HSPF 在热带沿海流域水文模拟中的应用

桂晗亮[1]，张春萍[1,2]，武治国[2]，张家铨[2]
(1.武汉工程大学 光电信息与能源工程学院，湖北 武汉 430000；2.武汉新烽光电股份有限公司，湖北 武汉 430000)

摘　要：[目的] 探究 HSPF 模型在热带沿海流域的适用性和不确定性，为该模型在不同流域和地区的应用提供科学参考。[方法] 以位于热带沿海地区的三亚河流域为例，建立 HSPF 模型，选取 2017—2019 年径流量对模型进行率定和验证；通过 Morris 筛选法分析了水文过程中 8 个参数的敏感度，并与国内外研究不同流域的参数敏感度相对大小进行对比；同时利用 MC-LHS 方法对不同降雨量下模型的不确定性进行分析。[结果] HSPF 模型能够很好地模拟研究区域实际的水文过程，率定期和验证期的 NSE 分别为 0.93 和 0.98，相对误差(R_e)分别为 0.87%和 0.21%；地下水日消退系数为最敏感参数，而下层土壤蒸发系数和地下水出流中进入深层的比例对径流模拟的影响几乎可以忽略。[结论] 参数敏感度相对大小体现空间差异性。模型模拟的不确定性与降雨量之间的相关性明显。降雨量越大，模型模拟的不确定性和置信区间就越大，模型就越不稳定。

关键词：HSPF；流域水文模型；Morris 筛选法；不确定性分析
文献标识码：B　　**文章编号**：1000-288X(2020)06-0115-06　　**中图分类号**：X321

文献参数：桂晗亮，张春萍，武治国，等. HSPF 在热带沿海流域水文模拟中的应用[J]. 水土保持通报，2020，40(6)：115-120. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2020.06.017；Gui Hanliang，Zhang Chunping，Wu Zhiguo，et al. Aplication of HSPF in hydrological simulation in tropical coastal watershed [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2020，40(6)：115-120.

Aplication of HSPF in Hydrological Simulation in Tropical Coastal Watershed

Gui Hanliang[1]，Zhang Chunping[1,2]，Wu Zhiguo[2]，Zhang Jiaquan[2]
(1. *School of Optical Information and Energy Engineering，Wuhan Institute of Technology，Wuhan，Hubei* 430000，*China*；2. *Wuhan Newfiber Optics Electron Co.，Ltd，Wuhan，Hubei* 430000，*China*)

Abstract：[Objective] The applicability and uncertainty of HSPF model in tropical coastal basins was explored in order to provide scientific reference for the application of HSPF model in different basins and regions. [Methods] Taking the Sanya river basin located in the tropical coastal region as a study area，a HSPF model was established，and the flow from 2017 to 2019 was selected to calibrate and verify the model. The sensitivity of 8 parameters in the hydrological process was analyzed by Morris screening method，and compared with the relative sensitivity of parameters in different watersheds studied at home and abroad. Meanwhile，the uncertainty of the model under different rainfall conditions were analyzed by MC-LHS method. [Results] The HSPF model could simulate the actual hydrological process in the study area very well. The NSE of the periodic and validation period was 0.93 and 0.98 respectively，and the R_e was 0.87% and 0.21%，respectively. Among which，base groundwater recession was the most sensitive parameter，while the influence of lower zone evapotranspiration parameter and proportion of groundwater flow into deep was almost negligible. [Conclusion] The relative sensitivity of the parameters reflected the spatial differences. The uncertainty of model simulation is significantly correlated with rainfall，the greater the rainfall is，the greater the uncertainty and confidence interval of the model simulation are，and the more unstable the model is.

Keywords：**HSPF；watershed hydrological model；Morris screening method；uncertainty analysis**

收稿日期：2020-05-12　　**修回日期**：2020-07-23
资助项目：武汉市科技局科技创新项目“基于实时在线监测技术的武汉海绵城市建设道路面源污染分析研究”(2018010402011221)；海绵城市建设水系统科学湖北省重点实验室开放基金项目“流域非点源污染对河川水质影响”(2019-05)
第一作者：桂晗亮(1997—)，男(汉族)，安徽省安庆市人，硕士研究生，研究方向为城市面源污染模拟与估算。Email：1358224614@qq.com。
通讯作者：张春萍(1978—)，女(汉族)，湖北省武汉市人，博士，副教授，主要从事城市水环境质量评价和管理方面的研究。Email：zhangchunping@chinhangroup.com。

