

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.03.012

不同暴雨情景下的城市内涝响应特征分析

赖成光^{1,2}, 廖耀星¹, 王兆礼^{1,2}

(1. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510641;
2. 人工智能与数字经济广东省实验室(广州), 广东 广州 510330)

摘要:针对近年来频发的城市暴雨内涝灾害问题,以广州长湓地区为例,构建了基于SWMM和LISFLOOD-FP的内涝耦合模型,结合历史暴雨事件提出一种新的短历时暴雨过程设计方法,在此基础上设计了114种暴雨情景,探讨了不同暴雨雨型和集中度条件下的城市内涝响应特征。结果表明:单峰雨型下的溢流和淹没情况比双峰和均匀型要高;在单峰雨型中,峰后型暴雨的溢流峰值最高,峰中和峰后型暴雨的溢流总量较大,峰后型暴雨导致的整体淹没情况较严重;重现期小于50 a时芝加哥型($r=0.7$)暴雨导致的淹没情况最严重,而重现期大于50 a时单峰Ⅱ型(峰后型)暴雨的淹没情况最严重;重现期为100 a时单峰Ⅱ型的淹没范围及水深比芝加哥型($r=0.7$)暴雨分别高8%和64%;暴雨集中度每上升一个等级,溢流及淹没情况明显加重;目前常用的芝加哥雨型在一定情况下存在低估内涝的风险,建议在内涝分析时进一步考虑更危险的雨型以及暴雨的集中度。

关键词:城市内涝;内涝耦合模型;设计暴雨;暴雨雨型;集中度;长湓地区

中图分类号:TU992 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2023)03-0101-08

Analysis of urban waterlogging response characteristics under different rainstorm rainfall scenarios // LAI Chengguang^{1,2}, LIAO Yaoxing¹, WANG Zhaoli^{1,2} (1. School of Civil Engineering & Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 2. Guangdong Artificial Intelligence and Digital Economy Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 510330, China)

Abstract: Aiming at the problem of frequent urban rainstorm and waterlogging disasters in recent years, a waterlogging coupled model based on SWMM and LISFLOOD-FP was constructed in Changban Area of Guangzhou as an example. Based on the historical rainstorm events, a new design method of short duration rainstorm process was proposed. On this basis, 114 rainstorm scenarios were designed, and the urban waterlogging response characteristics under different rainstorm rainfall patterns and concentration ratios were discussed. The results show that the overflow and inundation situation under the single peak rain pattern is higher than that under the double peak and uniform patterns. In the single peak rain pattern, the overflow peak of the post peak rainstorm is the highest, the total overflow amount of the mid peak rainstorm and post peak rainstorm is large, and the overall inundation caused by the post peak rainstorm is relatively serious. The inundation caused by Chicago type ($r=0.7$) rainstorm is the most serious when the return period is less than 50 years, and the inundation caused by single peak type II (post peak type) rainstorm is the most serious when the return period is more than 50 years. The inundation range and water depth of single peak type II with a 100-year return period are 8% and 64% higher than those of Chicago type ($r=0.7$) rainstorm respectively. Every level rising in rainstorm concentration ratio, the overflow and inundation will be significantly aggravated. At present, the commonly used Chicago rain pattern underestimates the risk of waterlogging under certain circumstances. It is suggested that the more dangerous rain pattern and the rainstorm concentration ratio should be further considered in waterlogging analysis.

Key words: urban waterlogging; waterlogging coupled model; design storm; rainstorm rainfall pattern; concentration ratio; Changban Area

基金项目:国家重点研发计划(2021YFC3001000);国家自然科学基金(51709117,51879107,U1911204)

作者简介:赖成光(1986—),男,教授,博士,主要从事城市雨洪研究。E-mail: laich@scut.edu.cn

通信作者:王兆礼(1979—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: wangzhli@scut.edu.cn

在全球气候变化和快速城市化的背景下,因暴雨造成的城市内涝灾害频繁发生^[1-3]。随着人口和财产不断向城市建成区聚集,遭遇同等规模暴雨情况下所造成的内涝损失比以往更大^[4-5]。2010—2018年,我国每年受淹或产生内涝的城市数量均超过80座,受影响人口高达5 000万~2亿,所造成的直接经济损失平均达到千亿元^[6]。例如,2021年7月,郑州市遭遇的极端暴雨,造成的特大涝灾导致409亿元直接损失和380人死亡或失踪;2020年5月22日,广州遭受了特大暴雨袭击并引发全城大面积内涝,全市直接经济损失超过100亿且造成4人死亡;2012年7月21日,北京发生特大暴雨引发内涝和次生灾害致使79人死亡。可见,暴雨内涝已严重威胁到人们的正常生活,给国家和社会造成严重的人员伤亡及财产损失^[7-11]。科学地认识城市暴雨内涝灾害的形成机理及其演变规律已成为我国城市内涝防御工作亟待解决的问题。

暴雨是引发城市内涝的直接原因,除暴雨雨量外,反映不同时段雨强变化的雨型也是影响内涝严重程度的关键因素。已有研究发现,即使雨量相同,不同的雨型会导致内涝淹没范围和水深产生较大差异^[12]。目前大部分研究采用较为单一的雨型,其中芝加哥雨型的使用最为广泛^[13-14]。例如:侯精明等^[15]探讨了不同雨峰系数的芝加哥雨型对内涝的影响,发现重现期小于20 a时,雨峰时间越早积水总量越大,而重现期大于20 a时,雨峰越晚所产生的积水总量和积水总面积越大;童旭等^[16]使用芝加哥雨型却得到与之近乎相反的结论;Chen等^[17-18]分别利用芝加哥雨型和历史极端降雨同样发现雨峰时间越晚,淹没水深和总面积均越大;Mu等^[19]的研究则发现雨峰位置对最大淹没面积和水深的影响不一致。以上研究表明,雨峰在不同位置所产生的内涝效果是不一样的。然而,上述研究所采用的芝加哥雨型是单峰雨型,暴雨峰值过于尖瘦,往往与实际雨型相差甚远,仅采用单一的芝加哥雨型可能会导致模拟结果不够准确。事实上,已有研究根据暴雨各时段雨量变化特征及雨峰位置归纳出7种主要雨型^[20],这些雨型能基本反映单场暴雨雨强的变化过程,与大部分暴雨的实际雨型较为相符。但这7种不同雨型对内涝产生何种差异,目前还未有太多深入的研究。此外,同一种雨型的雨峰集中度也存在不同^[21],其差异对内涝产生多大影响,目前还没有得到关注。

