

基于SWMM与LISFLOOD-FP耦合模型的城市街区 内涝模拟研究

卢兴超^{1,2}, 徐宗学^{1,2}, 李永坤^{2,3}, 胡小红^{2,3}, 唐清竹^{1,2}, 宋鹏越^{1,2}

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875; 3. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048)

摘要: 为了评估高度城市化建设背景下暴雨侵袭时城市街区内涝灾害的演变过程, 以北京市海淀区清河流域某典型排水分区为研究对象, 构建了基于SWMM与LISFLOOD-FP模型的水文水动力耦合模型。选择P20210712、P20210718和P20210823 3场实测降雨率定和验证模型参数, 并应用于P20210703实测降雨的预测, 同时选取降雨重现期分别为10、20、30、50 a的长历时(24 h)设计降雨情景进行内涝模拟分析。结果表明: 3场实测降雨条件下模型的纳什效率系数分别为0.76、0.68、0.71, 模型参数设置合理; P20210703实测降雨条件下, 模型模拟所得淹没范围、淹没水深与实际观测情况较为吻合, 耦合模型精度较高; 4种不同降雨重现期的长历时设计降雨情景下, 溢流节点数和溢流总量均随降雨重现期的增大而增加, 淹没深度大于1.00 m的淹没面积从降雨重现期为10 a的0.024 km², 增大到降雨重现期为50 a的0.345 km², 主要集中在上地下凹桥区、安宁庄西路、安宁庄中街、安宁庄路等位置, 与观测情况吻合较好。

关键词: 城市暴雨; 内涝模型; 水文水动力耦合模型; 溢流总量; 淹没深度

中图分类号: TV122

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2024)03-0098-08

Research on urban block waterlogging simulation based on coupling model of SWMM and LISFLOOD-FP// LU Xingchao^{1,2}, XU Zongxue^{1,2}, LI Yongkun^{2,3}, HU Xiaohong^{2,3}, TANG Qingzhu^{1,2}, SONG Pengyue^{1,2} (1. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China; 3. Beijing Water Science & Technology Institute, Beijing 100048, China)

Abstract: In order to evaluate the evolution process of urban block waterlogging disaster when encountering rainstorm under the highly urbanized construction, a typical drainage division of the Qinghe River Basin in Haidian District of Beijing was selected as the research object, and a hydrological-hydrodynamic coupling model based on SWMM and LISFLOOD-FP model was constructed. Three measured rainfall events, P20210712, P20210718, and P20210823, were selected for model parameter calibration and validation. P20210703 measured rainfall was selected for model application, and long-term (24 h) rainfall scenarios with rainfall return periods of 10, 20, 30, and 50 a were selected for waterlogging simulation analysis. The results show that the Nash-Sutcliffe efficiency coefficients of the model under three measured rainfall conditions are 0.76, 0.68, and 0.71, respectively, indicating that the model parameters are set reasonably. Under the condition of P20210703 measured rainfall, the simulated inundation range and depth of the model are in good agreement with the actual observation, indicating that the coupled model has high accuracy. Under long-term design rainfall scenarios with four different rainfall return periods, the number of overflow nodes and the total amount of overflow both increase with the increase of rainfall return period. The submerged area with a depth greater than 1.00 m increased from 0.024 km² with a rainfall return period of 10 a to 0.345 km² with a rainfall return period of 50a, mainly concentrated in lower concave bridge areas of Shangdi Road, Anningzhuang West Road, Anningzhuang Middle Street, Anningzhuang Road, etc., which are in good agreement with the observation results.

Key words: urban storm; waterlogging model; hydrologic-hydrodynamic coupling model; overflow volume; inundation depth

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52239003)

作者简介: 卢兴超(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事城市洪涝灾害防治研究。E-mail: xclu@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 徐宗学(1962—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: zxxu@bnu.edu.cn

IPCC 第六次评估报告综合报告指出:“2011—2020 年全球地表温度较 1850—1900 年升高了 1.1℃”,进一步明确了人类活动导致全球升温持续加剧^[1]。全球变暖影响气候形态,进而造成全球和区域的降水时空演变和分布特征发生改变,极端降水成为城市洪涝灾害发生的直接驱动要素^[2-3]。近些年来,我国多个城市饱受极端暴雨灾害的侵袭,2012 年北京“7·21”暴雨,降雨持续时间超过 20 h,平均降水量达到 170 mm,造成 79 人死亡,经济损失约 162.15 亿元^[4]。2016 年 7 月,武汉进入梅雨季节后遭遇强降雨,单日最大降水量达到 241.5 mm,造成全市 12 个区 75.7 万人受灾^[5]。2021 年 7 月 17—22 日,郑州遭遇千年一遇的特大暴雨,其中 20 日最大 1 h 降水量达到 201.9 mm^[6]。2023 年 8 月 1 日,受“杜苏芮”台风影响,北京地区有两个雨量站累计降水量超过 700 mm,远超“7·21”特大暴雨极值 541 mm,经济损失巨大,尤其是房山区和门头沟区。从“城市看海”到“城市看江”,城市暴雨洪涝成为城市发展之殇^[7],也成为城市常态化自然灾害和威胁之一。