近些年来,随着城市工业化进程的加快,环境受到人类活动影响的程度不断加剧,其中水环境问题日渐严重,人类在享受工业化所带来的效益同时,不得不开始重视水环境问题。流域水文模型具有成本低、便于情景分析等优点,现被广泛用于水文分析计算、生态保护等方面[1]。而流域水文模型可按对流域水文过程描述的离散程度分为:集总式、分布式和半分布式[2-3]。由于流域模拟问题的复杂性等原因,使得半分布式模型在实践的过程中具有更广阔的应用前景和更大的推广价值。而 HSPF(hydrological simulation program-Fortran)模型作为半分布式模型的经典代表,国外对于 HSPF 模型的应用已经非常广泛,研究者[4,9,13,23-24]利用 HSPF 模型对降雨径流为主的水文过程、气候变化以及土地利用变化对水文过程的影响开展了很多研究。Ourania Tzoraki 等[5]利用 HSPF 模型模拟喀斯特流域的水文过程。Diaz-Ramirez 等[6]的研究则表明,HSPF 能够适用于热带岛屿河流流域水文模拟。Luo C. 等[24]通过 HSPF 模型模拟土地利用的变化对 Xitiaoxi 流域水文水质的影响。然而 HSPF 模型在国内的关注和应用却很少,近年来才陆续有研究将该模型应用于丘陵地区太湖流域[7]、半干旱地区妫水河流域等[8],但鲜有研究证实该模型在热带沿海流域的适用性。此外,也有学者对于 HSPF 模型的不确定性问题进行了深入研究,Igor Iskra 等[9]利用蒙特卡洛—拉丁超立方(MC-LHS)、响应面和矩估计 3 种方法对 HSPF 进行了不确定性分析。程晓光等[8]利用 GLUE-MC 方法证实了 HSPF 模型不确定性与径流量有关。而庞树江等[10]利用 CLUE 分析 HSPF 模型的不确定性,并提出不确定性大小存在季节差异性。但是,对于降雨量影响模型不确定性的研究却很少见。

因此,为进一步探究 HSPF 模型在不同地区的适用性和不确定性的影响因素。本研究通过建立热带沿海地区三亚河流域的 HSPF 水文模型,选取 2017—2019 年 3 a 的径流量进行模拟,探究 HSPF 模型的敏感度以及不同降雨量条件下模型的不确定性,以期为 HSPF 模型在不同流域和地区的应用提供参考和依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域概述

三亚河位于三亚市南部,由六罗水、水蛟溪、半岭水三条河组成,以六罗水为主流。三亚河由北向南穿城而过,经由三亚港入海。地理位置位为 109°28′—109°31′E,18°14′—18°22′N,总流程 28.8 km,流域面积 337 km^2。气候为热带海洋性季风气候,年平均温度为 25.7 ℃,年平均降雨量为 1 347.5 mm,且降雨主要集中在 7—11 月。土地利用类型包括林地、农业用地、城市用地和草地。

1.2 模型架构

建立水文模型输入的数据包括时间序列 WDM 数据(气象、水文数据)和 GIS 数据(地形 DEM、土地利用数据)(详见表 1)。利用 BASINS 模型所嵌套的 WDMUtil 软件将气象和水文数据整合成时间序列 WDM 文件,同时通过 BASINS 和 GIS 软件分别进行流域的划分(泰森多边形法)和边界的提取,将三亚河流域划分为 28 个子流域,HSPF 建模需要的地理数据,由 BASINS 向 WinHSPF 转化,进而生成 WinHSPF的 UCI 运行文件,并利用 PEST 软件对模型参数进行寻优。

表 1 三亚河流域建模数据内容

数据类别	数据种类	数据内容	数据来源
WDM 数据	气象数据	降雨、蒸发、温度、风速、日辐射量、势能蒸发量、露点温度、	三亚国家气象站、白鹭公园监测站
	水文数据	云覆盖量日径流量、河道资料	武汉新烽光电有限公司
GIS 数据	地形 DEM 数据	高程、坡度、坡向	中科院资源环境科学数据共享中心
	土地利用类型	林地、农业用地、建筑用地、草地	

模型的率定和验证是水文预报模型中必不可少的部分。研究采用纳什系数(NSE)和相对误差(R_e)对模型拟合程度进行评价,NSE 越接近 1,R_e 越接近 0,说明模型拟合的程度就越好。

$$NSE=1-\frac{\sum_{t=1}^{n}(Q_{obs,t}-Q_{sim,t})^2}{\sum_{t=1}^{n}(Q_{obs,t}-\overline{Q}_{obs,t})^2} \quad (1)$$

$$R_e=\left|\frac{Q_{sim,t}-Q_{obs,t}}{Q_{obs,t}}\right|\times 100\% \quad (2)$$

式中:NSE 为纳什系数;R_e 为相对误差;$Q_{obs,t}$,$Q_{sim,t}$ 分别为 t 时刻的观测值和模拟值;$\overline{Q}_{obs,t}$ 为 t 时刻的观测值的平均值。

