

田宗儒, 刘非, 陈焱, 等. 基于 SWMM 和 FVCOM 耦合模型的城市内涝模拟及三维可视化方法[J]. 净水技术, 2026, 45(5): 137-151.

Tian Z R, Liu F, Chen Y, et al. Urban waterlogging simulation and 3D visualization based on SWMM-FVCOM coupling model framework[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(5): 137-151.

基于 SWMM 和 FVCOM 耦合模型的城市内涝模拟及三维可视化方法

田宗儒^{1,2}, 刘非^{1,2,3,*}, 陈焱^{1,2,3}, 程麒铭^{1,2}, 宁博睿^{1,2}, 蒋昆昆^{1,2}

(1. 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 3. 重庆交通大学环境水利工程重庆市工程实验室, 重庆 400074)

摘要 【目的】 在全球气候变化与城市化进程加速的背景下, 城市极端降水事件频发, 内涝灾害风险日益突出, 严重威胁城市水安全与公共安全。传统二维可视化手段难以全面展现城市复杂空间结构下的内涝演进特征, 亟需提高城市内涝模拟和预警结果的可视化效果。【方法】 本文以重庆市綦江区某排水片区为研究区域, 构建基于暴雨径流管理模型(SWMM)和有限体积海岸海洋模型(FVCOM)的一维-二维水文水动力耦合模型, 并开发基于 Unity 3D 与雨洪模型耦合的动态三维可视化方法增强内涝场景的空间表达与交互能力。【结果】 模型积水计算结果与实测数据的对比验证表明, 所构建的耦合模型可以较为准确地模拟内涝积水位置、范围及深度。相较于二维可视化, 基于 Unity 3D 的三维可视化方法可以更为形象地展示区域地形和地物特征, 动态生成积水, 支持展示精度调节以及水深梯度着色。将该方法与降雨监测系统结合进行滚动式内涝预警, 可实现在较短时间(5~10 s)内随耦合雨洪模型不断生成三维积水场景, 并具备实时场景漫游功能。【结论】 本文所提出的 SWMM-FVCOM 耦合模型与 Unity 3D 平台集成方法, 在确保准确性与时效性的基础上, 可突破平面展示局限, 显著提升内涝场景的直观性和决策效率, 为城市雨洪管理与应急防灾提供有效技术支撑。

关键词 城市内涝 暴雨内涝预警 三维可视化 暴雨径流管理模型 有限体积海岸海洋模型

中图分类号: TU992 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2026)05-0137-15

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.05.017

Urban Waterlogging Simulation and 3D Visualization Based on SWMM-FVCOM Coupling Model Framework

Tian Zongru^{1,2}, Liu Fei^{1,2,3,*}, Chen Yao^{1,2,3}, Cheng Qiming^{1,2}, Ning Borui^{1,2}, Jiang Kunjun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

3. Engineering Laboratory of Environmental Hydraulic Engineering of Chongqing Municipal Development and Reform Commission, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract [Objective] Against the background of accelerating global climate change and urbanization, the increasing frequency of extreme precipitation events has led to growing urban waterlogging risks, posing serious threats to urban water security and public safety. Traditional two-dimensional visualization methods fail to comprehensively represent waterlogging evolution characteristics in complex urban spatial structures. There is an urgent need to enhance the visualization effectiveness of urban waterlogging simulation

[收稿日期] 2025-04-14

[基金项目] 重庆市水利科技项目(CQSLK-2023026); 重庆市科学技术局技术创新与应用发展专项重点项目(CSTB2022TIAD-KPX0200); 重庆市技术创新与应用发展川渝科技创新合作计划项目(CSTB2024TIAD-CYKJXX0019); 重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJ202200775487439); 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室开放基金项目(SLK2023B11); 重庆市人力资源和社会保障局 2023 年留学人员回国创业创新支持计划(cx2023053)

[作者简介] 田宗儒(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为城市雨洪模型及相关技术, E-mail: 441565315@qq.com.

[通信作者] 刘非(1990—), 男, 讲师, 研究方向为城市雨洪管理, E-mail: fei.liu@cqjtu.edu.cn.

and early-warning results. [Methods] This paper selected a drainage area in Qijiang District, Chongqing City as the research area. A coupled one dimensional-two dimensional hydrodynamic model was developed based on storm water management model(SWMM) and finite volume coastal ocean model(FVCOM), and a dynamic three-dimensional visualization method was created by integrating Unity 3D with the rainfall-runoff model to improve spatial representation and interactive capabilities of waterlogging scenarios. [Results] Comparative validation between simulated and measured water accumulation data demonstrated that the coupled model could accurately simulate waterlogging locations, extents and depths. Compared with two-dimensional visualization, the Unity 3D-based three-dimensional method provided more realistic representation of terrain features, dynamic water generation, adjustable display precision and depth-based color gradients. When integrated with rainfall monitoring systems for rolling waterlogging warnings, the approach could generate continuously updated three-dimensional waterlogging scenes within 5-10 seconds while maintaining real-time scene navigation functionality. [Conclusion] The proposed integration method of SWMM-FVCOM coupling model with Unity 3D platform in this paper breaks through the limitations of planar representation while ensuring accuracy and timeliness, significantly improving the intuitiveness of waterlogging scenarios and decision-making efficiency. This provides effective technical support for urban stormwater management and emergency disaster prevention.

Keywords urban waterlogging storm-waterlogging early-warning three-dimensional visualization SWMM FVCOM

近年来,在全球气候变化和快速城市化影响下,城市极端暴雨的强度和频率均在增加,加剧了城市水安全危机^[1],例如,2021年郑州市“7·20”暴雨洪涝灾害事件导致的巨大生命和财产损失,造成了广泛深远的社会影响^[2]。基于气象预报或实时降雨监测对暴雨内涝进行预警是应对突发性城市洪涝灾害的有效手段,由于城市地形、下垫面类型复杂,仅依靠二维可视化难以真实刻画洪水演进过程。因此,研究基于三维可视化的城市内涝模拟和预警技术,对于提升洪水演进过程的展示效果,提高灾害应急管理具有重要作用。

数学模型是研究城市暴雨内涝的科学手段。基于物理过程的水文水动力模型在揭示灾害诱发机制和模拟洪水演进过程方面具有解释性较强的优点^[3],因此被广泛应用于城市内涝模拟和预警。例如,以美国国家环境保护局开发的暴雨洪水管理模型(SWMM)^[4-5]为代表的一维管网模型,由于其开源性佳、模型组件相对独立等特点,在全球得到了诸多应用和研究。一维模型虽然能提供详细的管网水力信息,但无法直接对地表水动力过程进行模拟。因此,在实践中通常将其与二维水动力模型进行耦合,以实现“地表-地下(管网)”的水量交换。在众多一维-二维水文水动力耦合模型中,以 MIKE 和 InfoWorks ICM^[6]为代表的国外商业软件较早实现了功能模块化,软件集成度较高,兼具一定的可视化功能,但其使用和维护成本较高。为此,国内外学者相继推出了自主研发的二维水动力模型。在 CCHE2D^[7]、LISFLOOD-FP^[8-9]、TELEMAC-2D^[10]、

GAST^[11]等水动力模型中,有限体积海岸海洋模型(FVCOM)^[12]基于无结构三角形网格,离散结构简单,适用于高效插值计算以及对复杂地形集水分布特征等的高精度模拟,该模型开发之初被广泛应用于海洋海岸的水动力研究,近年来被国内学者^[13-15]引入到城市内涝模拟领域,在模拟分析城市洪涝风险、海绵化及城市排水系统改造效果方面已取得了广泛应用。

水文水动力模型作为城市内涝模拟和预警的核心,其计算结果还有赖于可视化技术进行展示。由于城市环境复杂,暴雨内涝的突发性强,尤其是在地形坡度大的山地城市,二维可视化技术在实际应用中的展示度欠佳。随着计算机图形处理技术的发展,三维可视化技术可以通过人机交互直观形象地展示场景和洪涝信息,是解决这一问题的有效技术手段。在常见三维展示平台中,Unreal Engine 采用高效的图形处理引擎,适用于高真实感的游戏开发和影视制作。Blender 作为开源三维建模和渲染工具支持插件扩展,适合精细建模,但难以还原地形和水体信息。地理信息系统软件 ArcGIS Pro 的三维可视化模块(Scene Viewer 和 ArcGIS 3D Analyst)及 Cesium 等三维开发平台基于 3D GIS 技术解决了地形和地理空间可视化问题,但渲染性能限制了三维水体的展示效果^[16]。Unity 3D 作为一款跨平台的三维互动内容开发工具,凭借其卓越的人机交互、高效渲染引擎以及丰富的资源与插件,广泛应用于各类虚拟环境构建。王星捷等^[17]通过数据采集、处理与建模,实现了基于 Unity 3D 平台的三维虚拟城市

