

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.04.008

基于倾斜摄影的城市洪涝过程三维可视化展示方法

王 峰, 侯精明, 王俊琿, 王兴桦

(西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 针对城市洪涝过程数值模拟计算结果对数据精度的高度敏感性问题,以及满足城市洪涝过程高逼真度展示的需要,本文将倾斜摄影测量获取的高精度测绘地理数据用于城市洪涝过程数值模拟计算,以获取的高精度计算结果和倾斜摄影实景三维建模等数据为支撑,提出基于倾斜摄影的城市洪涝过程三维可视化展示方法。首先设计基于倾斜摄影的城市洪涝过程三维动态可视化技术流程框架,然后重点研究倾斜摄影实景三维建模与三维地理空间场景构建、洪涝淹没数据与 DEM 数据整合等关键技术,最后定制开发洪涝过程三维可视化展示系统 Flood-3DGIS,通过实例对城市洪涝过程进行了三维实景动态仿真可视化展示,结果实用、可靠。文章成果可有效提升城市洪涝可视化认知水平,其作为城市防洪减灾非工程措施的重要技术支撑,具有良好实际应用价值。

关键词: 倾斜摄影测量; 实景三维建模; 城市洪涝模拟; 三维可视化; 动态仿真

中图分类号: P208

文献标志码: B

文章编号: 1006-4710(2020)04-0494-08

3D visualization method of urban flood simulation based on tilt photogrammetry

WANG Feng, HOU Jingming, WANG Junhui, WANG Xinghua

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In view of the high sensitivity of numerical simulation results of urban flood process to data accuracy, and to meet the needs of high fidelity display of urban flood process, this paper uses the high-precision surveying and mapping geographic data obtained by tilt photogrammetry to numerical simulation model of urban flood process. Based on high-precision numerical simulation data sets and 3D modeling data of tilt photogrammetry, this paper puts forward a 3D visualization method of urban flood process based on tilt photogrammetry. Firstly, the technological process framework of urban flood process's 3D dynamic visualization based on tilt photogrammetry is designed. Then, the key technologies such as 3D modeling and 3D geospatial scene construction, and integration of numerical simulation data sets and DEM data are mainly discussed. Finally, a 3D visualization display system called Flood-3DGIS for urban flood process's display is developed. The examples of urban flood process's 3D real scene dynamic visualization shows that the results are practical and reliable. The method in this paper can effectively improve the cognitive level of urban flood process, and can provide an important technical support for non engineering measures of urban flood management and disaster reduction, which is of good practical application value.

Key words: tilt photogrammetry; real 3D modeling; urban flood simulation; 3D visualization; dynamic simulation

收稿日期: 2020-08-20; 网络出版日期: 2020-10-29

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20201029.1110.002.html>

基金项目: 国家“十三五”重大研发专项资助项目(2016YFC0402704); 国家自然科学基金资助项目(51709223); 西安市碑林区科技计划资助项目(GX2038)

第一作者: 王峰,男,硕士,工程师,研究方向为水利测绘遥感等。E-mail:305789861@qq.com

城市洪涝过程数值模拟和可视化展示,对城市洪涝灾害风险评估与防灾减灾应急决策管理具有重要意义^[1-2]。近年来,洪涝过程三维仿真可视化已成为洪涝模拟、动态洪水风险图研究的重要内容^[3-5]。倾斜摄影测量采用多台传感器进行多视角影像信息及数据采集,能快速获取高精度地表三维数据成果,涵盖实景三维模型、正射影像 DOM 及数字地表模型 DSM 等多源测绘地理信息成果^[6]。基于无人机倾斜摄影测量的城市三维建模正开展大量生产和应用,建模质量和效率也逐步得到优化和提升^[7]。城市洪涝模拟通常采用水文学模型、水动力模型及暴雨雨洪模型进行分析计算^[8-9],而准确度高的数值模拟模型离不开高精度地形、河道、管网、土地利用、地物等地理信息数据的支持。蔡雨亭等^[10]在研究中采用城区高精度 DEM 和其他地理信息数据构建城市局部范围雨洪模型。刘斌等^[11]针对城市洪涝模型对地形数据高度敏感和雨洪风险评估准确性受限于地形数据精度的问题,将无人机倾斜摄影测量技术重建的高精度实景三维模型应用在城市雨洪风险评估中。本文针对城市洪涝数值模拟模型准确性对高精度数据源的高度依赖性问题,立足于提升城市洪涝模拟结果可视化表达水平,提出基于倾斜测量的城市洪涝演进三维仿真可视化方法,研究实现该方法的关键技术,设计开发了城市洪涝过程三维可视化展示系统 Flood-3DGIS,实现了城市洪涝演进过程三维动态仿真可视化。本文方法可作为城市防洪减灾非工程措施的重要技术支撑,发挥其直观动态、展示精度高的特点,应用于洪涝灾害预测预报、洪涝风险评估、居民疏散避险、土地利用开发及灾害保险等方面。