1.3 参数敏感度分析

参数敏感度分析是研究参数变化所引起的模型响应,是模型不确定性分析的重要内容[11],也是进行

不确定性分析的前提工作之一。而 HSPF 模型水文模块的参数众多,且大部分参数具有物理背景,因此为提高不确定性研究的效率,需要先通过参数的敏感度分析,筛选出水文模块中对模拟有影响的参数。基于扰动分析法的 Morris 筛选法是目前应用较广的一种敏感度分析方法[12]。本研究采用修正的 Morris 筛选法,自变量以固定步长变化(±20%,±15%,±10%,±5%),运用公式(3)计算出 Morris 系数的平均值用以评价参数的敏感度大小。

$$S=\sum_{i=1}^{n-1}\frac{(Y_{i+1}-Y_i)/Y_0}{(P_{i+1}-P_i)/100}/(n-1) \tag{3}$$

式中:S 为参数相对敏感度($0\leqslant|S|<0.05$,不敏感;$0.05\leqslant|S|<0.2$,一般敏感;$0.2\leqslant|S|<1$,敏感;$|S|\geqslant1$,极敏感);Y_i,Y_{i+1}为模型第 i,$i+1$ 次运行输出值;Y_0 为参数率定后计算结果初始值;P_i,P_{i+1}为第 i,$i+1$ 次模型运算参数值相对于率定后参数值的变化百分率;n 为模型运行次数。

HSPF 模型包括 3 个主要模块:PERLND(透水区),IMPLND(不透水区)和 RCHRES(河道),其中 IMPLND 模块仅分析地表径流,而 PERLND 模块主要分析地表径流、壤中流和地下水水文过程。模型自上而下分为树冠层、植被层、各土壤层(包括表层土壤、上土壤层、下土壤层、地下水涵养层),降雨在 6 个垂直的存储层进行分配,最终进入河道[7]。研究主要通过 HSPF 的水文模块模拟三亚河流域的径流量,结合相关研究[11,13-15],选取对 HSPF 水文模块有影响的 8 个参数及其取值范围(表 2),利用修正的 Morris 筛选法,计算各参数在该流域的相对敏感度。

表 2　对 HSPF 水文模块有影响的参数敏感度分析

模型参数	参数含义	单位	参数范围	S 值	敏感等级
UZSN	额定上土壤层蓄积	inch	0.1～1	−0.01	不敏感
INTFW	壤中流出流系数	NA	1～3	−0.04	不敏感
IRC	壤中流消退系数	d^{-1}	0.5～0.7	0.01	不敏感
LZETP	下层土壤蒸发系数	NA	0～2	0	不敏感
LZSN	额定下土壤层蓄积	inch	2～15	−0.05	一般敏感
DEEPFR	地下水出流中进入深层地下水的比例	NA	0～0.5	0	不敏感
AGWRC	地下水日消退系数	NA	0.92～0.99	−0.69	敏感
INFILT	土壤渗透率	inch/h	0.01～0.25	−0.04	不敏感

1.4　MC-LHS 分析方法

MC-LHS 方法是将蒙特卡洛(Monte-Carlo,MC)模拟和拉丁超立方抽样(Latin hypercube sampling,LHS)结合的一种不确定性分析方法。蒙特卡洛方法则是一种以概率统计理论为基础的数值分析方法,常用于解决确定性和不确定性问题[3]。蒙特卡洛模拟的主要步骤分为:①对输入参数范围内随机抽样;②将随机抽样结果代入模型运行;③对运行结果进行统计分析。但是,蒙特卡洛模拟中的随机抽样往往不能保证参数的抽样点服从均匀分布,且需要非常庞大的样本量,而基于分层随机抽样的拉丁超立方抽样能够使样本的覆盖率更好,同时能减少抽样次数[16]。因此将拉丁超立方抽样与蒙特卡洛结合起来的 MC-LHS 方法用于模型不确定性分析的效率更高。本研究以纳什系数为目标函数,选取敏感度分析结果中的参数,采用拉丁超立方抽样取得 500 个样本,代入 HSPF 模型中运行并计算纳什系数,通过公式(4)—(5)对目标值纳什系数进行区间估计和变异系数计算。

$$P\{|X-E(X)|\geqslant\varepsilon\}\leqslant\frac{D(X)}{\varepsilon^2} \tag{4}$$

$$C_v=\frac{\mathrm{SD}}{\mathrm{MN}} \tag{5}$$

式中:X 为目标值;$E(X)$,$D(X)$分别为随机变量 X 的数学期望和方差;ε 为任意给定的正数;C_v 为变异系数;SD,MN 分别表示随机变量 X 的标准偏差和均值。

