DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.01.015

基于 TELEMAC-2D 和 SWMM 模型的城市内涝数值模拟

王兆礼[1,2],陈昱宏[1],赖成光[1,2]

(1. 华南理工大学土木与交通学院,广东 广州 510641;
2. 广东省水利工程安全与绿色水利工程技术研究中心,广东 广州 510641)

摘要:以广州长湴地区为例,基于 SWMM 和 TELEMAC-2D 模型构建一种新的耦合模型 TSWM,通过历史暴雨事件验证、模型对比等方式评估了 TSWM 模型的适用性和可靠性,并对不同重现期暴雨开展了数值模拟。结果表明:TSWM 模型能较准确地模拟研究区的内涝情况,可实现城市内涝精细化模拟;与基于 SWMM 和 LISFLOOD-FP、WCA2D 的耦合模型相比,TSWM 模型可得到更为精细的模拟结果;由于排水管网系统标准偏低,研究区在极端暴雨情况下容易发生内涝,建议采取提高排水管网系统标准、构建泵闸联合调度方案、布设 LID 设施等措施降低暴雨内涝影响;TSWM 模型在复杂城区内涝数值模拟方面具有良好的适用性和较高的模拟精度。

关键词:城市内涝;数值模拟;TELEMAC-2D;SWMM;模型耦合;长湴

中图分类号:TU992 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)01-0117-08

Numerical simulation of urban waterlogging based on TELEMAC-2D and SWMM model//WANG Zhaoli[1,2], CHEN Yuhong[1], LAI Chengguang[1,2] (1. *School of Civil Engineering and Transportation*, *South China University of Technology*, *Guangzhou* 510641, *China*; 2. *Guangdong Engineering Technology Research Center of Safety and Greenization for Water Conservancy Project*, *Guangzhou* 510641, *China*)

Abstract: Taking Changban district of Guangzhou City as an example, a new coupling model TSWM was constructed based on SWMM and TELEMAC-2D. the applicability and reliability of the model were evaluated through historical rainstorm event verification and model comparison, and then numerical simulations of rainstorms with different return periods were conducted. The results show that the TSWM model can accurately simulate the urban waterlogging in the study area, which is able to realize the refined simulation of urban waterlogging. Compared with the coupling models based on SWMM, LISFLOOD-FP and WCA2D, the TSWM model can obtain more refined simulation results. With the low standard of the drainage system, the study area is vulnerable to waterlogging under extreme rainstorms. A series of measures, such as upgrading the standard of drainage pipe network system, constructing the joint dispatching scheme of pumps and gates, and arranging LID facilities, are suggested to be taken to reduce the influence of urban waterlogging. The TSWM model has high applicability and accuracy in the numerical simulation of waterlogging in complex urban areas.

Key words: urban waterlogging; numerical simulation; TELEMAC-2D; SWMM; model coupling; Changban

在全球气候变化和快速城市化的背景下,城市洪涝灾害频繁发生,给人类社会造成了巨大的损失[1-5]。2012—2015 年我国每年受淹城市分别高达 184 座、234 座、125 座和 168 座,其中 2014 年全国 28 个省(自治区、直辖市)遭受不同程度洪涝灾害,因灾死亡 485 人,受灾人口 7 382 万人,直接经济损失 1 500 多亿元[6]。就 2021 年而言,7 月 19—20 日郑州市遭遇了千年一遇的大暴雨,造成的特大洪涝灾害致 292 人遇难和 47 人失踪;8 月 11—12 日湖北随县发生极端强降雨导致大面积积水,造成 21 人死亡、4 人失联;8 月 16 日北京海淀区发生局部大暴雨导致多个低洼地区出现内涝,2 名驾车涉水被困人

基金项目:国家自然科学基金(51709117,51879107);广东省水利科技创新项目(2020-28)

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

通信作者: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

员遇难。由此可见,由极端暴雨引发的城市洪涝灾害特别是内涝灾害已严重威胁到人们的正常生活和社会经济的发展[7]。

采取科学有效的防御措施是降低内涝灾害损失的有效手段。数值模拟是研究城市内涝形成机理和演进规律的一种重要方法,可为内涝预警预报、灾害救援、排水规划与设计等工作提供科学参考[8-9]。在众多数值模拟工具中,城市雨洪管理模型(SWMM)应用最为广泛,已被大量应用于城市内涝数值模拟、城市管网设计规划以及低影响开发(low impact development, LID)雨洪效应分析等领域[10-12]。但是,该模型无法给出淹没范围、淹没水深以及水流速度等内涝重要信息。因此许多学者尝试将 SWMM 模型和其他二维模型进行耦合,例如曾照洋等[13-14]利用 SWMM 模型分别与 LISFLOOD-FP 模型和加权元胞自动机二维模型(weighted cellular automata 2D inundation model, WCA2D)进行耦合,均取得了较好的模拟效果。然而,由于建成区的下垫面情况非常复杂,如何在模型中准确表征下垫面特点具有较大的难度[15-18]。采取 LISFLOOD-FP 和 WCA2D 模型开展内涝模拟时均将数字高程模型(digital elevation model, DEM)像元作为计算网格,在网格大小确定的前提下这种均匀网格对于形状简单且排布规整的区域模拟效果较好,但对于建筑物形状复杂、排列不规则的建成区模拟效果相对不佳,模拟精度会受到一定影响。通过不规则网格求解完整或者简化的二维浅水方程实现二维模拟,理论上可以得到更为精确的淹没结果[19]。