的场景漫游。陈淑妹等^[18]将地形灰度图转化成ASC格式导入Unity 3D引擎,实现了数字地形高程中规则格网的真三维显示。王俊琿等^[19]通过数字化处理、格式转换等前处理操作,基于Unity 3D中Terrain系统初步实现了洪涝灾害模拟结果的三维展示。然而,Terrain系统仅支持“*.raw”格式输入,该文件格式易在不同软件间转换时发生失真,适用性欠佳。此外,三维展示在城市内涝预警中的应用需快速准确地展示积水位置和深度,而现有三维可视化后处理方法难以兼顾展示精度、时效性与场景真实度。

本文以重庆市綦江区某排水片区为研究区域构建基于SWMM和FVCOM的一维-二维水文水动力耦合模型,模拟研究区不同降雨重现期下的管网溢流和内涝演进过程,分析积水量和易涝点水深变化

规律。将耦合模型与Unity 3D平台进行集成,实现积水的实时三维可视化。在此基础上,开展基于监测降雨的滚动式内涝预警,提升风险动态预判与应急响应效能。研究可为城市暴雨内涝防控与预警提供技术支撑。

1 方法

1.1 研究区及基础数据

綦江区位于重庆市南部,地处四川盆地与云贵高原东南结合部,地跨东经106°23′~106°55′、北纬28°27′~29°11′。研究区域位于綦江中心城区,覆盖面积约为6.33 km²,如图1所示。地形数据采用ALOS卫星相控阵型L波段合成孔径雷达(PALSAR)采集的数字高程模型(DEM),水平及垂直精度为12.5 m。研究区域边界基于綦江城区雨污管网分流改造工程确定,排水管网数据较为完整。

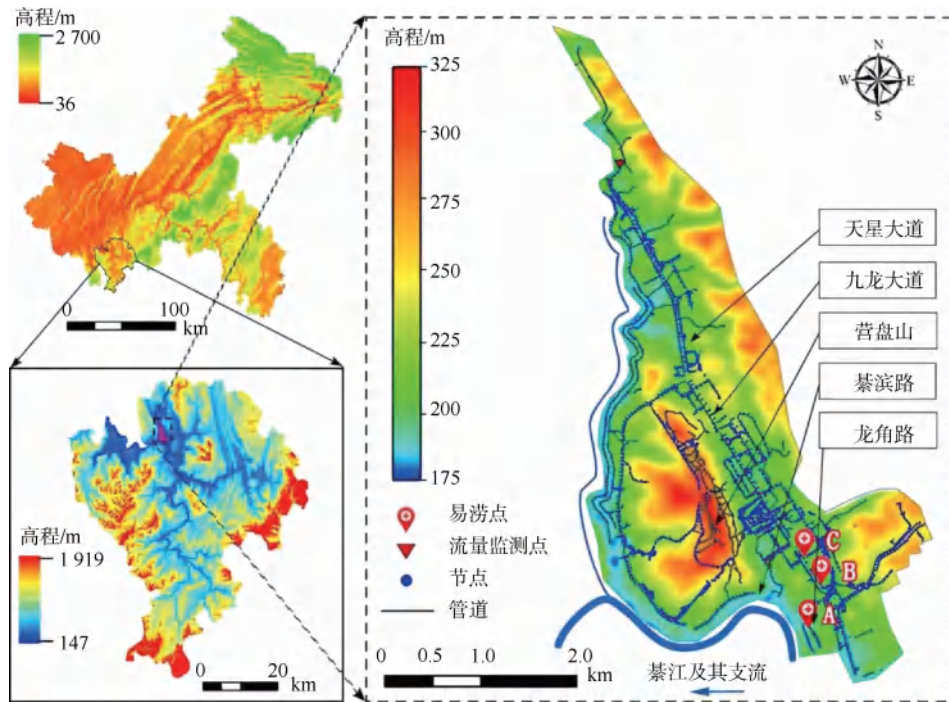


图1 研究区域概况及易涝点分布

Fig. 1 Overview of the Study Area and Distribution of Waterlogging-Prone Points

为分析研究区不同降雨重现期下的内涝演进规律,采用国内雨洪模拟研究中应用广泛的芝加哥雨型进行降雨过程设计^[20]。依据《重庆市暴雨强度修订公式与设计暴雨雨型》(渝建[2017]443号)中綦江区暴雨强度公式进行降雨情景设计,如式(1)。对研究区雨量计历史数据分析表明2024全年降雨雨型以单峰靠后型为主,结合参考文献^[21]中芝加哥雨型的设定,取雨峰系数(r)=0.7。设计降雨雨型

包含5个重现期(分别为1年一遇、5年一遇、10年一遇、50年一遇、100年一遇),降雨历时均为120 min,设计降雨过程线如图2所示。

$$q = \frac{3148 \times (1 + 0.867 \lg P)}{(t + 15.348)^{0.827}} \quad (1)$$

其中: q ——设计暴雨强度, L/(s·hm²);

P ——设计暴雨重现期, a;

t ——降雨历时, min。

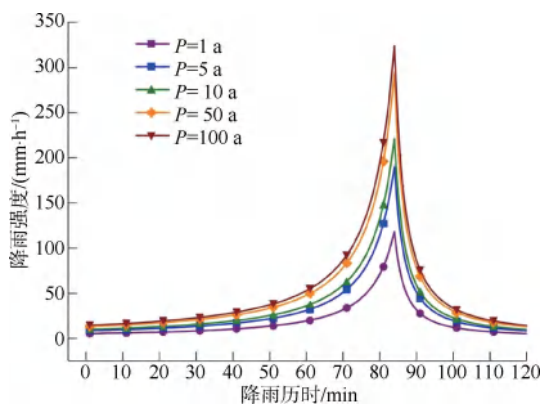


图 2 设计降雨过程线

Fig. 2 Process Curve of Designed Rainfall

1.2 SWMM-FVCOM 耦合模型构建

1.2.1 SWMM 模型

采用 SWMM 模型构建一维管网模型,对地表产汇流和管网汇流等过程进行模拟,分析研究区域内检查井溢流情况。使用自动计算机辅助设计软件 (AutoCAD) 提取研究区管线图纸中的检查井节点及管道数据,借助理信息系统软件 (ArcGIS) 以泰森多边形法初步划分研究区子汇水区,并基于研究区地表建筑分布进行人工调整,最终将节点、管道和子汇水区数据生成“*.inp”文件导入 SWMM。考虑

到研究区管网水力过程复杂,SWMM 采用动力波法求解^[22],设置模拟分析时间为 4 h,演算时间步长为 30 s。概化后的 SWMM 包含普通节点数为 4 043 个、管道数为 4 195 根、子汇水区为 4 049 个以及排放口 18 个。由于管道排口均布设在河道沿岸,在研究监测期间,并未发生倒灌,因此排放口均设置为自由出流。

1.2.2 FVCOM

由于 SWMM 无法直接对地表二维积水进行模拟计算,故将其输出的节点溢流结果转换为网络通用数据格式 (NetCDF),作为降雨径流边界条件输入 FVCOM 进行地表二维洪水漫流过程的模拟,以实现 SWMM 和 FVCOM 的单向耦合。使用地表水建模系统 (SMS) 软件对研究区域进行网格划分和网格插值,结果包含 74 473 个网格节点和 147 351 个三角网格单元,网格分辨率为 10 m,如图 3 所示。最终将网格、地形、节点溢流和运行设置等文件载入 FVCOM 进行计算^[12],地表漫流计算时长为 4 h,时间步长设置为 0.01 s。针对 SWMM 与 FVCOM 时间步长差异,本文在耦合过程中采用恒定边界条件处理方式,以保障边界输入的物理合理性与数值稳定性。

