

何畅烨, 林凯荣, 罗威, 等. 广州市车陂涌城市雨洪模拟模型构建[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(6): 90-100. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.06.008

HE Changye, LIN Kairong, LUO Wei, et al. Establishment of urban flood simulation model for Chebeichong River in Guangzhou City[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(6): 90-100. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.06.008

广州市车陂涌城市雨洪模拟模型构建

何畅烨¹, 林凯荣^{1,2,3}, 罗威¹, 徐源浩¹, 皋云⁴, 李碧琦⁴

(1. 中山大学 土木工程学院, 广东 广州 510275; 2. 广东省华南地区水安全调控工程技术研究中心, 广东 广州 510275; 3. 广东省海洋土木工程重点实验室, 广东 广州 510275; 4. 广东省水文局, 广东 广州 510140)

摘要:【目的】在全球气候变化背景下, 快速城市化对水文过程产生了深远的影响, 随之城市复杂下垫面对产汇流计算带来了挑战, 迫切需要综合考虑各种不同下垫面条件下的城市洪涝模拟技术。【方法】根据产汇流属性以及土地利用类型将城市复杂下垫面分类为透水面、直接不透水面和间接不透水面, 分别采用蓄满产流、超渗产流和 API-SCS-CN 产流计算方法, 再结合坡面、管道和河道汇流, 以广州市天河区车陂涌流域为研究区构建了车陂涌城市雨洪模拟模型, 并利用 2021—2023 年实测降雨径流数据检验考虑复杂下垫面的车陂涌城市雨洪模拟模型的实用性。【结果】车陂涌城市雨洪模拟模型率定期内流量模拟精度纳什效率系数达 0.71, 相关系数达 0.74, 验证期内流量模拟纳什效率系数达 0.79, 相关系数达 0.81, 相同建模条件下 SWMM-SCS 模型流量纳什效率系数达 0.5, 相关系数达 0.6。【结论】车陂涌城市雨洪模拟模型的模拟结果较 SWMM-SCS 模型更加准确, 纳什效率系数提升了 66.7%, 径流相关系数提升了 29.7%, 洪量误差则降低了 48.3%, 洪峰流量误差降低了 3.2%, 说明考虑复杂下垫面并利用多种产流模式的城市雨洪模型结构具有一定可靠性和应用前景, 可为城市雨洪模拟提供新思路。

关键词: 降雨; 复杂下垫面; 城市雨洪模拟; 产汇流; API-SCS-CN; 车陂涌

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.06.008

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)06-0090-11



Establishment of urban flood simulation model for Chebeichong River in Guangzhou City

HE Changye¹, LIN Kairong^{1,2,3}, LUO Wei¹, XU Yuanhao¹, GAO Yun⁴, LI Biqu⁴

(1. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China; 2. Guangdong Engineering Technology Research Center of Water Security Regulation and Control for Southern China, Guangzhou 510275, Guangdong, China; 3. Guangdong Key Laboratory of Marine Civil Engineering, Guangzhou 510275, Guangdong, China; 4. Hydrological Bureau of Guangdong Province, Guangzhou 510140, Guangdong, China)

Abstract: [Objective] In the context of global climate change, rapid urbanization has a profound impact on hydrological

收稿日期: 2024-04-10; 修回日期: 2024-05-28; 录用日期: 2024-08-08; 网络出版日期: 2024-08-14

基金项目: 国家优秀青年科学基金项目(51822908); 广东省基础与应用基础研究基金卓越青年团队项目(2023B1515040028); 广东省水文局项目(440001-2023-10716)

作者简介: 何畅烨(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事城市水文研究。E-mail: hechy25@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 林凯荣(1980—), 男, 教授, 博士, 主要从事水水文水资源研究。E-mail: linkr@mail.sysu.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

processes, and complex urban underlying surface has brought challenges to the calculation of runoff generation and flow concentration. There is an urgent need to develop urban flood simulation technologies that comprehensively consider different underlying surface conditions. [Methods] Based on the characteristics of runoff generation and flow concentration and land use types, the complex urban underlying surface was classified into permeable, directly impervious, and indirectly impervious surfaces. The runoff generation was calculated using the saturation-excess, infiltration-excess, and API-SCS-CN method, respectively. Combined with the flow concentration of slopes, pipelines, and river channels, Chebeichong urban flood simulation model was established for the Chebeichong River Basin in Tianhe District, Guangzhou. The model's practicality, considering the complex underlying surface, was validated using the measured rainfall and runoff data from 2021 to 2023. [Results] During the calibration period, the Chebeichong urban flood simulation model achieved a Nash efficiency coefficient of 0.71 and a correlation coefficient of 0.74 for flow simulation. During the validation period, the Nash efficiency coefficient reached 0.79, and the correlation coefficient reached 0.81. Under the same modeling conditions, the SWMM-SCS model achieved a Nash efficiency coefficient of 0.5 and a correlation coefficient of 0.6. [Conclusion] The simulation result of the Chebeichong urban flood simulation model are more accurate than those of the SWMM-SCS model, with the Nash efficiency coefficient improving by 66.7%, the runoff correlation coefficient increasing by 29.7%, the flood volume error decreasing by 48.3%, and the peak flow error decreasing by 3.2%. These findings indicate that incorporating complex underlying surfaces and multiple runoff generation models enhances the reliability and applicability of urban flood models, providing a new approach for urban flood simulation.

Keywords: rainfall; complex underlying surface; urban flood simulation; runoff generation and flow concentration; API-SCS-CN; Chebeichong River

0 引言

随着全球气候变化导致的极端降水事件增多增强,城市洪涝灾害防御、供水保障、生态环境容量面临着越来越大的挑战。与此同时,快速城市化产生的城市雨洪效应对城市水循环造成了深刻影响,特别是在城市内涝与微气候等方面的影响^[1],城市降水-径流和洪涝特性发生了显著变化。

近年来,城市洪涝在世界多地出现,水文极值和灾害强度屡屡刷新历史记录。2021年郑州“7·20”^[2]、2023年海河“23·7”^[3]和深圳“9·7”^[4]等极端超强暴雨事件对城市水安全带来巨大挑战。2023年9月,非洲利比亚受飓风“丹尼尔”带来的强降雨影响发生大坝溃坝事件,将古城德尔纳的1/4完全冲毁,造成利比亚全国超过1/5人口受灾,超过2万人死亡失踪^[5]。因此系统解析城市洪涝成因、科学调控洪涝过程和降低洪涝灾害风险成为了城市水文过程变化与调控的热点研究领域。

准确模拟城市内涝灾害风险并开展预警预报,是完善城市防洪除涝减灾体系,提升城市防洪除涝能力,减轻灾害损失的基础^[6]。国外研发的城市雨洪模拟模型应用较广,其中包括美国环境保护署开发的SWMM^[7],丹麦水利研究所研发的MIKE系列模型^[8]和英国Wallingford公司研发的InfoWorks ICM^[9]模型等;国内部分科研单位也自主研发城市雨洪模型,其中包括中国水利水电科学研究院自主研发的洪涝仿真模型^[10]和IFMS Urban软件^[11],华南理工大学研发的