2　结果与分析

2.1　模型率定与验证

研究选用三亚河流域 2017—2019 年日径流量为模拟对象,其中 2017 年 1 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日为率定期,2019 年 1 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日为验证期,选用纳什系数和相对误差来评价模型拟合程度,结果详见表 3。结合图 1 的模型拟合过程线,率定期和验证期的纳什系数分别为 0.93 和 0.98,相对误差分别为 0.87%和 0.21%,就水文模型模拟而言,一般认为纳什系数大于 0.90 和相对误差小于 10%就表明模型模拟的效果很好[17]。从率定期和验证期模

型拟合的结果来看，建立的 HSPF 模型对于日时间步长的径流量拟合程度很好。为进一步验证模型的适用性，将模型用于月时间步长的径流量的模拟，如表 3 和图 1 所示。结果说明 HSPF 模型适用于不同时间步长沿海热带流域的模拟，能够较为真实地反映实际水文过程。

表 3 HSPF 模型率定和验证的模拟结果

时间步长	过 程	时 段	相对误差/%	NSE
日时间步长	率定期	201701—201812	0.87	0.930 2
	验证期	201901—201912	0.21	0.980 5
月时间步长	率定期	201701—201812	0.73	0.906 3
	验证期	201901—201912	0.29	0.939 7