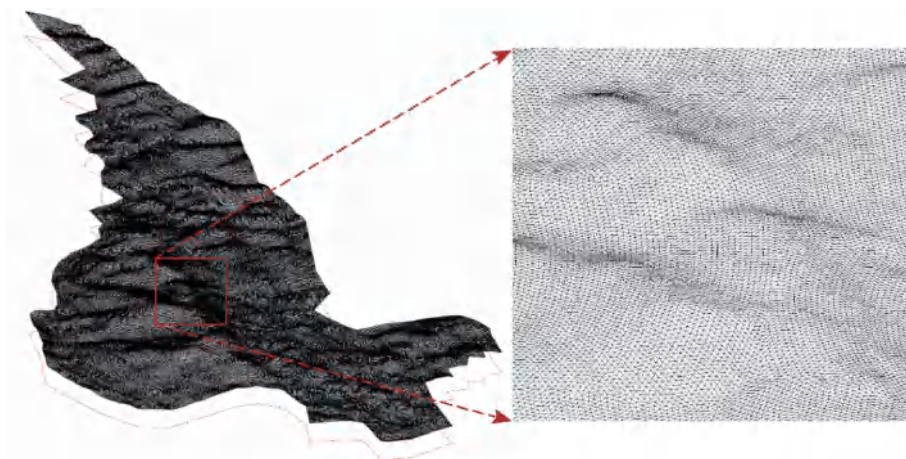


图 3 模型计算网格

Fig. 3 Mesh Grid of Model Computation

1.3 SWMM-FVCOM 与三维可视化耦合方法

三维可视化技术在城市洪涝展示及预警中的应用,首要关注对模型计算结果表达的准确性与实时性,其次为场景真实性。其应用难点在于建立模型地表淹没计算数据与地理空间数据的映射,并整合至同一场景中^[23]。SWMM-FVCOM 耦合模型基于

研究区三角形计算网格进行地表洪水漫流计算,利用网格编号和网格顶点空间坐标的固定性,建立模型水力要素与地理信息的索引,从而实现 SWMM-FVCOM 与三维可视化的耦合。图 4 为基于 SWMM-FVCOM 耦合模型模拟结果的三维可视化流程图。以 Unity 3D 中游戏对象 (GameObject) 系统为载体

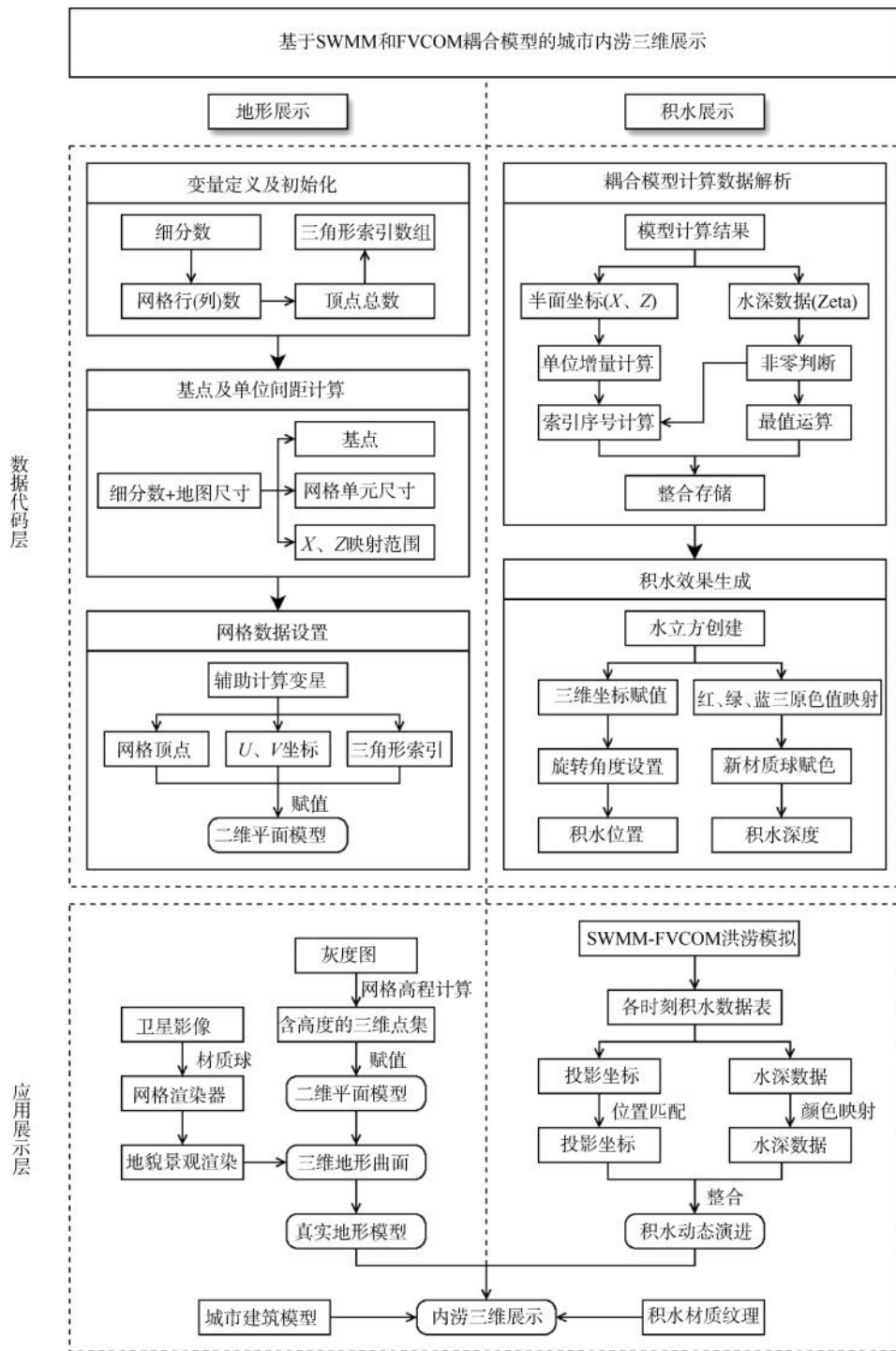


图4 雨洪模型与三维可视化耦合流程

Fig. 4 Coupling Process of Stormwater Model and 3D Visualization

构建地形,避免了 Terrain 系统对输入格式(“*.raw”)的限制,并可通过细分数调节三维展示精度。三维积水基于地表淹没计算数据实时生成,提高了模型与三维展示平台的集成度,可减少三维展示前处理操作,提高时效性。

1.3.1 真实地形建模

(1) 数据代码层

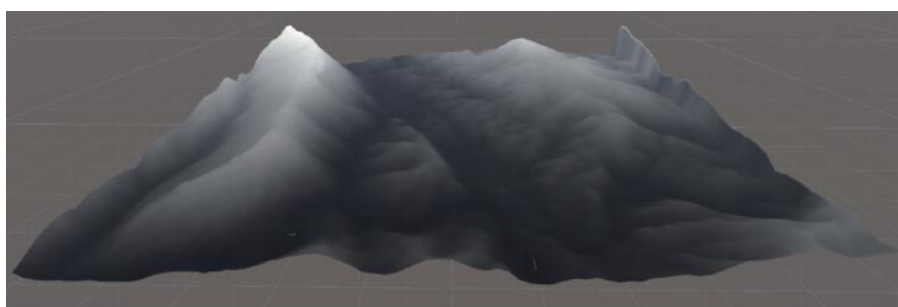
在 C #语言编译环境中创建可自定义尺寸和细分等级的正方形二维平面模型。由细分数计算网格行、列数和顶点总数,进而生成三角形索引数组。由

细分数和研究区地图尺寸计算网格基点, 网格单元尺寸和 X 、 Z 坐标映射范围(Unity 中以 X 、 Z 轴表示水平方向的位置, Y 表示垂直方向的位置)。设置辅助计算变量(单元网格边长, 平面尺寸, X 、 Z 轴单位向量和 X 、 Z 轴方向增量), 通过双层嵌套循环计算网格顶点位置、 U 和 V 坐标(分别对应 X 、 Z 轴)以及三角形索引, 并将计算好的数据赋值给网格对象。

