

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.05.010

基于 BIC-KMeans 和 SWMM 的城市雨洪快速模拟方法

刘成帅, 韩臻悦, 李 想, 孙 悦, 汤业海, 侯东儒, 胡彩虹

(郑州大学黄河实验室, 河南 郑州 450001)

摘要:针对城市雨洪模型率定过程过于烦琐复杂的问题,耦合贝叶斯信息准则(BIC)和K均值聚类机器学习算法(KMeans)构建了BIC-KMeans算法。根据样本参数在不同城市功能区的分布规律,结合暴雨洪水管理模型(SWMM)提出了城市雨洪快速模拟方法。分别在郑州大学主校区、郑州市金水区南部、郑州市中心城区3个集水区选取了6、3、4场历史观测洪水事件进行了验证。结果表明:提出的城市雨洪快速模拟方法适用性较好;洼蓄量、地表曼宁系数、入渗率和衰减系数等不确定性参数在不同城市功能区的取值由小到大依次为工商业区、居民区、公共用地区;3个集水区雨洪模拟洪水流量相对误差均小于12%、纳什效率系数均大于0.75、决定系数均大于0.80,各项指标均优于传统调参法;SWMM模拟精度会随着集水区空间尺度增大而变小,峰现时间误差在较小尺度集水区雨洪模拟中是分钟级,在较大尺度为小时级。

关键词:城市雨洪快速模拟;BIC-KMeans算法;SWMM;不确定性参数;城市功能区;集水区;
中图分类号:TU992 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)05-0079-09

Urban rainstorm flood rapid simulation method based on BIC-KMeans and SWMM //LIU Chengshuai, HAN Zhenyue, LI Xiang, SUN Yue, TANG Yehai, HOU Dongru, HU Caihong(*Yellow River Laboratory, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China*)

Abstract: In response to the problem of overly cumbersome and complex calibration process of urban rainstorm flood models, a BIC-KMeans algorithm was constructed by coupling Bayesian information criterion (BIC) and K-means clustering machine learning algorithm (KMeans). According to the distribution law of sample parameters in different urban functional areas, combined with the storm water management model (SWMM), an urban rainstorm flood rapid simulation method was proposed. Six, three, and four historical observation flood events were selected for verification in the main campus of Zhengzhou University, the southern part of Jinshui District in Zhengzhou City, and the central urban area of Zhengzhou. The results show that the proposed urban rainstorm flood rapid simulation method has good applicability. The values of uncertainty parameters such as depression storage capacity, surface Manning coefficient, infiltration rate, and attenuation coefficient vary from small to large in different urban functional areas, with the order of industrial and commercial areas, residential areas, and public use areas. The relative error of simulated flood discharge in the three catchment areas is less than 12%, the Nash efficiency coefficient is greater than 0.75, and the determination coefficient is greater than 0.80. All indicators are better than traditional parameter adjustment methods. The simulation accuracy of SWMM will decrease with the increase of the spatial scale of the catchment area. The peak time error is on the minute level in small-scale rainwater and flood simulation, and on the hour level in larger scale.

Key words: urban rainstorm flood rapid simulation; BIC-KMeans algorithm; SWMM; uncertainty parameters; urban functional area; catchment area

近年来,由突发性大暴雨引发的城市洪涝灾害日趋严峻^[1],严重威胁着城市公共基础设施和居民生命财产安全^[2-4]。郑州市“7·20特大暴雨”引发

严重内涝灾害事件,造成292人遇难,47人失踪,直接经济损失达532亿元。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次报告指出随着人类活动气

基金项目:国家自然科学基金项目(51739009, 51979250);黄河实验室(郑州大学)一流课题专项基金项目(YR1221R02);河南省科技攻关项目(222102320455)

作者简介:刘成帅(1996—),男,博士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:liucs@gs.zzu.edu.cn

通信作者:胡彩虹(1968—),女,教授,博士,主要从事水文及水资源研究。E-mail:hucaihong@zzu.edu.cn

候变化不断加剧,极端降雨事件也将变得更加频繁^[5],城市洪水快速预报预警显得愈发重要^[6]。洪水预报是防洪减灾工作重要的非工程措施之一,城市雨洪模型构建是洪涝预报预警工作的基石^[7-10]。自20世纪70年代起,暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM)、ICM(integrated catchment management)、MIKE模型等代表性城市雨洪模型相继出现并被广泛应用^[11-12]。王京晶等^[13]以济南市主城区所在流域为例构建SWMM,探讨了基流分割前后流量数据对模拟结果不确定性的影响;袁绍春等^[14]构建重庆市万州区某老旧建筑小区ICM模型评估了海绵化改造效能;胡彩虹等^[15]构建郑州市金水区南部的MIKE FLOOD模型,探讨了雨型对城市内涝的影响作用。这些传统的城市雨洪模型构建实质是对城市雨洪现象进行参数概化的过程^[7]。随着城市化快速发展,由突发性大暴雨引发的城市及城市群连片洪涝灾害日趋严峻^[1,16],对城市雨洪模型构建的区域、对象、空间多尺度性提出了越来越高的要求。为了达到城市雨洪快速建模仿真模拟的目的,Wu等^[17]基于SWMM结合神经网络提出了面向洪水过程的不确定性参数实时校正方法;袁绍春等^[18]基于BP(back propagation)神经网络算法实现了SWMM参数自动率定;侯精明等^[19]在水文水动力耦合模型的基础上,引入GPU(graphics processing unit)并行计算加速技术,在陕西省西咸新区成功应用。借助机器学习算法和高性能计算机在一定程度上可以提高SWMM参数校准效率^[10,20],这些研究表明机器学习技术在城市雨洪模拟中有广阔的应用前景。

K均值聚类机器学习算法(以下简称“KMeans算法”)因其数学原理简单、计算收敛速度快而广泛应用于洪水预报研究。李月玉等^[21]利用洪水的相似性扩大实时修正信息量,结合KMeans算法实现了沿渡河流域洪水分类预报;尤烽骅等^[22]基于改进人工蜂群算法的KMeans算法,进行了金沙江流域下游的寸滩站洪水分类预报研究;Hu等^[23]基于KMeans算法和BP神经网络构建了静乐流域洪水分类快速预报模型。KMeans算法在洪水预报中的应用研究大多集中于流域范围,并且多针对降雨洪水事件本身特征指标进行洪水分类,鲜有针对城市地区雨洪模型参数的应用报道。杜纤^[2]和Sun等^[24]先后结合改进的子汇水区划分方法将KMeans算法应用于SWMM的参数确定,但对于模型参数的物理意义及其与城市复杂下垫面之间的普适规律研究有所欠缺,没有消除随机选择初始聚类簇K对参数