鉴于此,本文对不同暴雨情景下的城市内涝响应特征进行研究,以街区尺度的广州市长湓地区为例,构建内涝数值模拟模型,系统分析不同设计暴雨

雨型和集中度特征对城市管网溢流和内涝淹没的影响及其量化关系,以期为城市内涝预警预报及防灾减灾工作提供参考。

1 研究区概况与数据来源

研究区位于广州市天河区长湓地铁站周边区域,是广州市典型的易涝区域,面积约1.61 km²(图1)。所采用的数据来源如下:近年的排水管网、土地利用类型以及8 m×8 m和5 m×5 m两种高程数据(简称DEM8和DEM5)来源于广州市规划和自然资源局;广州市五山站1954—2012年逐时暴雨资料来源于广东省气象局;2018年6月7—8日逐5 min实测暴雨数据来源于广州市气象局;遥感影像通过ArcGIS对谷歌地图进行截取。对于高程数据,在SWMM子汇水区坡度计算时采用DEM8;DEM5覆盖范围为研究区南部的易涝区域,其精度更高,用于内涝的二维精细化模拟。



图1 研究区遥感影像

Fig. 1 Remote-sensing image of study area

2 研究方法

2.1 SWMM与LISFLOOD-FP模型

暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM)是由美国环保署于20世纪70年代开发,用来模拟单次或连续降雨下水量和水质的模型,目前已经升级到5.1版本^[22]。SWMM包括地表产流、汇流和管网汇流等模块。地表产流模块中提供3种下渗模型,其中霍顿模型是模拟土壤水分入渗常用的经验模型;地表汇流计算采用非线性水库法,联立连续方程和曼宁方程求解^[23]。管网

汇流模块中提供恒定流、运动波和动力波 3 种方法对水流进行模拟,其中动力波法更适合复杂水流的计算。由于 SWMM 具有功能较全面、开源和免费等优点,被广泛用于城市排水规划、分析和设计^[24-25]。

LISFLOOD-FP 模型是由英国布里斯托尔大学开发的一种基于栅格的洪水模拟模型,可以输出每个时间步长和网格中多个洪水参数(如水深、流速等)的栅格地图,从而确定径流的时空演变^[26-27]。该模型包括两大核心求解器,分别是一维河道求解器和二维洪泛区求解器,对应模拟洪水波沿河道和泛洪区的传播。模型主要基于连续性方程和动量方程模拟洪水传播。对于一维河道模拟是通过消除动量方程中的局部加速度、对流加速度和压力项来简化一维圣维南方程,得到连续性方程和动量方程。

2.2 耦合模型构建与验证

尽管 SWMM 自带管网汇流模块,但缺乏地表漫流模块,无法提供更详细的淹没范围和水深等信息^[28]。LISFLOOD-FP 模型的优点是能根据给定的溢流信息模拟积水在地表的运动,提供了径流的时空演变信息,但无法考虑管网汇流信息。结合 SWMM 和 LISFLOOD-FP 各自优点,对两模型进行松散耦合,即由 SWMM 导出溢流点空间位置及溢流过程,输入 LISFLOOD-FP 模型开展积水二维模拟,最后输出特定时长下的淹没范围及水深信息^[26,29]。

为提高模型运行效率及精度,利用 ArcGIS 对复杂的管网数据进行概化处理,保留主干排水管网,最终概化得到 654 个检查井、653 条管线,并划分 91 个汇水区。SWMM 参数取值参考 SWMM 用户手册^[22] 及类似研究区^[15,17,26-27] 确定。选取广州市 2018 年 6 月 7—8 日(20180607 场次暴雨)和 2018 年 8 月 28—29 日(20180828 场次暴雨)的实测暴雨水位资料对 SWMM 进行验证,结果如图 2 所示。由图 2 可见,出水口水位与降雨的变化趋势总体吻合,出水口水位峰现时间均比雨峰时间滞后约 5 min,与一般城市雨洪规律相符。SWMM 在出水口的模拟水位和实测水位变化趋势总体吻合,水位峰值接近,两场暴雨模拟纳什效率系数 NSE 值分别达到 0.67 和 0.84,验证效果良好,表明参数及模型合理。进一步对 2018 年 6 月 7—8 日二维淹没模拟结果进行验证,结果见图 3。由图 3 可见,淹没范围与实测积水范围大致符合。经过实地调查获知,邻近长湴地铁站 C 出口的淹没水深基本在 0.2~0.3 m,最大水深达 0.47 m,模拟结果与现场实际情况较为相符,并且淹没模拟结果与前人的结果基本一致^[28,30-31]。

以上表明模型合理可靠,可用于下一步内涝数值模拟与分析。

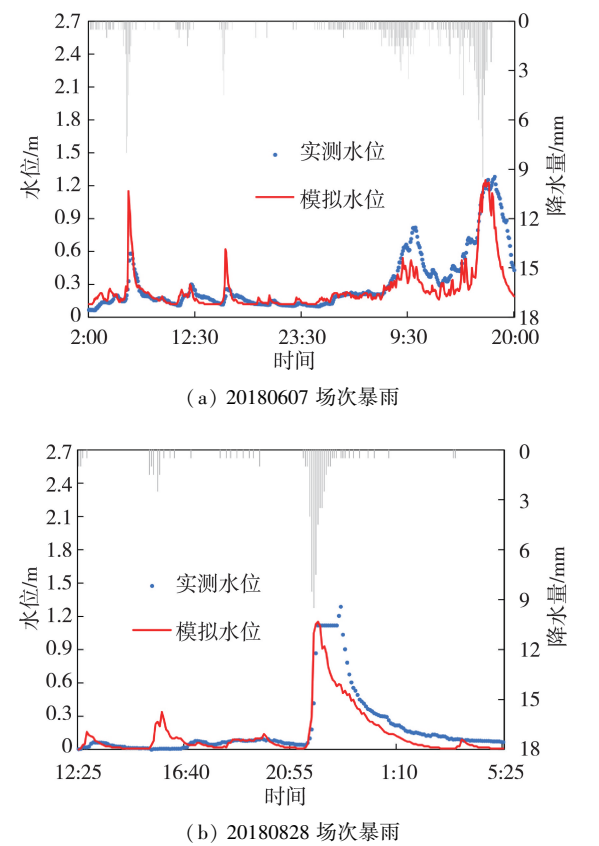


图 2 出水口模拟水位与实测水位对比
Fig. 2 Comparison between simulated and measured water depths in outfall

