引文格式：吴凯华,赵小阳,段鹏,等. 基于不同数字地形模型的城市内涝模拟[J]. 地理空间信息, 2024, 22(11): 38-42. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.11.007

基于不同数字地形模型的城市内涝模拟

吴凯华[1,2]，赵小阳[1,2,3]，段　鹏[1,2,3*]，邱镛康[1]，魏　峰[1]
（1. 广州市城市规划勘测设计研究院，广东 广州 510060；2. 广州市资源规划和海洋科技协同创新中心，广东 广州 510060；
3. 广东省城市感知与监测预警企业重点实验室，广东 广州 510060）

摘　要：城市内涝是威胁人民生命财产安全的主要自然灾害之一。地势低洼、建筑密度大、地面渗水能力弱的城中村或社区，更容易引发城市内涝。情景模拟是城市内涝防治的有效手段，但对于城市内涝模拟采用何种地形数据长期存在争议。以广州市中心城区两处易涝区为研究对象，采用广州市暴雨强度公式模拟该区域3种雨型的强降水过程；根据雨水口综合流速公式分析排水能力，分别结合数字表面模型和数字高程模型模拟地表汇水情况，并通过淹没深度对该区域内涝风险进行评估。结果表明，数字表面模型能比数字高程模型更好地模拟高密度建筑区的内涝情况，模拟结果对推进该区域排水系统建设和更全面开展城市雨洪模拟具有一定的参考价值。

关键词：数字表面模型；数字高程模型；雨水口泄流；降雨强度；淹没分析
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）11-0038-05

Urban Flooding Simulation Based on Different Digital Terrain Models

WU Kaihua[1,2], ZHAO Xiaoyang[1,2,3], DUAN Peng[1,2,3], QIU Yongkang[1], WEI Feng[1]
(1. Guangzhou Urban Planning & Design Survey Research Institute, Guangzhou 510060, China;
2. Guangzhou Collaborative Innovation Center of Natural Resources Planning and Marine Technology, Guangzhou 510060, China;
3. Guangdong Enterprise Key Laboratory for Urban Sensing, Monitoring and Early Warning, Guangzhou 510060, China)

Abstract: Urban flooding is one of the main natural disasters that threaten the safety of people's lives and property, especially for communities with low terrain, high density building and weak ground water permeability, which are more likely to trigger risks. Scenario simulation is an effective means of urban flooding prevention, but there has been a long-standing controversy over which type of terrain data to use for urban flooding simulation. Taking two waterlogging prone areas in the central urban area of Guangzhou as the research object, we used the rainstorm intensity formula of Guangzhou to simulate the heavy rainfall process of three rain patterns in this area. Then, we analyzed the drainage capacity based on the comprehensive velocity formula of gutter inlet, simulated the surface catchment by combining digital surface model (DSM) and digital elevation model (DEM), and assessed the flooding risk in this area by the submergence depth. The research results show that DSM can better simulate the flooding situation in high density building areas than DEM. The simulation results have certain reference value for promoting the construction of drainage systems in the region, and conducting more comprehensive urban rainwater and flood simulation.

Key words: DSM, DEM, gutter inlet discharge, rainfall intensity, submergence analysis

夏季降雨强度大，暴雨时间连续且范围集中，在排水设施不完善的城区，容易造成城市内涝，严重威胁城市居民生命财产安全。随着城镇建设的加快，城区建筑密度逐渐增加，使得地表不透水面增大[1]，地表雨洪调节能力显著降低，城市内涝风险加大。情景模拟是雨洪风险评估的重要手段[2-3]。目前常用的雨洪模拟模型包括SWMM模型[4]、MIKE模型[5]、InfoWorks水力模型[6]等，各种模型主要考虑了城市地形、排水能力、降雨强度等因素，其中地形数据是内涝模拟的基础。传统内涝模拟主要采用数字高程模型（DEM）提供地形信息[4,6]，但有学者提出由于城市场景的地表建筑密度较大，更适合采用数字表面模型（DSM）进行内涝分析[7-8]。大部分模型均假设排水管网能在暴雨情境下满负荷运行，却忽略了雨水口泄流的影响[9-10]。雨水口是连接地表和地下排水管网的通道，是城市排水系统的入口，研究表明即使排水管道的泄流能力足