城市暴雨洪涝模型是模拟城市暴雨洪涝过程的重要手段,对快速准确提取洪涝灾害范围、解析城市洪涝灾害受灾区域的时空变化特征具有重要作用^[8]。目前常用的城市洪涝模型以国外模型为主,如美国环保署的暴雨雨水管理模型(storm water management model, SWMM)、陆军工程兵团的 HEC-RAS、丹麦水力研究所的 MIKE 系列、英国布里斯托尔大学的 LISFLOOD-FP、华霖富公司的 InfoWorks ICM 等^[9]。其中,SWMM 属于完全开源软件,可对城市地表水文、管网和河道一维水动力过程进行模拟,但不能模拟管道超载雨水溢流到地表的二维漫流过程^[10];LISFLOOD-FP 模型属于半开源模型,可对河道一维洪水过程和二维地表漫流过程进行仿真模拟^[11];MIKE 系列和 InfoWorks ICM 软件属于商业化软件,模块齐全、功能强大,可以模拟多种复杂暴雨洪涝场景^[12]。借助城市暴雨洪涝模型可以对不同尺度下城市排水防涝系统进行模拟和评估,国内外许多学者已经开展相关研究,例如:王兆礼等^[13]基于 SWMM 和 TELEMAC-2D 模型构建一种新的耦合模型 TSWM,评估广州长湴地区内涝风险;雷向东等^[14]利用 ANUGA 和 SWMM 耦合模型,对不同雨峰位置的设计暴雨情景下广州车陂涌流域内涝进行模拟与分析;叶陈雷等^[15]利用 InfoWorks ICM 模型,分析了片区海绵改造对城市内涝的影响,结果表明仅采用源头海绵改造措施在面对极端降雨时效果有限,结合可持续排水系统与湖库调度可以有效减缓

内涝问题;施露等^[16]利用 MIKE FLOOD 模型对徐州市丰县复新河左岸地区的内涝过程进行模拟分析,结果表明部分中小河流排涝能力不足,导致内涝较为严重;Nandi 等^[17]利用 VIC(variable infiltration capacity)、RAPID(routing application for parallel computation of discharge)、LISFLOOD-FP 等模型,分析了印度克里希纳河流域上游洪水淹没过程,结果与观测情况吻合较好。

SWMM 是国内学者常用的一维水动力模型,具有运行稳定、操作方便快捷的优势。LISFLOOD-FP 模型可以将 SWMM 得到的节点溢流水量进行耦合,实现地表二维漫流淹没模拟,且模型参数要求较少。现有研究表明,将 SWMM 与 LISFLOOD-FP 模型进行耦合,可有效模拟城市地表产流、管网汇流以及地表漫流过程。例如:Wu 等^[18]通过耦合 SWMM 和 LISFLOOD-FP 模型,提出了二维水动力淹没模型,并基于该模型揭示了不同风暴潮、海平面上升和下降情景下未来城市淹没的演变情况;向小华等^[19]利用 SWMM 和 LISFLOOD-FP 模型,采用 GPU 的并行计算技术对盐城响水县城区的暴雨内涝进行模拟,取得效果良好。本文选择北京市海淀区清河流域某典型排水分区为研究对象,该区域属于高密度建成区,人口密度大,城市化强度高,是海淀区的科技产业聚集区之一。由于研究区排水系统简单,附属构筑物较少,没有复杂的运行调度规则,选择 SWMM 与 LISFLOOD-FP 模型可快速建模,构建研究区水文水动力耦合模型,量化分析城市暴雨洪涝过程。

1 研究区概况与数据来源

研究区为北京市海淀区清河流域某典型排水分区,面积为 5.82 km²,如图 1 所示。下垫面类型以城镇住宅用地、商业用地、公用设施与服务用地为主,属于高密度建成区,如图 2 所示。研究区高程为

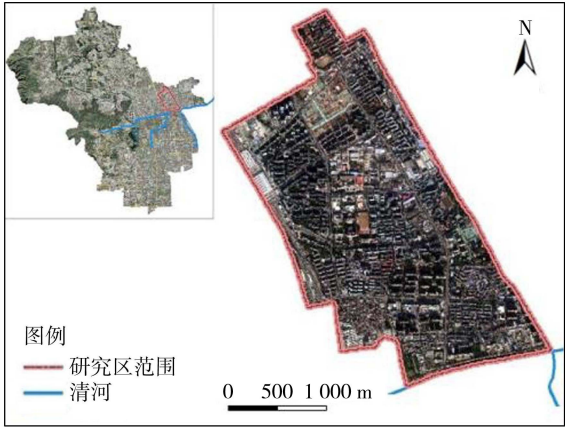


图 1 研究区卫星图

Fig. 1 Satellite image of study area

-1 ~ 50 m,坡度为 0 ~ 9°,地势呈现西北高、东南低,上层土壤以砂壤土、杂填土、壤土为主,多年平均降水量为 660 mm,主要集中在 6—8 月。根据北京市水务局的内涝风险统计和现场调研,研究区存在多处内涝积水点。本文所用排水管网数据由北京市水科学技术研究院委托勘测公司测绘所得,如图 3 所示。降雨资料来源于北京市水文总站提供的羊坊闸雨量站点和东小口雨量站点数据。2022 年土地利用数据以及 5 m×5 m 精度的数字高程模型(DEM)来源于北京市规划局。雨水管道流量和液位数据来源于北京市水科学技术研究院安装的监测设备。