IHUM模型^[12]和珠江水利科学研究院自主研发的Hydro MPM模型^[13]等。YAN等^[14]、CEA等^[15]总结城市洪水模型未来发展以及应对气候变化等问题的研究趋势,提出众包地理、遥感等大数据以及空间数据管理和分析方法的进一步发展提高了城市洪水模型的准确性和效率;PIADEH等^[16]总结过往城市雨洪模型研究提出城市实时雨洪模型可结合实时多源降雨数据以及更多如土壤湿度、风流模式和蒸发等实时数据提升模拟精度。近年不少学者融合新技术来提高城市雨洪模拟精度,XING等^[17]将多GPU流体动力模型应用于福州洪水事件模拟中,完成近乎实时显示的效率和稳定性,实现高分辨率的洪灾模拟;BALACUMARESAN等^[18]在澳大利亚墨尔本加德纳溪城市集水区应用监督学习算法与ANN模型准确估计历史风暴事件。

其中,径流曲线法(Soil Conservation Service Curve Number, SCS-CN)是一种简洁、有效并广泛应用于城市雨洪径流模拟的方法,但其通过考虑前期降雨情景来确定CN参数值难以适应当下城市雨洪快速模拟的需求。为适应城市雨洪模拟需求,SHI等^[19]依靠降雨历时的经验方程修正CN值;吴艾璞等^[20]提出了一种考虑次降雨事件中土壤前期雨量和土壤入渗量的静态渗透方程,以此改进SCS-CN模型;JIAO等^[21]提出潜在初始抽取和衰减常数以此改进SCS-CN方法,较原方法在4种植植系统径流模拟中NSE和 R^2 均提高20%以上。虽然这些研究提高了SCS-CN模型的准确性,但对于城市下垫面硬质化存在一定不适

应性, 对城市下垫面资料要求较高。

随着城市化的不断推进, 大面积不透水面以及地下管网、雨水井、沟渠等代替了原有自然下垫面, 城市下垫面通常呈现出复杂的自然-人为下垫面镶嵌格局^[22], 从很大程度上影响着地表水文过程, 导致径流增加、产流提前、洪峰增大等现象^[23], 进一步对城市水文过程和内涝灾害的精确模拟构成挑战。近年众多学者对城市复杂下垫面概化提出新方法或新概念。比如, 基于土地利用类型及产汇流响应特征逐层划分排水片区、用地汇水片区、地块汇水单元和模型子汇水区^[24]; 根据透水特性划分为不透水、透水、半透水、伪透水、强透水和水域等多种单元^[25]。现有技术方法鲜有同时考虑城市管网以及土地利用类型的产汇流响应特征的复杂下垫面划分方法。

广州市作为粤港澳大湾区的核心城市, 是城市内涝灾害频发的代表性城市之一。统计数据显示, 2016—2020 年发生了 19 次严重内涝, 2017 年“5·7”特大暴雨^[26]、2018 年“6·8”特大暴雨、2020 年“5·22”特大暴雨^[27]等历次受灾经济损失

均过亿, 甚者高达 28 亿元。《粤港澳大湾区水安全保障规划》^[28]《国务院办公厅关于加强城市内涝治理的实施意见》^[29]《广东省水利发展“十四五”规划》^[30]等多项文件指出要将工程与非工程措施相结合, 加强流域洪涝和自然灾害风险监测预警, 完善城市防控极端天气水灾害的体系机制, 构筑安全可靠的防洪减灾网。

本文以广州市天河区车陂涌流域为研究区, 提出根据土地利用类型及其产汇流响应特征和城市管网道路分布对城市复杂下垫面进行分类, 基于 API 提出更为简洁的方法改进产流计算, 构建车陂涌城市雨洪模拟模型 (Chebeichong Urban Flood Simulation Model, CBC-UFSM), 并基于实测降雨径流数据检验考虑混合产流模式的模型实用性, 以期广州市城市内涝预警及决策提供科学依据。