收稿日期：2023-07-24。
项目来源：广州市资源规划和海洋科技协同创新中心资助项目（2023B04J0301）；广东省重点领域研发计划资助项目（2020B0101130009）；广东省城市感知与监测预警企业重点实验室基金资助项目（2020B121202019）。
第一作者简介：吴凯华（1988—），硕士研究生，工程师，主要研究方向为遥感测绘与地理信息科学，E-mail：16473819@qq.com。
通信作者：段鹏（1980—），硕士研究生，高级工程师，主要研究方向为测绘与地理信息，E-mail：53119331@qq.com。

够，雨水口泄流能力不足仍会导致局部内涝[11-12]。

为研究城市内涝模拟过程中的最优地形数据选择，本文以广州市天河区两处易涝区为研究对象，采用广州市暴雨强度公式和雨水口综合流速公式模拟3种暴雨雨型的降雨和排水过程，分别基于DSM和DEM提供地形信息进行雨水汇流分析；再结合研究区历史积水情况，对比采用不同数字地形模型得到的内涝模拟结果；最后根据降雨过程中地表最大积水深度划分风险等级，对短时强降雨情境下城市内涝风险进行评估，为研究区域内涝防治提供参考。

1　研究区概况

广州市地处雨水丰沛的南亚热带沿海地区，既是人口密集、经济发达的现代化都市，又是全国洪涝灾害风险最高的城市之一。截至2020年，广州市依然有128处内涝积水点[13]。本文选取的研究区位于广州市中心城区内，内部包括城中村、现代化小区和部分工商业建筑，四周边界为城市主干道路或铁路，将研究区围成相对独立的区域（图1）。两个区域内均有广州市水务局公布的易涝点、水浸点，因此对该区域进行内涝风险评估，对指导洪涝防治和排水系统建设具有较强的现实意义。

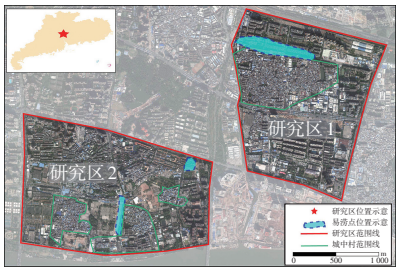


图1　研究区范围

审图号：粤S(2022)322号

2　研究方法

本文首先通过无人机倾斜摄影测量和三维点云重建获取研究区点云模型，并利用三角网插值法得到研究区的DSM和DEM；然后为了模拟降雨过程，参考广东省气候中心编制的广州市暴雨强度公式，采用3种短暴雨雨型分别模拟重现期为5年、10年、20年、50年、100年的短历时暴雨过程和地面径流总量；最后根据研究区雨水口分布和雨水口泄流综合公式计算排水量，结合降水量获得研究区地表积水的时空变化，并基于最大积水深度判断风险等级。