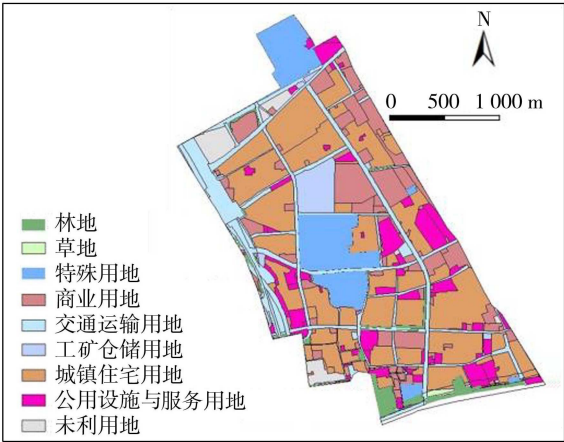


图 2 研究区下垫面类型分布

Fig. 2 Distribution of underlying surface types in sandy area

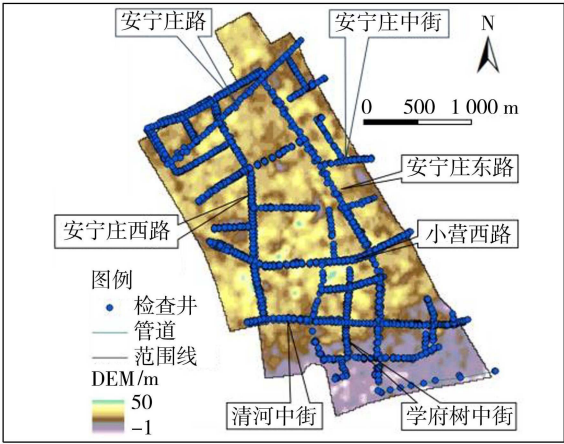


图 3 研究区排水管网

Fig. 3 Drainage pipeline network in study area

2 研究方法

2.1 SWMM

SWMM 是美国环保局于 1971 年开发的用于城市暴雨设计与管理的降雨-径流模型,现已经升级到 5.2.3 版本 (<https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>)。SWMM 既可以用于城市径流场次洪水模拟也可以用于长期连

续模拟^[20],还可以模拟每一个子汇水区的水量和水质,包括流速、径流量、溢流口出水量、管渠水质等^[21]。SWMM 将暴雨径流过程概化为产流过程和汇流过程,在产流过程中可采取 Horton、Green-Ampt、Curve Number 3 种不同下渗模型^[22]。本文选用 Horton 模型,计算公式为

$$f_t = f_w + (f_c - f_w)e^{-kt} \quad (1)$$

式中: f_t 为土壤 t 时刻下渗率; f_c 为初期下渗率; f_w 为稳定下渗率; t 为时间; k 为衰减指数。

SWMM 在城市排水管网汇流计算模块中,提供了恒定流、运动波、动力波 3 种计算方法。本文选用动力波方法,通过求解完整的圣维南方程,对管道中的回水、紊变、逆流、水头损失以及有压流等复杂水流状态进行计算,能够真实反映管道中水流实际运动状态,计算公式为

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial A}{\partial x} + gAS_t = 0 \quad (3)$$

式中: Q 为流量; A 为过水断面面积; g 为重力加速度; S_t 为摩阻比降; x 为距离。

2.2 LISFLOOD-FP 模型

LISFLOOD-FP 模型由英国布里斯托尔大学于 2001 年开发,目前已经升级为 8.1 版本 (<http://www.bris.ac.uk/geography/research/hydrology/models/lisflood>)。LISFLOOD-FP 模型为半开源水动力模型,以栅格为计算单元,可以实现一维河道和二维洪泛区的水动力模拟。由于模型整体构建过程较为简便,能够模拟城市和流域的洪涝淹没过程,在国外应用较为广泛。LISFLOOD-FP 模型的二维洪泛区求解器包括汇流求解器(Routing)、限流求解器(Flow-limited)、自适应求解器(Adaptive)、加速求解器(Acceleration)和 Roe 求解器。当水流从固定溢流节点在栅格上离散运动时进行有限差分法计算^[23],两个单元格之间的单位流量通过动量方程计算获得,每个时间步长的水深通过连续性方程更新获得,计算公式为

$$q_{t+\Delta t} = \frac{q_t - g h_t \Delta t \Delta (h_t + z) / \Delta x}{1 + g h_t \Delta t n^2 q_t h_t^{-10/3}} \quad (4)$$

$$\frac{\Delta h_{i,j}}{\Delta t} = \frac{q_{x,i-1,j} - q_{x,i,j} + q_{y,i,j-1} - q_{y,i,j}}{\Delta x} \quad (5)$$

式中: $q_{t+\Delta t}$ 为 $t+\Delta t$ 时刻的单宽流量; Δt 为时间步长; q_t 为 t 时刻的单宽流量; Δx 为单元格宽度; z 为单元格高程; h_t 为 t 时刻的水深; n 为曼宁粗糙度系数; $\Delta h_{i,j}$ 为每个时间步长下的水深; $q_{x,i-1,j}$ 、 $q_{x,i,j}$ 、 $q_{y,i,j-1}$ 、 $q_{y,i,j}$ 分别为 x 方向上 $(i-1,j)$ 位置、 x 方向上 (i,j) 位

置、y 方向上(i,j-1)位置、y 方向上(i,j)位置的单宽流量。

2.3 SWMM 与 LISFLOOD-FP 模型耦合原理

SWMM 与 LISFLOOD-FP 模型之间的耦合属于单项耦合,或称为松散耦合、外部耦合,即前者结果作为后者运行的驱动条件,如图 4 所示。LISFLOOD-FP 模型输入参数文件包括:. bdy 文件、. bci 文件、. dem 文件、. par 文件,其中. bdy 文件为由 SWMM 模拟得到的节点溢流过程文件,. bci 文件为区域边界和溢流节点坐标文件,. dem 文件为数字高程文件,. par 文件为运行文件。. bdy 文件通常将节点溢流结果处理成单宽流量过程线或栅格水深过程线,前者量纲为 L²/T,后者量纲为 L/T。