样本聚类效果的影响。本文基于SWMM,耦合贝叶斯信息准则(Bayesian information criterion, BIC)和KMeans算法,提出城市雨洪模型快速模拟方法,以期为提高城市雨洪模型率定效率,加快城市洪涝灾害的预报预警研究提供参考。

1 研究方法

1.1 SWMM

SWMM参数分为可测量获得的不确定性参数和需要率定的不确定性参数^[2],其中不确定性参数烦琐复杂的率定过程是影响模拟预报效率的主要问题之一^[18]。本文中涉及的不确定性参数见表1。SWMM不确定性参数敏感性与下垫面条件关系密切^[25],洼蓄量反映了水文响应单元的洼地蓄水深度,曼宁系数反映了降水在通过水文响应单元时受到的阻力,入渗率和衰减系数反映了Horton产流模式中的地面下渗能力^[26-27]。

表1 SWMM不确定性参数

Table 1 Uncertainty parameters of SWMM

类别	不确定性参数	单位	模型中的名称
地表产流模块	透水区洼蓄量	mm	Des-perv, DP
	不透水区洼蓄量	mm	Des-imperv, DI
	最大入渗率	mm/h	Max. Infiltr, MaxI
	最小入渗率	mm/h	Min. Infiltr, MinI
	衰减系数	h ⁻¹	Decay con, DC
地表汇流模块	透水区曼宁系数	无量纲	N-perv, NP
	不透水区曼宁系数	无量纲	N-imperv, NI
管网汇流模块	管道曼宁系数	无量纲	Con-mann, CM

1.2 BIC-KMeans

KMeans聚类算法是一种迭代求解的机器学习分析算法,是根据已知数据集中样本的特征相似程度,将样本数据划分成不同类型的计算过程^[28-29]。应用时需要随机选择K个样本点作为初始聚类中心,记为 $\mu_1^{(0)}, \mu_2^{(0)}, \dots, \mu_k^{(0)}$,之后定义代价函数:

$$J(c, \mu) = \min_{\mu} \min_c \sum_{i=1}^M \|x_i - \mu_{c_i}\|^2 \quad (1)$$

式中: x_i 为第*i*个样本; c_i 为 x_i 所属于的簇; μ_{c_i} 为簇对应的中心点; M 为样本总数。令 $t = 0, 1, 2, \dots, n$ 为迭代步数,重复如下过程直到代价函数J收敛:对于每一个参数样本 x_i ,将其分配至距离最近的中心($c_i^{(t)} = \arg \min_k \|x_i - \mu_k^{(t)}\|^2$),对于每一个聚类中心K,重新计算该类的中心($\mu_k^{(t+1)} = \arg \min_{\mu} \sum_{i: c_i^{(t)} = k} \|x_i - \mu\|^2$)。

KMeans算法需要人工预先确定初始K值,但该值和真实的数据分布未必吻合。利用BIC准则^[30]来确定KMeans算法中的聚类数目,构建BIC-

KMeans 算法对 SWMM 的不确定性参数进行规律挖掘,避免人为选取 K 值的主观性对聚类结果产生影响。BIC-KMeans 算法可以综合考虑机器学习中模型复杂度和精度问题,避免出现过拟合和欠拟合问题,BIC 评分值计算公式为

$$B = m \ln n - 2 \ln L \quad (2)$$

式中: B 为 BIC 评分值; m 为训练参数个数; n 为样本数量; L 为似然函数; $m \ln n$ 为惩罚项。BIC 值越小 KMeans 算法的质量越好。

1.3 城市雨洪快速模拟步骤

步骤 1 建立 SWMM 不确定性参数样本众包数据集。以“SWMM”为主题在 Web of Science、中国知网检索相关文献,最终得到包含 DI、DP、NI、NP、MaxI、MinI 和 DC 等 7 个不确定性参数明确取值的 686 套先验样本参数集。

步骤 2 样本参数聚类分析。将 $m \times n$ ($m = 7$, $n = 686$) 组先验参数样本利用 BIC-KMeans 算法进行聚类分析,输出特征参数值(即为 K 个聚类簇条件下的聚类中心值),此步骤借助 Python 语言编程计算实现。

步骤 3 子汇水区城市功能区化。根据文献[24]中的方法划分 SWMM 子汇水区,该方法引入了包含城市区域“社会主导-自然协同”下垫面属性特征的城市功能区概念,确保每一个子汇水区对应一个独立的城市功能区。

步骤 4 模型概化和验证。将参数聚类特征值依据城市功能区分布规律分发至各个子汇水区,避免人工调参,进行模型快速构建。选取不同尺度研究区,利用观测暴雨洪水事件进行模拟验证。

1.4 评价指标

选用洪水流量相对误差 (R_E)、纳什效率系数 (N_{SE})、决定性系数 (R^2) 和峰现时差 (Δt) 4 个指标进行模型评价。其中, N_{SE} 取值范围为 $(-\infty, 1]$, N_{SE} 越接近 1,模拟效果越好^[31]。

2 实例验证

2.1 验证区概况

郑州是我国中部地区最大的交通枢纽城市,地理位置为东经 $112^{\circ}42' \sim 114^{\circ}14'$,北纬 $34^{\circ}16' \sim 34^{\circ}58'$ 。年平均降水量 542.0 mm,65% 以上的降雨集中在汛期,多为短历时强降雨形式^[32]。城市化快速进程和雨岛效应导致郑州市内涝灾害频发^[2],且洪涝灾害呈现频率高、数量多的特点^[33]。郑州市内部分地区积水频繁,对城市运行和人民生命财产安全造成严重威胁,平均每年经济损失超过 2 亿元^[34]。本文选取郑州市内 3 个不同空间尺度的集水区进行