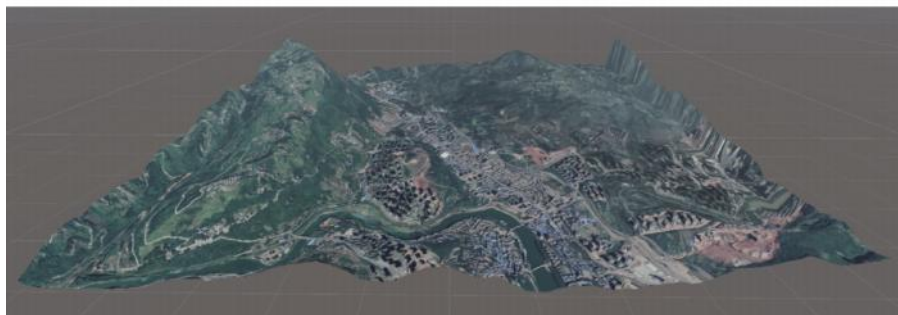
(2) 应用展示层

根据 Unity 3D 底层的灰度值映射关系对 DEM

灰度图进行网格高度插值计算, 储存为含高度的三维点集, 并赋值给二维平面模型得到三维地形曲面, 如图 5(a) 所示。经像素匹配后的研究区卫星影像由材质球添加到网格渲染器组件, 实现对三维地形曲面的地貌渲染, 如图 5(b) 所示。真实地形模型基于研究区灰度图和卫星影像实时生成, 并可通过细分数自由调节展示精度。在所搭建的场景中添加建筑物白膜预制体、树木、光照效果和天空盒等项目以增强三维展示效果, 如图 5(c) 所示。



(a) 三维地形曲面模型



(b) 地形曲面地貌渲染效果



(c) 三维场景细节

图 5 真实地形建模过程

Fig. 5 Modeling Process of Real Terrain

1.3.2 积水动态展示

(1) 数据代码层

通过 C #脚本解析并获取耦合模型计算结果中

各积水点的平面坐标和水深数据。对水深数据进行非零判断和最大值计算, 建立水深值与 RGB (RGB 分别代表红、绿、蓝三原色) 三色通道中 G 值的映射(R

值与 B 值不变),使得水深 Zeta 增大时 G 值成比例减小,蓝色加深,以此表征积水深度。对平面坐标,依次计算所有二维点 X、Z 方向上的单位量以及水深非零三维点的近似索引序号。如图 6 所示,依据

计算网格顶点平面坐标不变性,以近似索引序号定位水立方的平面位置(X、Z),进而获取该点处地形高程值(Y)对水立方进行三维坐标赋值,最终实现水体附着于三维地形表面的效果。

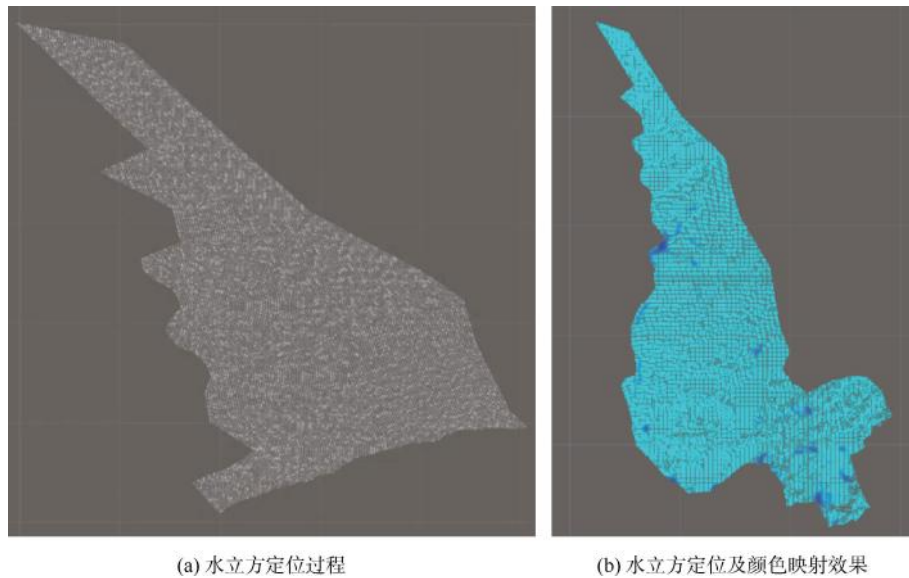


图 6 基于数据的水立方生成

Fig. 6 Data-Based Water Cube Generation

(2)应用展示层

根据预设相对路径读取耦合模型各时刻积水表格文件,结合表格中积水分布的投影坐标和三维地形曲面进行位置匹配确定积水范围。积水在预设时间间隔后自动生成在地形模型表面。通过向水立方中添加底噪纹理以增强积水效果真实性。

2 模型率定与验证

2.1 管网模型率定

为验证一维管网模型模拟暴雨径流的准确性,选取研究区两场监测过程稳定的实测历史降雨对建立的 SWMM 进行率定和验证。实测流量数据采自研究区北部某排放口布设的多普勒流量计,具体位置如图 1 所示。2024 年 11 月 16 日场次降雨(降雨历时 2 h)用于模型参数率定,2024 年 10 月 13 日场次降雨(降雨历时 6 h)用于模型验证。采用纳什效率系数(NSE)^[24]评估模型模拟结果和实测值的吻合程度。NSE 值越接近 1,说明模拟值和实测值的匹配程度越高,当 NSE 值大于 0.75,一般可认为所建立的模型较准确。由图 7 可知,2 场降雨事件的径流模拟值与实测值吻合度良好,对应的 NSE 值分别为 0.94 和 0.82,均大于 0.75,满足模

拟精确度要求。率定后的 SWMM 参数取值如表 1 所示。

2.2 耦合雨洪模型验证

为验证一维-二维耦合模型模拟地表漫流的可靠性,选取研究区 2025 年 1 月 7 日 9:30—1 月 7 日 14:30 历时 5 h 的实测降雨数据输入 SWMM-FVCOM 耦合模型计算,并对研究区 3 处易涝点进行现场监测。如图 1 所示,易涝点 A 位于龙角路河东市场公交车站,易涝点 B 位于九龙大道名扬国际对面处,易涝点 C 位于九龙市场公交大道人才车站旁侧。在此次降雨事件中,耦合模型在易涝点 B 和 C 2 处模拟出地表积水。经实地调查,易涝点 A、B、C 的现场情况如图 8 所示。经分析,耦合模型未在易涝点 A 模拟出积水,原因在于建模过程中未考虑该处道路雨水收集构筑物易发生堵塞;易涝点 B 可能的误差来源为该处道路雨水构筑物存在结构性破坏。将易涝点 B、C 积水深度和积水时间的实测值与模型模拟值进行对比(表 2),结果表明耦合模型可较准确地模拟地表产汇流过程,其地表积水计算结果可为融合三维可视化技术的暴雨内涝预警提供可靠的数据支撑。