1 关键技术与方法

通过倾斜摄影测量与后处理可获取高精度、高质量实景三维模型和数字地形高程等多源数据成果,为城市洪涝模拟数值计算提供基础数据源,可有效弥补数据分辨率过低、精度不够而导致数值模拟计算结果精度不足的问题。倾斜摄影测量与后处理得到的多源数据成果主要有:城市高精度实景三维模型;结合影像识别和人工判读获取精细化的城市土地利用类型和建筑地面矢量数据;基于数字正射影像和高程点云数据处理得到的数字高程模型数据;其他数据。因此,本文紧密结合倾斜摄影测量与后处理得到的多源数据成果对有效提升城市洪涝数值模拟结果精度的重要性,以及倾斜摄影具备支持三维实景展示的优势,设计了城市洪涝模拟三维仿真可视化方法流程(见图 1),并对构成该方法的

关键技术展开深入研究。

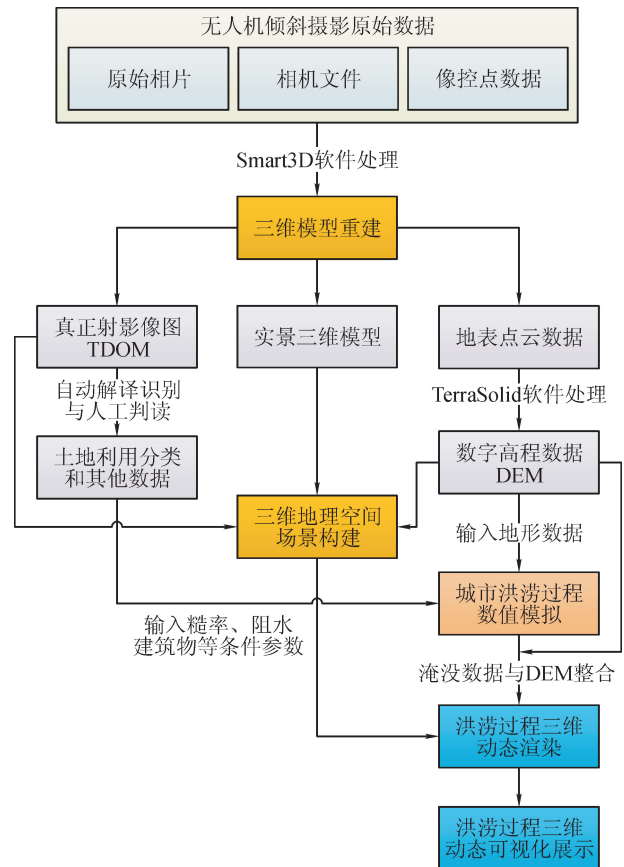


图 1 城市洪涝过程模拟三维仿真可视化技术流程图
Fig. 1 Technical flow chart of 3D simulation visualization for urban flood process

1.1 实景三维建模与三维地理空间场景构建

倾斜摄影测量后处理工具软件较多,其中 Smart3D 是一种基于图形运算单元 GPU 的快速三维场景运算软件,可运算生成基于真实影像的超高密度点云,并以此生成基于真实影像纹理的高分辨率实景三维场景模型。因此,本文选用 Smart3D 倾斜摄影建模软件,通过大规模并行计算,以多机 GPU 并行加速为核心,进行空间实景三维模型的自动批量构建。具体建模流程(见图 2)包括对倾斜影像获得的一组标准、无序的二维相片数据源进行无效相片去除及同名点选取、空三加密、多视匹配、三角网(TIN)构建、自动赋予纹理等步骤,最终得到实景三维模型。

