬小麦产量的影响。T1—T4 处理下的实测值均在模拟结果的

50%分位数数值以上，说明 APEX 模型可能高估了水分胁迫对冬小麦产量的影响，导致模拟产量偏低。蒸散量的模拟结果明显高于观测值（观测值均低于平均值，但在 5%~95% 的置信区间内），这一结果主要与蒸散量观测值（水量平衡法）没有考虑地下水的补充作用有关^[20]，随着灌水量的增加，模拟蒸散量的 5%~95% 置信区间呈升高趋势，说明模型可以较好地反映不同灌溉处理对冬小麦蒸散量的影响。

表 5 不同水分条件下 APEX 模型模拟冬小麦产量、生物量和蒸散量的不确定性分析

Table 5 Uncertainty analysis of APEX model simulated winter wheat yield, biomass and farmland evapotranspiration under different water conditions

输出结果	处理	观测值	模拟值					
			平均值	5%分位数	25%分位数	50%分位数	75%分位数	95%分位数
蒸散量/mm	T1	233	333	195	252	310	381	590
	T2	272	357	219	285	334	401	599
	T3	282	359	220	285	336	405	601
	T4	303	391	260	323	374	440	602
生物量/(kg·hm ⁻²)	T1	10 560	12 680	6 351	9 017	10 884	13 251	27 001
	T2	11 237	14 850	8 827	11 566	13 483	15 849	27 530
	T3	13 250	14 962	8 917	11 689	13 630	16 001	27 525
	T4	12 880	17 764	11 797	14 944	17 067	19 553	27 800
产量/(kg·hm ⁻²)	T1	5 460	5 160	2 813	3 580	4 238	5 433	11 038
	T2	6 363	6 020	3 676	4 527	5 260	6 493	11 243
	T3	6 697	6 067	3 717	4 570	5 320	6 553	11 248
	T4	6 837	7 215	4 846	5 873	6 727	7 983	11 430

3 讨论

在当地条件下（地下水位为 1.25 m，小麦季具有明显的地下水补充作用），RDMX 是影响农田蒸散和产量的最敏感参数，这一结果与以往研究^[7-8]存在一定差异。Wang 等^[8]认为 PAW 是最敏感参数，敏感性指数介于 0.49~0.52 之间。本研究中，PAW 敏感度较低（Sobol 法敏感性指数介于 0.01~0.23 之间），但当地下水位设置为 5 m 时，作物水分亏缺严重，PAW 参数敏感性指数显著提高，与 Wang 等^[8]研究结果一致，此时 RDMX 不再是敏感性参数，这主要是因为地下水位较低时，根区土壤水分很难由地下水补充，根系深度影响减弱，因此在地下水位变化较大的地区，应当考虑地下水位对模型相关参数（RDMX）敏感性的影响^[7]。RDMX 和 DMLA 的敏感性受水分条件影响显著，如不同降水年型、地下水位以及不同灌水量处理。相比灌水量，不同降水年型的参数敏感性差异更明显，说明不同降水年型对参数敏感性的影响更大，因此利用多年的试验数据进行模型参数校正能够更有效地降低模型参数的不确定性^[10]，这一结果是对以往不同水分处理下参

数敏感性分析研究^[13,17]的重要补充。

Sobol 法、Morris 法和 FAST 法模拟参数敏感性结果有较好的一致性，这与 CERES-Wheat^[21]、CERES-CROPGRO^[18]、CROPGRO-Tomato^[13]模型参数的敏感性分析结果一致，考虑到 Morris 法运行效率相对较高、适应性较强，可作为 APEX 模型参数敏感性分析的首选。本研究在特定的气候、土壤和田间管理条件下进行，筛选的参数仅适用于特定区域，在其他差异较大的生产条件下应用 APEX 模型，建议采用多种参数敏感性分析方法进行综合评价。

4 结论

- 1) 影响冬小麦蒸散量、生物量和产量的最敏感参数为 RDMX，影响叶面积指数的最敏感参数是 DMLA。
- 2) 在地下水位变化较大的地区，模型的参数优化和验证应该考虑不同地下水位的影响。
- 3) 随着灌水量和降水量的增加，RDMX 的敏感性指数降低，与作物生长相关的参数（TBS、DMLA、DLAI）敏感性指数升高。

（作者声明本文无实际或潜在的利益冲突）

参考文献:

- [1] 崔金涛, 丁继辉, YESILEKIN Nebi, 等. 基于 EFAST 的 CERES-Wheat 模型土壤参数敏感性分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 276-283.
- CUI Jintao, DING Jihui, YESILEKIN Nebi, et al. Sensitivity analysis of soil input parameters of CERES-Wheat model based on EFAST method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 276-283.
- [2] 兴安, 卓志清, 赵云泽, 等. 基于 EFAST 的不同生产水平下 WOFOST 模型参数敏感性分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 161-171.
- XING An, ZHUO Zhiqing, ZHAO Yunze, et al. Sensitivity analysis of WOFOST model crop parameters under different production levels based on EFAST method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 161-171.
- [3] WILLIAMS J R, JONES C A, KINIRY J R, et al. The EPIC crop growth model[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(2): 497-511.
- [4] 鄢定荣, 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]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2003, 27(5): 594-602.
- [5] 姚宁, 周元刚, 宋利兵, 等. 不同水分胁迫条件下 DSSAT-CERES-Wheat 模型的调参与验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 138-150.
- YAO Ning, ZHOU Yuangang, SONG Libing, et al. Parameter estimation and verification of DSSAT-CERES-Wheat model for simulation of growth and development of winter wheat under water stresses at different growth stages[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(12): 138-150.
- [6] 房全孝. 根系水质模型中土壤与作物参数优化及其不确定性评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 118-123.
- FANG Quanxiao. Optimizing and uncertainty evaluation of soil and crop parameters in root zone water quality model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(10): 118-123.
- [7] ZHANG Li, THOMAS E Juenger, JAVIER M Osorio, et al. Sensitivity analysis of the APEX model for assessing sustainability of switchgrass grown for biofuel production in central Texas[J]. BioEnergy. Research, 2018, 11(1): 69-85.
- [8] WANG Xiuying, HE Xiaoxia, WILLIMAS J R, et al. Sensitivity and uncertainty analyses of crop yields and soil organic carbon simulated with EPIC[J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(3): 1 041-1 054.
- [9] 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.
- [10] FANG Quanxiao, MA L, HARMEL R D, et al. Uncertainty of CERES-Maize calibration under different irrigation strategies using PEST optimization algorithm[J]. Agronomy, 2019, 9(5): 241.
- [11] SALTELLI A, TARANTOLA S, CAMPOLONGO F. Sensitivity analysis as an ingredient of modeling[J]. Statistical Science, 2000, 15(4): 377-395.
- [12] MORRIS M D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments[J]. Technometrics, 1991, 33(2): 161-174.
- [13] 李波, 李长信, 姚名泽, 等. 不同灌水处理下 CROPGRO-Tomato 模型全局敏感性和不确定性分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2020, 51(2): 153-161.
- LI Bo, LI Changxin, YAO Mingze, et al. Sensitivity and uncertainty analysis for CROPGRO-Tomato model at different irrigation levels[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2020, 51(2): 153-161.
- [14] BIM Sobol'. Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models [C]// Mathematical Modeling & Computational Experiment. 2010.
- [15] 杨靖民, 刘金华, 窦森, 等. 应用 DSSAT 模型对吉林省黑土玉米最佳栽培技术的模拟和校验研究 I. 模型品种参数校验和产量的敏感性分析[J]. 土壤学报, 2011, 48(2): 366-374.
- YANG Jingmin, LIU Jinhua, DOU Sen, et al. Evaluation and optimization of best management practices of maize for black soil in Jilin China using the DSSAT model I. Cultivar calibration and sensitivity analysis of maize yield parameters[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(2): 366-374.
- [16] 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.
- [17] 吴立峰, 张富仓, 范军亮, 等. 不同灌水水平下 CROPGRO 棉花模型敏感性和不确定性分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 55-64.
- WU Lifeng, ZHANG Fucang, FAN Junliang, et al. Sensitivity and uncertainty analysis for CROPGRO-cotton model at different irrigation levels[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(15): 55-64.
- [18] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(7): 136-142.
- [19] 王志军, 王碧胜, 孙筱璐, 等. 胶东半湿润区滴灌制度对冬小麦农田土壤水分、作物生长及水分利用的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(27): 6-15.
- WANG Zhijun, WANG Bisheng, SUN Xiaolu, et al. Effects of different drip irrigation schedules on soil moisture, wheat growth and water use at Jiaodong semi-humid region[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(27): 6-15.
- [20] 苑晶晶, 袁国富, 罗毅, 等. 利用 $\delta^{18}\text{O}$ 信息分析冬小麦对浅埋深地下水利用[J]. 自然资源学报, 2009, 24(2): 360-368.
- YUAN Jingjing, YUAN Guofu, LUO Yi, et al. Estimation of groundwater use of winter wheat using H_2^{18}O signatures: A preliminary study[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(2): 360-368.
- [21] 宋明丹, 冯浩, 李正鹏, 等. 基于 Morris 和 EFAST 的 CERES-Wheat 模型敏感性分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 124-131, 166.
- SONG Mingdan, FENG Hao, LI Zhengpeng, et al. Global sensitivity analyses of DSSAT-CERES-Wheat model using Morris and EFAST methods[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 124-131, 166.
- [22] 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.
- [23] SUN Xiaofeng, CROKE B, JAKEMAN A, et al. Benchmarking Active Subspace methods of global sensitivity analysis against variance-based Sobol' and Morris methods with established test functions[J]. Environmental Modelling & Software, 2022, 149: 105 310.
- [24] HERMAN J, USHER W. SALib: An open-source python library for sensitivity analysis[J]. The Journal of Open Source Software, 2017, 2(9): 97.