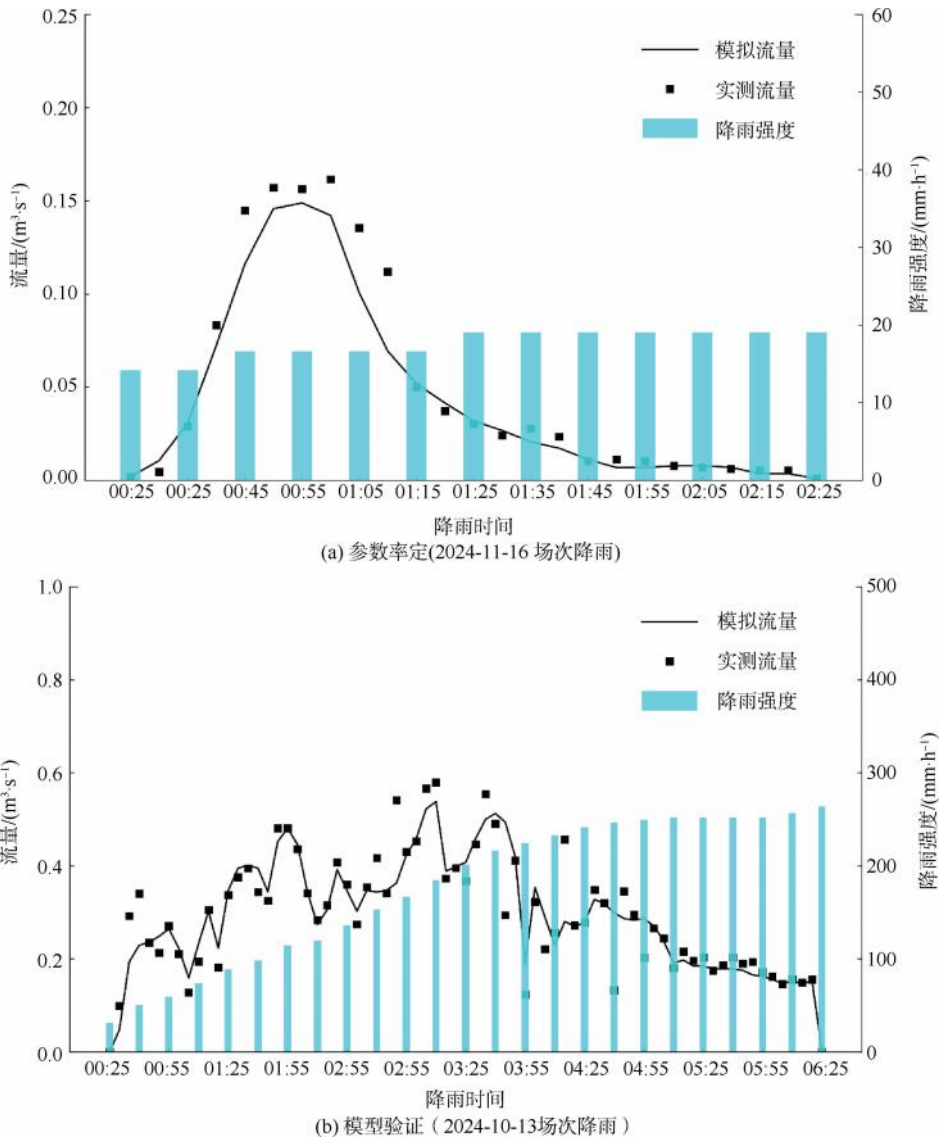


图 7 参数率定与模型验证

Fig. 7 Parameter Calibration and Model Validation

表 1 SWMM 模型参数率定结果

Tab. 1 Calibrated Parameters of the SWMM Model

参数	参考取值	率定值
管道曼宁系数	0.009~0.018	0.010
不透水区洼蓄深度/mm	1.2~3.5	2.0
透水区洼蓄深/mm	2.5~7.7	5.0
不透水区曼宁系数	0.011~0.024	0.016
透水区曼宁系数	0.06~0.24	0.15
无洼地不渗透面积比	5%~85%	25%
最大渗透/(mm·h ⁻¹)	15~120	76
最小渗透/(mm·h ⁻¹)	1.0~3.8	2.0
入渗衰减系数/(h ⁻¹)	2~7	3

3 结果与讨论

3.1 管网溢流分析及三维可视化

基于 SWMM 模拟结果,分析不同降雨重现期下的节点溢流情况,并进行三维可视化展示。管网节点的定位方法与积水类似,区别在于确定节点平面坐标后,基于地面高程减去节点埋深进行三维坐标赋值,以此展示节点的三维空间位置。非溢流节点以蓝色表示,并建立节点溢流量与 RGB 三色通道中 G 值的映射关系(R 值与 B 值不变),使节点溢流量增大时 G 值成比例减小,由黄色变为红色。

如表 3 和图 9 所示,溢流节点的数量及溢流总量与降雨重现期呈正相关趋势,5 个重现期下,溢流



图8 易涝点现场勘测图

Fig. 8 Field Conditions of Waterlogging-Prone Areas

表2 积水深度模拟值与实测值对比

Tab. 2 Comparison of Simulated and Measured Values for Waterlogging Depths

易涝点	积水深度/mm		相对误差	误差绝对值的 平均值	积水时间/min		相对误差	误差绝对值的 平均值
	模拟值	实测值			模拟值	实测值		
B	66.77	58	15.12%	11.82%	50	41	21.95%	16.86%
C	30.19	33	-8.52%		30	34	-11.76%	

表3 不同重现期下溢流节点统计结果

Tab. 3 Statistical Results of Overflow Nodes under Different Return Periods

重现期/a	溢流节点数	溢流节点占比	溢流量/m ³
1	302	7.47%	34 876
5	417	10.31%	101 130
10	499	12.34%	129 698
50	662	16.37%	209 043
100	726	17.96%	244 954

节点数量相较于前一重现期的增量依次为 115、82、163、64。具体表现为:1 a 重现期时,溢流节点集中分布在九龙大道,溢流量普遍低于 1 000 m³。当重现期增大为 5 a 时,新增溢流点主要位于天星大道。此外,九龙大道易涝点 B 处出现单节点近 7 000 m³ 的显著溢流,表明该处管网排水能力与负荷压力严重失衡,构成内涝高风险区。随着重现期继续增加,研究区东西两侧检查井逐步出现溢流且溢流量呈上升趋势。该溢流空间分异特征受区域地形与管网耦合效应主导,东侧汇水面积广而节点密度低,管网排水能力较差,加之较大地形坡度加速地表径、汇流,超出管网承载能力;西侧毗邻綦江漫滩区,排水主管密集与地势低洼的强汇水效应加剧了排水系统

负荷。

3.2 积水过程三维可视化

基于 SWMM-FVCOM 耦合模型模拟结果,对研究区不同降雨重现期下的二维内涝积水分布图与三维内涝场景模型进行对比分析,并通过增强三维建筑轮廓的可视化表达,以更直观地评估积水的空间分布特征,如图 10 所示。通过对研究区不同降雨重现期下的积水范围及水深分析发现研究区的排水能力较弱,在重现期为 1 a 的降雨下就产生了积水 [图 10(a)]。图 11 为不同重现期最大积水深度与淹没面积统计,随重现期增加淹没指标均呈非线性增长,最大水深增幅达 84.9%~85.6%,总积水量增长 7.0 倍~7.9 倍,淹没面积百分比从 1.3% 升至 10.6%。当重现期超过 50 a 后,各指标增速明显趋缓,其中淹没面积百分比增幅从 1~50 a 的每年 0.21% 降至 50~100 a 的每年 0.07%,表明排水系统在极端降雨条件下逐渐达到承载极限。随着重现期增加,积水范围和深度均有所扩大,但空间分布格局保持相对稳定,主要集中在研究区南侧、西侧和东南部。研究区南侧和西侧整体被綦江及其支流包围,地势较低,漫流至此的积水汇入江中排出。研

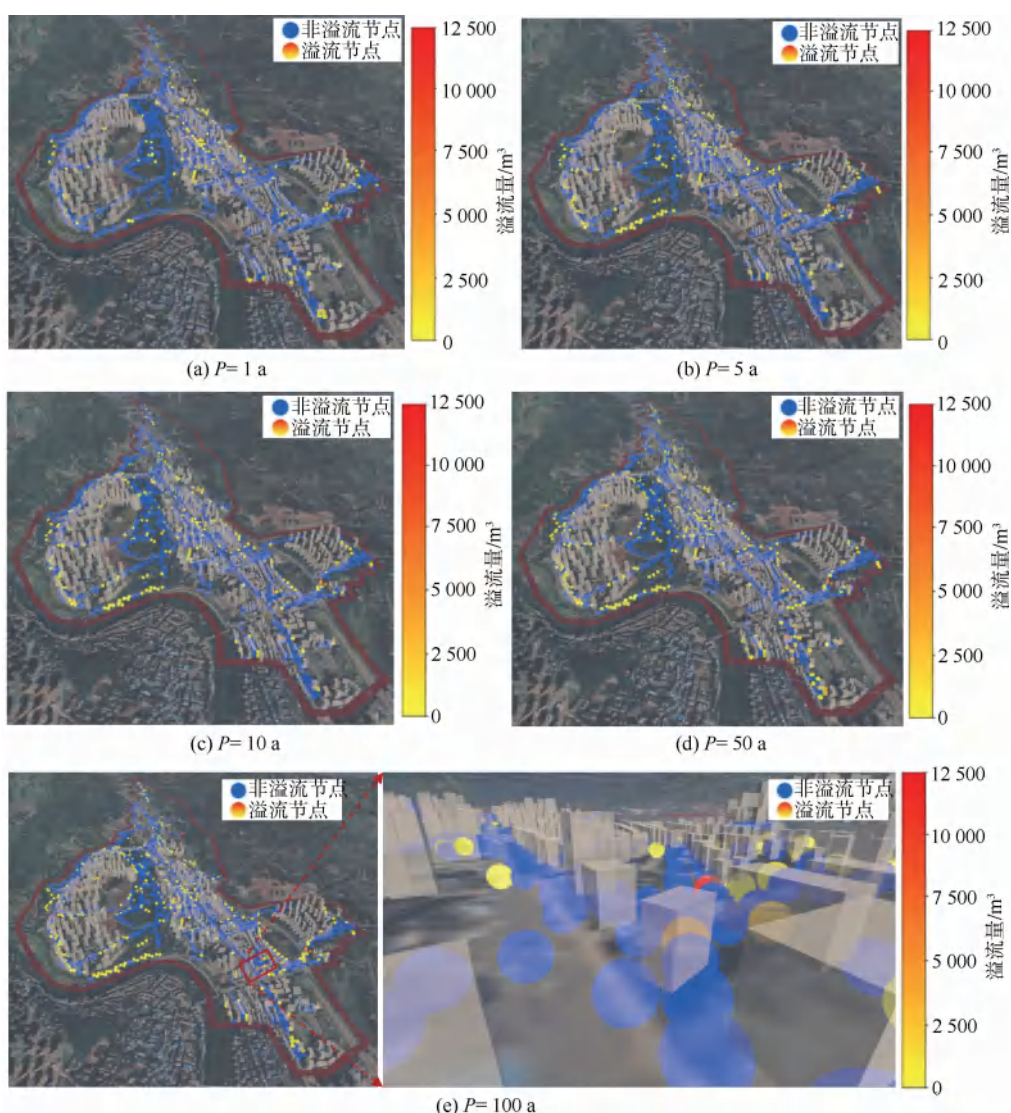


图9 不同重现期三维展示下的节点溢流分布

Fig. 9 Nodes Overflow Distribution under Different Return Periods in Three-Dimensional Views