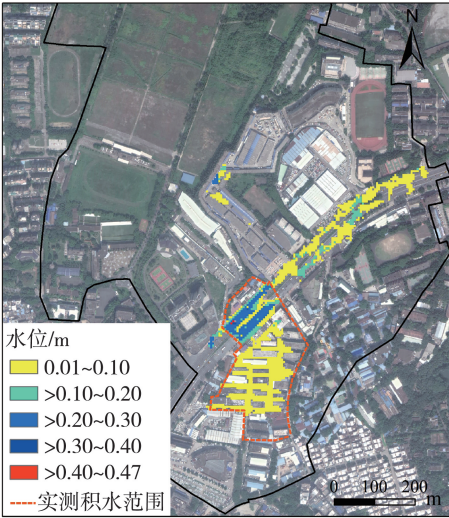


图 3 实测与模拟淹没范围
Fig. 3 Simulated and actual submerged range

2.3 设计暴雨过程

如何选择符合当地实际的设计暴雨过程是提高数值模拟精度的关键因素。为此,首先对研究区历史暴雨事件的雨型进行识别与统计,然后根据雨型统计结果推求不同雨型特征,以获取能反映研究区

实际暴雨特点的设计暴雨过程。对研究区附近的五山站 1954—2012 年逐时降雨资料进行筛选,参考相关研究^[32-33],以相邻间隔大于 2 h 且单场降水量大于 50 mm 作为暴雨事件的筛选标准,共筛选出 213 场暴雨。每场暴雨均可被识别出 7 种典型雨型中的一种:Ⅰ型为单峰靠前,Ⅱ型为单峰靠后,Ⅲ型为单峰居中,Ⅳ型为均匀雨型,Ⅴ型为双峰一前一后,Ⅵ型为双峰靠前,Ⅶ型为双峰靠后^[20]。采用模糊识别法^[34-35]对 213 场暴雨进行雨型识别,得到Ⅰ型 81 场、Ⅱ型 17 场、Ⅲ型 47 场、Ⅳ型 1 场、Ⅴ型 7 场、Ⅵ型 57 场以及Ⅶ型 3 场。其中,单峰雨型(Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ)占 145 场,占比为 68.08%;均匀雨型(Ⅳ)1 场,占比为 0.47%;双峰雨型(Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ)为 67 场,占比为 31.46%。以上结果与类似研究区的结果相似^[32,34]。

在此基础上,结合当地历史降雨事件提出一种新的短历时暴雨过程设计方法。由于各历史暴雨事件的历时不完全相同,需对这些暴雨事件进行标准化处理。为统一标准,把历时统一取为 10 个时段,当降雨历时刚好为 10 h 时则每一时段对应 1 h,而对于历时不等于 10 h 的暴雨事件则通过插值处理划分为 10 个时段。这些暴雨事件被统一时段标准后,对某雨型下的历史暴雨事件取同一时段分配比例的平均值,可得到该雨型在某时段 j 的分配比例 y_j ,用向量 $\mathbf{Y}$ 表示某雨型各时段的最终分配结果,计算公式为

$$\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_{10}) \quad (1)$$

其中 $y_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij} \quad (j = 1, 2, \dots, 10)$

式中: x_{ij} 为第 i 场暴雨在 j 时段的雨量占总雨量的比例; n 为某一雨型下的暴雨场数(如历史暴雨为Ⅲ型的有 47 场,则 $n = 47$)。上述方法得到的暴雨只有 10 个时段,通过样条插值法平滑处理得到 120 个时段,最后得到逐分钟的 120 min 设计暴雨过程,其余历时可依此类推。

集中度指一定时间内降雨的聚集强度,根据参考文献[21],计算公式为

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n p_i^2}{(\sum_{i=1}^n p_i)^2} \times 100\% \quad (2)$$

式中: C 为集中度; p_i 为时段 i 的降水量。集中度以 10% 和 20% 为阈值可划分为均匀、较集中和集中 3 个等级。

将暴雨历时设置为 120 min,选取重现期 P 分别为 1 a、5 a、10 a、20 a、50 a 和 100 a 共 6 种条件,进行

情景设计。根据广州市水务局于 2018 年 9 月印发的《广州市排水管理办法实施细则》,可推算 1 a、5 a、10 a、20 a、50 a 和 100 a 重现期下 120 min 的总降水量分别为 65.88 mm、95.74 mm、109.90 mm、125.97 mm、144.82 mm 和 157.73 mm。由于识别的Ⅳ型雨型只有 1 场,代表性不足,因此把Ⅳ型的降雨分配设置为绝对均匀;对于 3 种单峰雨型分别设计 9%、15% 和 21% 共 3 种集中度;此外,还选取了不同峰值的芝加哥雨型(雨峰系数 r 分别为 0.3、0.48 和 0.7)作为对比。最后,考虑雨型和集中度特征,并参考团队前期研究^[35]共设计了 114 种暴雨情景,暴雨过程如图 4 所示。