TELEMAC-2D 因其开源属性而被广泛应用于河流、河口、海岸、洪泛区的水动力过程模拟,并取得了较好的效果[20-21]。目前该模型在国内城市内涝二维数值模拟方面的应用还不多,如:刘家宏等[22]利用 TELEMAC-2D 建立了厦门岛的城市内涝模型,探讨了不同重现期和不同雨峰系数下内涝积水情况;邵蕊等[23]基于 TELEMAC-2D 分析了不同雨涝情景对城市应急响应时间的影响。然而,上述利用 TELEMAC-2D 开展城市内涝数值模拟的研究均未考虑耦合一维管网模型演算管网水流的运动过程,这与实际情况存在较大出入,模拟精度往往难以达到预期效果。目前国内外还没有二维 TELEMAC-2D 与一维管网模型耦合的案例。

本文以广州天河区长湴地区为研究实例,尝试将二维水动力模型 TELEMAC-2D 和一维水文水动力模型 SWMM 进行耦合得到一种新的城市内涝数值模拟模型(以下简称 TSWM 模型),并利用 TSWM 模型探讨在不同暴雨重现期下内涝淹没情况,揭示内涝的形成机理及演进规律。

1 数据来源及研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于广州市天河区中部西侧长湴地铁站附近(图 1),总面积约 1.56 km^2。该区域北部为山区森林,南部为高度城市化地区,周围主要有嘉福小学、长湴工业区、天源广场以及广东实验中学附属天河学校等。研究区地势北高南低,管网主要分布在天源路两侧以及南部长湴工业区。据实地调研,天源路、长湴地铁口附近以及南部长湴工业区经常发生内涝事件。

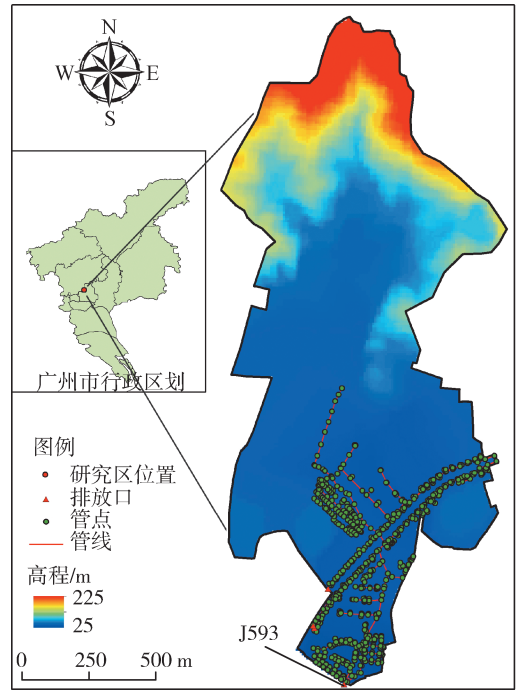


图 1 研究区高程及管网概况

Fig. 1 Overview of elevation and pipe network in study area

1.2 数据概况

采取两种 DEM 数据,分辨率分别为 5 m × 5 m 和 8 m × 8 m,其中分辨率为 8 m × 8 m 的 DEM 数据覆盖整个研究区,分辨率为 5 m × 5 m 的 DEM 数据仅包括了南部建筑密集地区。考虑到数据限制以及计算效率,在整个研究区建立 SWMM 模型计算子汇水区坡度时采用 8 m × 8 m 的 DEM 数据,在研究区南部进行二维模拟时则采用 5 m × 5 m 的 DEM 数据。研究区排水管网数据采用 2010 年数据;土地利用数据在 2014 年土地利用数据基础上,通过卫星图对比以及现场调查对其进行适当修正。

选取 2018 年 6 月 7—8 日实测暴雨(以下简称 201806 暴雨)进行验证。201806 暴雨历时较长,并且有两个雨峰,降水量较大,达到 284 mm。根据实

地调研可知,201806 暴雨导致天源路、地铁站出口及其南部长涟工业区大量积水,普遍积水深度为 0.2~0.5 m,天源路部分积水深度超过 0.5 m,给研究区企业和居民造成较大经济损失。

1.3 模型构建

1.3.1 SWMM 模型

SWMM 是美国环境保护署(EPA)开发的一款分布式水文水动力模型,主要用于城市某一单一事件或者长期的水量水质模拟,广泛应用于城市内涝数值模拟、城市管网设计规划以及 LID 雨洪效应分析等方面[13-14]。SWMM 模型计算能力十分强大,主要包括地表产流模块、地表汇流模块、管网水动力模块等。对于管网水动力模块,SWMM 提供了恒定流、运动波和动力波方法供用户自行选择。其结果显示形式也十分多样化,包括提供管网的时间序列曲线、剖面图以及统计分析表等。

