

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.03.018

基于贝叶斯模型平均法的分布式水文模型集合模拟

李江云¹, 代文江^{1,2}, 张选庆¹, 靳天赐¹

(1. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043)

摘要: 基于分布式水文模型的研究现状,分析了分布式水文模型不确定性的影响,以暴雨洪水管理模型(SWMM)为例,介绍了过程集合运用于分布式水文模型以提高模型模拟可靠度的方法,并利用这一方法模拟深圳市龙岗区的两场降雨过程。结果表明,采用纳什效率系数(NS)衡量模型的模拟结果准确度时,选择不同的产流模型会有较大差异,在2018年8月11日场次降雨中,采用Horton模型、Green-Ampt模型、基于贝叶斯模型平均法的集合模拟时NS值分别为0.849、0.834、0.855;在2018年8月15日场次降雨中,采用上述3种模拟方法时NS值分别为0.875、0.879、0.891。集合模拟结果明显优于单一模型,集合模拟结果与实测值的“契合程度”较单一模型有明显提升。

关键词: 分布式水文模型; 集合模拟; 贝叶斯模型平均法; 暴雨洪水管理模型(SWMM)
中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)03-0116-07

Distributed Hydrological Model Ensemble Simulation Based on Bayesian Model Average Method

LI Jiang-yun¹, DAI Wen-jiang^{1,2}, ZHANG Xuan-qing¹, JIN Tian-ci¹

(1. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. China Railway First Survey and Design Institute Group Co. Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: This paper analyzed the influence of uncertainty of distributed hydrological model based on its research advances. The storm water management model (SWMM) was exemplified to illustrate the method of applying process ensemble to distributed hydrological model to improve the simulation reliability, and two rainfall processes in Longgang District of Shenzhen City were simulated by using this method. When Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NS) was used to measure the accuracy of simulation results, there were great differences between different runoff yield models. In the rainfall event on August 11, 2018, the NS values were 0.849, 0.834 and 0.855 when Horton model, Green-Ampt model and the ensemble simulation based on Bayesian model average method were adopted, respectively. In the rainfall event on August 15, 2018, the NS values of the above three simulation methods were 0.875, 0.879 and 0.891, respectively. The simulation results of the ensemble model were significantly better than that of the single model, and the former had significantly improved the “degree of fit” compared with the latter.

Key words: distributed hydrological model; ensemble simulation; Bayesian model average method; storm water management model (SWMM)

基金项目: 广东省水利科技创新项目(2017-33)

水文模型作为一种对自然界水文现象进行概化与描述的工具,其系统研究开始于20世纪50年代,经历了从简单到复杂、从集总式到分布式、从经验模型到机理模型的发展历程,但由于实际水文现象的复杂性,使得水文模型在模拟过程中也存在着一定的不确定性。在20世纪90年代初,英国水文学家 Beven 已经开始对模型的不确定性进行研究^[1]。相对来说,针对分布式水文模型的结构不确定性研究较少,通过科学有效的方法降低水文模型结构的不确定性,提高水文模拟和预报的精度,成为当前迫切需要解决的难题。

集合建模能在一定程度上充分发挥各种方法的优势,全面、客观地统一考虑水文系统中各种确定性和不确定性因素^[2]。笔者结合国内外多模型的集合模拟,提出一种基于单一分布式水文模型的过程集合模拟方法,该方法是在运用分布式水文模型模拟的过程中,分别选择不同的产汇流模型模拟,然后将模拟结果加权平均。平均方法可采用贝叶斯模型平均法。在运用该方法之前可以通过遗传算法优化模型参数,然后针对每个过程模块选出“最优”参数组,在采用过程集合模拟时就很大程度上减少了参数的不确定性影响。