验证:S1 为郑州大学主校区,面积约为 2.84 km^2 ;S2 为郑州市金水区南部,面积约为 64.42 km^2 ;S3 为郑州市中心城区,面积约为 1010.20 km^2 。3 个集水区的位置见图 1。

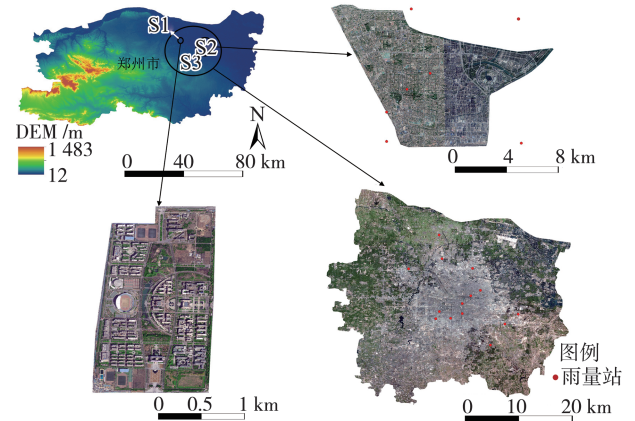


图 1 研究区位置及雨量站分布

Fig. 1 Location of study area and distribution of rainfall stations

2.2 数据来源与处理

S1、S2、S3 集水区的土地利用数据空间精度是 10 m,通过 ENVI 软件解译 Sentinel-2 遥感影像所得,分为建筑物、林地、草地、道路以及水体 5 类,具体分布见图 2。S1 的管网数据来自郑州大学基建处,S2、S3 的管网数据来自郑州市相关部门;逐时段降雨径流数据摘录自《河南省水文统计年鉴》,限于监测资料不足和数据可用性,在 S1、S2 和 S3 集水区分别选取了 6、3 和 4 次降雨较大的历史观测洪水事件,用于评估研究区 SWMM,具体洪水场次为 S1: 20140524、20150707、20160605、20170812、20180801、20180808; S2: 20160605、20170730、20170812; S3: 20110726、20120707、20120804、20120827,数据年份与研究区下垫面条件保持一致。其中,S3 的净雨会通过排水管网汇集排放城区内河,最终排入贾鲁河,对应选取郑州市贾鲁河中牟水文站作为流量验证站。对 3 个集水区进行雨水管网和子汇水区概化,管网和出水口均设置为自由流动,如图 3 所示。S1 划分为 75 个子汇水区、382 个节点、370 根管段和 1 个出水口;S2 划分为 292 个子汇水区、265 个节点、272 根管段和 1 个出水口;S3 划分为 3359 个子汇水区、2435 个节点、2458 根管段和 2 个出水口。3 个集水区包括 3 种城市功能区:工商业区、居民区、公共用地区,S1、S2、S3 中工商业区子汇水区数量占比分别为 30.7%、41.6%、21.6%;居民区子汇水区数量占比分别为 37.3%、43.0%、38.2%;公共用地区子汇水区数量占比分别为 32.0%、15.4%、40.2%,具体分布见图 4。

■ 水体 ■ 建筑用地 ■ 草地 ■ 林地 ■ 道路

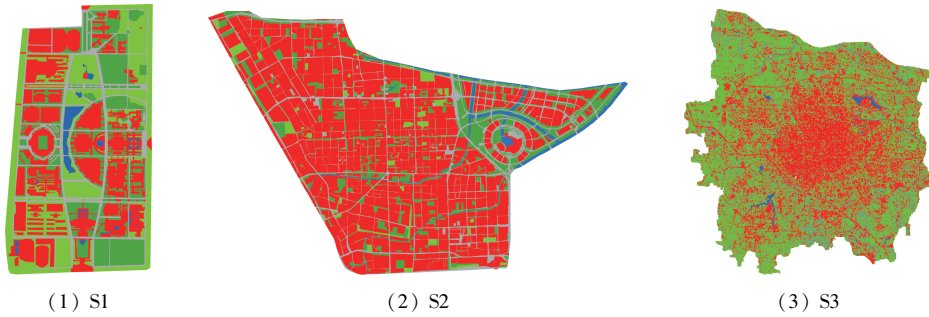


图2 土地利用类型分布

Fig.2 Land use type distribution

☐ 雨量站 ● 人孔 ▼ 出水口 □ 子汇水区 — 管网

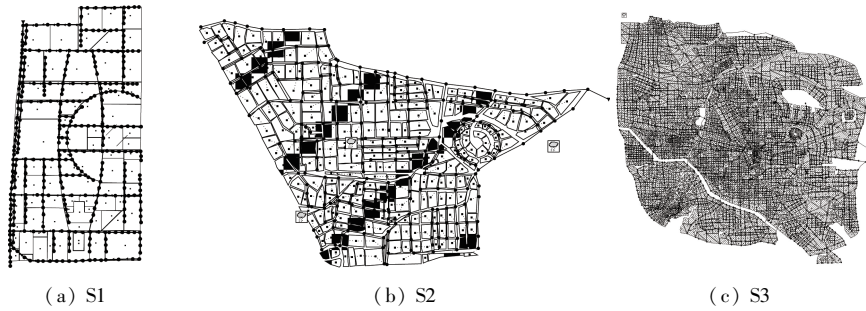


图3 子汇水区划分

Fig.3 Division of sub-catchments

■ 工商业区 ■ 居住区 ■ 公共用地区

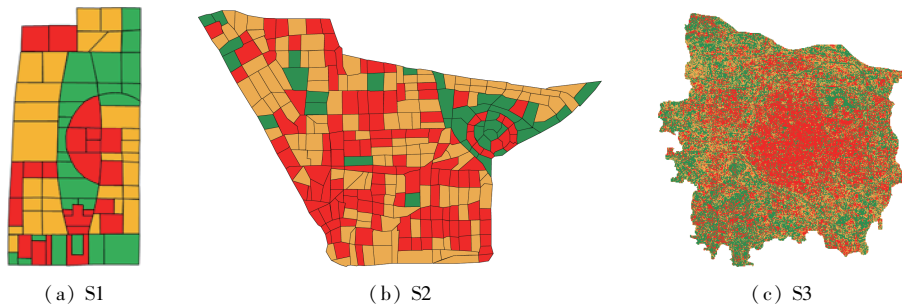


图4 城市功能区分布

Fig.4 Urban functional areas type distribution

3 结果与分析

3.1 参数聚类结果

图5为DI、DP、NP、NI、MaxI、MinI、DC等7个不确定参数的聚类簇数 K 值与BIC评分值的关系。由图5可见,当 $K=3$ 时出现拐点,此时 K 值前后的BIC评分值发生明显变化,综合考虑KMeans算法复杂度,确定686套样本参数最优聚类簇数为3。