1 研究区概况

车陂涌位于广东省广州市东部的天河区, 是天河区七条河涌中流域面积最大的河涌。车陂涌流域面积 82 km², 干流长度 15 km, 流域概况如图 1 所示。

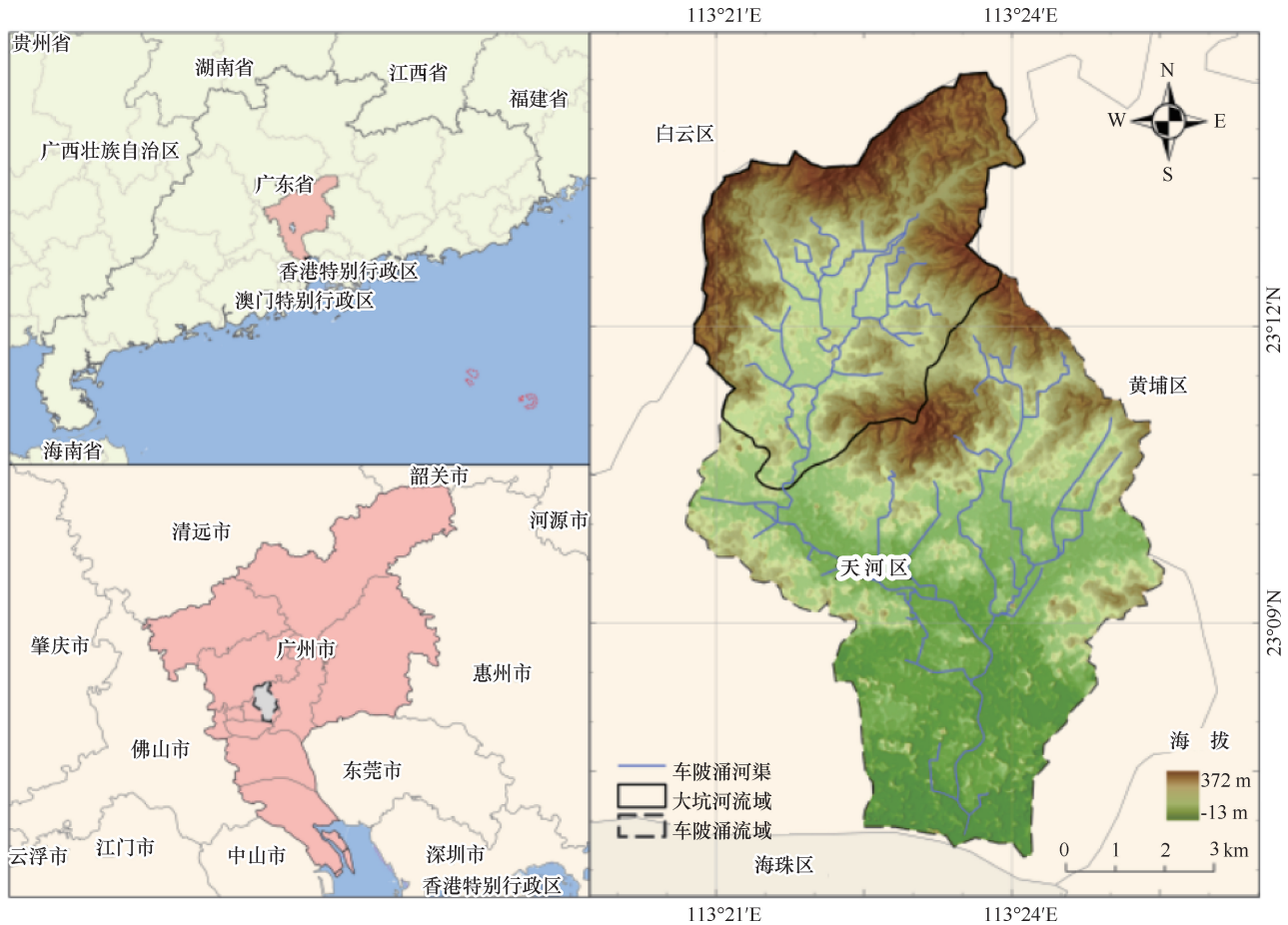


图 1 车陂涌流域概况
Fig. 1 Overview of Chebeichong River Basin

车陂涌流域上游以山地丘陵为主,中游丘陵和平原交错,下游以平原为主,流域地形北高南低,高程介于 $-13 \sim 372$ m 之间,属于亚热带海洋季风气候,年平均气温 22.3 $^{\circ}\text{C}$,年平均降雨量为 $1\,720$ mm。其中,大坑河流域是车陂涌的子流域,位于车陂涌流域上游,是典型的城市化进程较快的流域,有记录时间较长且翔实的历史降雨径流数据。1987 年大坑河流域的城市化水平较低,建成区仅占流域面积的 6%;到 2008 年,建成区占比达到 49.8%,城市化水平显著提升。2008 年以后,城市化率基本保持稳定,增速较缓;到 2015 年,城市化率达到 52.7%。因此,车陂涌流域中上游自然河沟和人工河渠并存,而下游河道渠道化明显。另外,由于夏季强降雨的影响,车陂涌流域城市内涝灾害频繁。综上所述,具有充足历史资料且研究具有防灾减灾工程意义的车陂涌流域适宜作为城市水文模拟的研究对象。

2 模型方法

搭建模型基于汇水单元对水文过程进行模拟,实现对城市雨洪过程的动态降雨-径流模拟计算,模型分为复杂下垫面划分、产流计算和汇流计算。其中产流计算是基于复杂下垫面划分结果分别采用不同产流模式进行计算,包括蓄满产流、超渗产流和 API-SCS-CN 产流,其中 API-SCS-CN 产流计算是将 *API* (前期降水指数)引入 SCS 模型中优化 *CN* 值的计算,使得 *CN* 值随降雨量而时变;汇流模块利用非线性水库法计算;管网模块利用动力波法计算管网内水流流动。车陂涌城市雨洪模型结构如图 2 所示,耦合复杂下垫面划分、产流和汇流模块,形成完整的城市雨洪模型。

研究区划分汇水单元后,再将汇水单元划分为透水面 (PA)、直接不透水面 (DA) 和间接不透水面 (NDA)^[31],复杂下垫面的划分及其产流模式如图 3 所示。透水面包括草地、湿地和林地等土地利用类型,在该下垫面上以蓄满产流为主;直接不透水面是指水流直接排入雨水管道的建筑和道路等建成区的不透水面;间接不透水面是指水流先流经透水面,再排至雨水管道的建筑和道路等建成区的不透水面。同时对建筑和道路的产流计算进一步细分,在直接不透水面中体现为不同的下渗曲线,在间接不透水面中体现为不同的 *CN* 初始值。

在 NDA 中,引入 *API* 值^[32]代表土壤湿度随时间变化,改进 SCS-CN 模型中 *CN* 值的计算,以此适应不同前期降雨情景。其公式为

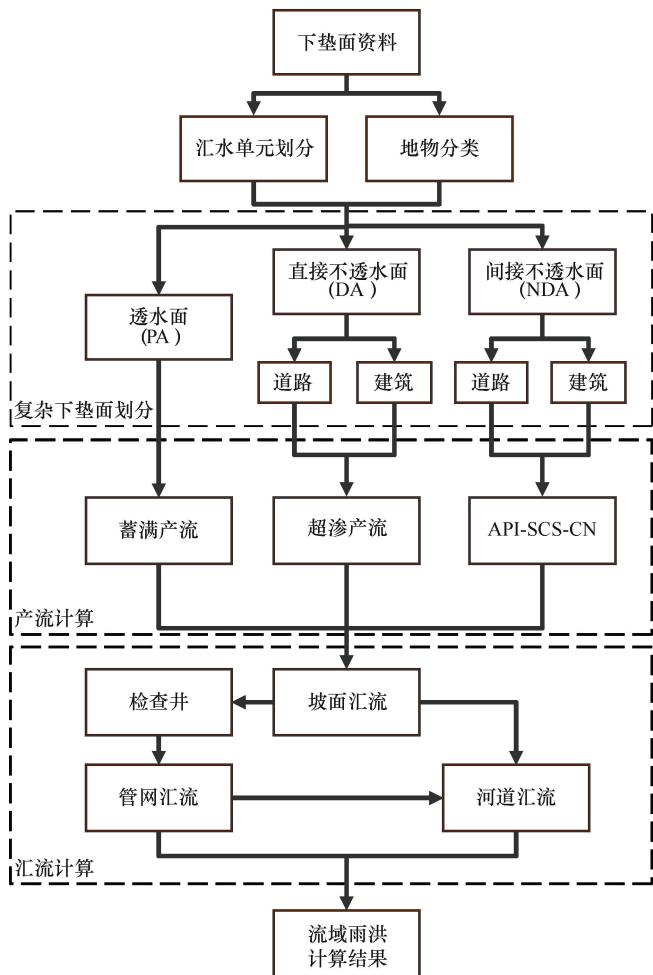


图2 车陂涌城市雨洪模型结构

Fig. 2 Structure of Chebeichong urban flood simulation model

$$API = \frac{\int_0^t \exp\left(-\frac{\sigma}{K_e}\right) P(t - \sigma) d\sigma}{K_e} \quad (1)$$

$$CN' = (a \times API + b) \times CN \quad (2)$$

式中, K_e 为土壤水滞时参数,需要通过实测降雨数据确定; P 为降水量; CN' 为改进后径流曲线特征值; a 和 b 需要实测数据来确定。

$$S = \frac{25\,400}{CN} - 254 \quad (3)$$

$$R_{NDA} = \frac{P^2}{P + S} \quad (4)$$

式中, R_{NDA} 为间接不透水面产流量 (mm); S 为损失雨量 (mm)。

在 DA 中道路和建筑分别计算各自的下渗曲,即

$$R_{DA} = \begin{cases} 0, & P < F \\ P - f\Delta t, & P \geq F \end{cases} \quad (5)$$