1 城市流域分布式水文模型研究进展

1.1 分布式水文模型的发展

降雨径流模型经历了一个从简单到复杂、从集总式到分布式、从经验模型到机理模型的发展历程。自20世纪70年代起,以美国为代表的发达国家开始用数学模型对城市地表径流的响应过程以及水质变化进行研究,最初的模型大多都是基于监测数据的黑箱模型。随着人类对城市水文学、水动力学等学科的深入研究,逐渐开发出了分布式水文模型,分布式水文模型能在一定程度上反映各种复杂水文关系的内在作用机制,包括水文效应的时空变异,水文过程与环境、地形、气候以及人类活动的耦合等问题^[3]。

20世纪90年代,计算机技术、地理信息系统(GIS)、遥感技术和雷达测雨技术等迅速发展,为研制和建立分布式水文物理模型提供了强大的技术平台,使得分布式水文物理模型成为水文学研究的热点课题之一。第一个最具代表性的分布式水文物理模型是由英国、法国和丹麦的科学家联合研制

的SHE模型。但由于该模型需要求解复杂的微分方程和众多参数,加上许多水文过程还不能用数学方法准确描述,使得SHE模型在早期应用受到限制,后来在SHE模型的基础上研制出来的MIKE-SHE模型和其他演化模型的应用性有所增强。我国水文学家在此方面也进行了一些研究,并取得了一些成果,例如,郭生练等^[4]提出和建立了一种基于数字高程模型(DEM)的分布式水文物理模型,模拟整个流域的径流形成过程,分析径流形成机理;夏军等^[5]开发了分布式时变增益水文模型(DTVGM),该模型既有分布式水文概念性模拟的特征,同时又具有水文系统分析适应能力强特点,能够在水文资料信息不完全或不确定性干扰条件下完成分布式水文模拟与分析;熊立华等^[6]提出了一个基于DEM的分布式水文模型,主要用来模拟蓄满产流机制,并通过实例检验模型模拟流量过程以及土壤蓄水量空间分布的能力。

1.2 分布式水文模型面临的问题

分布式水文模型发展至今,其面临的问题随着时代技术的改变而变化。在20世纪七八十年代,分布式水文模型的计算受计算机水平的限制,在90年代以后计算机迅速发展,计算受限问题得以解决,然而对水文系统的深刻认识、复杂系统建模和多学科交叉等问题成为分布式水文建模必须面对的难点^[7-8]。现阶段分布式水文模型面临的问题可以归纳为以下几个方面:非线性问题、尺度问题和不确定性问题。水文系统是非线性系统,所有分布式水文模型都会涉及描述非线性水文过程,例如描述分布式水文模型计算单元内的产流过程,不管是采用Richard方程还是SCS曲线数值法,都属于非线性方程。分布式水文模型的部分输入数据可以通过实地测量获得,然而测量得到的很多输入数据仅仅是点尺度上的参数化特征,将这样的实测数据直接应用到模型计算单元(具有一定的形状和面积)必然会产生误差。针对尺度问题的解决,目前存在两种不同的观点:Beven认为尺度问题最终将被证明是不可解决的,必须接受分布式水文模型的尺度依赖性;而Bloschl认为尺度问题正在逐步被解决,而且将来必然在水文学理论和实践中取得重要进展。利用水文模型进行水文过程模拟时,选用任何一种水文模型都不可避免地存在着模型的不确定性,即便是可以反映水文过程物理机制的分布式水文模

型,由于模型参数众多、物理结构复杂等也会造成模拟的不确定性。分布式水文模型的不确定性也可以分为模型输入的不确定性、参数的不确定性和模型结构的不确定性。

2 分布式水文模型的集合模拟

2.1 分布式水文模型SWMM

自20世纪70年代以来,暴雨洪水管理模型(SWMM)经过不断发展完善,已经成为应用最广泛的城市降雨水量水质模型。SWMM现已推出5.1版本,其中包含低影响开发(LID)模块。SWMM既可模拟单场次短历时降雨事件,也可模拟长历时降雨事件。该模型可以模拟建模区域内完整的降雨-径流过程,具体包括水文水力模拟和水质模拟。