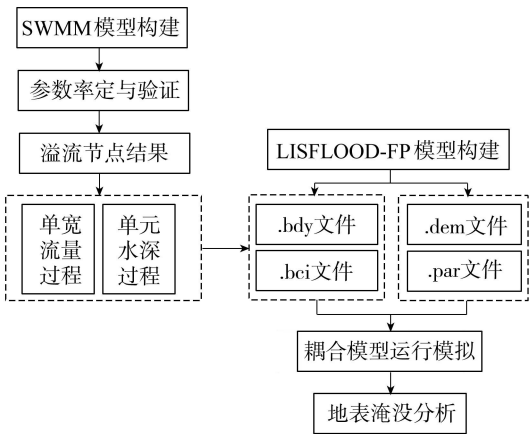


图 4 模型耦合示意图

Fig. 4 Schematic of model coupling

2.4 设计降雨情景

根据 DB11/T969—2016《城市雨水系统规划设计暴雨径流计算标准》,研究区属于 II 区,选择北京市水文手册设计暴雨图集推荐的 5 min 降雨间隔设计暴雨过程线,作为研究区域的洪涝设计暴雨雨型。图 5 为北京市 II 区气象台站址处,降雨重现期分别为 10、20、30 和 50 a 的 24 h 设计降雨过程线。

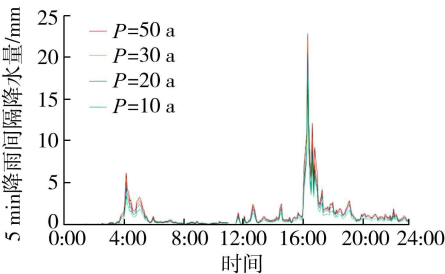


图 5 设计暴雨过程线

Fig. 5 Hyetograph of design storm

3 水文水动力耦合模型构建

3.1 SWMM 构建

在 ArcGIS 软件中对研究区的雨水管网系统进

行概化处理,借助 inpPINS 软件将 ArcGIS 中的概化数据转化成 SWMM 的输入文件,如图 6 所示。具体操作步骤如下:①根据地形高程、道路布局将研究区划分为一级汇水分区,结合管网、雨水口分布情况将一级汇水分区划分为排水分区;②在 ArcGIS 软件中对排水分区、雨水管道、检查井、排水口及相关附属设施进行概化和拓扑关系处理;③借助 inpPINS 软件将研究区中的排水分区和雨水管网系统数据转化成 SWMM 文件,其中排水分区数 1641 个、管道数 1665 个、节点数 1676 个;④在 SWMM 中添加降雨雨型,对模型参数进行率定与验证,并进行模拟。

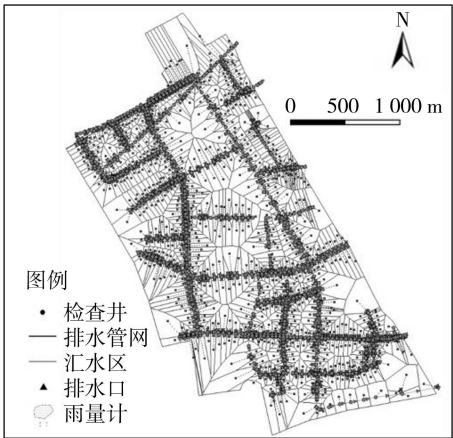


图 6 雨水管网系统概化图

Fig. 6 Generalization of rainwater pipe network system

3.2 SWMM 率定与验证

SWMM 参数中一部分来自模型固有属性参数,如管长、管径、井深、偏移、出口高程^[24];另一部分是借助《SWMM 模型用户手册》设定的初始参数,如曼宁系数、注蓄量、糙率、入渗率等,这部分参数需要率定和验证,率定结果见表 1。

表 1 模型参数选定

Table 1 Selection of model parameters

参数名称	物理意义	参数取值范围	率定结果
N-imperv	不透水区曼宁系数	0.011 ~ 0.50	0.28
N-perv	透水区曼宁系数	0.05 ~ 0.80	0.48
Dstore-imperv	不透水区注蓄深	1 ~ 20 mm	8 mm
Dstore-perv	透水区注蓄深	1 ~ 50 mm	15 mm
Maxrate	最大入渗率	80 ~ 150 mm/h	143 mm/h
Minrate	最小入渗率	1 ~ 50 mm/h	30 mm/h
Decay constant	衰减系数	1 ~ 10 h ⁻¹	9 h ⁻¹
Drying time	干燥时间	3 ~ 10 h	7 h

参照 GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》中误差评定方法,选择纳什效率系数评价模型模拟精度^[25],选用 P20210712、P20210718 两场实测降雨进行模型参数率定,将研究区出水口的实测流量和模拟流量进行对比分析,纳什效率系数分别为 0.76、0.68,如图 7(a)(b) 所示。选用 P20210823 实测降雨