1.3.2 TELEMAC-2D 模型

TELEMAC-2D 是法国国家水力学与环境实验室开发的开源水力学模型系统中的二维水动力模块,通过有限元数值方法或有限体积法求解 Navier-Stokes 方程,可以考虑的现象包括:非线性效应的长波传播、底摩擦、科里奥利力的影响,气象因素如大气压和风等的影响,湍流、超临界和亚临界的流动,水平温度和盐度梯度对密度的影响,水工建筑物如堰、堤、涵等的影响以及孔隙度的现象等。TELEMAC-2D 在水动力学模拟和海岸风暴潮模拟中得到了广泛应用,但用于城市内涝模拟的案例相对不多。本文利用 TELEMAC-2D 的二维自由表面流模拟模块,模拟城市内涝中管网溢流后的二维地表演进过程。TELEMAC-2D 模型求解的基本方程详见文献[22]。

TELEMAC-2D 提供了有限元方法和有限体积方法供用户根据计算需要进行选择,其中有限体积方法对比有限元方法具有更好的守恒性、更加明确的物理意义以及对复杂区域更强大的适用性等优点。本文主要采取有限体积方法,它是一种基于“双网格”的顶点中心方法,具体的求解方程详见文献[24]。

1.3.3 模型耦合方法

SWMM 模型具有成熟的降雨产汇流模块和管网水动力模块,但无法给出淹没范围、淹没水深以及水流速度等内涝重要信息,而 TELEMAC-2D 具有成熟的二维水动力模拟功能,且预留有水量输入的接口,将二者进行耦合可实现降雨产汇流、管网水流流动以及地表二维漫溢的全过程模拟。考虑耦合计算效率及易操作性,将采取单向耦合,可不依赖模型源码,较易实现且便于后续修改开发。尽管单向耦合在二维模拟时无法考虑暴雨后管网的排水能力,但在研究内涝危险性时最关心的往往是最大淹没范围和最大淹没水深。在实际内涝中,峰值出现时大多数管网都是满载甚至超载的,因此单向耦合所得到的结果与实际情况往往比较相符,而本文也会采用实际降雨过程对其合理性进行验证。

采用把 SWMM 模型的溢流结果作为点源输入到 TELEMAC-2D 模型中进行二维模拟的方法进行耦合(图 2),即 TSWM 耦合模型的具体构建步骤如下:

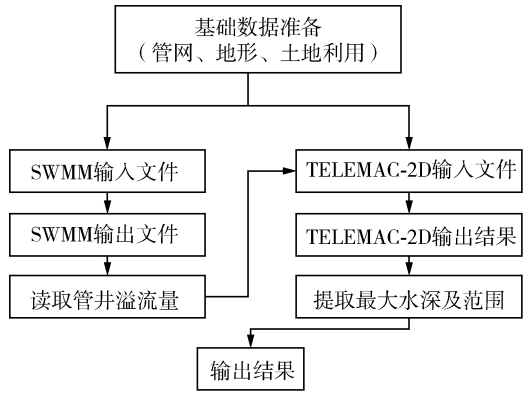


图 2 耦合流程

Fig. 2 Coupling flow chart

步骤 1 构建研究区 SWMM 模型,模拟研究区降雨径流过程以及管网汇流溢流过程。

步骤 2 提取 SWMM 模型溢流点的溢流过程并利用 Arcgis10.6 软件提取溢流点坐标,按顺序将横坐标和纵坐标分别写入参数文件中的 ABSCISSAE OF SOURCES 和 ORDINATES OF SOURCES 关键词中。

步骤 3 将所有溢流点的流量过程整理成 TELEMAC-2D 模型所需要的输入文件格式,即溢流过程的时间序列文件。

步骤 4 将所有溢流点对应的坐标以及流量系数写进 TELEMAC-2D 的参数文件中,此处提取的 SWMM 溢流过程均为实际的溢流量,所以此处流量系数均取 1;TELEMAC-2D 会根据溢流点的坐标自动将其替换为最近的格点,并在此点将溢流过程作为点源过程输入参与运算。

步骤 5 运行 TELEMAC-2D 模型模拟管网溢流后的二维地表演进过程,模拟完成后输出模拟结果并进行后处理。

可见,TSWM 模型依赖 SWMM 模型进行产汇流计算以及管网水动力计算,利用 TELEMAC-2D 进行二维地表淹没计算,考虑了城市雨洪的产汇流过程、

地下排水管网水动力过程以及地表淹没区内二维浅水流运动过程，能较好地反映城市内涝的产生及演进机理。

1.3.4 研究区耦合模型构建

利用 Arcgis10.6 对研究区管网数据、DEM 数据以及土地利用等数据进行预处理。对管网数据进行校检并概化后，共得到 625 条管线、630 个检查井、4 个排放口（图 1）。由于研究区较小且下垫面有关资料较为齐全，因此采用手动划分子汇水区。根据 DEM 数据和排水情况将研究区划分为 86 个子汇水区，其中最大的子汇水区为 66 号子汇水区，面积为 6.85 hm^2；最小的子汇水区为 35 号子汇水区，面积为 0.10 hm^2。SWMM 模型主要参数包括 4 个几何参数和 8 个经验参数，其中 4 个几何参数通过 Arcgis10.6 软件计算得到，8 个经验参数通过参考 SWMM 手册以及广州地区相关研究成果确定[14,25]。