SWMM对降雨-径流过程的模拟主要包括地表产汇流和管道输水两个过程。在地表产流模型中,各子汇水区被概化成一个具有一定坡度和特征宽度的矩形流域,每个子汇水区可以分为透水地表和不透水地表,不透水地表又可分为具有洼蓄能力的不透水地表和没有洼蓄能力的不透水地表。在计算不透水地表产流时,首先需要从降雨中扣除初始洼蓄损失,当降雨量小于初始洼蓄量时不产流,当降雨量大于洼蓄量后开始产流。对于不透水地表,除了初始洼蓄损失之外还有下渗损失,SWMM提供了3种下渗模型:Horton模型、Green-Ampt模型、SCS曲线数值模型。

2.2 基于贝叶斯模型平均法的集合模拟

贝叶斯模型平均法是一种基于贝叶斯理论的将模型本身的不确定性考虑在内的统计分析方法^[9]。它以实测样本隶属于某一模型的后验概率为权重,对各模型预报变量的后验分布进行加权平均,获得综合预报变量的概率密度函数。

贝叶斯模型平均法能综合各模型的优势,提供精度较高的均值预报。单一模型在水文过程模拟和预报中存在诸多不确定性,集合模拟是减少不确定性影响的有效方法。将贝叶斯模型平均法的理论应用于实际之前,需要解决的一个主要问题是确定各模型的权重。

2.3 基于SWMM的集合建模

分布式水文模型包含的参数在空间上一般呈不均匀分布,由于划分子流域众多的情况下不可能在每个子流域或子区域都设站收集水文气象资料,

因此,分布式水文模型仍然依赖于某些站点的实测水文气象资料来率定模型参数,在此情况下如果根据流域出口断面水文资料来率定众多的子流域或子区域的模型参数,实际上也存在一定的不确定性。因此,确定分布式水文模型参数的问题就成为缺乏水文气象资料条件下如何减少模型不确定性的问题。实际上,划分再小的子集水区,其下垫面也并非只有一种类型,我们在传统的设置中只考虑了一种占比最大的下垫面类型作为该子集水区的下垫面,在选择产汇流模型时也是以这种下垫面为主进行选择,这种近似的等同也会使得模型存在一定的不确定性,因此,在模型结构上有必要考虑利用贝叶斯模型平均法进行集合模拟。水文过程集合模拟的途径主要可概括为两种:过程集合和结果集合。过程集合是在每个水文循环分过程采用不同方法模拟,再组合成适用的整体水文模型;结果集合是运用不同的水文模型分别模拟计算,将模拟的结果基于一定的原则进行集合。

对于软件所集成的多种产流模型,针对流域集水区的同一降雨事件,在设定地面径流时选择多种产流模型分别模拟(例如,产流模型选择Horton模型,汇流模型选择非线性水库模型),分别将单一模拟的同一时刻流量值与实测值进行对比,然后通过加权平均法将各次模拟的结果进行集合,从而有效地改善模型的预测和模拟能力,提高其精度。目前对于集合方法的研究成果主要有:简单平均法、加权平均法、神经网络法和模糊推理法等^[10]。

选用纳什效率系数(NS)^[11]表征模型模拟值和观测值之间的接近程度:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (R_{obs,t} - R_{sim,t})^2}{\sum_{t=1}^T (R_{obs,t} - \bar{R}_{obs})^2} \quad (1)$$

式中:NS为模拟流量序列的纳什效率系数; t 为模拟流量的时间序列; $R_{sim,t}$ 为模拟流量序列; $R_{obs,t}$ 、 \bar{R}_{obs} 分别为观测流量序列及其平均值。NS的值域是从负无穷大到1,值越大表示精度越高。