数据输入率定后模型中,将实测流量数据和模拟流量结果数据进行对比,纳什效率系数为0.71,如图 7(c)所示,说明参数设定合理,模型具有可靠性。

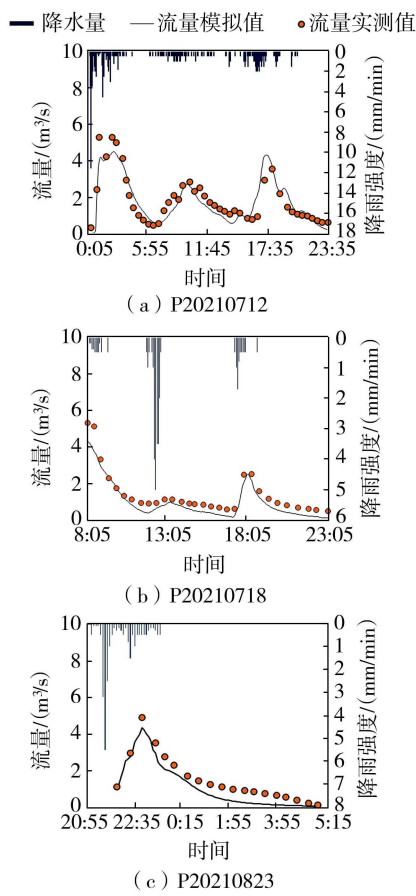


图7 SWMM 参数率定和验证结果

Fig.7 Parameter calibration and validation results of SWMM

3.3 LISFLOOD-FP 模型构建

LISFLOOD-FP 模型对一维管网溢流节点水量以二维漫流形式进行模拟,通过将 SWMM 的节点溢流数据输入到 LISFLOOD-FP 模型中实现对城市内涝的二维模拟,可以得到地表淹没范围、淹没水深、淹没时间以及流速。具体步骤如下:①将 SWMM 模拟得到的溢流节点流量过程转化成单宽流量过程;②分别建立 .bdy 文件和 .bci 文件,其中在 .bdy 文件中依次输入各个溢流节点的符号 P 、 x 坐标、 y 坐标、溢流类型和节点编号,在 .bci 文件中输入节点单宽流量值和对应时间节点;③检查研究区 DEM 坐标类型,确保与溢流节点的坐标系类型保持一致;④将 DEM 文件名称、.bdy 文件名称、.bci 文件名称输入到 .par 文件中,并根据研究区本底参数设置运行参数,借助 MATLAB 软件运行 LISFLOOD-FP 模型。

4 结果与分析

4.1 实测降雨模拟结果

选取 P20210703 的实测降雨数据作为资料进行

模拟,总降水量为 54.3 mm,降雨时间为 1:55—6:50,降雨历时为 5 h。利用 SWMM 进行一维水文水力模拟,溢流节点总数为 178 个,占总节点数的 10.39%,如图 8 所示。模拟的溢流总量为 1.258 万 m³。

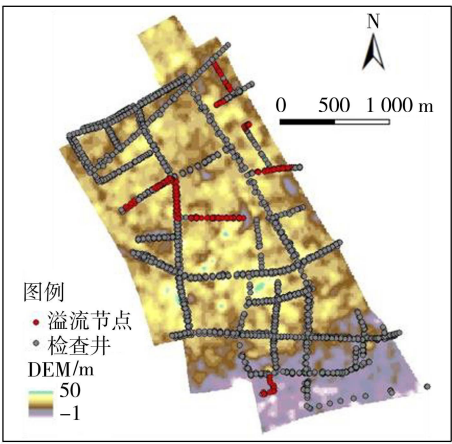


图8 溢流节点空间分布

Fig.8 Spatial distribution of overflow nodes

将所有溢流节点的单宽流量过程线转化成 .bdy 文件,溢流节点的坐标转化成 .bci 文件。运行 LISFLOOD-FP 模型,得到研究区二维淹没范围,如图 9 所示。参照 GB50014—2021《室外排水设计标准》、TCECS647—2019《城镇内涝防治系统数学模型构建和应用规程》以及相关研究^[26],根据淹水深度 H 划分 I、II、III、IV 级淹没区间,对应 H 值分别为 $>0 \sim 0.15$ m、 $>0.15 \sim 0.50$ m、 $>0.50 \sim 1.00$ m、 >1.00 m。模拟得到 I 级区间面积为 29.025 hm²、II 级区间面积为 0.477 hm²、III 级区间面积为 0.037 hm²、IV 级区间面积为 0.015 hm²,总淹没面积占研究区面积的 5.08%。由图 9 可见,内涝积水点主要集中在安宁庄西路、安宁庄中街、学府树中街等道路,最大积水深度超过 0.5 m,与现场调研情况基本相符。

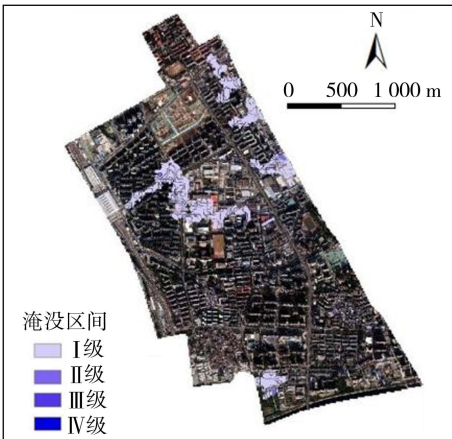


图9 淹没水深空间分布

Fig.9 Spatial distribution of inundation depth

4.2 设计降雨情景模拟结果

4.2.1 节点溢流情况

利用 SWMM,选取降雨重现期分别为 10、20、30、50 a 的长历时(24 h)设计降雨情景,对研究区暴雨洪涝过程进行模拟。分析可知,随着降雨重现期的增大,溢流节点的数量呈现明显增加趋势,溢流节点数分别为 1 039、1 203、1 294、1 326 个,溢流总量也呈现增大趋势,分别为9.75 万、17.85 万、26.64 万、35.54 万 m³,对应的溢流水量占总径流量比例分别为22.41%、29.61%、35.54%、38.92%。图 10 为不同降雨重现期下的溢流节点空间分布,可见安宁庄东路、安宁庄南路、安宁庄中街在不同降雨重现期下均有节点溢流,随着降雨重现期增大到 50 a,安宁庄西路与安宁庄南路交叉口出现管道溢流节点,安宁庄中街、安宁庄东路、朱房路的管道溢流节点数量明显增多,这与该研究区观测的易涝点位置基本吻合。

4.2.2 内涝淹没情况

利用 LISFLOOD-FP 模型对研究区二维淹没区域进行模拟,不同降雨重现期下各级区间淹没面积如表 2 所示。当降雨重现期分别为 10、20、30、50 a

时,淹没总面积分别为 1. 323、1. 866、2. 149、2. 202 km²,淹没区域占研究区面积比例分别为 22.73%、33.27%、36.92%、37.83%。由表 2 可见,在 I、II、III 级区间,淹没面积随着重现期的增大而增大,即内涝灾害风险面积增大。降雨重现期从 10 a 提高到 50 a,研究区的总淹没面积从1. 323 km² 增大到2. 202 km²,淹没面积占比从22.73% 增大到 37.83%,最大积水深度增大到1.00 m 以上,主要分布在上地下凹桥区、安宁庄西路、安宁庄中街、安宁庄路等位置,如图 11 所示。经调查可知,上地下凹桥区、安宁庄中街内涝是由于地势低洼、汇水面积过大造成;安宁庄西路、安宁庄路内涝是由于雨水口分布不合理、个别管道排水能力不足造成。