为了考虑建筑的阻水作用，将建筑物的轮廓作为内部硬边界并生成无网格孤岛；为了保证网格在建筑物轮廓的连续性，需对建筑物轮廓进行重采样。本文网格默认最大边长为 5 m，局部网格将会根据建筑轮廓重采样后的距离进行加密，处理后网格共有 54 954 个节点，102 338 个网格，通过插值工具对高程点数据插值得到高程信息网格。类似地，糙率场网格也可根据研究区土地利用类型通过将高程点信息替换为糙率值插值获得，糙率值根据土地利用类型以及相关研究选取[22]。由于研究区地势北高南低，因此将研究区最下边的边界设为开边界，允许自由出流；建筑物边界及其他边界设为闭合边界，考虑其阻水作用。

1.4 精度评价

采用混淆矩阵计算精度评价指标来评估 TSWM 模型的模拟精度[13,26-27]，并将其结果与 LISFLOOD-FP 和 WCA2D 耦合模型的结果进行对比。在混淆矩阵评价方法中，模拟值和真实值之间存在 4 种关系：TP（true positive）表示实际有积水，与模拟结果一致；FP（false positive）表示实际没有积水，而模型模拟错误；FN（false negative）表示实际有积水，而模型没有正确模拟；TN（true negative）表示实际和模拟结果都没有积水。其中，TP 和 TN 均表示模拟结果和实际情况一致，而 FN 和 FP 则表示模拟结果与实际相悖，TP、TN、FP 和 FN 根据其所代表的面积进行量化，分别记为 S_{TP}、S_{TN}、S_{FP} 和 S_{FN}。分别用 R_{ACC}、R_{TPR}、R_{PPV} 和 F_1 代表准确率、敏感度、精度和 F1 分数来综合评价模型表现，其中，F_1 值越接近于 1 代表模型效果越好。各指标计算公式如下：

$$R_{ACC} = \frac{S_{TP} + S_{TN}}{S_{TP} + S_{TN} + S_{FP} + S_{FN}} \tag{1}$$

$$R_{TPR} = \frac{S_{TP}}{S_{TP} + S_{FN}} \tag{2}$$

$$R_{PPV} = \frac{S_{TP}}{S_{TP} + S_{FP}} \tag{3}$$

$$F_1 = \frac{2R_{TPR}R_{PPV}}{R_{TPR} + R_{PPV}} \tag{4}$$

2 结果与分析

2.1 耦合模型验证

将 201806 暴雨资料输入 TSWM 模型并开展数值模拟。由图 3 可知，主要排放口 J593 的流量过程与该暴雨过程基本一致并有所延后，符合城市地区产汇流规律。SWMM 模型的溢流点大多数分布在天源路两侧（图 4），这与天源路积水较为严重的情况也相符合，模拟范围与 201806 暴雨的内涝范围基本一致。模拟结果显示天源路、长湴工业区模拟水深为 0.2 ~ 0.5 m，部分地区模拟水深超过 0.5 m，表明长湴地铁站周边积水较为严重，这与水务局 2016 年发布的天河区 10 个易涝点中的第 3 点长湴地铁站周边相一致。201806 暴雨所导致涝水几乎倒灌进入长湴地铁口，当时周边积水深度为 0.25 ~ 0.30 m，这与模拟的积水深度基本一致。可见模拟

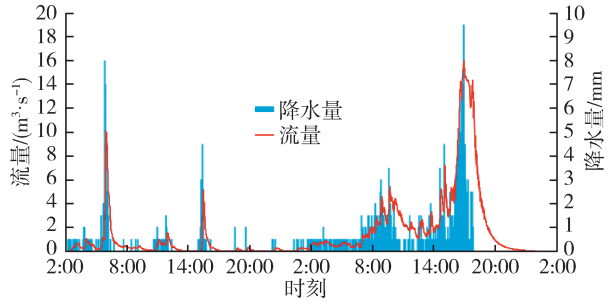


图 3 主排放口 J593 流量与暴雨过程对比

Fig. 3 Comparison between discharge process and rainstorm process of main outlet J593

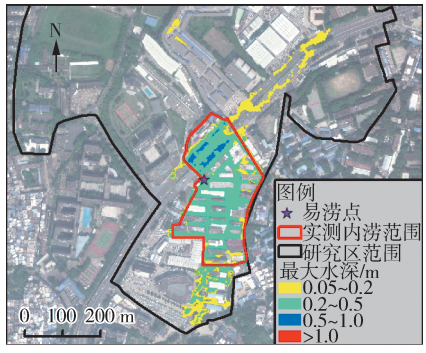


图 4 实际内涝与模拟淹没情况对比

Fig. 4 Comparison between actual waterlogging and simulated inundation conditions