2.1　数字地形模型构建

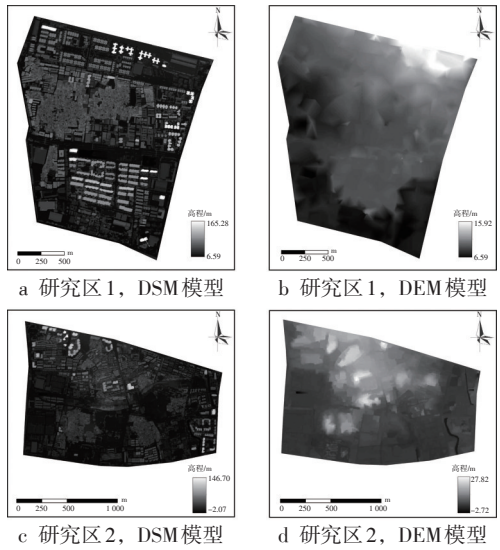
本文选取大疆Mavic 3E行业版无人机作为航飞设备，并配置RTK模块实现厘米级定位。为保证建模精度，航摄高度设置为50 m，采用井字型航线，旁向重叠率为70%，航向重叠率为90%。拍摄完成后，采用运动结构术重建三维结构[14]。首先从图像中提取焦距信息；再进行特征检测和匹配；然后通过迭代光束法平差自动求解相机方位和场景几何信息，并采用非线性最小二乘法不断优化生成稀疏点云；最后通过三维多视角立体视觉算法构建密集点云模型。获取研究区三维点云模型后，通过建立虚拟格网和格网插值快速建立初始三角网，并对初始三角网进行数据优化，得到最终的不规则三角网。对数据进行冗余处理和密集处理，构造高分辨率的DSM[15]。同时，采用布料滤波[16]分离出三维点云模型中的地面点云，采用相同方法建立不规则三角网，对三角网进行内插后，由网格转为栅格数据，得到研究区DEM。本文最终构造的DSM、DEM分辨率为1 m×1 m（图2）。

2.2　降雨情景模拟

由于目前发生的极端降雨通常只有几十分钟，历史上造成广州城区内涝的暴雨历时也多为2 h以内，因此本文以2 h为暴雨情境历时，暴雨重现期分别为5年、10年、20年、50年、100年。为较好地模拟广州地区真实的降雨情境，本文采用广东省气候中心2022年编制的广州市中心城区短历时暴雨强度公式（http://swj.gz.gov.cn/xxgk/qt/tzgg/content/post_8835843.html），即

$$q=\frac{13\,290.63\times(1+0.607\lg P)}{(t+39.126)^{0.956}} \tag{1}$$

式中，q为暴雨强度，单位为L/(s·hm^2)；P为重现期，单位为a；t为降雨历时，单位为min。



a 研究区1，DSM模型　b 研究区1，DEM模型

c 研究区2，DSM模型　d 研究区2，DEM模型

图2　研究区数字地形模型

本文采用芝加哥雨型模拟降雨过程中每个时刻的降雨强度，峰值系数r为0.533 1，则峰前、峰后暴雨

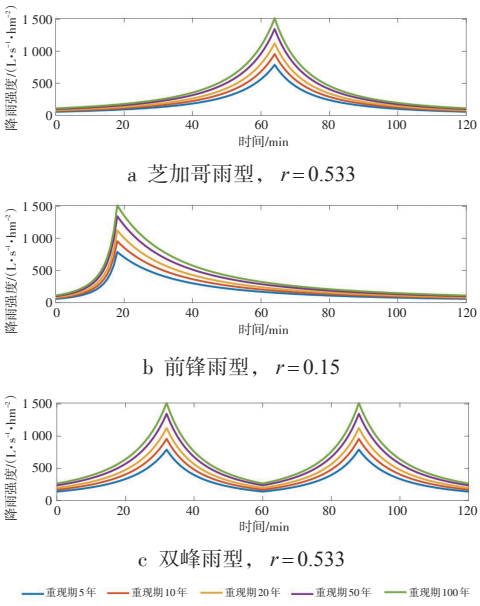
瞬时强度为：

$$i_b=\frac{a[\frac{(1-c)t_b}{r}+b]}{(\frac{t_b}{r}+b)^{1+c}} \tag{2}$$

$$i_a=\frac{a[\frac{(1-c)t_a}{1-r}+b]}{(\frac{t_a}{1-r}+b)^{1+c}} \tag{3}$$

式中，a =13 290.63×(1+0.607lg P)；b =39.126；c = 0.956。

为更好地对比不同降雨模型对内涝的影响，本文根据广州市暴雨强度公式和芝加哥雨型，取 r =0.15，设计前锋雨型；同时，仍取 r =0.533，通过缩短单个雨峰历时，构造双峰雨型（图3）。