3 结果与分析

3.1 总溢流量

流域排水管网中管井的溢流量变化可以反映排水系统在不同雨型下的整体溢流情况。利用 SWMM 模拟并输出不同设计暴雨下所有管井的总溢流量变化。图 5 为重现期为 100 a 时不同设计情景下总溢流量的峰值和峰现时间情况。由图 5(a)可见,重现期相同时,不同雨型导致的溢流量过程差异较大,溢流过程线与暴雨时程分配过程线相似。雨峰出现时间越早,起涝时间越早,其中单峰Ⅰ型的起涝时间和峰现时间最早。单峰雨型下的溢流峰值比其他雨型的高,如芝加哥型($r = 0.7$)比均匀Ⅳ型和双峰Ⅴ型分别高 28.7 m³/s 和 25.0 m³/s。芝加哥雨型下的溢流峰值较尖瘦,比本地单峰雨型的溢流峰值高。雨峰越靠后,溢流峰值有增加趋势,如同样是芝加哥雨型, $r = 0.7$ 时的溢流峰值比 $r = 0.3$ 高 14.9 m³/s。对各雨型的溢流总量分析发现,峰中和峰后型降雨的溢流总量较大,当重现期小于 20 a 时,峰后型溢流总量较大;而重现期大于 20 a 时,峰中型的溢流总量较大,且本地单峰雨型的溢流总量比芝加哥雨型大,如重现期为 100 a 时单峰Ⅲ型的溢流总量比单峰Ⅰ型和芝加哥峰中型分别高 11.3% 和 12.9%。由上述分析可知,不同暴雨峰值位置对管网的溢流呈现不同的影响规律。由于管网水流过程直接受到地表产汇流的影响,暴雨强度越高,地表产汇流强度加大,汇到管网的水量越多,当超过管网排水能力时即产生溢流。对于峰值靠前的降雨,前期峰值降雨部分用于填洼和下渗等损失,净雨峰值强度下降,导致地表产汇流强度降低,因此管网溢流情况相对较轻。对于峰值靠中后的降雨,前期雨量部分用于填洼和下渗等损失,且管网受前期雨量影响已经有一定充满度,当达到降雨峰值时刻,管网流量在原有基础上迅速增大,管段被充满并且出现溢流,因此管网溢流情况相对严重。