$$f = \frac{A_{DA}}{x + B_{DA}} + C_{DA} \quad (6)$$

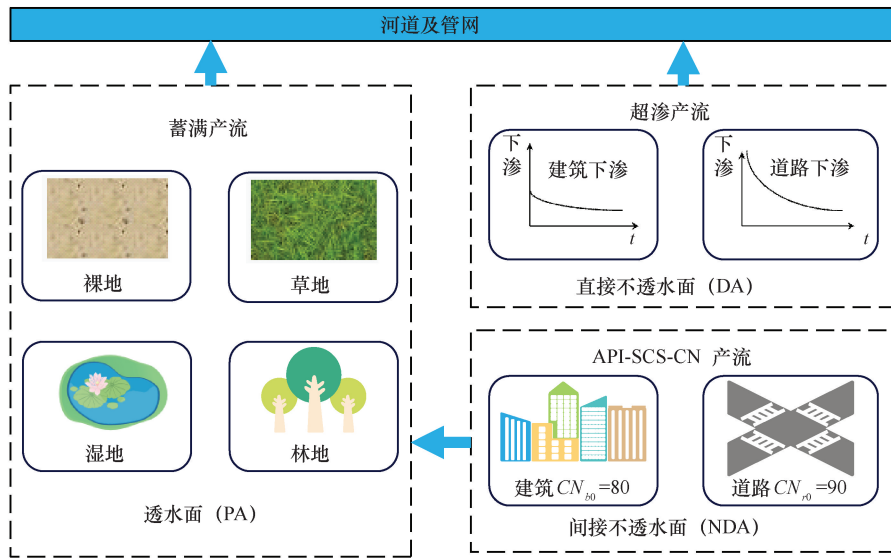


图3 复杂下垫面划分及对应产流模式

Fig. 3 Division of complex underlying surfaces and corresponding runoff generation modes

式中, R_{DA} 为直接不透水面产流量 (mm); F 为入渗量 (mm); f 为入渗率 (mm/h); x 为降雨持续时间 (h), 模型中定义降雨时刻后 4 h 内存在降雨视作降雨持续; A_{DA} 、 B_{DA} 和 C_{DA} 均为下渗率的计算参数。

在 PA 中, 构建 API 和蓄满产流计算中的关系, 计算公式如下。

当 $A + P < WMM$ 时

$$A = WMM \left[1 - \left(1 - \frac{k \times API}{WM} \right)^{\frac{1}{1+B}} \right] \quad (7)$$

$$R_{PA} = P - (WM - k \times API) + WM \quad (8)$$

式中, A 为汇水单元原有蓄水容量 (mm); WMM 为汇水单元最大蓄水容量 (mm); k 为给定值的前期降雨指数衰减系数; API 为同时刻间接不透水面中的前期降雨指数; WM 为汇水单元平均蓄水容量 (mm); B 为蓄水容量在汇水单元上的分布不均匀性; R_{PA} 为透水面产流量 (mm)。

当 $A + P > WMM$ 时

$$R_{PA} = P - (WM - k \times API) \quad (9)$$

汇流模块模拟净雨从集水区各处向出口断面汇集的过程。模型将集水区概化为非线性水库, 通过求解由连续性方程与曼宁方程组成的方程组对汇流进行计算^[33]。

对于水力过程, 为计算水流在管道中的运动, 在模型中使用动力波计算方法, 求解完整的运动方程^[34]。该方法在较小的时间步长下进行演算, 且求解完整的圣维南方程组, 因此计算结果更加准确可

靠, 可以对多种管道内的水流情况进行计算描述^[35]。

参数率定使用人工调参及遗传算法自动调参相结合的方法。遗传算法是一种模拟自然界动物优胜劣汰进化的过程, 将多组参数作为初始种群, 在迭代过程中选择、交叉和变异更新出新的参数组^[36]。计算纳什效率系数以评价模型率定准确性, 从而确定率定过程中多组参数中的全局最优解作为最终模型参数。

本文使用纳什效率系数 NSE 、相关系数 R 、洪水总量误差 RE 、洪水峰值误差 QE 作为模型效果评估指标^[37]。其公式为

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_s^i - Q_o^i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_s^i - \overline{Q_o})^2} \quad (10)$$

式中, Q_s^i 为模拟径流量 (m^3/s); Q_o^i 为实测径流量 (m^3/s); $i = 1, 2, \dots, n$; n 为计算时段数; $\overline{Q_o}$ 为实测径流均值 (m^3/s)。

$$R = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Q_s^i - \overline{Q_s})(Q_o^i - \overline{Q_o}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_s^i - \overline{Q_s})^2 \sum_{i=1}^n (Q_o^i - \overline{Q_o})^2} \quad (11)$$

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^n Q_s^i - \sum_{i=1}^n Q_o^i}{\sum_{i=1}^n Q_o^i} \times 100\% \quad (12)$$

$$QE = \frac{Q_s^m - Q_o^m}{Q_o^m} \times 100\% \quad (13)$$

式中, Q_s^m 为模拟径流峰值 (m^3/s); Q_o^m 为实测径流峰值 (m^3/s)。

3 模型构建

一维模型构建主要由河道管网、节点、汇水单元三个模块组成, 其中节点模块包含雨水井、蓄水池 (含水库) 和排放口等。河道管网、节点、汇水单元模块是相互交互的, 通过河道管网生成节点, 汇水单元的地表径流通过节点入流到河道管网中进行河道管网中的汇流。建模过程所需数据资料包括高精度

DEM 栅格、土地利用类型栅格、城市路网矢量文件和城市管网规划图等。研究使用的是 ALOS 卫星雷达 12.5 m 精度的 DEM 栅格数据以及卫星遥感土地利用产品。河道管网模块主要包括根据城市规划图纸概化河道以及管网生成制作概化河道管网矢量线要素。节点模块需要制作节点的点要素矢量, 包含的属性主要为内底标高等。节点模块除雨水井外, 还有蓄水池, 同样需要设置底部标高、初始水深标高、最大标高、蓄水容量曲线和排放口。车陂涌流域出口连接外江并设有闸门, 流域为重力排水区, 闸门概化为当内涌水位高于外江水位时打开闸门进行自排, 当内涌水位低于外江水位时关闭闸门。因此模型输入包含下游外江水位, 以此作为下边界反映出内外江交互作用。

汇水单元模块构建首先需要明确流域范围再进行划分汇水单元。汇水单元的划分方法是 HAND 值法 (Height Above the Drainage), 基本原理为通过计算某一栅格填洼修正后的 DEM 值减去该栅格同一流向上最大的累积流量栅格的 DEM 值, 表征该栅格单元与最近汇水栅格的垂直距离。地面径流会从 HAND 值较大的格点流向较小的格点, 因此可以用于划分汇水单元^[38]。通过生成 HAND 等高线图, 结合山脊线与雨水井来划分汇水单元, 同时考虑道路立交、不同土地利用、不同居民区对汇水单元面的破碎进行人工调整。综合考量后绘制得到车陂涌流域的汇水单元, 如图 4 所示。

汇水单元涉及的属性包括名称、面积、平均坡度、特征宽度、雨量站、透水面占比 (PA)、直接不透水面占比 (DA) 和间接不透水面占比 (NDA) 等。其中直接不透水面与间接不透水面均再划分为道路与建筑两类, 并计算其所占比例。

模型中对应的不同下渗类型划分, 即透水面占比、直接不透水面占比和间接不透水面占比是利用 eCognition 软件对不同时期车陂涌流域 Sentinel 卫星遥感影像数据 (10 m 分辨率) 的土地利用类型数据以及通过锁眼卫星影像划分的车陂涌土地利用数据进行处理, 定义透水、直接不透水 (道路)、直接不透水 (建筑)、间接不透水 (道路)、间接不透水 (建筑)。再依次定义多尺度分割规则、分类规则、后处理规则、类别合并规则、透水面与透水面提取与统计规则、透水面与不透水面提取结果导出规则。导入车陂涌路网及管网数据, 划分缓冲区, 合并不同地物的分割对象, 将建筑和路面合并为不透水面, 再细划分为直接不透水 (道路)、直接不透水 (建筑)、间接不透水 (道路) 和间接不透水 (建筑), 将林地、草地以及