究区东南部为主城区,结合研究区山地城市高差较大的地形特点和主城区低渗透率的下垫面属性,降雨前期少有填注和下渗等损失,后期净雨峰值强度较大,快速造成管网溢流并增加了地表产汇流强度,形成积水。通过查看三维内涝场景模型,可直观观察到主城区西靠营盘山,山脚下形成了天然排水通道。地表漫流先在地形较为低洼处形成内涝点,随着积水量增加,水流逐步向綦滨路汇集入江。未能排出的积水则逐渐稳定在原位置形成内涝区域,且淹没时间较长。图 12 为 100 a 一遇降雨下易涝点 B、C 不同时刻积水情况,其中 $T=90 \text{ min}$ 时两区域开始出现明显积水, $T=120 \text{ min}$ 时淹没情况最为严重。

二维内涝积水分布图可简洁地展示各时刻的积水范围及深度,便于快速获取积水信息,但无法直观、清晰地展示其对周围环境的影响,已逐渐无法适应当下和未来的内涝灾害精细化管理要求。通过三维与二维对比可看出,三维场景模型可真实准确地刻画研究区地形和地物特征,反映物体空间位置关系,连续动态地生成地表积水,更精细地展示该区域内涝积水分布位置、范围及深度等信息。此外,水深差距过大的积水点在二维积水图中通常难以同时显示,而在三维积水动态展示中可通过调节细分分数保证其显示精度。在三维场景中,可通过视觉效果直观获取研究区内涝演进情况,有助于排查易涝点和分析积水成因。

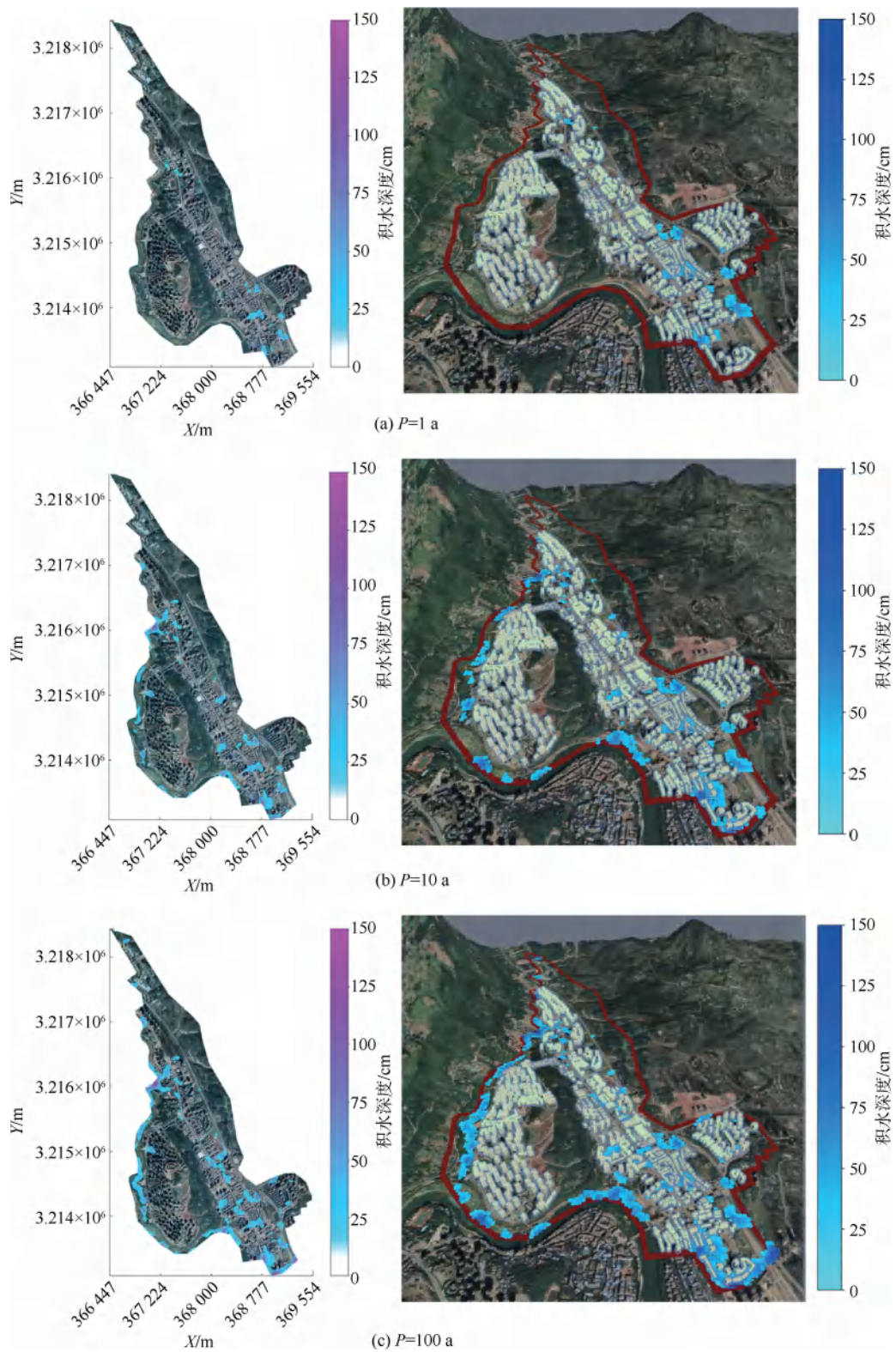


图 10 不同重现期二维(左)与三维(右)展示下的峰值积水分布

Fig. 10 Peak Waterlogging Distribution under Different Return Periods in Two-Dimensional (Left) and Three-Dimensional (Right) Views

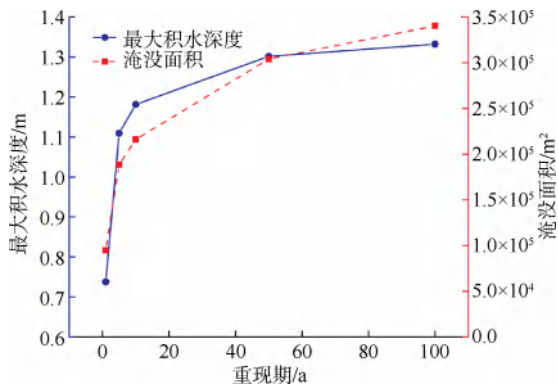
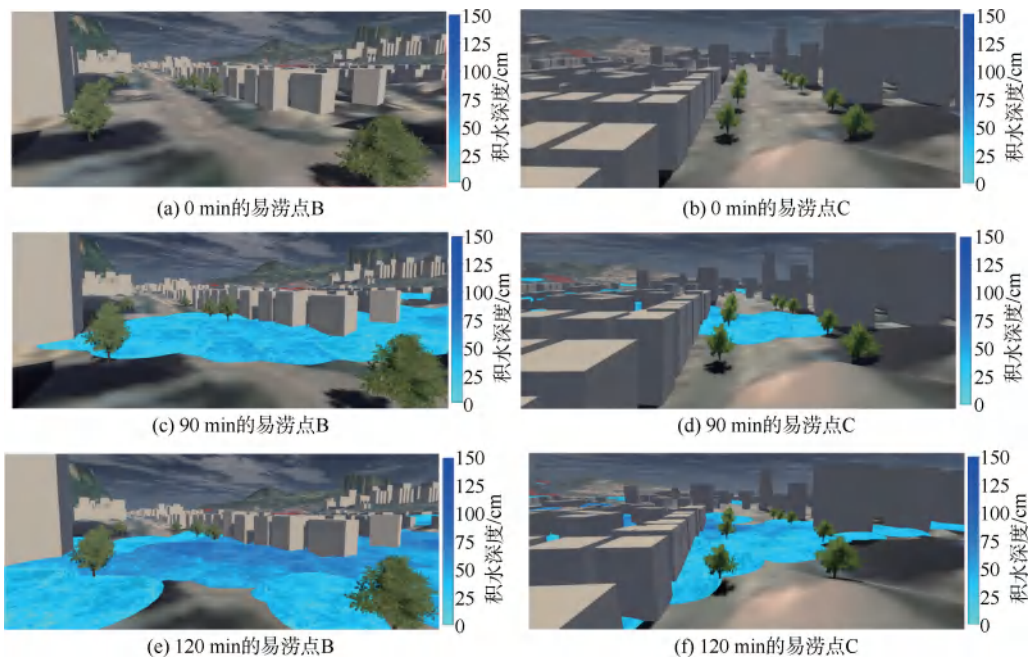