各个模型的模块权重采用贝叶斯模型平均法确定,Duan等人^[12]将该方法应用于水文模型结构不确定性分析中,研究了9个水文模型的集合预报,结果表明,贝叶斯模型平均法能根据各线型的后验概率设置权重进行加权平均。运用贝叶斯模型平均

法组合预测的关键是计算后验概率,而计算后验概率的关键是计算边际似然,即计算一个高维、复杂的积分,对此,目前比较好的方法是马尔科夫蒙特卡洛法,该方法通过不断调整抽样分布使得样本的概率密度分布接近响应曲面,最后求得贝叶斯后验分布。本研究集合了3种不同产流模型的模拟结果对上述方法的可行性进行初步探索,即对3种产流模型的模拟结果进行对应时间步长下的加权平均,采用贝叶斯模型平均法对各模型权重系数进行迭代,直至模型收敛,获得与监测值相吻合的集合模型。集合途径采用过程集合,在每一个时间步长下对SWMM中的3种不同产流模型的模拟结果进行加权平均,在MATLAB平台上编写贝叶斯模型平均法程序,并调用SWMM进行参数化建模和计算,在两个软件之间实现数据的相互连接计算。实现流程如图1所示。

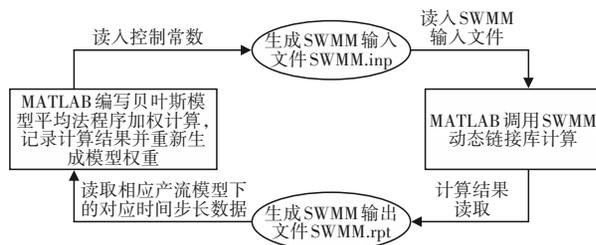


图1 基于MATLAB实现过程集合的流程示意

Fig.1 Flow chart of process ensemble based on MATLAB

3 应用实例

3.1 研究区域概况及模型构建

研究区域位于深圳市龙岗区东北部,属低山丘陵滨海区,为亚热带海洋性季风气候,年均降雨量为1 935.8 mm,年均降雨天数为140 d,全年86%的雨量出现在汛期(4月—9月)。研究区域占地面积约为7 hm²,全域有65%的生态用地,高程大多分布在33~38.5 m(黄海高程),呈现北高南低的特点。排水体制为分流制,生活污水经处理后全部作为中水回用,雨水排放至区域东部丁山河,区域包含一个雨水排放口,同时有凹式绿地、雨水花园、植草沟、透水铺装等多种LID设施,是典型的小区尺度地块。按照渗透性强弱集水区细分为透水性子汇水区、半透水性子汇水区和不透水性子汇水区。在实际情况下,由于半透水面中包含砖石地面、绿地等,这些均存在不同程度的下渗。因此,在模型中采用不同的不透水区域百分比来处理这部分区域。

基于研究区域的实际情况建立SWMM模型,最终概化的模型包含52个子汇水区、79条排水管渠,如图2所示。模型概化过程中单独提取各个用地类型来计算面积和设置参数,对于提取后的不同类型用地,采用上海慧水科技有限公司的HS-Date CAD插件进行提取并计算其面积。结合《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》中推荐的各汇水面综合径流系数参考值转化为不透水面积百分比,同时结合实际研究区域情况来确定各类型用地面积及不透水面积所占比例,具体如下:公共绿地、居住用地、工业用地、商业金融用地、行政办公用地、市政道路及景观用地的面积分别为2.162、0.235、0.445、1.178、0.479、2.521 hm²,综合不透水面积百分比分别为15%、60%、40%、40%、60%、10%。