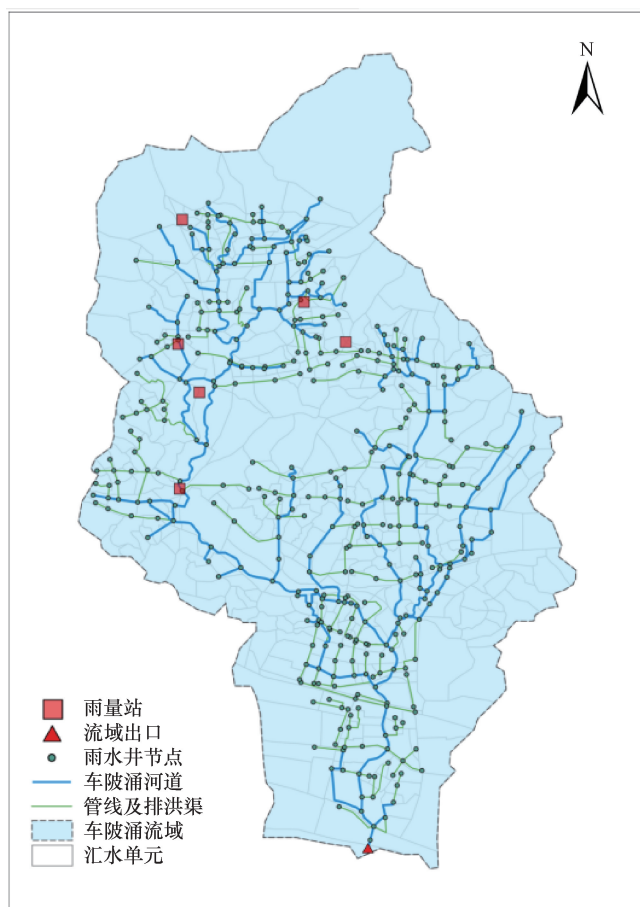


图 4 现代车陂涌流域下垫面建模

Fig. 4 Underlying surface modeling of modern Chebeichong River Basin

裸地合并为透水面, 最后将各部分比例导出即可获取各汇水单元的对应的不同下渗类型比例。

地表漫流特征宽度指汇水单元的面积与其地表漫流最长路径长度的比值, 最大地表漫流长度是指在水流渠道化之前, 汇水单元中最长水流路径的长度^[39]。实际中汇水单元的特征宽度无法实测, 是模型中一个理想化的参数, 只能通过计算得到。研究采用公式 $Width = K \times \sqrt{Area}$ ($0.2 < K < 5$), 其中 K 取 1.25。

通过坡度分析, 将 DEM 栅格输出为百分比的坡度栅格, 获得各汇水单元的坡度。汇水单元对应雨量站则是利用最邻近法分配。

车陂涌城市雨洪模拟模型的构建最终需要将 ArcGIS 中制作的节点、河道管网、汇水单元的点线面矢量文件属性表相关属性整合输出为文本格式的模式输入初始化文件。

4 结果与讨论

车陂涌城市雨洪模拟模型是基于 C 语言自主研

发的精细化下垫面划分的产汇流模型。以汇水单元为最小单元对水文过程进行模拟, 实现了对城市内涝过程的动态降雨-径流模拟计算, 其中包含 15 个待优化参数。

研究基于车陂涌流域内 6 处降雨计、和 1 处河道流量计的地面历史观测数据及其他下垫面资料, 构建了适用于车陂涌流域的改进模型。模型参数含义、取值范围及率定值如表 1 所列。车陂涌城市雨洪模拟模型中包含了多种产流模式, 不同产流模式的参数敏感性各有差异。间接不透水面对应的 API-SCS-CN 产流计算中敏感性较高的参数是 a , 表征前期降雨与土壤含水量对产流的影响程度; 直接不透水面对应的超渗产流计算中敏感性较高的参数是 A_{DA} , 表征直接不透水面的下渗率衰退速率, 取值越大衰退越快; 透水面对应的蓄满产流计算中敏感性较高的参数是 A , 表征原有蓄水量对下渗容量的影响。本研究结合模型机理确定了各参数合理取值范围, 并在率定过程中确定了适用于车陂涌流域的参数取值, 当用于其他流域时可根据下垫面特征适当调整参数取值从而适应不同流域应用情景。

模型率定所使用的数据时间段为 2021 年 5 月 27 日—2021 年 6 月 14 日, 验证所使用的数据时间段为 2023 年 4 月 1 日—2023 年 7 月 31 日中的 6 场降雨事件。车陂涌城市雨洪模拟模型建模总体结果如图 5 所示, 模拟流量过程与观测流量过程在趋势性上较为一致, 在准确性上较为良好, 各小时流量模拟精度 R 达到 0.74, NSE 达到 0.71。

使用 2023 年 4 月 1 日—2023 年 7 月 31 日时段内的 6 场降雨径流过程对车陂涌城市雨洪模拟模型进行

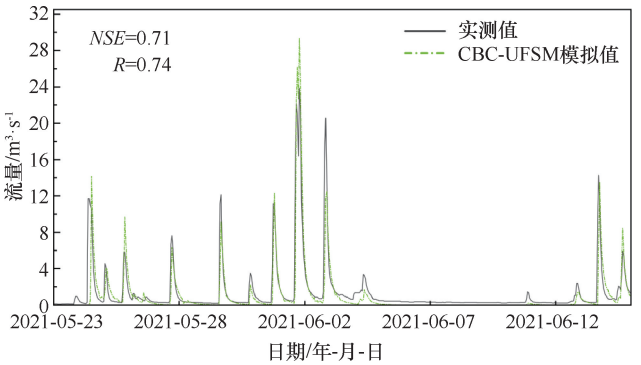


图5 车陂涌城市雨洪模拟模型建模率定期结果
Fig.5 Calibration results of modeling rate of Chebeichong urban flood simulation model

验证。SWMM-SCS 模型是指 SWMM 模型中下渗模块使用 SCS-CN 模型, 其汇流模块原理与 CBC-UFSM 模型汇流原理一致, 均为非线性水库法, 由于其是工程实践中应用最为广泛的城市雨洪模型, 因此将 CBC-UFSM 模型验证期结果与 SWMM-SCS 模型模拟结果进行对比, 结果如图 6 所示。

车陂涌城市雨洪模拟模型与 SWMM-SCS 模型模拟的 6 场降雨径流过程线的模型精度评价系数统计如表 2 所列, 车陂涌城市雨洪模拟模型的验证集模拟结果较 SWMM-SCS 模型径流纳什效率系数 NSE 提升了 66.7%, 径流相关系数 R 提升了 29.7%, 洪量误差 RE 则降低了 48.3%, 洪峰流量误差降低了 3.2%。模型参数在 6 场降雨事件中均保持一致, 从图中可以看出车陂涌城市雨洪模拟模型的模拟洪水流量过程与实测流量较为吻合, 基本能反映实际降雨径流过程。而 SWMM-SCS 模型模拟普遍出现洪峰靠后且退水过程不吻合实际的情况, 尤其是在双峰流量过程线中