highest yield was 10.4 t/hm², achieved by applying 150 m³/hm² of biogas slurry combined with 50% of traditionally used fertilizer (topdressing 3 times). In both years, applying 150 m³/hm² of biogas slurry combined with 25% of traditionally used fertilizer but by topdressing twice only gave the lowest yield. Applying 300 m³/hm² of biogas combined with 50% and 75% of traditionally used reduced the rice yield and taste of the grains. ② Increasing topdressing from 2 to 3 times increased rice yield when the fertilization was the same. ③ Applying biogas slurry increased soil organic matter by 7.1% to 52.4%. Increasing biogas slurry and chemical fertilization also increased alkali hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, available potassium, phosphatase activity, and electrical conductivity (EC) of the soil, but had little effect on soil pH. Applying 150 m³/hm² of biogas slurry combined with 25% of traditionally used fertilizer reduced alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, and available potassium contents, compared to CK. Applying 300 m³/hm² of biogas slurry combined with 50% of traditionally used fertilizer increased EC, alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, and available potassium contents in the soil, compared to CK. ④ Applying 75% of traditionally used fertilizer increased soil phosphatase activities by 10.6% and 42.4%, depending on biogas slurry application, compared to CK. **【Conclusion】** Combing biogas slurry application and chemical fertilization can improve rice yield, soil nutrient contents, and enzyme activity only when applied at right rates. From our two-year experiment, applying 150 m³/hm² of biogas slurry combined with 50%~75% of traditionally used fertilizers by topdressings the fertilizers 3 times is optimal for improving crop yield and soil quality.

Key words: rice; biogas slurry; chemical fertilizer; yield; soil nutrient

责任编辑: 白芳芳

(上接第 40 页)

Sensitivity and Uncertainty Analysis of the APEX Model to Water Status

HOU Jinjin, SUN Xiaolu*, WANG Bisheng, YANG Xiaohui, XU Mengjie, FANG Quanxiao*

(Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

Abstract: **【Background and Objective】** The APEX model is a comprehensive watershed-scale model for simulating the effects of management practices on agricultural systems and their impacts on water quality, soil erosion, and nutrient cycling. This paper analyzes the sensitivity of its parameters to water status in soil. **【Method】** The analysis is based on data measured from 2016 to 2019 from an irrigation experiment conducted in Jiaodong in Shandong province. Winter wheat was used as the model plant; the Sobol, Morris, and FAST methods were used to analyze the sensitivities of the APEX model parameters associated with crop growth and water stress. We considered the influences of groundwater depth, rainfall and irrigation. **【Result】** When groundwater depth was 1.25 m, the maximum root depth (RDMX) was the most sensitive parameter affecting evapotranspiration, biomass, and yield, while the maximum potential leaf area index (DMLA) was the most sensitive parameter impacting leaf area index (LAI). When the groundwater depth was increased to 5 m, the sensitive parameters influencing crop evapotranspiration and yield differed, with PARM38 (weight coefficient of water stress calculation) and RWPC1 (proportion of root biomass during germination) becoming the most sensitive parameters. Results calculated from all three methods indicated that as irrigation water increased, the sensitivity of RDMX decreased, while the sensitivities of DMLA, DLAI (peak point in growth season), and WA (potential light energy utilization) increased. The sensitivity of RDMX was significantly higher in dry years than in humid years, as opposed to the sensitivity of DMLA. Uncertainty analysis demonstrated that wheat biomass, yield, and evapotranspiration fell within the 5% to 95% confidence interval of the simulated data. **【Conclusion】** The most sensitive parameters identified by the Sobol, Morris, and FAST methods were consistent, although their sensitivity indexes varied with irrigation treatments, rainfall patterns, and groundwater depth. Considering computational efficiency and accuracy, the Morris method is more suitable for parameter sensitivity analysis of the APEX model. These findings provide valuable insights into the application of the APEX to analyze the impact of environmental conditions on crops.

Key words: APEX model; sensitivity analysis; water stress; Sobol; Morris; FAST; uncertainty analysis

责任编辑: 韩洋