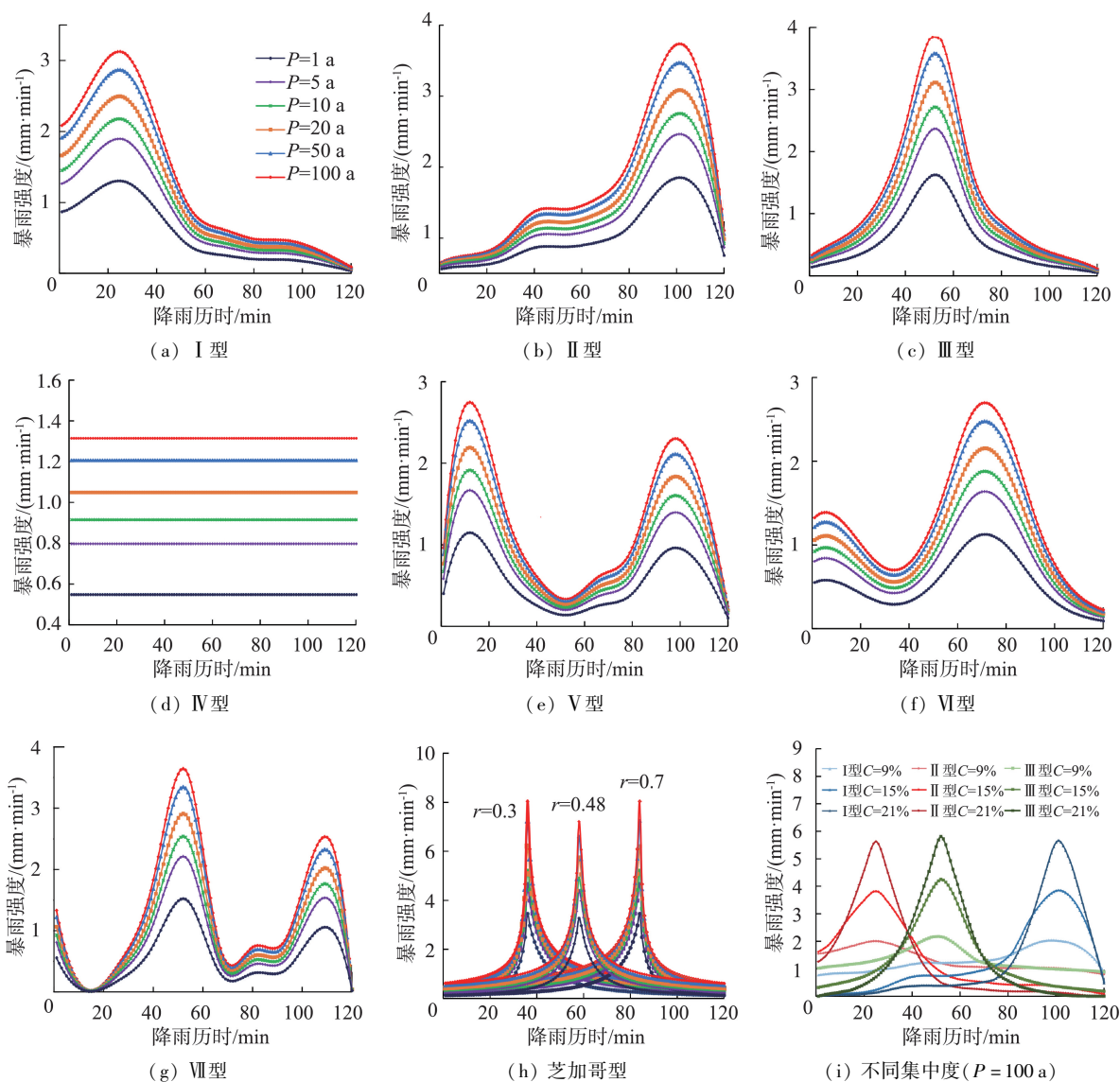


图 4 不同设计情景暴雨过程

Fig.4 Design rainstorm process of different design scenarios

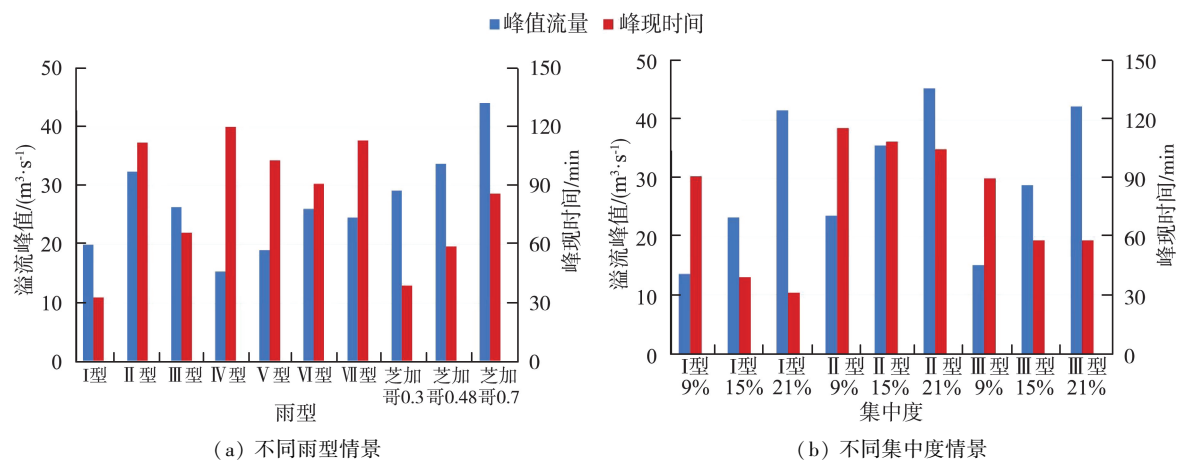


图 5 重现期为 100 a 时不同设计情景下总溢流量情况

Fig.5 Total overflow of different design scenarios under return period of 100 years

由图 5(b) 可见, 峰后型降雨在不同集中度下的溢流峰值均最高, 峰中型降雨的溢流总量均最大。在相同雨型下, 不同集中度也会导致溢流量产生极大差异。集中度越高, 溢流峰现时间有提前趋势; 集

中度每上升一个等级, 溢流总量及峰值明显增大, 集中度从 9% 增加到 15% 时, 各雨型的溢流峰值平均提升 71.3%, 溢流总量平均提升 47.5%; 集中度从 15% 到 21%, 溢流峰值平均提高 51.2%, 溢流总量

平均提升 18.6%。

3.2 内涝空间分布

为了分析不同暴雨雨型和集中度下的内涝淹没情况,利用构建的耦合模型,选取重现期为 100 a,分别输入 114 种设计暴雨情景进行模拟,得到不同雨

型及集中度下的淹没范围及水深,结果如图 6 和图 7 所示。总体而言,研究区的排水能力较弱,个别地区甚至在重现期为 1 a 的暴雨下就产生了积水。不同雨型在相同重现期下所导致的淹没范围和水深产生较大差异,单峰雨型比双峰和均匀型的淹没情况

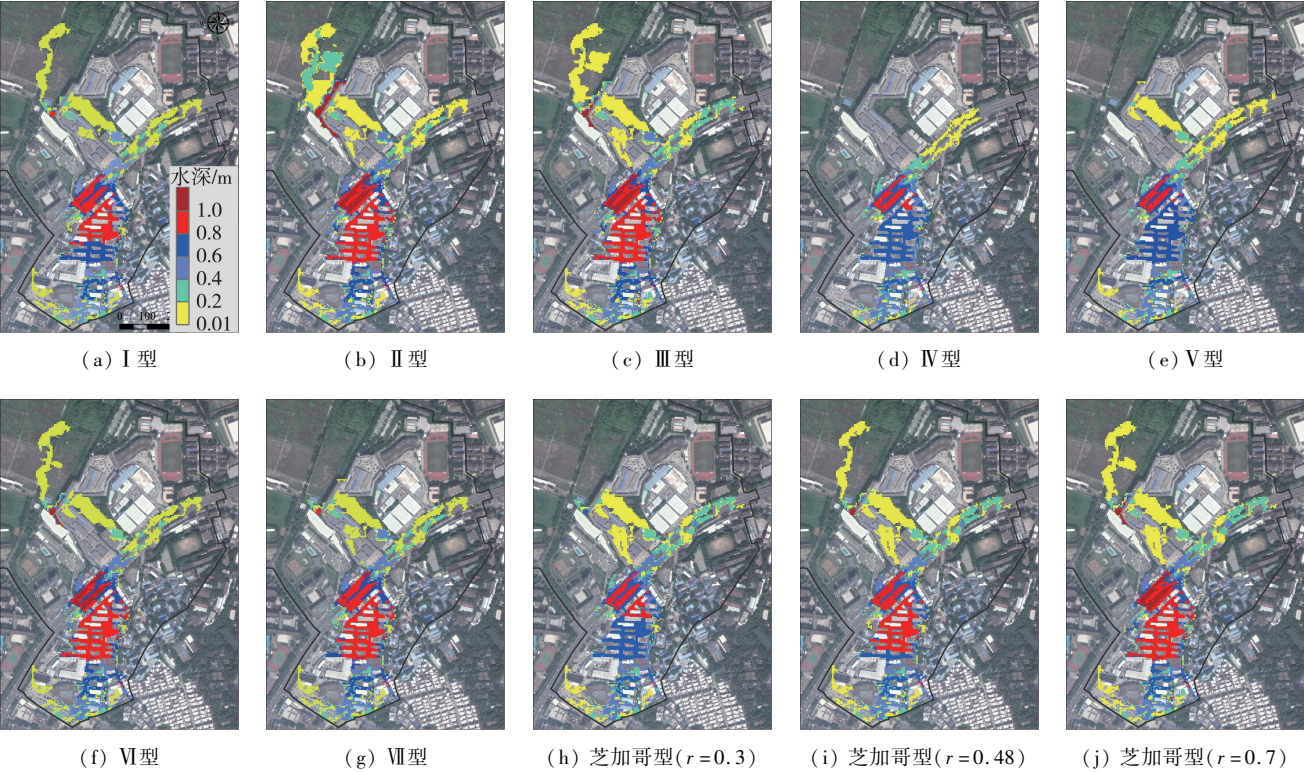


图 6 重现期为 100 a 时不同雨型下最大积水深度空间分布

Fig.6 Spatial distribution of maximum inundation depth with different rainfall patterns under return period of 100 years