SWMM不确定性参数样本聚类结果如图6所示,黑色横线代表聚类范围分界线,不同类别子汇水区的参数取值见表2。工商业区子汇水区的土地利

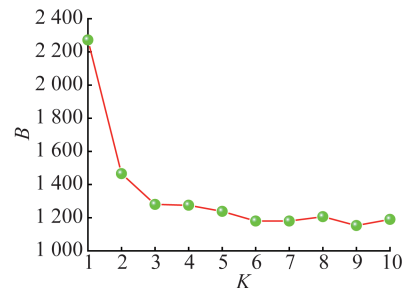


图5 不确定参数 K 值与BIC评分值的关系
Fig.5 Relationship between K value and BIC score value of uncertain parameters

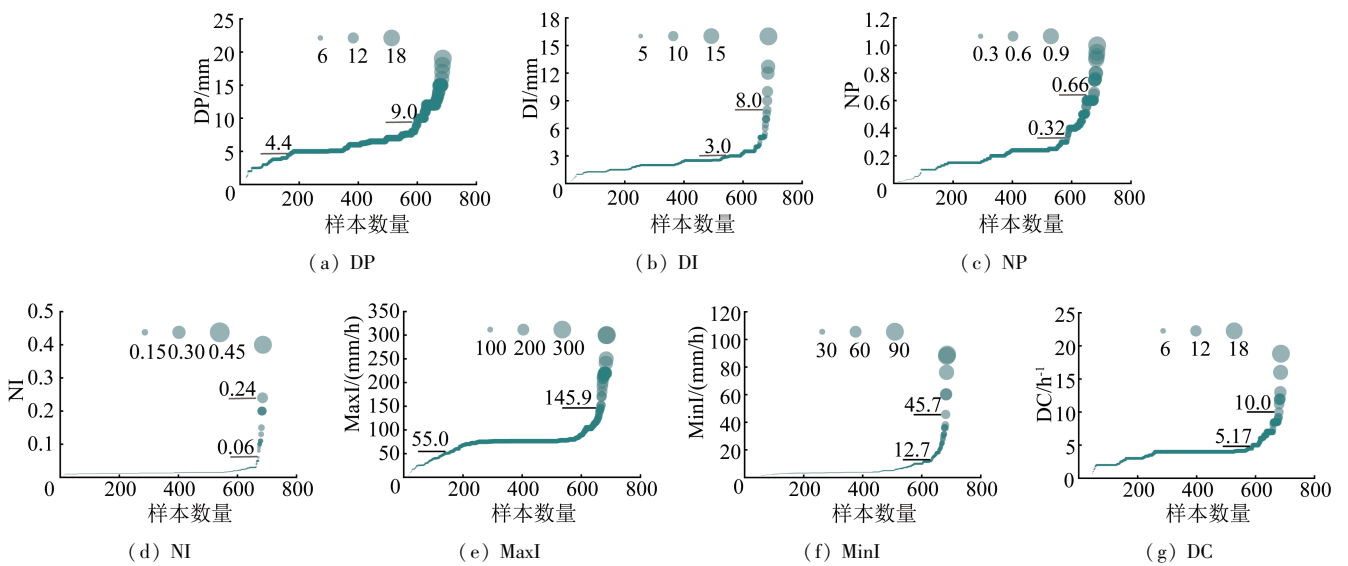


图 6 SWMM 不确定性参数样本聚类结果

Fig. 6 Clustering result of SWMM uncertain parameter samples

用类型以建筑物、硬化路面为主,地表平整密实,注蓄量、地表曼宁系数、入渗率和衰减系数均为最小;居民区子汇水区位于市区中心外围或周边,相对分散,既有硬化的道路和屋顶,也有约 30% 的绿地率。相对于工商业区,居住区的地表粗糙起伏程度更大一些,渗透性较好一些,注蓄量、地表曼宁系数、入渗率和衰减系数适中;公共用地子汇水区以园林为主,土地利用类型以草地、林地为主,地表粗糙程度最大,具有较好的渗透性和蓄水能力,注蓄量、地表曼宁系数、入渗率和衰减系数均为最大。本文选取的样本参数空间尺度均小于 1 km^2 ,忽略其所属城市的气候差异影响^[35-36]。

表 2 不同城市功能区 SWMM 不确定性参数取值

Table 2 SWMM uncertainty parameter values of different urban functional areas

城市功能区	DI/ mm	DP/ mm	NI	NP	MaxI/ (mm/h)	MinI/ (mm/h)	DC/h ⁻¹
工商业区	1.91	2.73	0.01	0.17	31.69	4.3	3.27
居民区	4.16	5.97	0.14	0.48	79.68	21.96	7.13
公共用地	11.94	12.07	0.4	0.84	213.33	74.73	13.55

3.2 雨洪模拟结果

图 7~9 为 S1、S2、S3 各场次洪水 SWMM 模拟结果,表 3 为评价指标统计结果。由图 7 可见,S1 的 6 场洪水流量模拟过程线基本与实测值吻合,结合表 3, R_E 的范围为 4.11%~11.74%, R^2 的范围为 0.89~0.97, N_{SE} 的范围为 0.86~0.96, Δt 的范围为 2~11 min,为分钟级,故认为较小尺度 SWMM 模拟结果优良。由图 8 可见,S2 的 3 场洪水流量模拟过程线与实测值基本吻合,但相比 S1 的模拟过程线较为散乱,结合表 3, R_E 的范围为 3.66%~9.32%, R^2