a 芝加哥雨型，r=0.533

b 前锋雨型，r=0.15

c 双峰雨型，r=0.533

图3 不同重现期降雨过程模拟

2.3 雨水口泄流计算

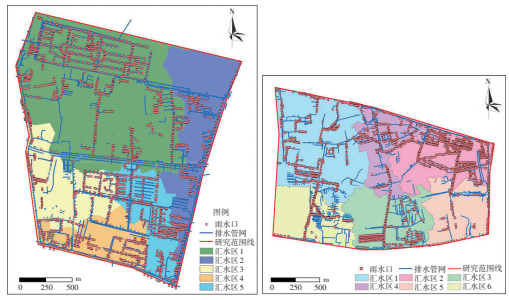
雨水口是路面径流进入地下管道的入口，雨水口泄流的效率直接影响城市路面的积水程度[17]。雨水口泄流过程一般包括堰流、孔口出流和管嘴出流3种模式。常用的计算方法为孔流堰流公式和综合流速公式。由于综合流速公式考虑了侧支管对雨水口泄流能力的限制[18]，场景适用性强，可用于多种坡度的平算式雨水口泄流量计算[19]，因此本文采用该公式计算雨水口泄流量。

$$Q=a\times u\times A(Fr)^b \tag{4}$$

$$Fr=u/\sqrt{g\times h} \tag{5}$$

式中，Q 为雨水口下泄流量；a、b 为算前流速；A 为雨水口面积；Fr 为算前弗劳德数；g 为重力加速度；h 为水深。

通过实地摸查发现（图4），研究区1有2 299个雨水口，研究区2有2 117个雨水口；雨水口皆为平入算式，大部分雨水算子长0.5 m、宽0.3 m；排水管道总长为19.87 km，主要为圆形砼结构，部分为PVC材质。由于降雨时间较短，假设降雨过程中研究区排水量主要由雨水口泄流能力决定。



a 研究区1 b 研究区2

图4 研究区排水系统与汇水区划分情况

2.4 淹没模拟

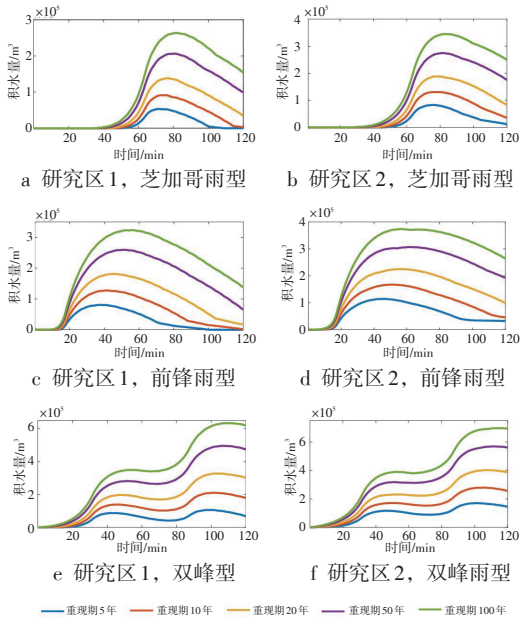
由于研究区1建筑密度较大，地表基本为混凝土地面、局部生长植被，土壤裸露地块较少，因此忽略地面渗流；而研究区2存在大面积裸露地块，有必要考虑地面渗流。本文采用Horton渗流模型，设置稳定入渗率为30 mm/h。同时，由于模拟雨型为短时强降雨，地面雨水蒸发时间短，因此忽略蒸散发造成的径流损失。内涝积水总量的计算公式为：