表 1 车陂涌城市雨洪模拟模型下渗模块参数

Table 1 Infiltration module parameters of Chebeichong urban flood simulation model					
下垫面类型	参数名称	参数含义		取值范围	率定取值
间接 不透水面(NDA)	a_r	$CN' = (a \times API + b) \times CN$	计算道路时变 CN	0.00 ~ 1.00	0.58
	b_r			0.00 ~ 0.20	0.05
	a_b		计算建筑时变 CN	0.00 ~ 1.00	0.43
	b_b			0.00 ~ 0.20	0.05
直接 不透水面(DA)	A_r	$f = \frac{A_{DA}}{x + B_{DA}} + C_{DA}$	计算道路时变下渗率	0.00 ~ 10.00	3.80
	B_r			5.00 ~ 9.00	7.00
	C_r			0.00 ~ 0.15	0.01
	A_b		计算建筑时变下渗率	0.00 ~ 10.00	4.50
	B_b			5.00 ~ 9.00	7.00
	C_b			0.00 ~ 0.15	0.01
透水面(PA)	K	前期降雨指数衰减系数		0.00 ~ 1.00	1.00
	A	汇水单元原有蓄水量/mm		0.00 ~ 20.00	6.00
	B	蓄水容量在汇水单元上的分布不均匀性		0.00 ~ 0.50	0.30
	WM	汇水单元平均蓄水容量/mm		0.00 ~ 20.00	5.00
	WMM	汇水单元最大蓄水容量/mm		0.00 ~ 20.00	7.60

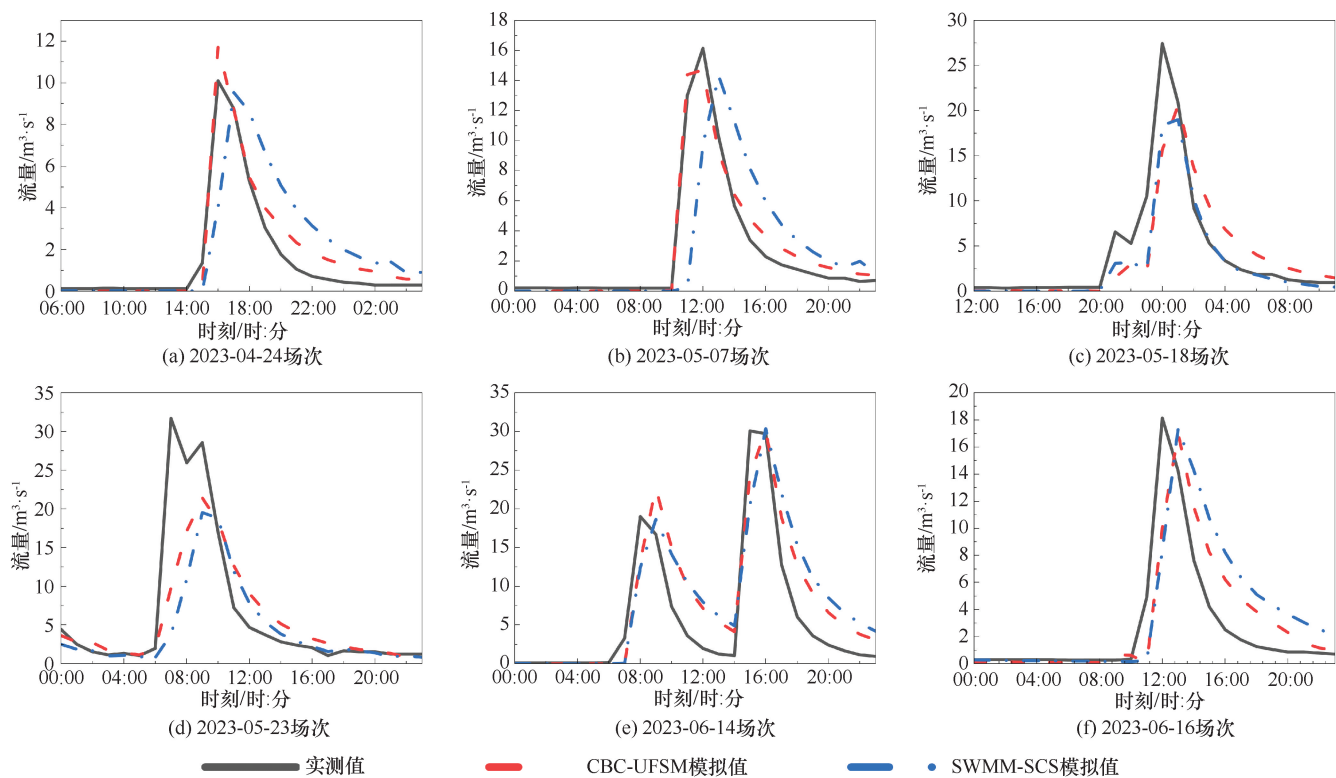


图6 CBC-UFSM 和 SWMM-SCS 模型流量过程线对比

Fig. 6 Comparison of flow hydrographs between CBC-UFSM and SWMM-SCS models

表2 CBC-UFSM 和 SWMM-SCS 模型验证期场次平均评价指标统计

Table 2 Statistics of average evaluation metrics for individual events during validation period using CBC-UFSM and SWMM-SCS models

模型名称	<i>NSE</i>	<i>R</i>	<i>RE</i> /%	<i>QE</i> /%
CBC-UFSM	0.79	0.81	16.77	14.78
SWMM-SCS	0.50	0.60	32.46	15.26

模拟流量明显不符。在单峰流量过程线事件中，SWMM-SCS 模型一般存在退水过程偏慢等问题，而在引入 API 改进 SCS 产流计算后的车陂涌城市雨洪模拟模型中，该情况一定程度上得到改善使得模型精度提高。

基于复杂下垫面划分的车陂涌城市雨洪模拟模型对单峰雨型的降雨过程模拟精度较好，验证集中流量模拟相关系数 *R* 达到 0.81，纳什效率系数 *NSE* 达到 0.79。模型对多峰雨型的降雨过程模拟精度仍有欠缺，如 2023-06-14 场次。多峰模拟不佳的原因可能是退水过程仍不够精确，比方城市流域中管网、水闸等作用下退水比自然退水过程更快。

综合而言，CBC-UFSM 和较常用于工程实践的 SWMM-SCS 模型相比，主要优势有以下三个方面：

第一，考虑不透水面中道路与建筑产汇流特性进行城市复杂下垫面的划分。将不透水面划分为直接不透水面与间接不透水面，突破了 SWMM 模型只考虑透水面积与不透水面积比例的局限性。第二，提出并建立符合城市复杂下垫面产汇流特性的产流计算模式。较于 SWMM 模型产流计算中所有的汇水单元均采用相同的产流计算方法，CBC-UFSM 模型综合考虑不透水面中道路和建筑以及它们不同的产流、汇流和排水方式的差异。第三，引入 *API*(前期降雨指数)至产流计算方法中，以此考虑前期土壤湿润程度。优化了 SCS-CN 产流计算方法中 *CN* 值的计算，使得 *CN* 值随降雨量而时变，更准确地表征降雨过程中土壤湿度的变化。