图 11 不同重现期积水深度与淹没面积统计图

Fig. 11 Statistics of Flood Depth and Inundation Area under Different Return Periods

3.3 三维可视化在城市内涝预警中的应用

通过将自主搭建的降雨监测系统、SWMM-FVCOM 耦合雨洪模型以及 Unity 3D 进行集成实现内涝预警的三维可视化(图 13)。将綦江研究区雨量计数据接入山地城市降雨和内涝风险监测系统后台,可实时获取区域当前降雨量。以气象台预报未来发生中雨以上降水过程或雨量计实时降雨强度超过 0.4 mm/min 作为内涝预警的启动条件。预警启动后,实时降雨数据经换算后输入 SWMM-FVCOM 水文水力模型,同步模拟城市排水系统响应及地表产汇流过程,计算并输出各时刻积水范围与深度,并以 Excel 表格格式存储在 Unity 3D 预设读取路径

图 12 不同时刻易涝点积水情况 ($P=100 \text{ a}$)Fig. 12 Ponding Condition of Waterlogging-Prone Points at Different Time ($P=100 \text{ a}$)

下。在积水空间位置索引过程中网格顶点平面坐标保持不变,反映在积水数据表中即前 2 列为 X 、 Z 坐标不变,而后第 i 列记录第 j 个时间间隔对应位置处的水深值 $Zeta(i \geq 3; j = i - 2)$,每经过一个时间间隔写入一列。在 Unity 3D 真实地形模型基础上依据积水数据表动态生成各时刻积水从而对内涝发生的时间、位置和程度进行实时预警。

研究区雨量传感器于 2025 年 1 月 9 日 0 时监测到区域内实时降雨强度达到 0.52 mm/min 并启动预警。SWMM-FVCOM 耦合模型模拟地表积水的结果输出间隔预设为 10 min ,当模型模拟出地表积

水后实时生成三维场景进行滚动式内涝预警。本次降雨过程自 1 月 9 日 0:00 开始,持续至 8:00,期间降雨强度呈逐渐增大趋势,实测降雨过程如图 14 所示。本次预警过程中真实地形环境的生成仅用时约为 10 s ,耦合模型完成对当前截止时刻水深计算后约 5 s 即可实现三维积水效果的生成,可以看出,所提出的三维展示方法在暴雨内涝预警中具有较强的实用性。

在 Unity 3D 三维内涝场景中通过胶囊体创建简化人物模型,并将主摄像机设为该模型的子对象,以此模拟用户视角。通过 C# 脚本编程,用户可使用键盘按键控制胶囊体在场景中的移动,模拟人物

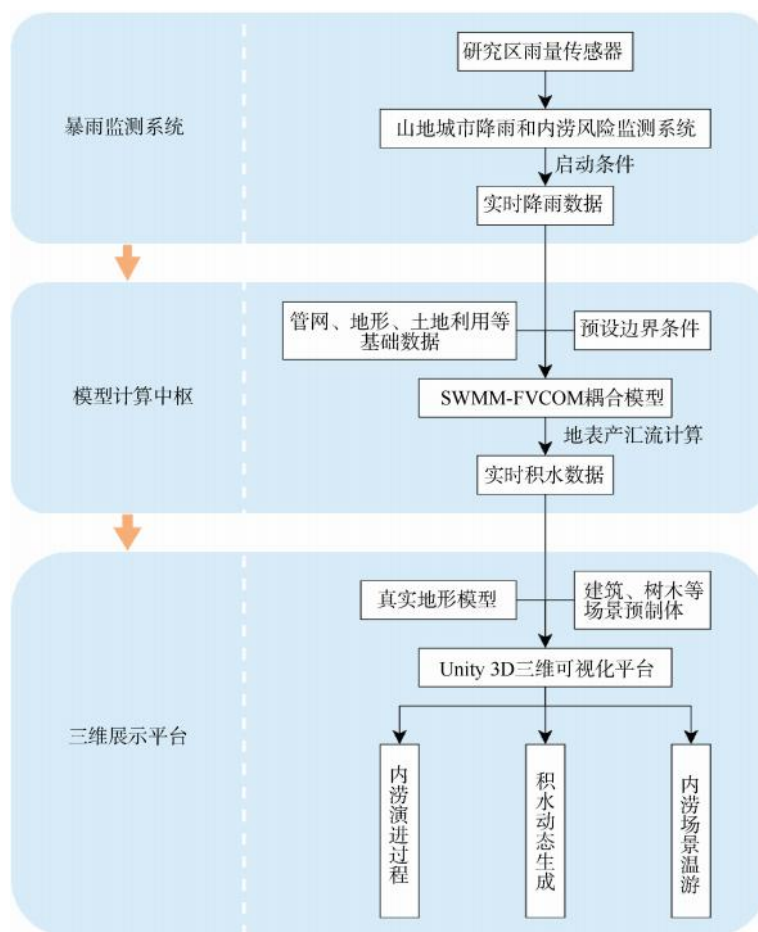


图 13 基于三维可视化的城市内涝实时预警框架

Fig. 13 Early Warning Framework of Real-Time Urban Waterlogging Based on Three-Dimensional Visualization

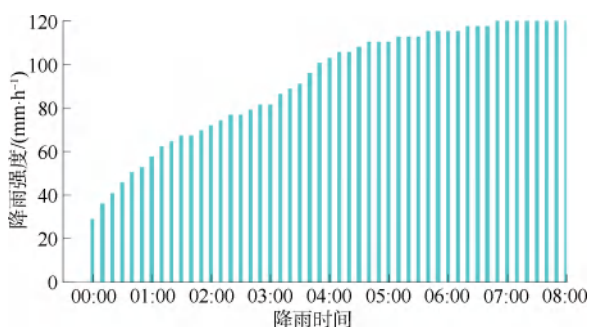


图 14 2025-01-09 场次实测降雨过程

Fig. 14 Measured Rainfall Process for 2025-01-09 Event

空间位移;同时,通过鼠标移动控制主摄像机视角,实现人物视角的 360°旋转,从而身临其境地感受内涝淹水过程及危害程度。图 15 为研究区天星大道和九龙大道典型淹没区域在不同时刻的第一人称视角场景漫游效果。

4 结论

以山地城市重庆市綦江区某排水片区为研究区

域,构建了基于 SWMM-FVCOM 的一二维耦合雨洪模型,并基于 Unity 3D 平台提出了城市内涝模型的三维可视化方法。所采用的 SWMM 和 FVCOM 模型均为开源模型,Unity 3D 平台提供非商业化应用的免费使用许可。程序经过封装后,只需输入研究区的 DEM 数据、卫星影像图以及各时刻的积水数据表,即可在 Unity 3D 中直接生成包含地形和动态积水变化的三维场景。该方法支持地形和积水展示精度的灵活调节,具有较强的实用性。在实际暴雨内涝预警中,三维积水展示在确保准确性与时效性的基础上,突破了平面展示的局限,提供了更丰富的场景信息,显著增强了积水生成的连续性与内涝场景的真实感。所提出的方法可有效提升城市洪涝过程的可视化水平,未来可应用高分辨率数字地表模型(DSM)及无人机摄影技术针对研究区内易涝区域搭建精细化场景,并集成虚拟现实技术进一步提升场景真实性与沉浸感。