$$W_t=\int_0^t I\times S\mathrm{d}t-V_t-V_s\times S\times t \tag{6}$$

式中，t 为降雨历时；W_t 为 t 时刻积水总量；V_t 为 t 时刻排水总量；V_s 为单位时间每 m² 地表渗流能力；I 为瞬时降雨强度；S 为降雨面积。

计算地面排水量时，利用式（4）计算单个雨水算子泄流量，并采用参考文献[11]、[20]推荐的雨水口参数（a = 0.302，b = −0.816），算前流速由流入算前总作用水头决定，为简化计算，设为0.2 m/s；当地面径流量小于雨水口排水能力时，认为排水量等于径流量。由于研究区高程起伏，本文基于DEM采用D8算法进行流向分析，并划分汇水区，为减小计算复杂度，对一些面积较小的相邻汇水区进行合并，最终两个研究区的汇水区划分情况见图4。根据每个汇水区的面积以及雨水口分布情况计算径流量与排水量，再采用式（6）计算得到所有汇水区不同时刻累计地表积水总量（图5），可以看出，双峰雨型的最大积水量高于单峰雨型，这与前人研究较一致[21]。

在计算淹没面积与深度时，假设洪水淹没水位在汇水区内为一个水平面，通过累加DEM、DSM每个像素点淹没深度与淹没面积之积，计算淹没区域的总库容量。当总库容量等于地面积水总量时，对应的水位值即为真实淹没水位[2]。



a 研究区1，芝加哥雨型　b 研究区2，芝加哥雨型
c 研究区1，前锋雨型　d 研究区2，前锋雨型
e 研究区1，双峰型　f 研究区2，双峰雨型

图5　研究区不同雨型地面积水总量随时间的变化曲线

3　内涝模拟结果分析

本文分别基于DEM和DSM，通过淹没模拟得到研究区在不同雨型、不同暴雨重现期的最大积水情况（图6、7），其中芝加哥雨型与前锋雨型的淹没情况较一致，双峰雨型则显示出淹没面积更广的特点，这主要是由于其在相同重现期下的积水量更高所致。对比淹没模拟结果发现，相较于采用DEM的内涝模拟结果，采用DSM的雨水淹没区域更分散，这主要是由于建筑物阻隔，地形起伏不连续所致。

对于研究区1，当暴雨重现期为5年时，采用DEM和DSM的模拟结果基本一致；但当重现期逐渐增长，采用DSM的模拟结果在北部小区以及城中村东南部都出现了内涝情况，而大部分情境下采用DEM的模拟结果均未出现明显内涝。通过查阅该区域的历史数据发现，城中村东南部在近10年的强暴雨记录中均出现过不同程度的内涝情况，而北部小区及其南侧道路还属于广州市公布的易涝点之一。对于研究区2，采用DEM和DSM的模拟结果在不同情境下的淹没区分布基本一致，尤其是在东北部的易涝点均显示出内涝特征；但对于中部的易涝点，采用DEM的模拟结果在相应淹没区显示为团块状，未将易涝点覆盖完全，而采用DSM的模拟结果则更好地覆盖了该易涝点的位置。此外，相较于采用DEM得到的连片淹没区，采用DSM的模拟结果能更好地显示路网的淹没情况，而道路是雨水汇流的主要通路，也是城市内涝时的主要淹没区域和重点关注区域，因此采用DSM的模拟结果能更好地反映城市道路在内涝时的危险性。同时，通过本文分析发现，在实际降雨过程中，除了地下停车场等开放地下空间会发生雨水倒灌外，大部分情况下建筑物能对雨水形成阻隔，从而影响雨水的汇流过程，DSM地形数据将建筑作为一个完整的不透水体，能更好地反映这一特征。结合模拟结果和研究区的历史内涝情况，本文认为相较于DEM，选取DSM作为数字地形模型进行城市高密度建筑群内涝模拟更合理。