表 2 不同降雨重现期下各级区间淹没面积

Table 2 Inundation area of different levels under different rainfall return periods

淹没区间	淹没面积/km ²			
	P=10 a	P=20 a	P=30 a	P=50 a
I 级	1. 171	1. 469	1. 503	1. 413
II 级	0. 092	0. 203	0. 227	0. 264
III 级	0. 036	0. 024	0. 138	0. 180
IV 级	0. 024	0. 171	0. 280	0. 345

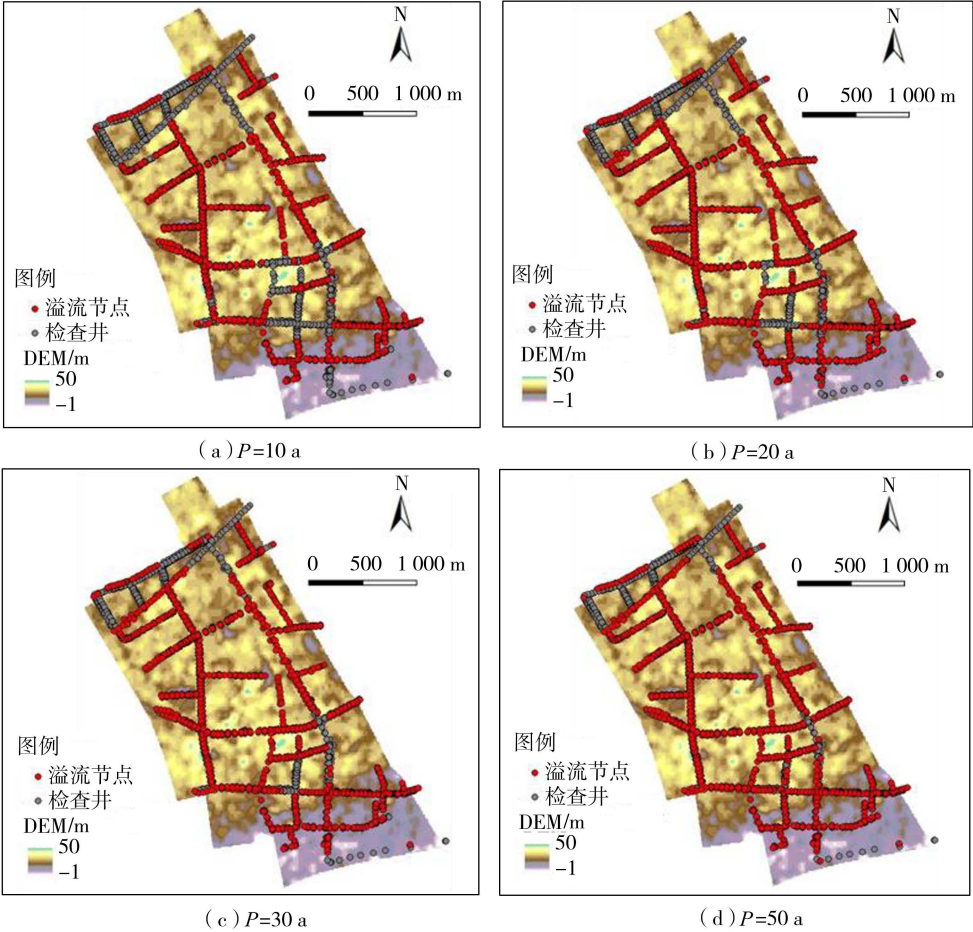


图 10 不同降雨重现期下溢流节点空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of overflow nodes under different rainfall return periods