同时，该模型仍有可改进优化之处，在参数敏感性分析及率定上，模型可以考虑优化模型框架并精简模型参数数量，以此在保证精度的同时提高计算效率；在模拟精度上，该模型输入包含前期影响雨量，由于模型预热期存在一定的不确定性，当实际初始土壤湿度条件与模型预设条件差异较大时，会一定程度上影响初始涨水过程模拟。雨型对模型的模拟精度也存在一定影响，多峰的雨型的降雨径流过程线相对偏差大于单峰陡涨陡落的雨型的。除此之外，由于城市

管道和河道堵塞或淤积、水闸等水工建筑物调度运行都会影响雨洪模拟的精度。因此, 今后还需要进一步加强模型构建的准确性和验证, 提升模型的模拟性能。

5 结 论

本文以广州市天河区车陂涌流域为研究区, 提出根据土地利用类型及其产汇流响应特征和城市管网道路分布对城市复杂下垫面进行分类, 基于 API 提出更为简洁的方法改进产流计算, 构建车陂涌城市雨洪模拟模型, 使用 2021 年 5 月 27 日—2021 年 6 月 14 日实测降雨径流数据对模型进行率定, 2023 年 4 月 1 日—2023 年 7 月 31 日中的 6 场降雨事件实测降雨径流数据检验。主要结论如下。

(1) 基于城市复杂下垫面划分结果的混合产流的车陂涌城市雨洪模拟模型在率定期内模拟流量过程与观测流量过程在趋势性上较为一致, 在准确性上较为良好, 各小时流量模拟精度 R 达到 0.74, NSE 达到 0.71。在验证期内 6 场降雨事件中流量模拟平均精度 R 达到 0.81, NSE 达到 0.79, 说明车陂涌城市雨洪模拟模型具有一定可靠性。

(2) 在相同降雨场次模拟中, CBC-UFSM 和较常用于工程实践的 SWMM-SCS 模型相比, 径流纳什效率系数 NSE 提升了 66.7%, 径流相关系数 R 提升了 29.7%, 洪量误差 RE 则降低了 48.3%, 洪峰流量误差降低了 3.2%。CBC-UFSM 较 SWMM-SCS 模型模拟效果更好, 具有一定应用前景, 能为城市雨洪模拟提供了新思路。

参考文献(References):

[1] 梅超, 刘家宏, 王浩, 等. 城市下垫面空间特征对地表产汇流过程的影响研究综述[J]. 水科学进展, 2021, 32(5): 791-800.
MEI C, LIU J H, WANG H, et al. Comprehensive review on the impact of spatial features of urban underlying surface on runoff processes[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(5): 791-800.

[2] 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 Z Y, YAO C, DONG J L, 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.

[3] 姚文广. 坚持系统思维是成功防御海河“23·7”流域性特大洪水的重要法宝[J]. 水利发展研究, 2024, 24(3): 58-63.
YAO Wenguang. Adhering to systematic thinking: a key to success in defense against Haihe River’s “23·7” catastrophic flood[J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(3): 58-63.

[4] 卢陈, 胡晓张, 吴尧, 等. 深圳河流域 2023 年“9·7”极端特大暴雨分析及洪涝治理思考[J]. 中国防汛抗旱, 2024, 34(1): 24-28.
LU Chen, HU Xiaozhang, WU Yao, et al. Analysis of “9.7” extraordinary rainstorm in the Shenzhen River Watershed and thinking of flood strategies[J]. China Flood & Drought Management, 2024, 34(1): 24-28.

[5] 李国英. 为以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业提供有力的水安全保障: 在 2024 年全国水利工作会议上的讲话[J]. 水利发展研究, 2024, 24(1): 1-10.
LI Guoying. Improved water security for China’s efforts to build itself into a stronger country and rejuvenate the Chinese nation on all fronts by pursuing Chinese modernization—Speech at the 2024 National Water Conservancy Work Conference [J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(1): 1-10.

[6] 汤青峰, 彭立云, 蒋永红, 等. 基于 SWMM 的城市河网情景调控与分析研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(5): 15-26.
TANG Q F, PENG L Y, JIANG Y H, et al. SWMM-based scenario regulation and analysis of urban river networks[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(5): 15-26.

[7] 肖婉婷, 宋聚生, 马翔, 等. 基于 SWMM 的校园海绵城市布局优化研究: 以深圳市某中学校园为例[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(9): 48-60.
XIAO W T, SONG J S, MA X, et al. Optimization of LID facilities planning strategy based on PSO algorithm and SWMM model: a case study of middle school campus in Shenzhen[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(9): 48-60.

[8] 方煜铭, 马旭民, 林凯荣, 等. 基于 MIKE FLOOD 的深圳市大空港片区暴雨内涝模拟分析[J]. 人民珠江, 2024, 45(5): 88-95.
FANG Y M, MA X M, LIN K R, et al. Simulation analysis of rainstorm waterlogging in Shenzhen dakonggang area based on MIKE FLOOD[J]. Pearl River, 2024, 45(5): 88-95.

[9] 叶陈雷, 徐宗学, 雷晓辉, 等. 基于 SWMM 和 InfoWorks ICM 的城市街区洪涝模拟与分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 87-94.
YE C L, XU Z X, LEI X H, et al. Flood simulation and risk analysis on urban block scale based on SWMM and InfoWorks ICM[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 87-94.

[10] 王静, 李娜, 程晓陶. 城市洪涝仿真模型的改进与应用[J]. 水利学报, 2010, 41(12): 1393-1400.
WANG J, LI N, CHENG X T. Improvement and application of numerical model for the simulation of flooding in urban area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(12): 1393-1400.

[11] 喻海军, 马建明, 张大伟, 等. IFMS Urban 软件在城市洪水风险图编制中的应用[J]. 中国防汛抗旱, 2018, 28(7): 13-17.
YU H J, MA J M, ZHANG D W, et al. Application of IFMS Urban software in urban flood risk mapping[J]. China Flood & Drought Management, 2018, 28(7): 13-17.

[12] 黄国如, 陈文杰, 喻海军. 城市洪涝水文水动力耦合模型构建与评估[J]. 水科学进展, 2021, 32(3): 334-344.
HUANG G R, CHEN W J, YU H J. Construction and evaluation of an integrated hydrological and hydrodynamics urban flood model[J].