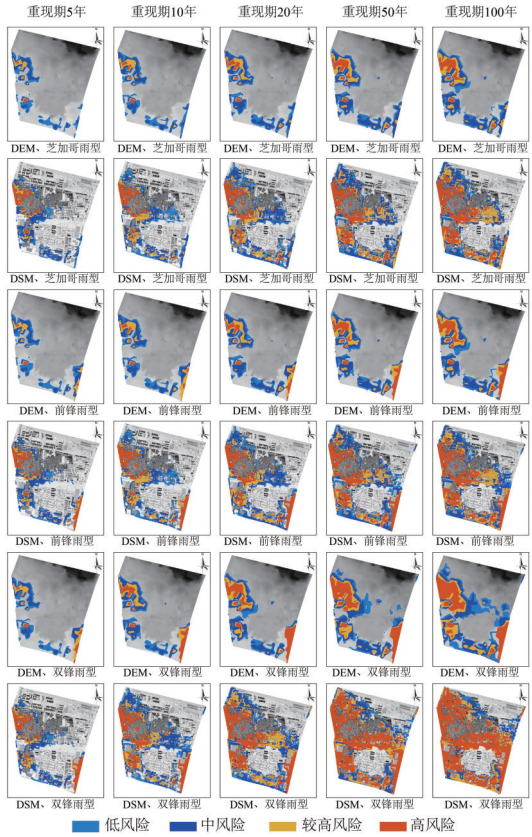


图6　研究区1在不同情境下的模拟淹没情况

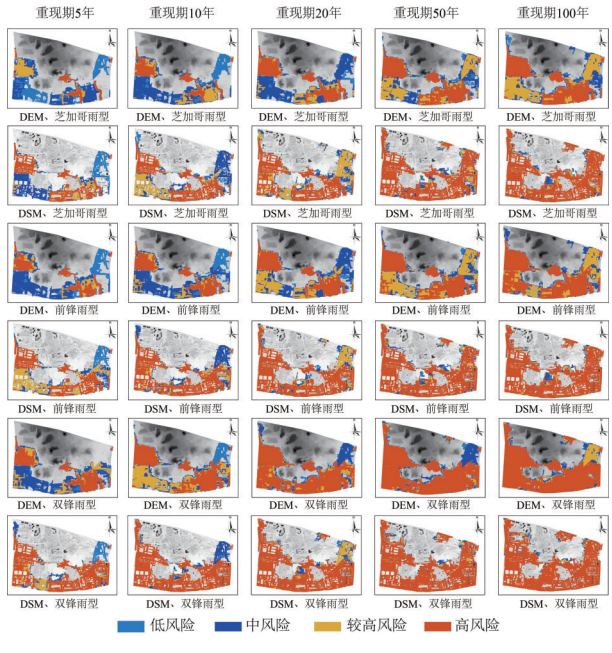


图7　研究区2在不同情境下的模拟淹没情况

确定合理的内涝模型后，本文进一步进行内涝风险评估。由于暴雨过程中，水浸深度是危害城区居民生命财产安全的主要诱因，因此主要根据淹没深度进行内涝风险划分。本文将内涝风险等级划分为低风险、中风险、较高风险、高风险4级，具体见表1。

表1 内涝风险等级划分

风险等级	风险评价	淹没水深/m	风险等级	风险评价	淹没水深/m
Ⅰ	低风险	0 ~ 0.2	Ⅲ	较高风险	0.5 ~ 0.8
Ⅱ	中风险	0.2 ~ 0.5	Ⅳ	高风险	> 0.8

根据地面积水总量的变化（图5），降雨过程中地面积水量在某一时刻会达到峰值，此时淹没面积和淹没深度达到最大，因此本文将汇水区地面积水量峰值时刻的淹没面积和淹没深度作为内涝风险的判定依据。由图6、7可知，随着暴雨重现期的增加，研究区内被淹没面积逐渐增大，但不同风险等级的淹没面积却呈现不同的增长趋势。以采用DSM、芝加哥雨型的模拟结果为例（图8），随着重现期的增加，高风险区淹没面积逐渐增加，低风险区则在后期出现面积缩减的趋势，而其他情境下也有相似特征。这主要是由于城市地形起伏变化较大，随着积水量的增加，大量中、低风险区转化为较高、高风险区，导致低风险区面积不增反减，而高风险区面积不断增加。