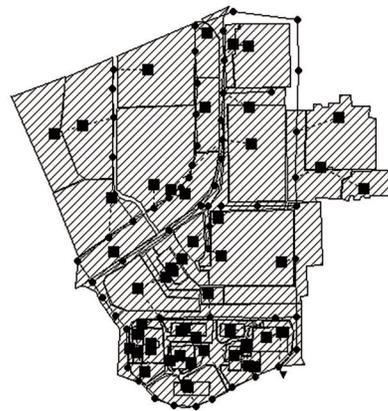


图2 研究区域的概化模型

Fig.2 Generalization model of study area

选择2018年8月11日和15日两场降雨进行研究,降雨及径流数据来源于课题组在深圳低碳城所做试验,其中前一场为小雨,降雨量为6.6 mm,降雨历时2 h,平均降雨强度为3.3 mm/h;后一场为大雨,降雨量为29.2 mm,降雨历时2 h,平均降雨强度为14.6 mm/h。

3.2 模型参数率定

参数敏感性分析参考盛旺^[13]在硕士论文中对同地区的参数敏感性分析结果,选取4个对径流总量、峰值流量和峰值时间敏感性较高的参数作为率定参数,这4个参数分别是:不透水区曼宁系数、最大渗透速率、不透水区洼蓄量、最小渗透速率。采用GLUE方法率定各个参数,最终得到模型的最优参数如表1所示。

表 1 SWMM 模型水文水力参数及取值
Tab.1 Hydrologic and hydraulic parameters and values of SWMM model

参数名称	物理意义	取值
N-Imperv	不透水区曼宁系数	0.048
N-Perv	透水区曼宁系数	0.019
S-Imperv	不透水区注蓄量/mm	1.25
S-Perv	透水区注蓄量/mm	4
PctZero	不透水区无注区占比/%	50
Max Rate	最大渗透速率/(mm·h ⁻¹)	67.76
Min Rate	最小渗透速率/(mm·h ⁻¹)	15.57
Infiltration Decay	渗透衰减系数/h ⁻¹	3
Manning-N	管道曼宁系数	0.011

3.3 集合模拟各产流模型敏感度分析

采用所选择的 3 种产流模型,分别模拟 2018 年 8 月 11 日和 15 日两场降雨,根据模拟结果绘制模型

权重与集合模拟似然函数(即 NS)之间的散点图,通过散点图定性衡量集合成员在不同权重下对集合结果的影响程度,结果如图 3 所示。分析图 3(a)~(c)可知,随着 SCS 模型权重的增大,集合模拟的似然值不断减小,当 SCS 模型的权重接近 0 时集合模拟的似然值反而最大,表明 SCS 模型无法反映该场次降雨的产流过程;集合模拟的似然值随着 Horton 模型所占权重的增加而增加,但当 Horton 模型的权重接近 1 时,似然值又有下降的趋势,说明单一的 Horton 模型也不是最佳模拟结果;同样,集合模拟的似然值会随着 Green-Ampt 模型权重的增加而增加,该模型只是在权重不超过 0.4 的情况下有较好的表现,随着该模型权重的增加,集合模拟似然值反而减小,说明单一的 Green-Ampt 模型也不能达到使模拟值与观测值之间似然值最大的模拟结果。