结果与实际情况吻合，所构建的 TSWM 模型合理可靠，可用于下一步的模拟和预测。

2.2 模型对比分析

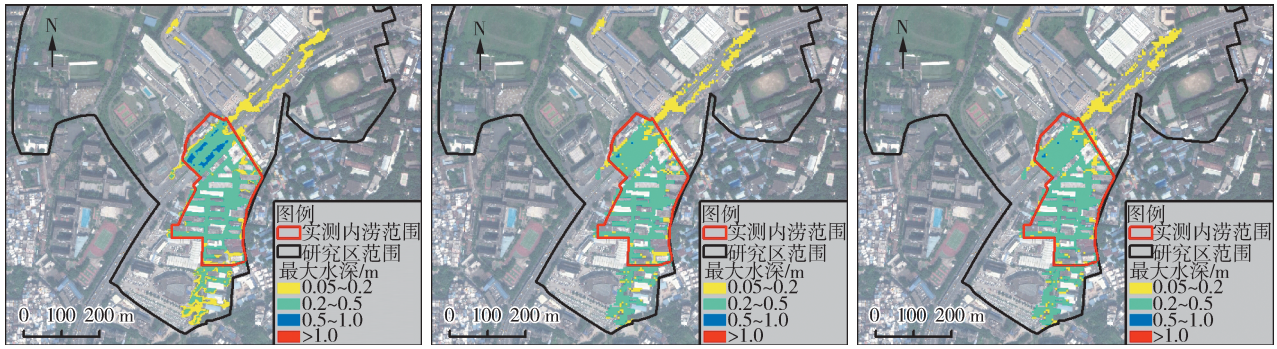
为了进一步说明 TSWM 模型结果的可靠性，分别构建 SWMM 模型与 LISFLOOD-FP、WCA2D 的耦合模型（LISFLOOD-SWMM 耦合模型和 WCA2D-SWMM 耦合模型），输入相同的管网及土地利用数据模拟内涝情况并与 TSWM 模型的结果进行对比，其中地形数据是基于相同分辨率（5 m×5 m）的高程点，LISFLOOD-SWMM 和 WCA2D-SWMM 耦合模型采用 DEM 栅格，而 TSWM 模型采用不规则网格。LISFLOOD-SWMM 和 WCA2D-SWMM 耦合模型的精度已通过了前期研究的验证[14-15]，具有重要的对比价值。

由图 5 及表 1 可知，3 种模型的最大淹没范围及淹没水深基本一致，而 TSWM 模型在天源路的积水深度较其他两个模型略微深一点，水深超过 0.5 m 的面积较大，这与实际调查情况更相符。3 种模型的评价指标如表 2 所示，可知 3 种模型模拟结果的 S_{TN} 值均较大，表明三者均具有较高的准确率。其中，TSWM 模型的 S_{TP}、R_{TPR}、F_1 略优于另外两个模型，表明 TSWM 模型模拟结果优于另外两个模型。

2.3 不同暴雨情景下内涝结果分析

为了模拟不同暴雨重现期下研究区的内涝情况，采用广州市水务局发布的暴雨公式计算 6 种不同重现期下的暴雨强度，并采用芝加哥雨型作为设计降雨雨型，推算不同重现期下的 2 h 降雨过程，设计降雨过程如图 6 所示。6 种不同重现期的设计暴雨过程输入 SWMM 模型后得到溢流过程，再将溢流过程导入 TELEMAC-2D 中可得到不同暴雨重现期下的最大淹没范围及水深（图 7）。

由图 7 可知，随着暴雨重现期的增大，研究区内涝情况越来越严重，淹没面积由 1 年一遇的 35 169 m^2 扩大至 100 年一遇的 93 323 m^2，最大淹没水深由 0.88 m 提高至 1.25 m。在 100 年一遇暴雨下，淹没水深超过 0.5 m 的淹没面积达到 48 901 m^2，天源路及长湴工业区内涝情况十分严重，其中天源路长湴地铁站出口附近路段淹没水深超过 1 m，有涝水倒灌进地铁站的风险，而长湴工业区淹没水深普遍超过 0.5 m。其他重现期下的淹没情况见表 3。以上表明该地区的排水管网系统整体上标准偏低，当发生极端暴雨会引发严重的内涝，对研究区的生命财产安全构成了重大威胁。因此建议该地区可采取提高排水管网系统标准、构建泵闸联合调度方案、布设



（a）TSWM 模型　（b）LISFLOOD-SWMM 耦合模型　（c）WCA2D-SWMM 耦合模型

图 5　3 种模型最大淹没水深空间分布

Fig. 5　Spatial distribution of maximum inundation depth obtained from three models

表 1　不同积水深度淹没面积统计

Table 1　Statistics of inundation area under different inundation depths

模　型	淹没面积/m^2			总面积/m^2
	0.05～0.20 m	0.20～0.50 m	>0.50 m	
TSWM 模型	16 631	31 581	1 812	50 024
LISFLOOD-SWMM 耦合模型	14 100	34 725	100	48 925
WCA2D-SWMM 耦合模型	13 350	35 825	150	49 325

表 2　模型精度评价指标统计

Table 2　Statistics of model accuracy evaluation indices

模　型	S_{TP}	S_{FP}	S_{TN}	S_{FN}	R_{ACC}	R_{TPR}	R_{PPV}	F_1
TSWM 模型	3.22	1.78	150.35	0.34	0.986	0.903	0.644	0.752
LISFLOOD-SWMM 耦合模型	3.16	1.74	150.40	0.41	0.986	0.885	0.645	0.746
WCA2D-SWMM 耦合模型	3.13	1.81	150.33	0.44	0.986	0.877	0.634	0.736