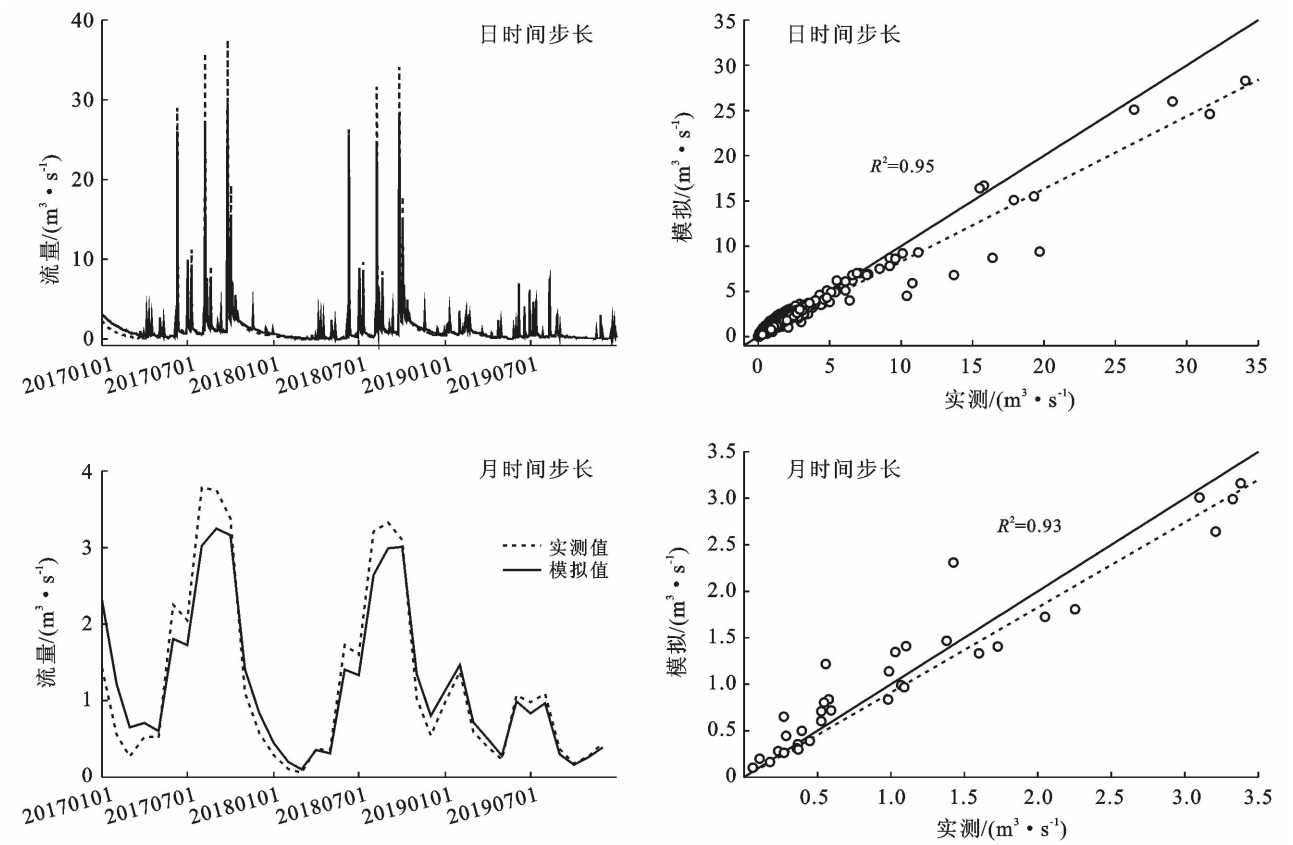


图 1 不同时间步长降雨径流过程线及散点图

2.2 参数敏感度分析结果

以模型拟合程度指标 NSE 为目标值，利用修正的 Morris 筛选法计算参数敏感度（表 2）。分析表 2 可知，参数敏感度依次为：AGWRC，LZSN，INFILT，INTWF，UZSN，IRC，LZETP 和 DEEPFR，其中相对敏感度较大的参数为 AGWRC，LZSN，INFILT 和 INTWF，AGWRC 的相对敏感度为－0.69（敏感），LZSN 的相对敏感度为－0.05（一般敏感），INFILT 和 INTWF 的相对敏感度为－0.04，余下参数的相对敏感度较低。

AGWRC 是地下水消退系数，控制地下水的退水过程进而影响产流量；LZSN 是下土壤层的额定蓄积，主要影响河道入流量[18]。HSPF 降雨汇流过程主要是由地表径流、壤中流和基流组成，热带流域独特的气候条件有可能影响土壤含水量、下渗率等特性，使得地表径流和壤中流在降雨汇流过程中的作用减弱，此时水文过程主要受基流影响。

HSPF 模型的水文循环包括植被截留、地表径流、土壤水分配、地下水运动、蒸散发等部分。通过与国内外对 HSPF 模型水文模块参数敏感度分析的研究结论进行对比（表 4），发现 HSPF 模型参数敏感度的相对大小具有空间差异性，不同流域的敏感参数和相对敏感度大小并不完全相同，本研究中较为敏感的参数依次为 AGWRC，LZSN，INFILT 和 INTWF，而其他研究[7,11]中敏感的参数更多。结合模型的水文机理分析，模型在不同流域的模拟中存在差异性[19]，可能与各流域不同的地形地貌、土地利用等条件有很大关系。例如，将本研究与半干旱半湿润的妫水河流域[8]进行对比，发现在参数的相对敏感度大小上就存在着很大的差异性，妫水河流域地处北温带，属于大

陆性季风气候,地形多以丘陵为主,本研究中的热带沿海流域属于热带海洋季风性气候,多以城镇、山地为主,在地形地貌、气候、城镇化比例等方面明显的差异,能够影响地表径流和土壤层中的再分配过程。此外也有研究指出流域特征和气候特征等相似的流域之间,敏感性参数类似[20]。

表 4　国内外 HSPF 参数敏感度分析对比

序号	太湖流域[11]	妫水河流域[8]	青山水库流域[2]	South Nation River[9]	热带沿海流域(本研究)
1	AGWRC	LZSN	INTFW	INFILT	AGWRC
2	UZSN	AGWRC	LZSN	AGWETP	LZSN
3	INFILT	BASETP	AGWRC	CEPSC	INFILT
4	INTFW	IRC	BASETP	IRC	INTFW
5	IRC	DEEPFR	IRC	LZETP	UZSN
6	DEEPFR	INFILT	UZSN	DEEPFR	IRC
7	LZSN	UZSN	LZETP	UZSN	LZETP
8	BASETP	INTFW	INFILT	BASETP	DEEPFR
9	LZETP			LZSN	