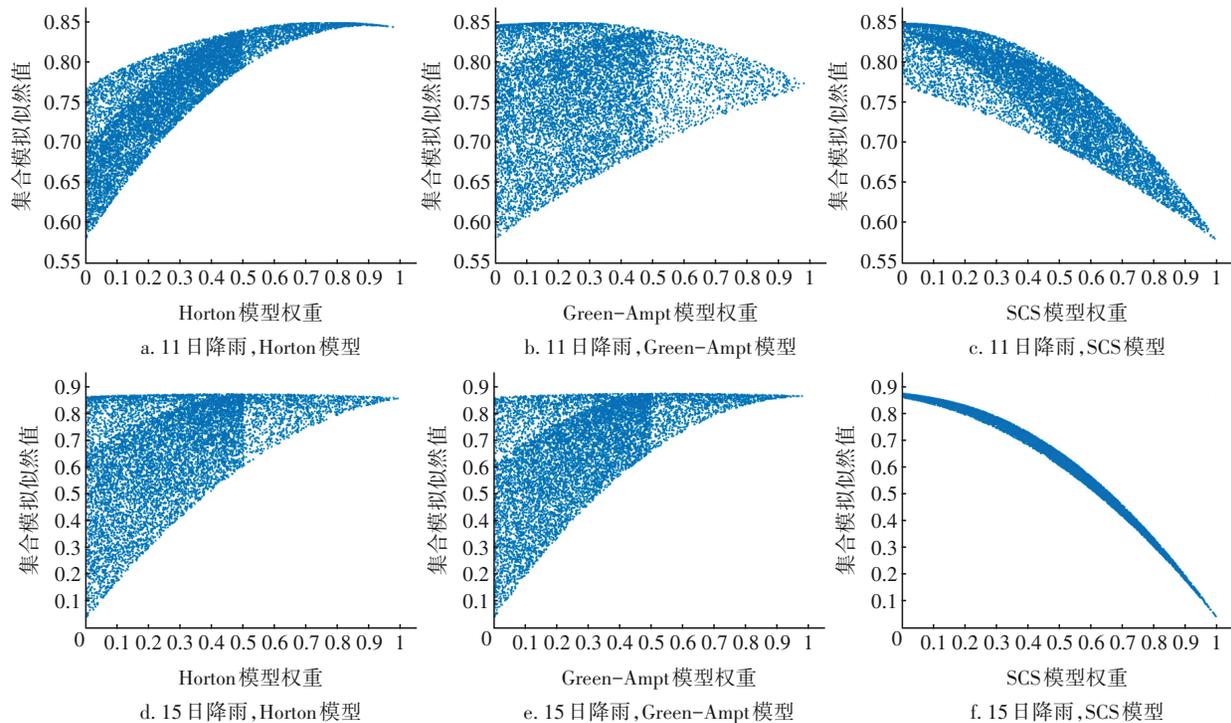


图 3 不同降雨事件下不同产流模型权重对应似然分布

Fig.3 Likelihood distribution of weights of different runoff yield models under different rainfall events

分析图 3(d)~(f)可知,随着 SCS 模型权重的增大,集合模拟的似然值不断减小,当 SCS 模型的权重接近 0 时集合模拟的似然值反而最大,表明 SCS 模型无法反映该场次降雨的产流过程;但 Horton 模型和 Green-Ampt 模型对集合模拟的结果都有较好的表现,随着模型权重的增加,集合模拟似然值一直维持在一个稳定的数值左右,说明 Horton 模型和

Green-Ampt 模型都可用于当前条件下的模拟,且无论选用哪个产流模型,模拟结果表现都相差不大。

3.4 模拟结果分析

不同场次降雨下采用经验贝叶斯模型平均法集合模拟的敏感性分析结果,从侧面反映出 SCS 模型不可用于所选研究区域与所选降雨的模拟,因此可以忽略此模型,采用 Horton 模型与 Green-Ampt 模

型加权集合模拟,在两场降雨下两种模型不同权重时集合模拟似然值的分布情况如图4所示。

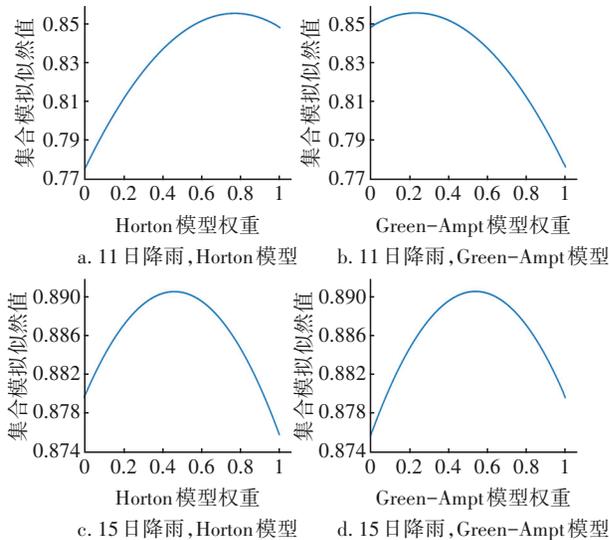


图4 不同场次降雨下敏感模型权重对应似然分布

Fig.4 Likelihood distribution of weights of sensitive models under different rainfall events