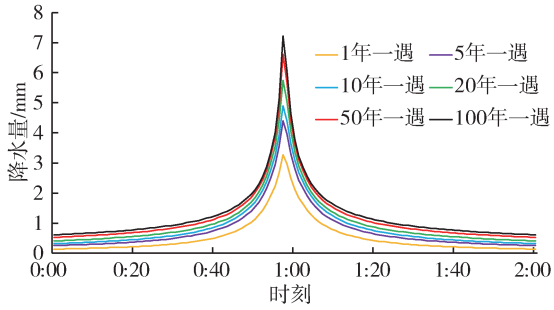


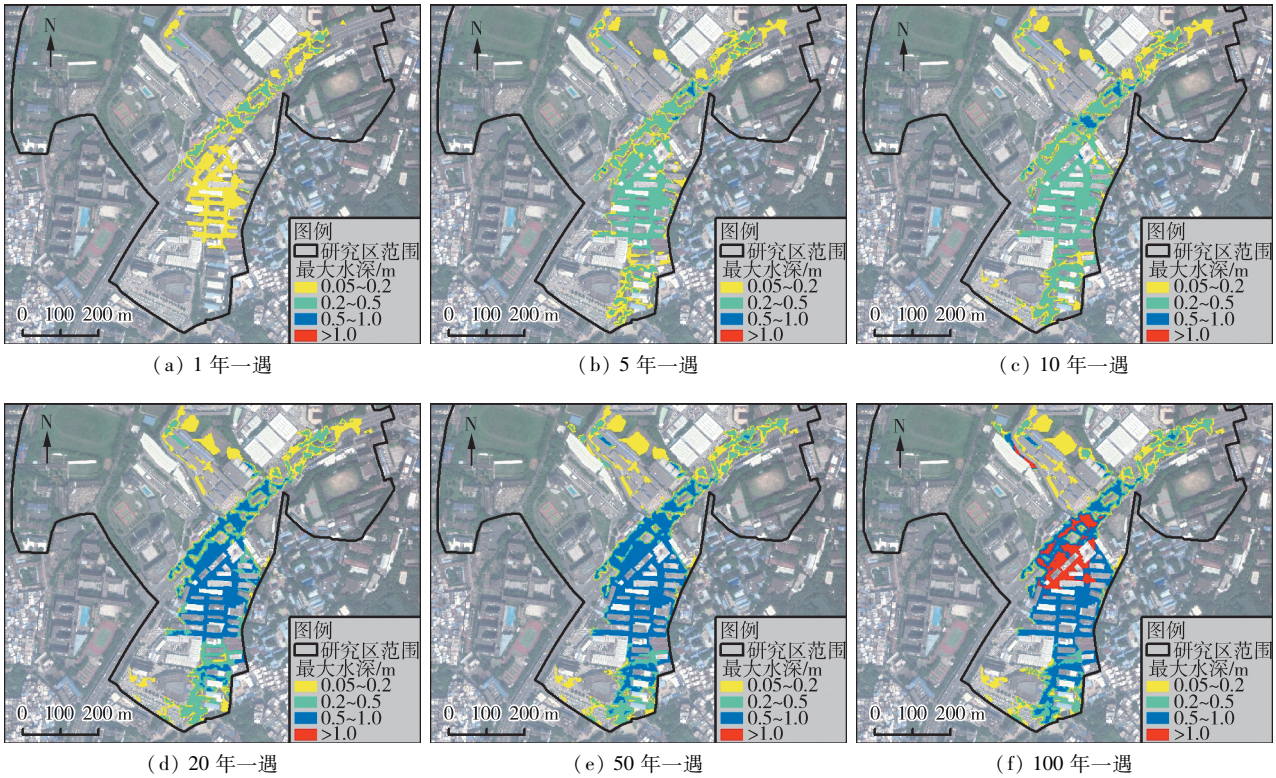
图 6　设计降雨过程

Fig. 6　Process of design storm

LID 设施等措施降低暴雨内涝的影响，确保周边居民的生命财产安全。

2.4　讨论

研究区南部为高度城市化地区，建筑较为密集且地形复杂，给内涝的数值模拟带来了挑战。LISFLOOD-SWMM 和 WCA2D-SWMM 耦合模型均采用 DEM 栅格作为地形数据，在规定网格大小情况下，可能无法如实地将复杂地形和密集建筑物的外轮廓特征展示出来。由于 LISFLOOD-SWMM 和 WCA2D-SWMM 耦合模型需要将建筑物加高以表示建筑的阻水作用，建筑物加高后可能会导致地形失真，从而影响模拟结果的准确性。而 TSWM 模型可以自由设置网格的大小，尽可能地保留建筑原来的轮廓，从而得到更加准确的模拟结果。如图 8 中部所示，TSWM 模型成功模拟了实测内涝范围内的积水情况，而 LISFLOOD-SWMM 和 WCA2D-SWMM 耦合模型未能模拟该地区的积水，调查结果表明该位置是属于淹没范围，表明 TSWM 模型可以更精细地表征地形，输出的模拟结果与实际情况更相符。由于研究区内道路较为宽阔，房屋轮廓较为规整，5 m×5 m 的 DEM 基本上可以反映大部分地区的地形情况，因此 3 种耦合模型的模拟结果整体上基本一致，只有少部分地区存在细微差别。若在地形更加复杂且无法取得精细地形数据的情况下，相信不