注:①各参数名称详见表 2;②参数敏感度按序号由高到低排列。

2.3　不同降雨量对模型不确定性的影响

选取敏感参数进行拉丁超立方抽样并代入 HSPF 模型中运行,依据日降雨量划分成小雨(0～10 mm)、中雨(10～25 mm)、大雨(25～50 mm)和暴雨(50 mm 以上)4 种降雨类型,以模型拟合程度评价指标纳什系数为目标函数用于不确定分析,分别计算离散系数和置信水平为 80%,90%下模型区间(表 5)。由表 5 可知,4 种类型降雨的 C_v 值分别为大雨(−11.268)、暴雨(−4.074)、中雨(0.104)、小雨(0.102),说明 HSPF 模型对于不同降雨量模拟的不确定性存在差异,降雨量小的时段(≤25 mm)模型的拟合程度相比较降雨量大的时段(>25 mm)模型的拟合程度更好,且降雨量越大,不确定性越大,模型就越不稳定。分别对比置信水平为 80%和 90%下目标值的变化区间,模型区间也与降雨量有关,降雨量较小时(≤25 mm)不同置信水平下的变化区间远小于降雨量大时(>25 mm)。

表 5　不同降雨类型 HSPF 不确定性计算结果

雨 型	不同置信水平下的目标值		离散系数/C_v
	90%	80%	
小雨(0～10 mm)	0.836 3～0.856 7	0.838 6～0.854 4	0.102
中雨(10～25 mm)	0.856 3～0.877 4	0.858 6～0.875 1	0.104
大雨(25～50 mm)	−0.363 6～0.049 9	−0.317 7～0.004 0	−11.268
暴雨(50 mm 以上)	−0.618 5～−0.219 0	−0.574 1～−0.263 4	−4.074

降雨量不同时,模型不确定性大小和区间有很大差异(图 2)。图 2 表明 HSPF 模型的不确定性大小和降雨量有关。之所以出现这种情况,与 HSPF 模型的产流机制有关,模型中将透水地段水量平衡过程概化成净雨到达地表形成地表径流,产生入渗并实现各土壤层中的再分配,不透水地段水文过程为净雨产生地表径流的过程;降雨经地表植被和洼地截留后产生地表径流、壤中流和基流,落地雨在土壤中的再分配过程与雨强等因素密切相关。当雨量较小时,降雨大部分直接经过地表植被等截留后直接形成了地表径流,而少部分或没有净雨进入土壤中再分配,这时模型产流主要是地表径流,但是雨量较大时,模型的产流包括地表径流、壤中流和基流。因此,降雨量可用于解释其他研究[10]提出的 HSPF 模型不确定性的季节差异,同样在其他水文预报模型的研究中也证实了降雨量是影响水文模型不确定性的因素之一[21-22]。

3　结 论

(1) 通过 HSPF 模型对三亚河流域的日流量进行模拟,分别以 2017 和 2018 年的日径流量为率定期,2019 年为验证期,率定期和验证期的纳什系数为 0.93 和 0.98,相对误差为 0.87%和 0.21%。结果表明所建立的 HSPF 模型能够很好的模拟三亚河流域实际的水文过程。此外,进一步验证了 HSPF 模型

对月时间步长的模拟，证实了在沿海热带流域的适用性。

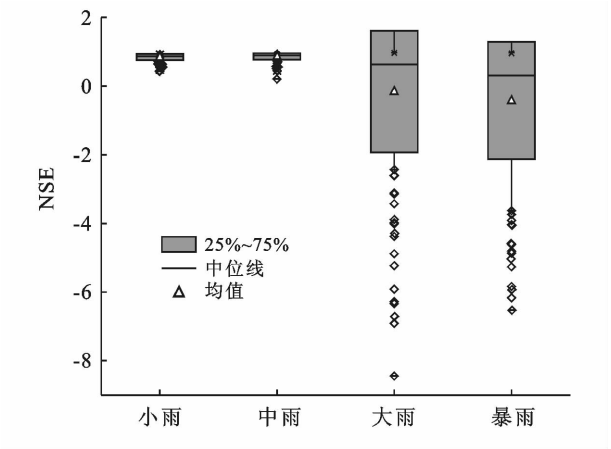


图 2 不同程度降雨目标值箱线图

(2) 在 HSPF 模型完成率定的基础上，利用 Morris 筛选法对模型水文模块参数进行敏感度分析，三亚河流域对径流过程影响的敏感参数依次为：AGWRC，LZSN，INFILT，INTWF，UZSN，IRC，LZETP，DEEPFR，其中 AGWRC 最敏感，而 LZETP 和 DEEPFR 对该流域径流模拟几乎无影响；同时与国内外研究中的结论进行对比，发现参数敏感度在不同流域不同。

(3) 利用 MC-LHS 方法进行不确定分析，发现模型模拟的不确定性与降雨量之间相关性明显。降雨量越大，模型模拟的置信区间和变异系数 C_v 越大，模型的不确定性就越大，说明模型就越不稳定。同时证实了降雨量是影响 HSPF 模型不确定性的因素之一，进一步解释降雨量的变化是造成 HSPF 模型不确定存在季节差异性的原因之一。

[参 考 文 献]

[1] 罗定贵，张巍，郑一，等. 基于 WARMF 模型的杭埠—丰乐河流域泥沙模拟的初步研究[J]. 北京大学学报(自然科学版)，2008，44(2)：224-232.