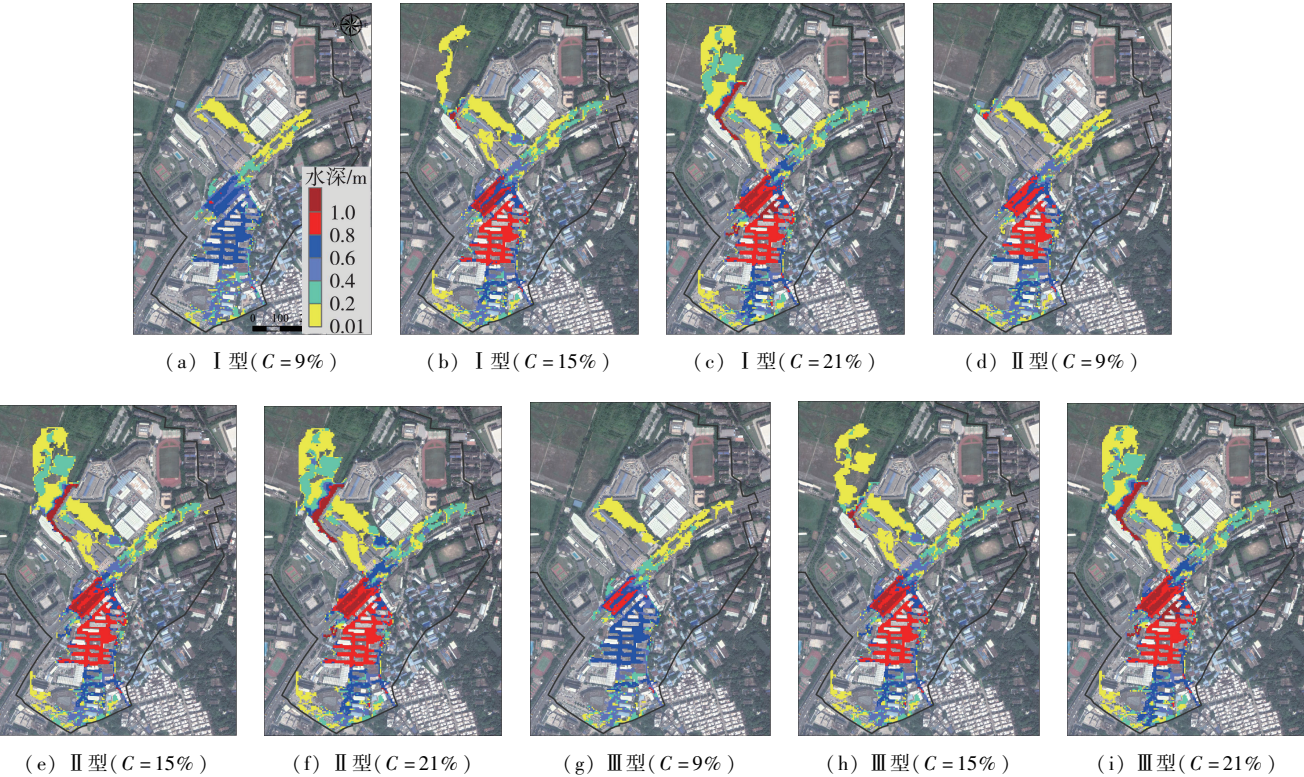


图 7 重现期为 100 a 时不同集中度下的最大积水深度空间分布

Fig.7 Spatial distribution of maximum inundation depth with different concentrations under return period of 100 years

更严重,如重现期为 100 a 时单峰Ⅱ型的淹没范围及水深比芝加哥型($r=0.7$)分别高 0.9 hm²(约 8%)和 0.94 m(约 64%)。

由图 7 可见,对于不同集中度,其值越高则淹没情况越严重,集中度每上升一个等级,最大淹没范围及水深均明显增加。如在重现期为 100 a 时雨型Ⅱ的暴雨下,当集中度为 9% 时其淹没范围仅为 8.42 hm²,而当集中度为 21% 时其淹没范围增加到 14.37 hm²,提高了 71% 左右;而在相同集中度下,单峰Ⅱ型的淹没情况比其他单峰雨型更严重,如雨型Ⅱ在 9%、15% 和 21% 3 种集中度的淹没范围分别比雨型Ⅰ大 0.77 hm²(约 10%)、2.4 hm²(22%)和 0.39 hm²(3%)。

上述分析表明,即使暴雨重现期相同,但在不同雨型和集中度条件下所造成的内涝情况差异较大。单峰峰后型的降雨导致的溢流峰值较高,使得淹没情况比其他雨型更严重。而目前常用的芝加哥雨型在高重现期下并非是最危险的雨型,如在重现期为 100 a 的高重现期时单峰Ⅱ型和Ⅲ型引发的内涝更为严重。由于重现期为 100 a 往往是洪涝评估和防灾减灾工作开展的常用参考标准,仅使用芝加哥雨型可能会低估内涝产生的风险。因此,建议在内涝分析和风险评估时,除了考虑芝加哥雨型外,需结合当地实际考虑其他更危险的雨型以及暴雨的集中度情况。

4 结 论

a. 基于 SWMM 与 LISFLOOD-FP 构建广州市长湓地区内涝模拟耦合模型,经验证,所构建模型具有良好的适用性、可靠性;提出一种新的短时暴雨过程设计方法,设计了 114 种暴雨情景,能较好地反映当地历史暴雨特征。

b. 重现期相同时,不同暴雨雨型和不同集中度下的管网溢流情况有较大差异。单峰雨型下的溢流峰值总量及峰值比双峰和均匀型的高,峰后型降雨的溢流峰值最高。峰中和峰后型降雨的溢流总量较大,当重现期小于 20 a 时,峰后型溢流总量较大;而重现期大于 20 a 时,峰中型的溢流总量较大,且本地单峰雨型的溢流总量比芝加哥雨型大。暴雨集中度每上升一个等级,溢流总量及峰值明显增大。

c. 重现期相同时,不同暴雨雨型和不同集中度下的淹没范围和水深差异明显。单峰雨型比其他雨型的淹没情况更严重。峰值靠后的单峰雨型导致的整体淹没情况较严重,其中单峰Ⅱ型和芝加哥型($r=0.7$)是导致淹没情况最严重的两种雨型。低重现期下($P\leq 50$ a)的芝加哥型($r=0.7$)的淹没情况最严重;高重现期下($P>50$ a),单峰Ⅱ型的淹没情况

最严重;重现期为 100 a 时单峰Ⅱ型的淹没范围及水深比芝加哥型($r=0.7$)分别高 8% 和 64%。暴雨集中度越高,内涝的淹没范围和水深越大,在相同集中度下,雨型Ⅱ的淹没情况比其他单峰雨型更严重。

d. 当前常用的芝加哥雨型在一定情况下存在低估内涝的风险,建议在内涝分析时进一步考虑更危险的雨型以及暴雨的集中度情况,从而更全面、科学评估内涝灾害的影响。

参考文献:

- [1] 黄国如,陈易德. 高度城镇化背景下珠三角地区降雨结构时空演变特征分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 82-90. (HUANG Guoru, CHEN Yisi. Analysis of temporal and spatial evolution characteristics of rainfall structure in the Pearl River Delta area under background of high urbanization[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 82-90. (in Chinese))
- [2] 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))
- [3] BLOESCHL G, KISS A, VIGLIONE A, et al. Current European flood-rich period exceptional compared with past 500 years[J]. Nature, 2020, 583(7817): 506-566.
- [4] 李超超,程晓陶,申若竹,等. 城市化背景下洪涝灾害新特点及其形成机理[J]. 灾害学, 2019, 34(2): 57-62. (LI Chaochao, CHENG Xiaotao, SHEN Ruozhu, et al. New Characteristics and formation mechanism of flood and waterlogging disasters in the context of rapid urbanization[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(2): 57-62. (in Chinese))
- [5] TELLMAN B, SULLIVAN J A, KUHN C, et al. Satellite imaging reveals increased proportion of population exposed to floods[J]. Nature, 2021, 596(7870): w03695.
- [6] 中华人民共和国水利部. 2018 年中国水旱灾害公报[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2019.
- [7] 徐宗学,叶陈雷. 城市暴雨洪涝模拟:原理、模型与展望[J]. 水利学报, 2021, 52(4): 381-392. (XU Zongxue, YE Chenlei. Simulation of urban flooding/waterlogging processes: principle, models and prospects[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(4): 381-392. (in Chinese))
- [8] 王艳艳,李娜,王杉,等. 洪灾损失评估系统的研究开发及应用[J]. 水利学报, 2019, 50(9): 1103-1110. (WANG Yanyan, LI Na, WANG Shan, et al. Development and application of flood damage assessment system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(9): 1103-

1110. (in Chinese))
- [9] 马超,赵凯,齐文超,等. 基于示踪方法的沿海城市内涝防灾方案研究[J]. 水资源保护,2022,38(1):91-99. (MA Chao,ZHAO Kai,QI Wenchao,et al. Formulation of flood mitigation scheme in coastal cities based on source tracking method[J]. Water Resources Protection,2022,38(1):91-99. (in Chinese))
- [10] 栾震宇,金秋,赵思远,等. 基于 MIKE FLOOD 耦合模型的城市内涝模拟[J]. 水资源保护,2021,37(2):81-88. (LUAN Zhenyu, JIN Qiu, ZHAO Siyuan, et al. Simulation of urban waterlogging based on MIKE FLOOD coupling model[J]. Water Resources Protection,2021,37(2):81-88. (in Chinese))
- [11] 冯钧,王云峰,邬炜,等. 城市内涝事理图谱构建方法及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(6):479-487. (FENG Jun, WANG Yunfeng, WU Wei, et al. Construction method and application of event logic graph for urban waterlogging[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(6): 479-487. (in Chinese))
- [12] 刘媛媛,刘洪伟,霍风霖,等. 基于机器学习短历时暴雨时空分布规律研究[J]. 水利学报,2019,50(6):773-779. (LIU Yuanyuan, LIU Hongwei, HUO Fenglin, et al. An application of machine learning on examining spatial and temporal distribution of short duration rainstorm[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2019,50(6):773-779. (in Chinese))
- [13] 雷向东,赖成光,王兆礼,等. LID 改造对城市内涝与面源污染的影响[J]. 水资源保护,2021,37(5):131-139. (LEI Xiangdong, LAI Chengguang, WANG Zhaoli, et al. Influence of LID adaptation on urban flooding and non-point source pollution[J]. Water Resources Protection, 2021,37(5):131-139. (in Chinese))
- [14] 傅春,付耀宗,肖存艳,等. 基于 MIKE FLOOD 模型的鹰潭市内涝弹性分析[J]. 水利水电科技进展,2022,42(1):33-39. (FU Chun, FU Yaozong, XIAO Cunyan, et al. Analysis of urban waterlogging resilience based on MIKE FLOOD model in Yingtan City[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1):33-39. (in Chinese))
- [15] 侯精明,郭凯华,王志力,等. 设计暴雨雨型对城市内涝影响数值模拟[J]. 水科学进展,2017,28(6):820-828. (HOU Jingming, GUO Kaihua, WANG Zhili, et al. Numerical simulation of design storm pattern effects on urban flood inundation[J]. Advances in Water Science, 2017,28(6):820-828. (in Chinese))
- [16] 童旭,覃光华,王俊鸿,等. 基于 MIKE URBAN 模型研究设计暴雨雨型对城市内涝的影响[J]. 中国农村水利水电,2019(12):80-85. (TONG Xu, QIN Guanghua, WANG Junhong, et al. The effect of design storm patterns on urban waterlogging based on MIKE URBAN model[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(12): 80-85. (in Chinese))
- [17] CHEN W, HUANG G, ZHANG H, et al. Urban inundation response to rainstorm patterns with a coupled hydrodynamic model: a case study in Haidian Island, China[J]. Journal of Hydrology, 2018, 564: 1022-1035.
- [18] LUO P, MU D, XUE H, et al. Flood inundation assessment for the Hanoi Central Area, Vietnam under historical and extreme rainfall conditions[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 12623.
- [19] MU D, LUO P, LYU J, et al. Impact of temporal rainfall patterns on flash floods in Hue City, Vietnam[J]. Journal of Flood Risk Management, 2021, 14(1): e12668.
- [20] 岑国平,沈晋,范荣生. 城市设计暴雨雨型研究[J]. 水科学进展, 1998, 9(1): 41-46. (CEN Guoping, SHEN Jin, FAN Rongsheng. Research on rainfall pattern of urban design storm[J]. Advances in Water Science, 1998, 9(1): 41-46. (in Chinese))
- [21] JIANG P, WANG D, CAO Y. Spatiotemporal characteristics of precipitation concentration and their possible links to urban extent in China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2016, 123(3): 757-768.
- [22] ROSSMAN L A. Storm water management model user's manual version 5. 1[M]. Washington D. C.: The United States Environmental Protection Agency, 2015.
- [23] 芮孝芳,蒋成煜,陈清锦,等. SWMM 模型模拟雨洪原理剖析及应用建议[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(4): 1-5. (RUI Xiaofang, JIANG Chengyu, CHEN Qingjin, et al. Principle analysis and application of storm water management model on stimulating rainfall-runoff[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(4): 1-5. (in Chinese))
- [24] YU H, HUANG G, WU C. Application of the stormwater management model to a piedmont city: a case study of Jinan City, China[J]. Water Science and Technology, 2014, 70: 858-864.
- [25] 李雄飞,田甜,程香菊,等. 综合管廊雨水舱缓解城市内涝的效果分析[J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 20-26. (LI Xiongfei, TIAN Tian, CHENG Xiangju, et al. Effects of rainwater tank in integrated pipe gallery on alleviating urban waterlogging[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6): 20-26. (in Chinese))
- [26] 曾照洋,王兆礼,吴旭树,等. 基于 SWMM 和 LISFLOOD 模型的暴雨内涝模拟研究[J]. 水力发电学报, 2017, 36(5): 68-77. (ZENG Zhaoyang, WANG Zhaoli, WU Xushu, et al. Rainstorm waterlogging simulations based on SWMM and LISFLOOD models[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(5): 68-77. (in Chinese))