- Advances in Water Science, 2021, 32(3): 334-344.
- [13] 杨芳, 宋利祥, 李旭东, 等. 珠江流域水旱灾害防御“四预”系统模型研发及应用[J]. 中国水利, 2023(4): 10-14.
YANG Fang, SONG Lixiang, LI Xudong, et al. Development and application of professional models in the “forecast, early-warning, rehearsal, and plan” system for flood and drought prevention in the Pearl River Basin[J]. China Water Resources, 2023(4): 10-14.
- [14] YAN Y N, ZHANG N, ZHANG H. Applications of advanced technologies in the development of urban flood models[J]. Water, 2023, 15(4): 622.
- [15] CEA L, COSTABILE P. Flood risk in urban areas: Modelling, management and adaptation to climate change. A review [J]. Hydrology, 2022, 9(3): 50.
- [16] PIADDEH F, BEHZADIAN K, ALANI A M. A critical review of real-time modelling of flood forecasting in urban drainage systems [J]. Journal of Hydrology, 2022, 607: 127476.
- [17] XING Y, LIANG Q H, WANG G, et al. City-scale hydrodynamic modelling of urban flash floods: the issues of scale and resolution[J]. Natural Hazards, 2019, 96(1): 473-496.
- [18] BALACUMARESAN H, IMTEAZ M A, AZIZ M A, et al. Use of artificial intelligence modelling for the dynamic simulation of urban catchment runoff[J]. Water Resources Management, 2024, 38(10): 3657-3683.
- [19] SHI W H, WANG N. Improved SMA-based SCS-CN method incorporating storm duration for runoff prediction on the Loess Plateau, China[J]. Hydrology Research, 2020, 51(3): 443-455.
- [20] 吴艾璞, 王晓燕, 黄洁钰, 等. 基于前期雨量和降雨历时的 SCS-CN 模型改进[J]. 农业工程学报, 2021, 37(22): 85-94.
WU Aipu, WANG Xiaoyan, HUANG Jieyu, et al. Improvement of SCS-CN model based on antecedent precipitation and rainfall duration [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(22): 85-94.
- [21] JIAO P J, XU D, WANG S L, et al. Improved SCS-CN method based on storage and depletion of antecedent daily precipitation[J]. Water Resources Management, 2015, 29(13): 4753-4765.
- [22] 杨可欣, 毛树怀, 王铎洋, 等. 未来土地利用情景下城市地表径流变化模拟预测研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(11): 66-76.
YANG Kexin, MAO Shuhuai, WANG Luoyang, et al. Simulation and prediction study of urban surface runoff change under the future land use scenario [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(11): 66-76.
- [23] 徐宗学, 程涛. 城市水管理与海绵城市建设之理论基础: 城市水文学研究进展[J]. 水利学报, 2019, 50(1): 53-61.
XU Z X, CHENG T. Basic theory for urban water management and sponge city: Review on urban hydrology [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(1): 53-61.
- [24] 栾清华, 付潇然, 王海潮, 等. 大尺度无管流数据城区 SWMM 构建及模拟: I. 复杂下垫面城区数字精细化关键技术[J]. 水科学进展, 2019, 30(5): 653-660.
LUAN Q H, FU X R, WANG H C, et al. SWMM- based rainfall-runoff simulations in large-scale urban area with no pipeline-flow observations: I: key techniques for digitalizing urban area with complicated land-surface characteristics [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(5): 653-660.
- [25] 刘波, 戎贵文, 陈情情, 等. 基于 SWMM 的 LID 设施分区布局及减排效益[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(5): 930-939.
LIU B, RONG G W, CHEN Q Q, et al. Regional distribution and mitigation benefit of LID facility based on SWMM[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(5): 930-939.
- [26] 伍志方, 蔡景就, 林良勋, 等. 2017 年广州“5·7”暖区特大暴雨的中尺度系统和可预报性[J]. 气象, 2018, 44(4): 485-499.
WU Zhifang, CAI Jingzhuo, LIN Liangxun, et al. Analysis of mesoscale systems and predictability of the torrential rain process in Guangzhou on 7 May 2017[J]. Meteorological Monthly, 2018, 44(4): 485-499.
- [27] 张晨钰, 王伟, 黄莉, 等. 高度城镇化背景下粤港澳大湾区易涝点驱动力分析: 以深圳市为例[J/OL]. 水资源保护: 1-19 (2024-04-10). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20230731.1817.003.html>.
ZHANG Chenyu, WANG Wei, HUANG Li, et al. Driving forces of waterlogging sites in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area in the context of high urbanization: Taking Shenzhen city [J/OL]. Water Resources Protection: 1-19 (2024-04-10). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20230731.1817.003.html>.
- [28] 马兴华, 张云, 崔国韬, 等. 面向粤港澳大湾区建设的珠江流域水安全保障研究框架与展望[J]. 人民珠江, 2024, 45(5): 1-9.
MA X H, ZHANG Y, CUI G T, et al. Research framework and prospects for water security in Pearl River Basin oriented to construction of Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area [J]. Pearl River, 2024, 45(5): 1-9.
- [29] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于加强城市内涝治理的实施意见[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2021(13): 9-13.
General Office of the State Council. Implementing Opinions of the General Office of the State Council on strengthening urban waterlogging control [J]. Gazette of the State Council of the People's Republic of China, 2021(13): 9-13.
- [30] 吉红香, 黄本胜, 邱静, 等. 大湾区水安全治理策略探讨[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(6): 14-20.
JI Hongxiang, HUANG Bensheng, QIU Jing, et al. Discussions on water security governance in Chinas Greater Bay Area [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(6): 14-20.
- [31] 周宏, 刘俊, 高成, 等. 考虑有效不透水下垫面的城市雨洪模拟模型: I. 模型原理与模型构建[J]. 水科学进展, 2022, 33(3): 474-484.
ZHOU Hong, LIU Jun, GAO Cheng, et al. Development of an urban stormwater model considering effective impervious surface: I: theory and development of model [J]. Advances in Water Science, 2022, 33(3): 474-484.
- [32] 龚斯淇, 夏军, 余敦先, 等. 基于 TVGM-SWMM 模型的城市雨

洪模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56(8): 901-911.

GONG Siqi, XIA Jun, SHE Dunxian, et al. Urban stormwater simulation based on TVGM-SWMM model[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2023, 56(8): 901-911.

[33] 陈晓燕, 张娜, 吴芳芳, 等. 雨洪管理模型 SWMM 的原理、参数和应用[J]. 中国给水排水, 2013(4): 4-7.

CHEN Xiaoyan, ZHANG Na, WU Fangfang, et al. Stormwater Management Model (SWMM): Principles, Parameters and Applications[J]. China Water & Wastewater, 2013(4): 4-7.

[34] 王静, 李娜. 上海城区动态洪水风险图应用系统及典型暴雨内涝分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(3): 61-76.

WANG Jing, LI Na. The dynamic flood hazard map application system of urban area in Shanghai and typical rainstorm waterlogging analysis[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(3): 61-76.

[35] HSU M H, CHEN S H, CHANG T J. Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system[J]. Journal of Hydrology, 2000, 234(1/2): 21-37.

[36] 马彦斌, 盛旺, 李江云, 等. 基于遗传算法的 SWMM 模型参数率定研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(7): 46-49.

MA Yanbin, SHENG Wang, LI Jiangyun, et al. Parameter Calibration of SWMM Model Based on GA[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(7): 46-49.

[37] ZAGHLOUL N A. Sensitivity analysis of the SWMM Runoff-Transport parameters and the effects of catchment discretisation[J]. Advances in Water Resources, 1983, 6(4): 214-223.

[38] NOBRE A D, CUARTAS L A, HODNETT M, et al. Height above the nearest drainage: a hydrologically relevant new terrain model[J]. Journal of Hydrology, 2011, 404(1/2): 13-29.

[39] 周毅, 余明辉, 陈永祥. SWMM 子汇水区域宽度参数的估算方法介绍[J]. 中国给水排水, 2014, 30(22): 61-64.

ZHOU Y, YU M H, CHEN Y X. Estimation of sub-catchment width in SWMM[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(22): 61-64.

(责任编辑 王璐)