表 3 评价指标统计结果

Table 3 Statistical result of evaluation indicators

集水区	洪水事件	传统调参				BIC-KMeans 模型			
		$R_E/\%$	R^2	N_{SE}	Δt	$R_E/\%$	R^2	N_{SE}	Δt
S1	20140524	14.14	0.91	0.89	0.17	8.07	0.97	0.96	0.07
	20150707	11.74	0.91	0.89	0.05	11.74	0.93	0.92	0.15
	20160605	12.92	0.92	0.89	0.18	9.00	0.97	0.94	0.05
	20170812	12.10	0.93	0.91	0.22	4.11	0.97	0.97	0.03
	20180801	15.98	0.93	0.89	0.23	10.62	0.97	0.95	0.07
	20180818	19.76	0.88	0.85	0.06	10.94	0.89	0.96	0.18
	平均	14.44	0.91	0.89	0.15	9.08	0.95	0.95	0.09
S2	20160605	19.77	0.86	0.79	1.82	9.32	0.97	0.91	1.70
	20170812	7.46	0.87	0.76	1.50	5.83	0.94	0.89	1.50
	20170730	6.51	0.79	0.77	1.75	3.66	0.86	0.85	1.70
	平均	11.25	0.84	0.77	1.69	6.27	0.92	0.88	1.63
S3	20110726	12.42	0.81	0.78	1.80	8.20	0.85	0.79	3.00
	20120707	12.9	0.79	0.71	2.85	3.20	0.87	0.86	2.00
	20120804	14.54	0.74	0.70	4.66	9.40	0.86	0.85	3.50
	20120827	9.70	0.83	0.77	3.10	5.10	0.82	0.77	3.40
	平均	12.39	0.79	0.74	3.10	6.48	0.85	0.82	2.98

的范围为 0.86~0.97, N_{SE} 的范围为 0.85~0.91, Δt 的范围为 1.5~1.7h,为小时级,故认为 S2 的 SWMM 模拟结果良好。由图 9 可见,S3 的 4 场洪水流量模拟过程线与实测值吻合程度较差, R_E 的范围为 3.2%~9.4%, R^2 的范围为 0.82~0.87, N_{SE} 的范围为 0.74~0.86, Δt 的范围为 2~3.5h,为小时级,故认为 S3 的 SWMM 模拟结果较差。相对于传统调参法,基于 BIC-KMeans 算法的模拟流量过程和洪峰更加接近实测洪水,从评价指标上看,S1、S2 和 S3 的 R_E 、 R^2 、 N_{SE} 、 Δt 分别平均提高 5.36%、0.04、0.065、0.06h、4.98%、0.08、0.11、0.06h 和 5.92%、0.06、0.08、0.13h。可见,较于传统调参法,BIC-KMean 算法能较好地反应 SWMM 不确定性参数在