[2] 张丽红. HSPF 模型径流参数优化及不确定性研究[D]. 浙江 杭州：浙江大学，2016.

[3] 宋文博. 伊通河流域非点源污染模拟及不确定分析[D]. 吉林 长春：吉林大学，2016.

[4] 李兆富，刘红玉，李燕. HSPF 水文水质模型应用研究综述[J]. 环境科学，2012，33(7)：2217-2223.

[5] Ourania Tzoraki, Nikolaos P. Nikolaidis. A generalized framework for modeling the hydrologic and biogeochemical response of a Mediterranean temporary river basin [J]. 2007, 346(3):112-121.

[6] Diaz-Ramirez J N, Perez-Alegria L R, McAnally W H. Hydrology and sediment modeling using BASINS/HSPF in a tropical island watershed [J]. Transactions of the Asabe, 2008,51(5):1555-1565.

[7] 李燕，李兆富，席庆. HSPF 径流模拟参数敏感性分析与模型适用性研究[J]. 环境科学，2013，34(6)：2139-2145.

[8] 程晓光，张静，宫辉力. 半干旱半湿润地区 HSPF 模型水文模拟及参数不确定性研究[J]. 环境科学学报，2014，34(12)：3179-3187.

[9] Iskra I, Droste R. Parameter Uncertainty of a Watershed Model [J]. Canadian Water Resources Journal, 2008,33(1):5-22.

[10] 庞树江，王晓燕，马文静. 多时间尺度 HSPF 模型参数不确定性研究[J]. 环境科学，2018，39(5)：2030-2038.

[11] 罗川，李兆富，席庆，等. HSPF 模型水文水质参数敏感性分析[J]. 农业环境科学学报，2014，33(10)：1995-2002.

[12] Francos A. Sensitivity analysis of distributed environmental simulation models: Understanding the model behavior in hydrological studies at the catchment scale [J]. Reliability Engineering and System Safty, 2003, 79(2):205-218.

[13] Chen Ying, Xu Chongyu, Chen Xingwei, et al. Uncertainty in simulation of land-use change impacts on catchment runoff with multi-time scales based on the comparison of the HSPF and SWAT models [J]. Journal of Hydrology, 2019,573:486-500.

[14] 刘仙. 基于 BASINS/HSPF 模型的岩溶槽谷区地下水模拟研究：以重庆青木关地下河系统为例[D]. 重庆：西南大学，2009.

[15] 邢可霞，郭怀成，孙延枫，等. 基于 HSPF 模型得滇池流域非点源污染模拟[J]. 中国环境科学，2004，24(2)：229-232.

[16] Camp M V, Walraevens K. Pumping test interpretation by combination of Latin hypercube parameter sampling and analytical models [J]. Computers & Geosciences, 2008,35(10):2065-2073.

[17] Donigian A S. Watershed model calibration and validation: The HSPF experience [J]. Proceedings of the Water Environment Federation, 2002,8:44-73.

[18] 董延军，李杰，郑江丽，等. 流域水文水质模拟软件(HSPF)应用指南[M]. 河南 郑州：黄河水利出版社，2009.

[19] Liew M W V, Arnold J G, Garbrecht J D. Hydrologic simulation on agricultural watersheds: Choosing between two models [J]. Transactions of the Asabe, 2003, 46(6):1539-1551.

[20] Diaz-Ramirez J N, Mcanally W H, Martin J L. Sensitivity of simulating hydrologic processes to gauge and radar rainfall data in subtropical coastal catchments [J]. Water Resources Management, 2012, 26(12): 3515-3538.

(下转第 129 页)

[12] Yan Changrong, Liu Enke, Shu Fan, et al. Review of agricultural plastic mulching and its residual pollution and prevention measures in China [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2014, 31(2): 95-102.

[13] Zhang Dan, Liu Hongbin, Hu Wanli, et al. The status and distribution characteristics of residual mulching film in Xinjiang, China [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016,15(11):2639-2646.

[14] 康虎,敖李龙,秦丽珍,等.生物质可降解地膜的田间降解过程及其对玉米生长的影响[J].中国农业通报,2013,29(6):54-58.