图5为采用单一模型和集合模型对两场降雨的模拟结果。

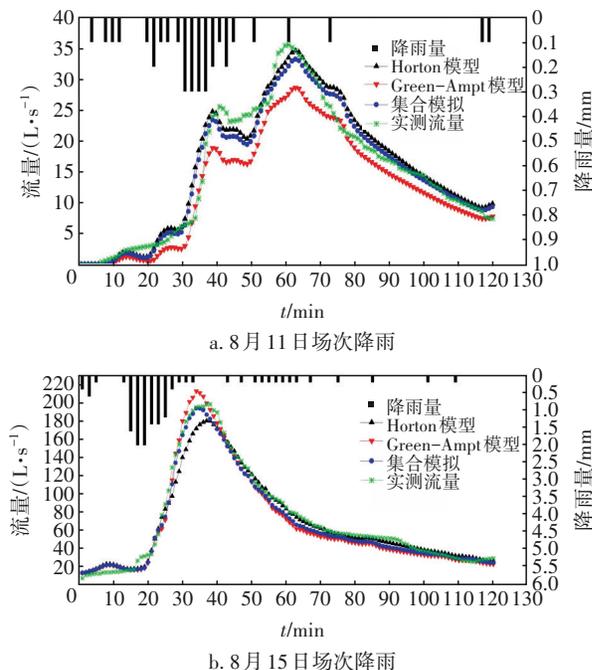


图5 不同场次降雨下产流模型与集合模型模拟结果对比
Fig.5 Comparison of simulation results between runoff model and ensemble model under different rainfall events

在8月11日这场降雨中,采用Horton模型时的似然值为0.849,采用Green-Ampt模型时的似然值

为0.834,采用集合模拟得到的似然值为0.855,集合模拟在峰值流量之后与实测流量的“契合程度”较单一模型模拟有所提升,但集合模拟在峰值流量前的“契合程度”提升不明显;在8月15日这场降雨中,采用Horton模型时的似然值为0.875,采用Green-Ampt模型时的似然值为0.879,采用集合模拟得到的似然值为0.891,集合模拟结果明显优于单一模型,集合模拟较单一模型模拟的“契合程度”有明显提升。

Horton模型与Green-Ampt模型的模拟结果相差不大,但与SCS模型的模拟结果相差较大,故同一模型选用不同过程模块进行模拟时会出现较大的结果差异,其原因是不同产流模型的适用性及计算方法侧重点不同,即不同模块之间的结构差异,例如,经验Horton模型通常用于透水与半透水表面,SCS模型常用于透水性较大的流域降雨产流计算。集合模拟结果相对单一模型模拟结果有较大的改善,实测流量与模拟流量过程线之间的偏差相较于单一模型(Horton产流模型)有所减小。加权平均能够针对各个产流模型的模拟结果“取长补短”,在一定程度上能减少各个产流模型与实际复杂产流过程之间的差异,从而降低模拟结果的不确定性。

4 结论

在回顾水文模型发展历程的基础上,总结了分布式水文模型应用于实际过程中所存在的问题,通过类比多模型集合模拟来提高模拟精度的方法,提出了一种单一分布式水文模型过程集合提高模拟精度的构思,并提出了具体的集合建模方法,集合方法采用加权平均法。每一模块模拟时均采用遗传算法进行参数优化。模拟结果表明,过程集合建模能够在一定程度上改善模型结构的不确定性,提高模型的模拟精度。但在本研究中集合只是选用了3种产流模型,集合方法比较简单,在后续研究中如何科学选用各类模型和权重,是进一步研究的方向。