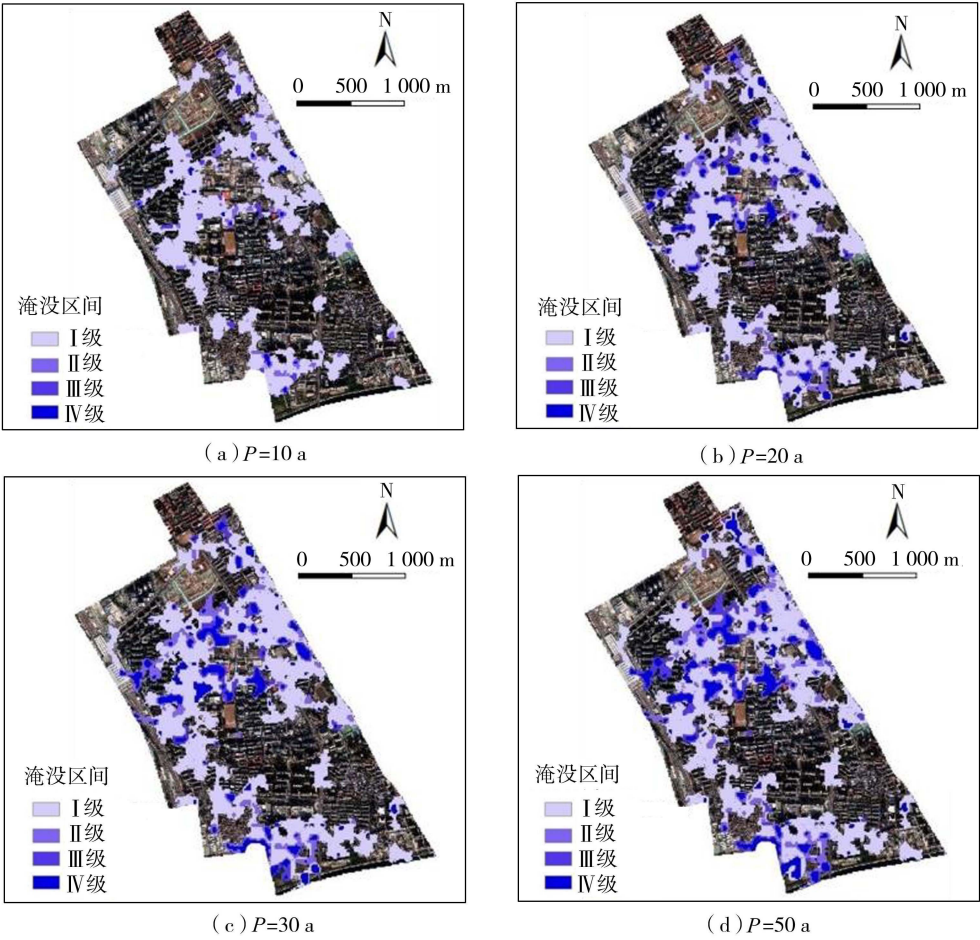


图 11 不同降雨重现期下地表淹没深度

Fig. 11 Inundation depth under different rainfall return periods

5 结 论

a. 将 SWMM 与 LISFLOOD-FP 模型进行外部耦合,构建北京市海淀区清河流域某典型排水分区的水文水动力模型。选用 P20210712、P20210718、P20210823 3 场实测降雨对模型参数进行率定与验证,并选用 P20210703 实测降雨进行二维淹没模拟。结果表明安宁庄西路、安宁庄中街属于内涝区域,所模拟的溢流范围和淹没水深与实际观测情况较为吻合。说明研究区耦合模型可靠,具有一定应用价值。

b. 利用耦合模型,选用降雨重现期分别为 10、20、30、50 a 的长历时设计降雨情景进行暴雨内涝模拟。结果表明随着降雨重现期的增大,溢流节点数和对应的溢流总量均呈现明显增加趋势, I、II、III 级区间的淹没面积随着降雨重现期的增大而增大,其中上地下凹桥区、安宁庄西路、安宁庄中街、安宁庄路等位置的最大积水深度增大到 1.00 m 以上。模拟结果说明研究区存在多个易涝点,在高降雨重现期下内涝积水区域呈现片状连接,具有较高的风险。

参考文献:

[1] IPCC. AR6 synthesis report: climate change 2023 [R]. Berne: Interlaken, 2023.

[2] 徐宗学,陈浩,任梅芳,等. 中国城市洪涝致灾机理与风险评估研究进展 [J]. 水科学进展, 2020, 31 (5): 713-724. (XU Zongxue, CHEN Hao, REN Meifang, et al. Progress on disaster mechanism and risk assessment of urban flood/waterlogging disasters in China [J]. Advances in Water Science, 2020, 31 (5): 713-724. (in Chinese))

[3] 黄亦轩,徐宗学,陈浩,等. 深圳河流域内陆侧洪涝风险分析 [J]. 水资源保护, 2023, 39 (1): 101-108. (HUANG Yixuan, XU Zongxue, CHEN Hao, et al. Analysis on urban flood/waterlogging risk at inland side of the Shenzhen River Basin [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (1): 101-108. (in Chinese))

[4] 姜晓曼,袁慧玲,薛明,等. 北京“7·21”特大暴雨高分辨率模式分析场及预报分析 [J]. 气象学报, 2014, 72 (2): 207-219. (JIANG Xiaoman, YUAN Huiling, XUE Ming, et al. Analysis of a torrential rainfall event over Beijing on 21-22 July 2012 based on high resolution model analyses and forecasts [J]. Acta Meteorologica Sinica,

- 2014,72(2):207-219. (in Chinese))
- [5] 徐宗学,程涛,任梅芳.“城市看海”何时休:兼论海绵城市功能与作用[J]. 中国防汛抗旱,2017,27(5):64-66. (XU Zongxue, CHEN Tao, REN Meifang. When will the “Looking at sea in cities” disappear: on the function and roles of sponge city [J]. China Flood & Drought Management, 2017,27(5): 64-66. (in Chinese))
- [6] 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))
- [7] 徐宗学,叶陈雷. 从“城市看海”到“城市看江”:极端暴雨情景下福州市洪涝过程模拟与风险分析[J]. 中国防汛抗旱,2021,31(9):12-20. (XU Zongxue, YE Chenlei. From “looking at sea in city” to “looking at river in city”: simulation and risk analysis of food and waterlogging process in Fuzhou City under extreme rainstorm scenarios [J]. China Flood & Drought Management, 2021, 31(9): 12-20. (in Chinese))
- [8] 朱辉,何祺胜,李金阳,等. 基于多源遥感数据的蓄洪区洪涝遥感监测与分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022,50(4):50-57. (ZHU Hui, HE Qisheng, LI Jinyang, et al. Remote sensing monitoring and analysis of flood in flood storage area based on multi-source remote sensing data [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(4):50-57. (in Chinese))
- [9] 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))
- [10] 赵冬泉,陈吉宁,佟庆远,等. 基于GIS的城市排水管网模型拓扑规则检查和处理[J]. 给水排水,2008(5):106-109. (ZHAO Dongquan, CHEN Jining, TONG Qingyuan, et al. Inspection and modification of GIS based topological relationships in urban drainage modeling[J]. Water & Wastewater Engineering, 2008(5):106-109. (in Chinese))
- [11] 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))
- [12] 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))
- [13] 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))
- [14] 雷向东,王兆礼,曾照洋,等. 基于ANUGA和SWMM耦合模型的车陂涌流域内涝模拟分析[J]. 水资源保护, 2023,39(3):82-90. (LEI Xiangdong, WANG Zhaoli, ZENG Zhaoyang, et al. Simulation analysis on Chenbei watershed waterlogging based on ANUGA and SWMM coupling model[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 82-90. (in Chinese))
- [15] 叶陈雷,徐宗学,雷晓辉,等. 福州晋安河片区海绵改造对城市内涝的影响[J]. 水资源保护,2023,39(1):83-92. (YE Chenlei, XU Zongxue, LEI Xiaohui, et al. Influences of sponge reconstruction of Jin'an River drainage district in Fuzhou City on urban flooding/waterlogging [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1):83-92. (in Chinese))
- [16] 施露,董增川,付晓花,等. Mike Flood在中小河流洪涝风险分析中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017,45(4):350-357. (SHI Lu, DONG Zengchuan, FU Xiaohua, et al. Application of Mike Flood to analysis of flood and waterlogging risks of medium and small rivers [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(4):350-357. (in Chinese))
- [17] NANDI S, REDDY M J. An integrated approach to streamflow estimation and flood inundation mapping using VIC, RAPID and LISFLOOD-FP [J]. Journal of Hydrology, 2022, 610:127842.
- [18] 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.
- [19] 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))