基于本文内涝模拟结果，当暴雨重现期小于20年时，研究区1内涝高风险区主要出现在西北部的城中村低洼巷道内，研究区2内涝高风险区主要出现在西部的厂房和南部城中村洼地，其余区域主要为中、低风险区；当暴雨重现期大于20年时，城中村内涝高风险区进一步扩张，城市道路的内涝风险程度也逐渐转变为高风险，尤其是研究区2。由于重现期短的暴雨发生概率更大，城中村区域人口密集、建筑密度大而排水系统建设滞后，地表多为混凝土铺设，渗透率低而径流系数大，降雨时积水容易在短时间内汇集于地势低洼的巷道中，更易形成高风险区，对居民生命财产安全造成威胁，因此有必要完善城中村排水系统，降低内涝风险。

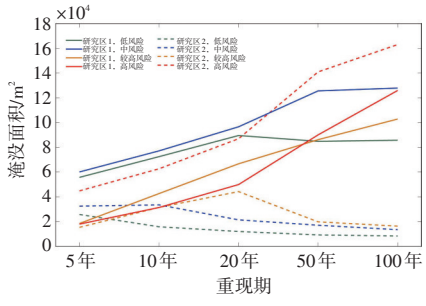


图8 各风险等级淹没面积变化（DSM、芝加哥雨型）

4 结 语

本文以广州市天河区两处建筑密集区域为研究对象，根据广州市暴雨强度公式和雨水口综合流速公式模拟不同重现期3种雨型下的短历时强降雨和排水过程，并结合DSM和DEM分析不同地形模型对内涝模拟的影响。研究结果表明，由于DSM考虑了地面建筑对雨水径流的影响，能更好地模拟暴雨过程中城市的内涝情况。本文以积水深度为关键指标，评估研究区不同内涝风险等级的分布情况发现，城中村内高密度建筑之间的低洼巷道更易积水，有必要加强该区域的内涝防治。

参考文献

[1] 赵玉竹. 重庆市近30a不透水面时空变化研究[J]. 地理空间信息,2020,18(3):12-15

[2] 刘斌,唐雅玲,马晨燕,等. 无人机倾斜摄影三维模型在城市雨洪风险评估中的应用[J]. 测绘通报,2019(10):46-50

[3] Yang Y, Pan C L, Fan A W, et al. A New Urban Waterlogging Simulation Method Based on Multi-factor Correlation[J]. Water, 2022(9):1 421-1 439

[4] 刘兴权,刘为. 城市暴雨积水的计算分析及其动态仿真研究[J]. 地理空间信息,2010,8(4):10-12

[5] 陈刚,张兴奇,李满春. MIKE BASIN支持下的流域水文建模与水资源管理分析:以西藏达孜县为例[J]. 地球信息科学,2008,10(2):230-236

[6] 姜吉威,解智强,徐通,等. 基于二维水力建模的城市洪涝灾害时空反演[J]. 地理空间信息,2022,20(7):32-37

[7] 周倩倩,王和平,许苗苗,等. 基于GIS的栅格水文建模法快速评估内涝风险[J]. 中国给水排水,2015,31(21):109-113

[8] 李若男. 高精度城市暴雨内涝灾害危险性模拟与韧性优化策略研究[D]. 上海:华东师范大学,2019

[9] Smith M B. Comment on ‘Analysis and Modeling of Flooding in Urban Drainage Systems’[J]. Journal of Hydrology, 2006,317(1/2):355-363

[10] 朱呈浩,夏军强,周美蓉,等. 雨水口泄流计算对城市洪涝模拟结果影响研究[J]. 水利发电学报,2019,38(8):75-86

[11] 陈倩,夏军强,董柏良. 城市洪涝中雨水口泄流能力的试验研究[J]. 水科学进展,2020,31(1):10-17

[12] Palla A, Colli M, Candela A, et al. Pluvial Flooding in Urban Areas: The Role of Surface Drainage Efficiency[J]. Journal of Flood Risk Management,2018(11):663-676

[13] 邝敏毅,邓兴栋,朱理铭,等. 洪涝风险管控从空间总体规划向控规传导:广州的实践与探索[J]. 水利学报,2022,53(7):779-788

（下转第61页）