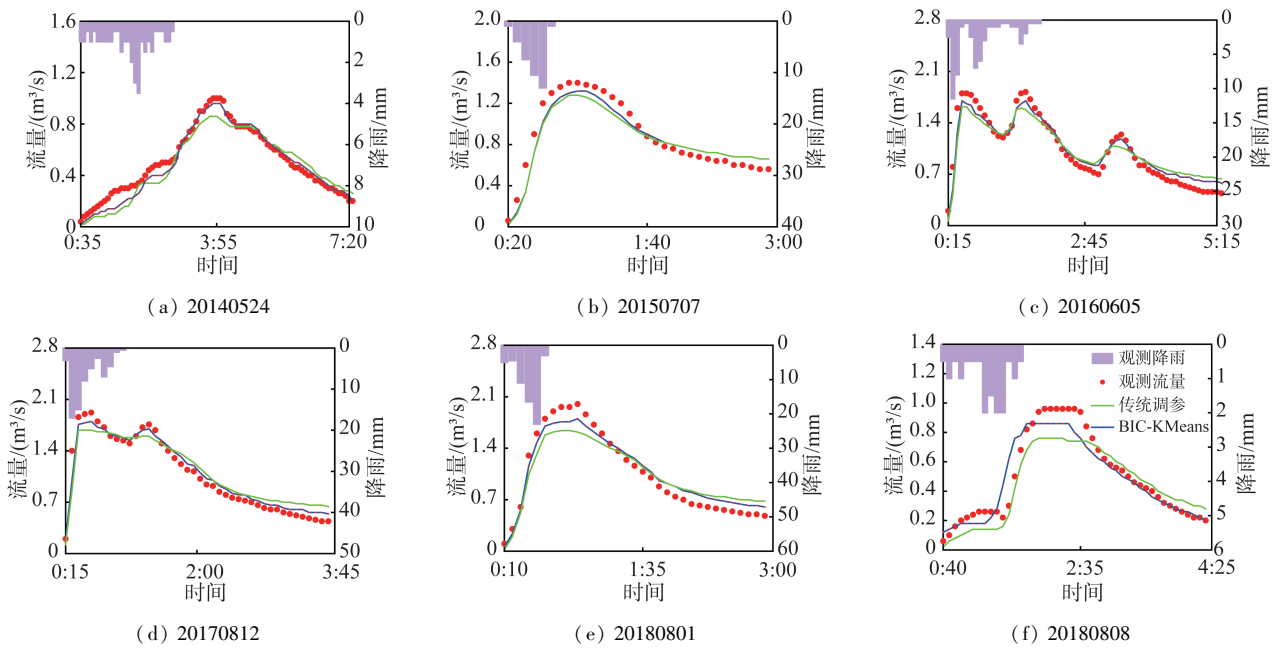


图7 S1各场次洪水SWMM模拟结果

Fig. 7 SWMM simulation results of different floods in S1

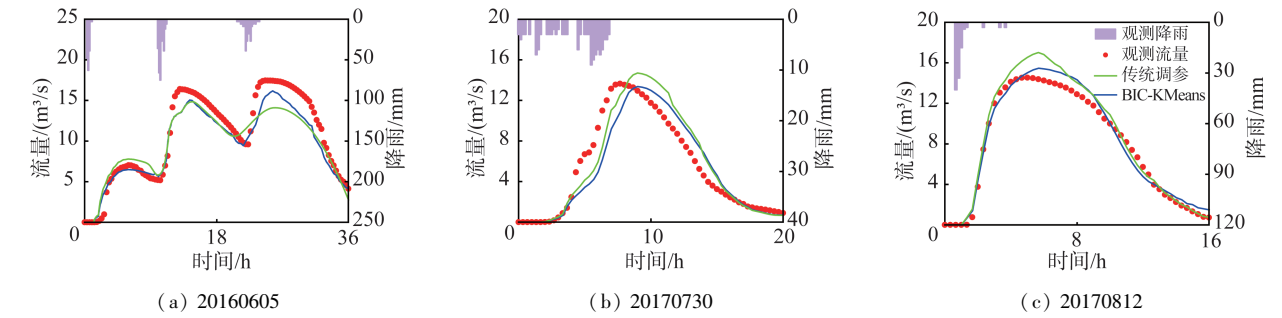


图8 S2各场次洪水SWMM模拟结果

Fig. 8 SWMM simulation results of different floods in S2

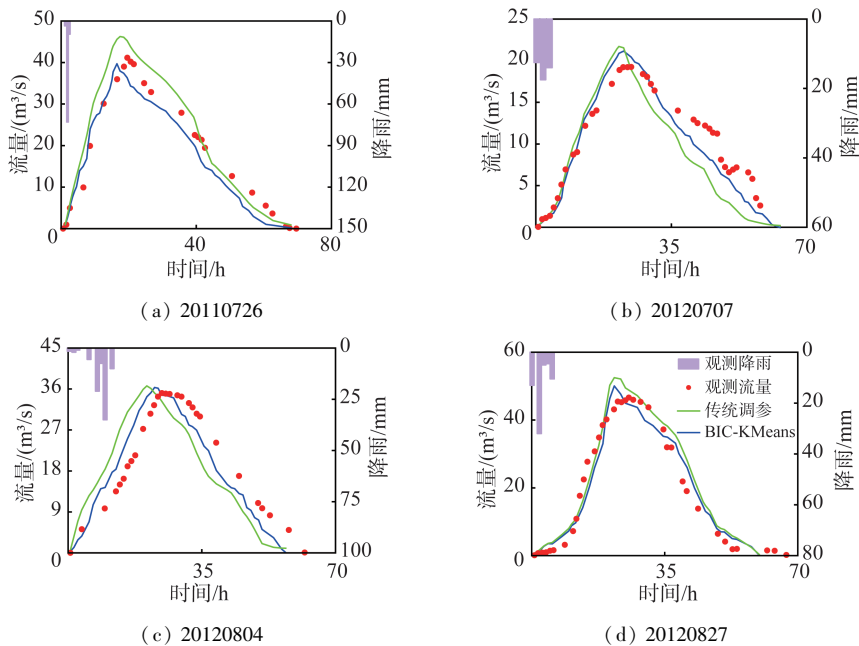


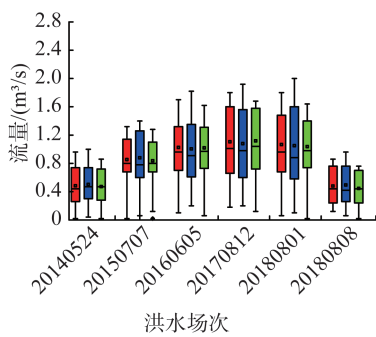
图9 S3各场次洪水SWMM模拟结果

Fig. 9 SWMM simulation results of different floods in S3

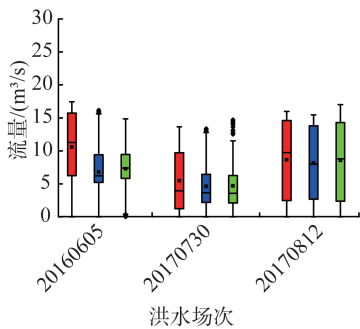
不同城市功能区上的分布规律,使 SWMM 模拟更加符合实际的下垫面情况。

为了进一步研究不同空间尺度对 SWMM 模拟结果的影响,对模拟流量和观测流量序列绘制箱线图(图 10)和概率分布图(图 11)。由图 10(a)可见,6 场洪水事件的模拟和观测流量序列并无异常值产生,说明模拟结果偏离程度很小;模拟均值、中位数、箱体分布范围、1.5 倍四分位差与观测值都非常接近,模拟结果精度较高。由图 10(b)可见,洪水事件 20160605、20170812 的模拟流量序列在上四分位范围外出现异常值,说明在个别时刻的流量模拟值偏大很多,同时 20160605、20170812 场次模拟流量箱体分布范围相差较大,只有 20170730 场次模拟结果相对较好。由图 10(c)可见,4 场洪水事件模拟流量与观测流量的箱体范围均不一致,这是峰现时间误差太大导致模拟流量过程整体偏移造成的。

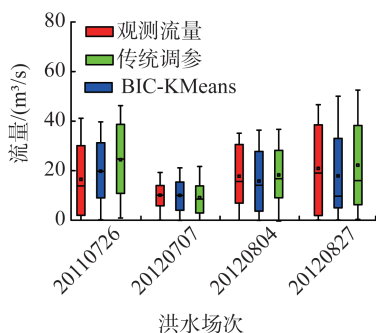
■ 观测流量 ■ 传统调参 ■ BIC-KMeans



(a) S1



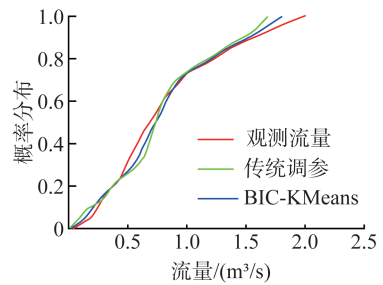
(b) S2



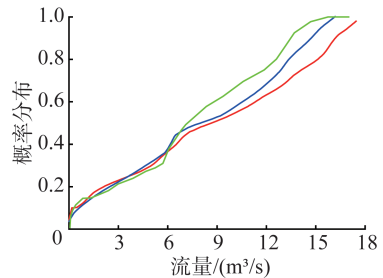
(c) S3

图 10 SWMM 模拟洪水流量箱线图

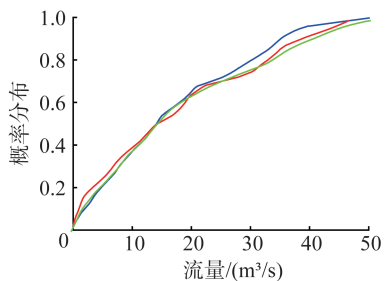
Fig. 10 Boxplots of SWMM simulating flood discharge