(下转第124页)

[29] 夏军,左其亭,邵民诚. 博斯腾湖水资源可持续利用:理论·方法·实践[M]. 北京:科学出版社,2003.

[30] 李新虎,宋郁东,张奋东,等. 博斯腾湖最低生态水位计算[J]. 湖泊科学,2007,19(2):177-181. (LI Xinhua, SONG Yudong, ZAHNG Fendong, et al. The calculation of the lowest ecological water level of Lake Bosten[J]. Journal of Lake Sciences, 2007,19(2):177-181. (in Chinese))

[31] 陈一迪,诸葛亦斯,石岳峰,等. 柴达木盆地湖泊天然生态水文特性辨识[J]. 水资源保护,2023,39(1):225-233. (CHEN Yidi, ZHUGE Yisi, SHI Yuefeng, et al. Identification of natural eco-hydrological characteristics of lakes in the Qaidam Basin [J]. Water Resources Protection, 2023,39(1):225-233. (in Chinese))

[32] 郑汉杰,王子博,朱翔,等. 盐度与水位双重波动对芦苇去除水中氮磷的影响机理[J]. 环境科学研究,2023,36(5):986-994. (ZHENG Hanjie, WANG Zibo, ZHU Xiang, et al. Influencing mechanisms of dual fluctuations of water level and salinity on nitrogen and phosphorus removal by reed [J]. Research of Environmental Sciences, 2023,36(5):986-994. (in Chinese))

[33] YIN X A, YANG Z F. A method to assess the alteration of water-level-fluctuation patterns in lakes[J]. Procedia Environmental Sciences, 2012,13:2427-2436.

[34] GOWNARIS N J, PIKITCH E K, ALLER J Y, et al. Fisheries and water level fluctuations in the world's largest desert lake[J]. Ecohydrology, 2017,10(1):e1769.

[35] 魏潇娜,龙爱华,尹振良,等. 和田河流域冰川径流对气候变化响应的模拟分析[J]. 水资源保护,2022,38(4):137-144. (WEI Xiaona, LONG Aihua, YIN Zhenliang, et al. Simulation of response of glacier runoff to climate change in the Hotan River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022,38(4):137-144. (in Chinese))

[36] 彭建,赵会娟,刘焱序,等. 区域生态安全格局构建研究进展与展望[J]. 地理研究,2017,36(3):407-419. (PENG Jian, ZHAO Huijuan, LIU Yanxu, et al. Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction [J]. Geographical Research, 2017,36(3):407-419. (in Chinese))

(收稿日期:2023-08-06 编辑:王芳)

(上接第105页)

[20] 李家科,李亚,沈冰,等. 基于SWMM模型的城市雨水花园调控措施的效果模拟[J]. 水力发电学报,2014,33(4):60-67. (LI Jiake, LI Ya, SHEN Bing, et al. Simulation of rain garden effects in urbanized area based on SWMM [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014,33(4):60-67. (in Chinese))

[21] 徐宗学. 水文模型:回顾与展望[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2010,46(3):278-289. (XU Zongxue. Hydrological models:past, present and future[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2010,46(3):278-289. (in Chinese))

[22] 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))

[23] DAZZI S, SHUSTIKOVA I, DOMENEGHETTI A, et al. Comparison of two modelling strategies for 2D large-scale flood simulations [J]. Environmental Modelling & Software, 2021,146:105225.

[24] 杨钢,徐宗学,赵刚,等. 基于SWMM模型的北京大红门排水区雨洪模拟及LID效果评价[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2018,54(5):628-634. (YANG Gang, XU Zongxue, ZHAO Gang, et al. Simulating urban rainfall-runoff and assessing LID facilities by SWMM model in Dahongmen catchment [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2018,54(5):628-634. (in Chinese))

[25] 何旭,缪子梅,田佳西,等. 基于CMIP6多模式的长江流域气温、降水与径流预估[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2024,48(2):1-8. (HE Xu, MIAO Zimei, TIAN Jiaxi, et al. Temperature, precipitation and runoff prediction in the Yangtze River Basin based on CMIP6 multi-model [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2024,48(2):1-8. (in Chinese))

[26] 叶婉露,韦明杰. 数学模型在大兴国际机场排水防涝规划中的应用[J]. 给水排水,2021,57(7):123-128. (YE Wanlu, WEI Mingjie. Application of digital model in drainage and waterlogging control planning of Daxing International Airport [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021,57(7):123-128. (in Chinese))

(收稿日期:2023-08-04 编辑:王芳)