(a) 1 年一遇　(b) 5 年一遇　(c) 10 年一遇

(d) 20 年一遇　(e) 50 年一遇　(f) 100 年一遇

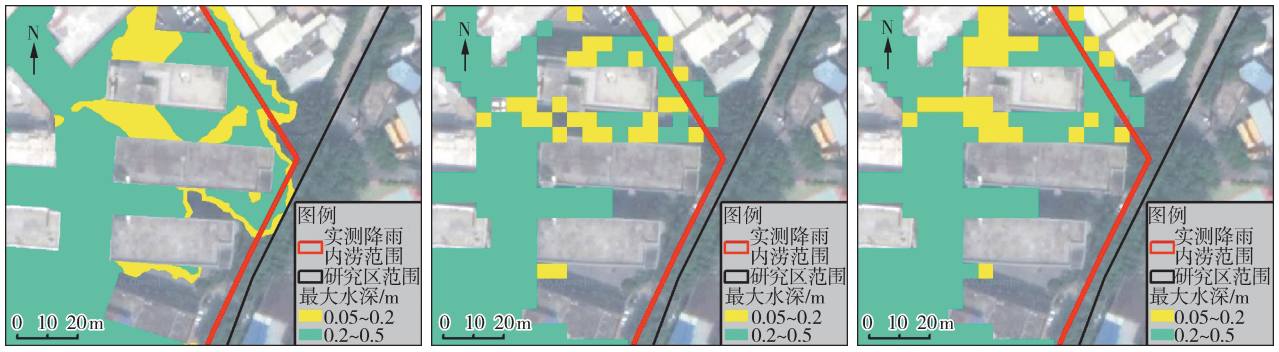
图 7　不同暴雨重现期下研究区内涝情况

Fig. 7　Waterlogging situation in study area under different rainstorm return periods

表 3　不同暴雨重现期下研究区淹没面积统计

Table 3　Statistics of inundation area under different rainstorm return periods

淹没水深/m	淹没面积/m^2					
	1 年一遇	5 年一遇	10 年一遇	20 年一遇	50 年一遇	100 年一遇
0.05 ~ 0.2	28 881	24 189	23 788	23 107	23 224	27 184
0.2 ~ 0.5	6 274	34 402	45 049	22 975	19 278	17 238
0.5 ~ 1.0	15	679	2 257	32 560	43 228	38 249
> 1.0	0	0	0	0	2	10 652
总计	35 170	59 270	71 094	78 642	85 732	93 323



(a) TSWM 模型　(b) LISFLOOD-SWMM 耦合模型　(c) WCA2D-SWMM 耦合模型

图 8　3 种耦合模型结果对比

Fig. 8　Comparison of simulated results obtained from three coupling models

规则网格处理复杂地形的优势将更加明显。

3　结　论

a. TSWM 模型主要排放口流量过程与实际降雨过程相一致并有所延后,符合城市地区产汇流规律,且模拟的淹没范围及淹没深度与实际淹没情况基本相符,表明 TSWM 模型能较准确地模拟研究区的内涝情况。与 LISFLOOD-SWMM 和 WCA2D-SWMM 耦合模型相比,TSWM 模型因其采用不规则网格可更加精细地表征复杂城市地形,在相同分辨率的 DEM 条件下可以得到更为精细的模拟结果。

b. 研究区的内涝情况随着暴雨重现期增大而变得越加严重;研究区内的排水管网系统整体上标准偏低,对研究区的生命财产安全构成了重大威胁,建议采取提高排水管网系统标准、构建泵闸联合调度方案、布设 LID 设施等措施降低暴雨内涝影响,确保区域内的居民生命财产安全。

c. TSWM 模型在复杂城区内涝数值模拟方面具有良好的适用性和较高的模拟精度,具有较大的推广潜力和应用价值。

参考文献:

[1] 徐宗学,任梅芳,陈浩. 我国沿海城市洪潮组合风险分析[J]. 水资源保护,2021,37(2):10-14. (XU Zongxue, REN Meifang, CHEN Hao. Analysis on urban flooding risk caused by flood tide combination in coastal cities[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 10-14. (in Chinese))

[2] RUIJVEN B J V, LEVY M A, AGRAWAL A, et al. Enhancing the relevance of shared socioeconomic pathways for climate change impacts, adaptation and vulnerability research[J]. Climatic Change, 2014, 122(3): 481-494.

[3] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展,2016,27(4):485-491. (ZHANG Jianyun, WANG Yintang, HE Ruimin, et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and cause analysis in China[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(4): 485-491. (in Chinese))

[4] 周宏,刘俊,高成,等. 我国城市内涝防治现状及问题分析[J]. 灾害学,2018,33(3):147-151. (ZHOU Hong, LIU Jun, GAO Cheng, et al. Analysis of current situation and problems of urban waterlogging control in China[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(3): 147-151. (in Chinese))

[5] 郝晓丽,穆杰,喻海军,等. 城市洪涝试验研究进展[J]. 水利水电科技进展,2021,41(1):80-86. (HAO Xiaoli, MU Jie, YU Haijun, et al. Advances in experimental research of urban flooding[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(1): 80-86. (in Chinese))

[6] 国家防汛抗旱总指挥部,中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害公报(2015)[M]. 北京:中国水利水电出版社,2015.