(a) S1



(b) S2



(c) S3

图 11 SWMM 模拟洪水流量概率分布

Fig. 11 Probability distribution of SWMM simulating flood discharge

由图 11(a) ~ (c) 可见,基于 BIC-KMeans 算法的 SWMM 在不同空间尺度的模拟流量和观测流量概率分布曲线较为接近,说明 BIC-KMeans 算法在 SWMM 建模过程中时间效率更高。较小空间尺度集水区(S1)模拟流量与观测流量概率分布曲线吻合程度较好,较大空间尺度集水区(S2、S3)概率分布曲线吻合程度较差。

总体而言,基于 BIC-KMeans 算法和 SWMM 的城市雨洪快速模拟方法在 S1、S2、S3 3 种不同空间尺度的集水区通过了验证,相比于传统调参法, N_{SE} 分别提高了 0.065、0.11、0.08。但从应用效果来看,较小尺度集水区适用性最好,较大尺度集水区适用性较差,模拟精度会随着研究区空间尺度增大而减小,模型的空间尺度依赖性仍需深入研究。

4 结论

a. 提出了基于 BIC-KMeans 算法和 SWMM 的城市雨洪模型快速模拟方法,基于观测降雨流量数

据,分别在郑州大学主校区、郑州市金水区南部、郑州市中心城区 3 个集水区进行了验证, R_E 均小于 12%、 N_{SE} 均大于 0.75、 R^2 均大于 0.80,说明提出的方法适用性较好。

b. DI、DP、NI、NP、MaxI、MinI、DC 等 7 个 SWMM 不确定性参数的参数聚类取值与城市功能区有关,不同城市功能区参数聚类取值由小到大依次为:工商业区、居民区、公共用地区。

c. 城市雨洪模型模拟精度会随着集水区空间尺度增大而变小,峰现时间误差在较小尺度集水区雨洪模拟中是分钟级,在较大尺度为小时级。

参考文献:

[1] 刘业森,刘媛媛,李敏,等. 降雨数据空间分辨率在城市流域洪峰变化分析中的影响[J]. 地球信息科学学报, 2022,24(7):1326-1336. (LIU Yesen, LIU Yuanyuan, LI Min, et al. Influence of spatial resolution of rainfall data on flood peak in urban areas[J]. Journal of Geo-information Science, 2022,24(7):1326-1336. (in Chinese))

[2] 杜纤. 基于 SWMM 模型的城市暴雨洪涝精细化模拟研究[D]. 郑州:郑州大学,2020.

[3] 郑德凤,高敏,李钰,等. 基于 GIS 的大连市暴雨洪涝灾害综合风险评估[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022,50(3):1-8. (ZHENG Defeng, GAO Min, LI Yu, et al. Comprehensive risk assessment of rainstorm-flood disaster in Dalian City based on GIS[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3): 1-8. (in Chinese))

[4] 任宏昌,张恒德. 郑州“7·20”暴雨的精细化特征及主要成因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(5):1-9. (REN Hongchang, ZHANG Hengde. Refined features and main causes of “7·20” rainstorm in Zhengzhou [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022,50(5):1-9. (in Chinese))

[5] 周波涛,钱进. IPCC AR6 报告解读:极端天气气候事件变化[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(06): 713-718. (ZHOU Botao, QIAN Jin. Changes of weather and climate extremes in the IPCC AR6[J]. Climate Change Research, 2021, 17(6): 713-718. (in Chinese))

[6] HU Caihong, LIU Chengshuai, YAO Yichen, et al. Evaluation of the impact of rainfall inputs on urban rainfall models: a systematic review [J]. Water, 2020, 12(9):2484.

[7] 苟娇娇,缪驰远,徐宗学,等. 大尺度水文模型参数不确定性分析的挑战与综合研究框架[J]. 水科学进展, 2022,33(2):327-335. (GOU Jiaojiao, MIAO Chiyuan, XU Zongxue, et al. Parameter uncertainty analysis for large-scale hydrological model: challenges and comprehensive study framework [J]. Advances in Water Science, 2022,33(2):327-335. (in Chinese))

[8] 丁晶,王文圣,金菊良. 论水文学中的尺度分析[J]. 四川大学学报(工程科学版)2003(3):9-13. (DING Jing, WANG Wensheng, JIN Juliang. Scale analysis in hydrology [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2003(3):9-13. (in Chinese))

[9] REGGIANI P, HASSANIZADEH S M, SIVAPALAN M, et al. A unifying framework for watershed thermodynamics: constitutive relationships [J]. Advances in Water Resources, 1999, 23(1): 15-39.

[10] 晁丽君,张珂,陈新宇,等. 基于多源降水融合驱动的 WRF-Hydro 模型在中小河流洪水预报中的适用性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 55-64. (CHAO Lijun, ZHANG Ke, CHEN Xinyu, et al. Applicability of WRF-Hydro model based by multi-source precipitation merging in flood forecasting for small and medium-sized watersheds[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3): 55-64. (in Chinese))

[11] 胡伟贤,何文华,黄国如,等. 城市雨洪模拟技术研究进展[J]. 水科学进展, 2010, 21(1): 137-144. (HU Weixian, HE Wenhua, HUANG Guoru, et al. Review of urban storm water simulation techniques[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(1): 137-144. (in Chinese))

[12] 梅超. 城市水文水动力耦合模型及其应用研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2019.

[13] 王京晶,徐宗学,赵刚,等. 基流分割对城市雨洪模拟不确定性分析的影响[J]. 水资源保护, 2022, 38(5): 65-71. (WANG Jingjing, XU Zongxue, ZHAO Gang, et al. Impact of baseflow separation on uncertainty analysis of urban storm water simulation [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5): 65-71. (in Chinese))

[14] 袁绍春,王怀鋈,吕波,等. 基于 InfoWorks ICM 模型的山地城市老旧建筑小区海绵化改造方案设计及评估[J]. 水资源保护, 2020, 36(5): 43-49. (YUAN Shaochun, WANG Huaiyun, LYU Bo, et al. Design and evaluation of sponge city reconstruction scheme of old building district in mountainous city based on InfoWorks ICM model [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5): 43-49. (in Chinese))