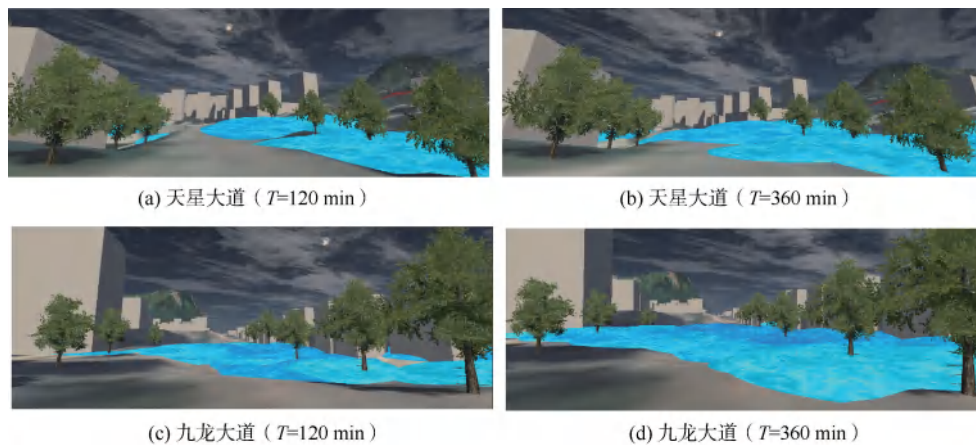


图 15 内涝场景漫游及预警效果

Fig. 15 Waterlogging Scenario Navigation and Early Warning Effect

参考文献

- [1] 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 J Y, Wang Y T, He R M, et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(4): 485-491.
- [2] 程晓陶,刘昌军,李昌志,等. 变化环境下洪涝风险演变特征与城市韧性提升策略[J]. 水利学报, 2022, 53(7): 757-768, 778.
Cheng X T, Liu C J, Li C Z, et al. Evolution characteristics of flood risk under changing environment and strategy of urban resilience improvement [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(7): 757-768, 778.
- [3] 周添红,唐佐槐,褚俊英,等. 极端暴雨条件下城市内涝模拟研究进展与展望[J]. 人民长江, 2025, 56(5): 14-22, 30.
Zhou T H, Tang Z H, Chu J Y, et al. Progress and prospects of urban waterlogging simulation under extreme rainstorm conditions [J]. Yangtze River, 2025, 56(5): 14-22, 30.
- [4] Gironás J, Roesner L A, Rossman L A, et al. A new applications manual for the storm water management model (SWMM)[J]. Environmental Modelling & Software, 2010, 25(6): 813-814.
- [5] 许迪. SWMM 模型综述[J]. 环境科学导刊, 2014, 33(6): 23-26.
Xu D. An overview of storm water management model (SWMM) [J]. Environmental Science Survey, 2014, 33(6): 23-26.
- [6] 苟德菲,杨辉,周午阳,等. 基于 InfoWorks ICM 的广州市 H 区流域排水系统模型验证[J]. 净水技术, 2020, 39(4): 67-73.
Gou D F, Yang H, Zhou W Y, et al. Validation of watershed drainage system based on InfoWorks ICM model for H zone of Guangzhou City [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(4): 67-73.
- [7] 房亚军,于川淇,金鑫. 基于 SWMM-CCHE2D 耦合模型的海绵城市内涝管控效果评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(2): 582-591.
Fang Y J, Yu C Q, Jin X. Evaluation of SWMM-CCHE2D model-based sponge city inland food control effects [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(2): 582-591.
- [8] 卢兴超,徐宗学,李永坤,等. 基于 SWMM 与 LISFLOOD-FP 耦合模型的城市街区内涝模拟研究[J]. 水资源保护, 2024, 40(3): 98-105, 124.
Lu X C, Xu Z X, Li Y K, et al. Research on urban block waterlogging simulation based on coupling model of SWMM and LISFLOOD-FP [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3): 98-105, 124.
- [9] 陈朝晖,李鹏,张煜洲,等. 耦合一二维水动力模型的城市社区暴雨内涝模拟研究[J]. 水利水电技术: 中英文, 2024, 55(7): 55-69.
Chen C H, Li P, Zhang Y Z, et al. Urban community stormwater inundation simulation research on coupling one-and two-dimensional hydrodynamic models [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(7): 55-69.
- [10] 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 Z L, Chen Y H, Lai C G. Numerical simulation of urban waterlogging based on TELEMAC-2D and SWMM model [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 117-124.
- [11] 侯精明,李桂伊,李国栋,等. 高效高精度水动力模型在洪水演进中的应用研究[J]. 水力发电学报, 2018, 37(2): 96-107.
Hou J M, Li G Y, Li G D, et al. Application of efficient high-resolution hydrodynamic model to simulations of flood propagation

- [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2018, 37(2): 96-107.
- [12] Chen C S, Liu H D, Beardsley R C. An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: Application to coastal ocean and estuaries[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, 20(1): 159-186.
- [13] Tan Y Q, Cheng Q M, Lyu F W, et al. Hydrological reduction and control effect evaluation of sponge city construction based on one-way coupling model of SWMM-FVCOM: A case in university campus[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 349: 119599. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119599.
- [14] Liu F, Ren C J, Chen Y. Flood risk investigation of pedestrians and vehicles in a mountainous city using a coupled coastal ocean and stormwater management model[J]. *Journal of Flood Risk Management*, 2024, 17(2): e12979. DOI: 10.1111/jfr3.12979.
- [15] 魏书仪, 刘非, 袁绍春, 等. 基于 SWMM 和 FVCOM 模型的城市多级排水系统改造模拟研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2024, 55(12): 29-39.
Wei S Y, Liu F, Yuan S C, et al. Simulation study of urban multistage drainage system modification based on SWMM and FVCOM model [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2024, 55(12): 29-39.
- [16] 田梦然, 储鼎, 赵晓伟. 利用实景三维模型构建城市洪涝预警平台[J]. *测绘与空间地理信息*, 2020, 43(s1): 21-24.
Tian M R, Chu D, Zhao X W. Using real scene 3D model to construct urban flood and waterlogging early warning platform [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2020, 43(s1): 21-24.
- [17] 王星捷, 李春花. 基于 Unity 3D 平台的三维虚拟城市研究与应用[J]. *计算机技术与发展*, 2013, 23(4): 241-244.
Wang X J, Li C H. Research and application of 3D virtual city based on Unity 3D[J]. *Computer Technology and Development*, 2013, 23(4): 241-244.
- [18] 陈淑姝, 甘淑. Unity 3D 支持的 DEM 地形三维可视化表达技术实现[J]. *软件导刊*, 2018, 17(1): 208-211.
Chen S S, Gan S. The technology of DEM of 3D terrain visualization based on Unity 3D[J]. *Software Guide*, 2018, 17(1): 208-211.
- [19] 王俊晖, 侯精明, 王峰, 等. 洪涝过程模拟及三维实景展示方法研究[J]. *自然灾害学报*, 2020, 29(4): 149-160.
Wang J H, Hou J M, Wang F, et al. Study on flood process simulation and 3D scene display method[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2020, 29(4): 149-160.
- [20] 张大伟, 赵冬泉, 陈吉宁, 等. 芝加哥降雨过程线模型在排水系统模拟中的应用[J]. *给水排水*, 2008, 44(s1): 354-357.
Zhang D W, Zhao D Q, Chen J N, et al. Application of Chicago rainfall hydrograph model in drainage system simulation [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2008, 44(s1): 354-357.
- [21] 赖成光, 廖耀星, 王兆礼. 不同暴雨情景下的城市内涝响应特征分析[J]. *水资源保护*, 2023, 39(3): 101-108, 133.
Lai C G, Liao Y X, Wang Z L. Analysis of urban waterlogging response characteristics under different rainstorm rainfall scenarios[J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(3): 101-108, 133.
- [22] 宋晓猛, 张建云, 王国庆, 等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战——II. 城市雨洪模拟与管理[J]. *水科学进展*, 2014, 25(5): 752-764.
Song X M, Zhang J Y, Wang G Q, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: II: Urban stormwater modeling and management [J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(5): 752-764.
- [23] 王峰, 侯精明, 王俊晖, 等. 基于倾斜摄影的城市洪涝过程三维可视化展示方法[J]. *西安理工大学学报*, 2020, 36(4): 494-501.
Wang F, Hou J M, Wang J H, et al. 3D visualization method of urban flood simulation based on tilt photogrammetry [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2020, 36(4): 494-501.
- [24] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles[J]. *Journal of Hydrology*, 1970, 10(3): 282-290.