[7] 陈文龙,徐宗学,宋利祥,等. 基于流域系统整体观的城市洪涝治理研究[J]. 水利学报,2021,52(6):659-672. (CHEN Wenlong, XU Zongxue, SONG Lixiang, et al. Research on the control measures of pluvial and fluvial urban floods based on holistic view of watershed system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(6): 659-672. (in Chinese))

[8] 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))

[9] WU Xushu, WANG Zhaoli, GUO Shenglian, 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.

[10] 陆海明,邹鹰,孙金华,等. 基于 SWMM 的铁心桥实验基地内涝防治效果模拟[J]. 水资源保护,2020,36(1):58-65. (LU Haiming, ZOU Ying, SUN Jinhua, et al. Simulation of waterlogging control effect in Tiexinqiao

experimental base based on SWMM[J]. Water Resources Protection,2020,36(1):58-65. (in Chinese))

[11] MADRAZO-URIBEETXEBARRIA E, GARMENDIA M, BERRONDO J A, et al. Sensitivity analysis of permeable pavement hydrological modelling in the Storm Water Management Model [J]. Journal of Hydrology, 2021, 600:126525.

[12] 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))

[13] 曾照洋, 王兆礼, 吴旭树, 等. 基于 SWMM 和 LISFLOOD-FP 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))

[14] 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):31-40. (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):31-40. (in Chinese))

[15] 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)))

[16] 徐天奕,刘克强,李琛,等. 太湖流域大尺度洪涝淹没仿真模型的建立及应用[J]. 水利水电科技进展,2021,41(4):40-45. (XU Tianyi, LIU Keqiang, LI Chen, et al. Establishment and application of large-scale flood inundation simulation model for Taihu Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021,41(4):40-45. (in Chinese))

[17] 夏军,张印,梁昌梅,等. 城市雨洪模型研究综述[J]. 武汉大学学报(工学版),2018,51(2):95-105. (XIA Jun, ZHANG Yin, LIANG Changmei, et al. Review on urban storm water models [J]. Engineering Journal of Wuhan University,2018,51(2):95-105. (in Chinese))

[18] 向小华,陈颖悟,吴晓玲,等. 城市二维内涝模型的 GPU 并行方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(6): 528-533. (XIANG Xiaohua, CHEN Yingwu, WU Xiaoling, et al. GPU parallelized algorithm of urban two-dimensional inundation model [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2020,48(6):528-533. (in Chinese))

[19] 李若男,王军,胡恒智. 黄浦区北部子汇水区划分方法及暴雨内涝情景模拟[J]. 水电能源科学,2019,37(7):50-53. (LI Ruonan, WANG Jun, HU Hengzhi. Sub-catchment division method and rainstorm waterlogging scenario modeling in North Huangpu District[J]. Water Resources and Power,2019,37(7):50-53. (in Chinese))

[20] HORRITT M S, Bates P D. Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation[J]. Journal of Hydrology,2002,268(1):87-99.

[21] PINEL S, Bonnet M P, DA SILVA J S, et al. Flooding dynamics within an amazonian floodplain: water circulation patterns and inundation duration [J]. Water Resources Research,2020,56(1):e2019WR026081.

[22] 刘家宏,李泽锦,梅超,等. 基于 TELEMAC-2D 的不同设计暴雨下厦门岛城市内涝特征分析[J]. 科学通报, 2019,64(19): 2055-2066. (LIU Jiahong, LI Zejin, MEI Chao, et al. Urban flood analysis for different design storm hyetographs in Xiamen Island based on TELEMAC-2D[J]. Science Bulletin,2019,64(19):2055-2066. (in Chinese))

[23] 邵蕊,邵薇薇,苏鑫,等. 基于 TELEMAC-2D 模型分析不同洪涝情景对城市应急响应时间的影响[J/OL]. 清华大学学报(自然科学版):1-10[2021-10-15]DOI:10.16511/j. cnki. qhdxxb,2021. 22. 036. (SHAO Rui, SHAO Weiwei, SU Xin, et al. Impact of various flood scenarioson urban emergency responses times based on the TELEMAC-2D model[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology). 1-10 [2021-10-15] DOI: 10.16511/j. cnki. qhdxxb,2021. 22. 036. (in Chinese))

[24] ATA R. Telemac-2 d new finite volume schemes for shallow water equations with source terms on 2 d unstructured grids [C]//Proceedings of the 19th TELEMAC-MASCARET User Conference. Oxford: HR Wallingford,2012:93-98.

[25] 陈佩琪,王兆礼,曾照洋,等. 城市化对流域水文过程的影响模拟与预测研究[J]. 水力发电学报,2020,39(9): 67-77. (CHEN Peiqi, WANG Zhaoli, ZENG Zhaoyang, et al. Assessing influence of future urbanization on hydrological process in typical river basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39 (9): 67-77. (in Chinese))

[26] 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))

[27] 李永坤,薛联青,邸苏闯,等. 基于 Infoworks ICM 模型的典型海绵措施径流减控效果评估[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(5):398-405. (LI Yongkun, XUE Lianqing, DI Suchuang, et al. Evaluation of runoff reduction effect of typical sponge measures based on Infoworks ICM model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020,48(5):398-405. (in Chinese))

(收稿日期:2021-10-30　编辑:雷燕)