[15] 胡琼恩,李婷,马丕明,等.生物可降解地膜的研究进展[J].塑料包装,2017,27(3):34-41.

[16] 殷海善,姚建民.渗水地膜覆盖玉米试验研究综述[J].水土保持研究,2000,7(4):47-49.

[17] 夏雪岩,宋世佳,刘猛,等.夏播旱地谷子渗水地膜穴播增产机理研究[J].中国农业科技导报,2016,18(3):119-125.

[18] 孙东宝.北方旱作区作物产量和水肥利用特征与提升途径[D].北京:中国农业大学,2017.

[19] Lei Xiangdong, Peng Changhui, Tian Dalin, et al. Meta-analysis and its application in global change research [J]. Chinese Science Bulletin, 2007,52(3):289-302.

[20] 孙宝娣,崔丽娟,李伟,等.湿地价值评估尺度转换方法:Meta 分析研究概述[J].湿地科学与管理,2016,12(1):58-62.

[21] 马登科,殷俐娜,刘溢健,等.施氮量对黄土高原旱地冬小麦产量和水分利用效率影响的整合分析[J].中国农业科学,2020,53(3):486-499.

[22] Li Qiang, Li Hongbing, Zhang Li, et al. Mulching improves yield and water-use efficiency of potato cropping in China: A meta-analysis [J]. Field Crops Research, 2018, 221:50-60.

[23] Blair J M, Crossley D A. Errata: Nitrogen Additions and Litter Decomposition: A Meta-Analysis [J]. Ecology, 2008, 89(3):888-888.

[24] Sun Binfeng, Zhao Hong, Lü Yizhong et al. The effects of nitrogen fertilizer application on methane and nitrous oxide emission/uptake in Chinese croplands [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016,15(2): 440-450.

[25] 李荣,张睿,贾志宽.不同覆盖材料对耕层土壤温度及玉米出苗的影响[J].干旱地区农业研究,2009,27(3):13-16,26.

[26] 赵引,毛晓敏,段萌.覆膜和灌水量对农田水热动态和制种玉米生长的影响[J].农业机械学报,2018,49(8):275-284.

[27] 周昌明.地膜覆盖及种植方式对土壤水氮利用及夏玉米生长、产量的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2016.

[28] 银敏华,李援农,李昊,等.覆盖模式对农田土壤环境与冬小麦生长的影响[J].农业机械学报,2016,47(4):127-135,227.

[29] 马建涛,陈玉章,程宏波,等.覆盖方式对旱地不同熟性马铃薯土壤水热特征和产量的影响[J].灌溉排水学报,2020,39(7):7-16.

[30] 唐文雪,马忠明.地膜降解特征对土壤水热效应和玉米产量的影响[J].农业环境科学学报,2018,37(1):114-123.

[31] 莫非.垄沟覆盖下品种熟性与施肥量对东非高原玉米生产力的影响及机理[D].甘肃 兰州:兰州大学,2016.

[32] 单智超,冯良山,田建全,等.渗水地膜对玉米水分利用效率的影响[J].水土保持研究,2017,24(3):194-197.

[33] 吴杨,贾志宽,边少锋,等.不同方式周年覆盖对黄土高原玉米农田土壤水热的调控效应[J].中国农业科学,2018,51(15):52-65.

[34] 刘凯,谢英荷,李廷亮,等.地膜覆盖对我国干旱半干旱地区土壤温度及土壤水分的影响[J].山西农业科学,2019,47(10):1847-1852.

[35] 陈发.新疆残膜回收机械化技术研究、应用与建议[J].新疆农业科学,2008(S2):127-134.

[36] 姚建民.渗水地膜研制及其应用[J].作物学报,2000,26(2):185-189.

(上接第 120 页)

[21] Shen Zhenyao, Hong Qian, Yu Hong, et al. Parameter uncertainty analysis of the non-point source pollution in the Daning River watershed of the Three Gorges Reservoir Region, China [J]. Science of the Total Environment, 2008, 405(1/3):195-205.

[22] 龙银平,张耀南,赵国辉,等.SWAT 模型水文过程模拟的数据不确定性分析:以青海湖布哈河流域为例[J].冰川冻土,2012,34(03):660-667.

[23] Albek M, Ulker B, Albke E. Hydrological modeling of Seydi Suyu. Watershed (Turkey) with HSPF [J]. Journal of Hydrology, 2004, 285(1/4):260-271.

[24] Luo Chuan, Li Zhaofu, Liu Hongyu, et al. Differences in the responses of flow and nutrient load to isolated and coupled future climate and land use changes [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 256: 109918.