参考文献:

- [1] BEVEN K, BINLEY A. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction [J]. Hydrological Processes, 1992, 6(3): 279-298.
- [2] 王浩,李扬,任立良,等. 水文模型不确定性及集合模拟总体框架[J]. 水利水电技术, 2015, 46(6):

- 21-26.
- WANG Hao, LI Yang, REN Liliang, *et al.* Uncertainty of hydrological model and general framework of ensemble simulation [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2015, 46(6): 21-26 (in Chinese).
- [3] 熊立华, 郭生练. 分布式流域水文模型[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- XIONG Lihua, GUO Shenglian. Distributed Basin Hydrological Model [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2004 (in Chinese).
- [4] 郭生练, 熊立华, 杨井, 等. 分布式流域水文物理模型的应用和检验[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2001, 34(1): 1-5, 36.
- GUO Shenglian, XIONG Lihua, YANG Jing, *et al.* Comparative study and application of distributed hydrophysical model of watersheds [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2001, 34(1): 1-5, 36 (in Chinese).
- [5] 夏军, 工纲胜, 吕爱锋, 等. 分布式时变增益流域水循环模拟[J]. *地理学报*, 2003, 58(5): 789-796.
- XIA Jun, GONG Gangsheng, LÜ Aifeng, *et al.* Water cycle simulation of distributed time-varying gain watershed [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(5): 789-796 (in Chinese).
- [6] 熊立华, 郭生练, 田向荣. 基于DEM的分布式流域水文模型及应用[J]. *水科学进展*, 2004, 15(4): 517-520.
- XIONG Lihua, GUO Shenglian, TIAN Xiangrong. DEM-based distributed hydrological model and its application [J]. *Advances in Water Science*, 2004, 15(4): 517-520 (in Chinese).
- [7] ZOPPOU C. Review of urban storm water models [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2001, 16: 195-231.
- [8] ROSSI L, KREJCI V, RAUCH W, *et al.* Stochastic modeling of total suspended solids (TSS) in urban areas during rain events [J]. *Water Research*, 2005, 39(17): 4188-4196.
- [9] HOETING J A, MADIGAN D, RAFTERY A E, *et al.* Bayesian model averaging: a tutorial [J]. *Statistical Science*, 1999, 14(4): 382-417.
- [10] 袁喆, 严登华, 杨志勇, 等. 集合建模在径流模拟和预测中的应用[J]. *水利学报*, 2014, 45(3): 351-359.
- YUAN Zhe, YAN Denghua, YANG Zhiyong, *et al.* Ensemble model and its application in runoff simulation and forecast [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(3): 351-359 (in Chinese).
- [11] 卫晓婧, 熊立华, 万民, 等. 融合马尔科夫链-蒙特卡罗算法的改进通用似然不确定性估计方法在流域水文模型中的应用[J]. *水利学报*, 2009, 40(4): 464-473, 480.
- WEI Xiaojing, XIONG Lihua, WAN Min, *et al.* Application of Markov Chain Monte Carlo method based modified generalized likelihood uncertainty estimation to hydrological models [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(4): 464-473, 480 (in Chinese).
- [12] DUAN Q Y, AJAMI N K, GAO X G, *et al.* Multi-model ensemble hydrologic prediction using Bayesian model averaging [J]. *Advances in Water Resources*, 2007, 30(5): 1371-1386.
- [13] 盛旺. 基于SWMM模型参数敏感性及其优化研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- SHENG Wang. Study on Parameter Sensitivity and Optimization Based on SWMM Model [D]. Wuhan: Wuhan University, 2018 (in Chinese).

作者简介:李江云(1967-),女,湖北武汉人,博士,教授,主要从事城镇给排水系统优化设计与运行、智慧水务以及城镇节水方面的研究。

E-mail:lijy@whu.edu.cn

收稿日期:2019-11-23

修回日期:2020-05-21

(编辑:刘贵春)