[15] 胡彩虹,姚依晨,刘成帅,等. 降雨雨型对城市内涝的影响[J]. 水资源保护, 2022, 38(6): 15-21. (HU Caihong, YAO Yichen, LIU Chengshuai, et al. Effect of rainfall patterns on urban waterlogging [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6): 15-21. (in Chinese))

[16] 陈文龙,徐宗学,张印,等. 高密度城市暴雨洪涝治理理论框架及其应用研究[J]. 水利学报, 2022, 53(7): 769-778. (CHEN Wenlong, XU Zongxue, ZHANG Yin, et al. Theoretical framework and application of urban rainstorm flood control in high-density cities [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(7): 769-778. (in Chinese))

[17] WU Zening, MA Bingyan, WANG Huiliang, et al. Identification of sensitive parameters of urban flood model

- based on artificial neural network [J]. Water Resources Management, 2021, 35(7): 2115-2128.
- [18] 袁绍春, 李迪, 陈垚, 等. 基于 BP 神经网络算法的 SWMM 参数自动率定方法 [J]. 中国给水排水, 2021, 37(21): 125-130. (YUAN Shaochun, LI Di, CHEN Yao, et al. Automatic calibration procedure of storm water management model parameters based on back propagation neural network algorithm [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(21): 125-130. (in Chinese))
- [19] 侯精明, 张兆安, 马利平, 等. 基于 GPU 加速技术的非结构流域雨洪数值模型 [J]. 水科学进展, 2021, 32(4): 567-576. (HOU Jingming, ZHANG Zhaoan, MA Liping, et al. Unstructured numerical model for rainfall-runoff process in watershed based on GPU acceleration technology [J]. Advances in Water Science, 2021, 32(4): 567-576. (in Chinese))
- [20] 杨森雄, 卿晓霞, 朱韵西. 一种耦合 SWMM 计算的参数自动率定算法及实现 [J]. 给水排水, 2021, 57(1): 148-154. (YANG Senxiong, QING Xiaoxia, ZHU Yunxi. An auto-calibration method by coupling SWMM with optimization algorithm and its implementation [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57(1): 148-154. (in Chinese))
- [21] 李月玉, 周建奕, 蒋汝成, 等. 基于 K 均值聚类分析的流域洪水实时分类修正 [J]. 中国农村水利水电, 2016(12): 160-162. (LI Yueyu, ZHOU Jianyi, JIANG Rucheng, et al. Classified correction of real-time flood forecasting based on K -cluster analysis [J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(12): 160-162. (in Chinese))
- [22] 尤烽骅, 余玉聪, 刘招, 等. 基于联合改进人工蜂群及 K 均值聚类算法的洪水分类研究 [J]. 水文, 2021, 41(4): 40-47. (YOU Fenghua, YU Yucong, LIU Zhao, et al. Research on flood classification based on joint improved artificial bee colony and K means clustering algorithms [J]. Journal of China Hydrology, 2021, 41(4): 40-47. (in Chinese))
- [23] HU Caihong, ZHANG Xueli, LI Changqing, et al. Real-time flood classification forecasting based on K -means + clustering and neural network [J]. Water Resources Management, 2022, 36: 103-117.
- [24] SUN Yue, LIU Chengshuai, DU Xian, et al. Urban storm flood simulation using improved SWMM based on K -means clustering of parameter samples [J]. Journal of Flood Risk Management, 2022, 15(4): e12826.
- [25] WARSTA L, NIEMI T J, TAKA M, et al. Development and application of an automated subcatchment generator for SWMM using open data [J]. Urban Water Journal, 2017, 14(9): 954-963.
- [26] 梅超, 刘家宏, 王浩, 等. SWMM 原理解析与应用展望 [J]. 水利水电技术, 2017, 48(5): 33-42. (MEI Chao, LIU Jiahong, WANG Hao, et al. Introduction of basic principle and application prospect for SWMM [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(5): 33-42. (in Chinese))
- [27] 张俊, 冯慧娟, 周毅, 等. SWMM 径流量计算参数敏感性分析 [J]. 中国农村水利水电, 2022(8): 1-5. (ZHANG Jun, FENG Huijuan, ZHOU Yi, et al. Analysis of the runoff calculation parameters sensitivity in SWMM [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(8): 1-5. (in Chinese))
- [28] 钱堃, 包为民, 李偲松, 等. K 均值聚类分析方法在洪水预报中的应用 [J]. 水电能源科学, 2012, 30(5): 41-44. (QIAN Kun, BAO Weimin, LI Kesong, et al. Application of K -means cluster analysis in flood forecasting [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(5): 41-44. (in Chinese))
- [29] 刘可新, 包为民, 阙家骏, 等. 基于主成分分析的 K 均值聚类法在洪水预报中的应用 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2015, 48(4): 447-450. (LIU Kexin, BAO Weimin, QUE Jiajun, et al. Application of K -means cluster method to flood forecasting based on principal component analysis [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2015, 48(4): 447-450. (in Chinese))
- [30] HAN S, COULIBALY P. Bayesian flood forecasting methods: a review [J]. Journal of Hydrology, 2017, 551: 340-351.
- [31] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models part I: a discussion of principles [J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282-290.
- [32] 胡彩虹, 刘成帅, 李想, 等. 郑州市雨岛效应多方法集成评估及其量化研究 [J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 152-159. (HU Caihong, LIU Chengshuai, LI Xiang, et al. Multi-method integrated evaluation and quantitative study of rain island effect in Zhengzhou City [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 152-159. (in Chinese))
- [33] 王振亚, 姚成, 董俊玲, 等. 郑州“7·20”特大暴雨降水特征及其内涝影响 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 17-22. (WANG Zhenya, YAO Cheng, DONG Junling, et al. Precipitation characteristic and urban flooding influence of “7·20” extreme rainstorm in Zhengzhou [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3): 17-22. (in Chinese))
- [34] 申言霞. 基于本体的城市洪涝灾害脆弱性评估研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- [35] ICHIBA A, GIRES A, TCHIGUIRINSKAIA I, et al. Scale effect challenges in urban hydrology highlighted with a distributed hydrological model [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018, 22(1): 331-350.
- [36] ZAGHLOUL N A. Sensitivity analysis of the SWMM runoff-transport parameters and the effects of catchment discretization [J]. Advances in Water Resources, 1983, 6(4): 214-223.

(收稿日期: 2022-11-23 编辑: 王芳)