(下转第 133 页)

- (3): 102-108. (in Chinese))
- [17] 窦明, 王艳艳, 李胚, 等. 基于限制纳污红线的排污权交易模型[J]. 环境污染与防治, 2016, 38(8): 81-86. (DOU Ming, WANG Yanyan, LI Pei, et al. The emission trading model based on the limited pollutant on the red line [J]. Environmental Pollution and Control, 2016, 38(8): 81-86. (in Chinese))
- [18] 王文君, 方国华, 李媛, 等. 基于改进多目标粒子群算法的平原坡水区水资源优化调度[J]. 水资源保护, 2022, 38(2): 91-96. (WANG Wenjun, FANG Guohua, LI Yuan, et al. Optimal operation of water resources in plain slope water area based on improved multi-objective particle swarm optimization algorithm [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 91-96. (in Chinese))
- [19] 王艳艳, 窦明, 李桂秋, 等. 基于和谐目标优化的流域初始排污权分配方法[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(2): 12-16. (WANG Yanyan, DOU Ming, LI Guiqiu, et al. The allocation methods of watershed initial emissions permits based on harmonious objectives optimization [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(2): 12-16. (in Chinese))
- [20] 汪斌. 淮河流域纳污能力及限制排污总量研究[R]. 蚌埠: 淮河水利委员会, 2006.
- [21] 韩明霞, 乔琦, 孙启宏. 辽河流域工业行业污染减排潜力实证研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(8): 75-79. (HAN Mingxia, QIAO Qi, SUN Qihong. Research of industrial pollutant emission reduction potential in the Liaohe River Basin [J]. China Population, Resources and Environment, 2010, 20(8): 75-79. (in Chinese))
- [22] 李冬冬, 杨晶玉. 基于不同减排技术的排污权交易二级市场拍卖机制设计[J]. 系统管理学报, 2020, 29(2): 368-376. (LI Dongdong, YANG Jingyu. Auction mechanism design for emission trading in secondary market based on different abatement technology [J]. Journal of Systems & Management, 2020, 29(2): 368-376. (in Chinese))
- [23] 王艳艳, 窦明, 李桂秋, 等. 基于和谐目标优化的流域初始排污权分配方法研究[J]. 水利水电科技进展, 2014, 35(2): 12-16. (WANG Yanyan, DOU Ming, LI Guiqiu, et al. The allocation methods of watershed initial emission permits based on harmonious objectives optimization [J]. Advance in Science and Technology of Water Resources, 2014, 35(2): 12-16. (in Chinese))
- (收稿日期: 2022-04-20 编辑: 王芳)

(上接第 108 页)

- [27] WU X, WANG Z, GUO S, et al. Scenario-based projections of future urban inundation within a coupled hydrodynamic model framework: a case study in Dongguan City, China [J]. Journal of Hydrology, 2017, 547: 428-442.
- [28] 王兆礼, 陈昱宏, 赖成光. 基于 TELEMAC-2D 和 SWMM 模型的城市内涝数值模拟[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 117-124. (WANG Zhaoli, CHEN Yuhong, LAI Chengguang. Numerical simulation of urban waterlogging based on TELEMAC-2D and SWMM model [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 117-124. (in Chinese))
- [29] 李鹏, 徐宗学, 赵刚, 等. 基于 SWMM 与 LISFLOOD-FP 模型的城市暴雨内涝模拟: 以济南市为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(6): 1083-1092. (LI Peng, XU Zongxue, ZHAO Gang, et al. Simulation of urban rainstorm waterlogging processes based on SWMM and LISFLOOD-FP models: case study in Jinan City [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(6): 1083-1092. (in Chinese))
- [30] 曾照洋, 赖成光, 王兆礼, 等. 基于 WCA2D 与 SWMM 模型的城市暴雨洪涝快速模拟[J]. 水科学进展, 2020, 31(1): 29-38. (ZENG Zhaoyang, LAI Chengguang, WANG Zhaoli, et al. Rapid simulation of urban rainstorm flood based on WCA2D and SWMM model [J]. Advances in Water Science, 2020, 31(1): 29-38. (in Chinese))
- [31] ZENG Z, WANG Z, LAI C. Simulation performance evaluation and uncertainty analysis on a coupled inundation model combining SWMM and WCA2D [J]. International Journal of Disaster Risk Science, 2022, 13: 448-464.
- [32] CHEN Z, YIN L, CHEN X, et al. Research on the characteristics of urban rainstorm pattern in the humid area of Southern China: a case study of Guangzhou City [J]. International Journal of Climatology, 2015, 35: 4370-4386.
- [33] ADAMS B J, FRASER H G, HOWARD C D D, et al. Meteorological data analysis for drainage system design [J]. Journal of Environmental Engineering, 1986, 112(5): 827-848.
- [34] ZHANG M, XU M, WANG Z, et al. Assessment of the vulnerability of road networks to urban waterlogging based on a coupled hydrodynamic model [J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 127105.
- [35] 岑国平. 城市雨水径流计算模型[J]. 水利学报, 1990(10): 68-75. (CEN Guoping. A model to simulate stormwater runoff in urban area [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990(10): 68-75. (in Chinese))
- (收稿日期: 2022-06-14 编辑: 王芳)