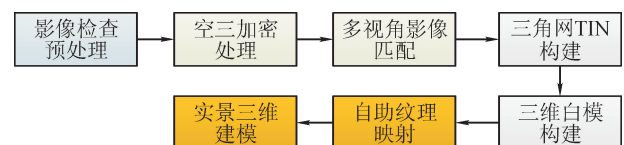


图 2 Smart3D 软件实景三维建模流程图
Fig. 2 Real 3D modeling flow of Smart3D software

图 3(a)和图 3(b)分别展示了 TIN 构建生成的三维白模数据和自动赋予纹理后生成的实景三维模型效果,整个过程完全无需人工干预便可自动完成大批量城市三维模型的构建。Smart3D 支持导入标准影像数据格式(如 jpg, tiff 等),可输出不同坐标系、不同格式的实景三维模型成果和正射影像、高程点云、矢量测绘数据(如 OSGB, OBJ, STL, DAE 等),以便和 GIS 平台、水模拟软件(如 Delft3D, MIKE, SWMM 等)对接。目前,常用的倾斜摄影三维模型数据组织方式是二进制存贮的、带有嵌入式链接纹理数据(如 jpg 格式)的 OSGB 格式,该格式是自带多级分辨率的 LOD 数据,根据密集点云逐级抽稀构建出的三角网模型,保证三维场景浏览过程中不同层级之间的过渡很平滑。



(a) 三维白模数据



(b) 实景三维模型

图 3 Smart3D 软件生成实景三维模型效果图
Fig. 3 Effect of real scene 3D model generated by Smart3D software

实景三维模型覆盖范围仅限于摄影区域,需将其与整个基础三维地形地貌场景融合,才能构成完整三维地理空间场景。针对构建完整的三维地理空间场景,本文做法是将栅格化的不同分辨率、不同数据源的卫星影像、地图等图像数据和 DEM 数据,经过椭球转换、投影变换以及剪切、重采样等预处理,建立 WGS84 椭球基准下,以多级金字塔 LOD 方式组织管理的海量地形地貌瓦片数据集。对于倾斜摄影后得到的实景三维模型数据,采用 Smart3D 软件处理,具体做法是横向按区域划分,一个区域对应一个实景三维模型数据集,单独命名管理;同一区域内纵向按 LOD 分级分块,不同级别对应不同尺度分辨率,同一级别内不同分块数据集单独命名管理;最

终形成适合不同区域、不同分辨率的实景三维模型数据集 LOD 组织管理模式,其中单一局域的实景三维模型 LOD 数据集构建过程,如图 4 所示。

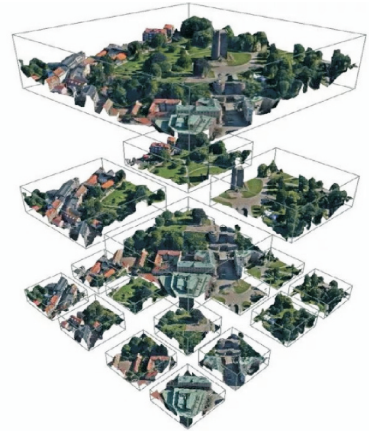


图 4 实景三维模型 LOD 金字塔数据集构建图
Fig. 4 Construction of LOD pyramid for real 3D model

最后,本文利用 WebGL 技术开发面向浏览器前端的三维虚拟地球可视化引擎,该引擎采用基于 LOD 技术的渲染机制,对地形地貌瓦片数据集按 LOD 组织方式确定文件格式、协议描述、调度模式,一方面实时调度加载指定区域和各级尺度的影像、DEM 等地形和纹理数据,另一方面调度加载同一区域和尺度对应的实景三维模型数据。经过三维虚拟地球可视化引擎对地形地貌瓦片数据和实景三维模型数据的映射、叠加及渲染,最终构建动态、大范围、多尺度的三维地理空间场景,如图 5 所示。

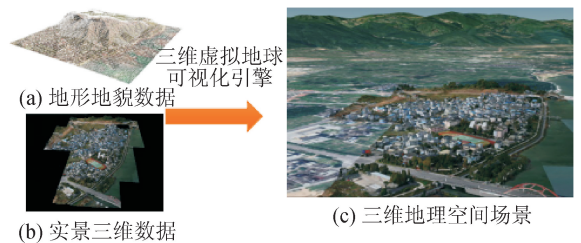


图 5 三维地理空间场景构建图
Fig. 5 Construction of 3D geospatial scene

1.2 土地利用类型识别提取与矢量化数据获取

居民区、植被、道路、水体等不同类型的土地利用数据,是确定城市洪涝数值模型分析计算所需地表糙率、阻水建筑物等参数的重要依据,也是评估洪涝风险的重要因子。利用倾斜摄影获取的实景三维模型、多视角影像、高程点云数据可得高质量的真正射影像图(TDOM)数据^[12],为识别提取各类类型土地利用数据奠定了基础。因此,本文以倾斜摄影得到的 TDOM 数据作为数据源,通过自动识别和解译方法与人工判读相结合的复合方法,识别和提取

准确度高的城市土地利用分类及其他细分矢量数据。其中自动识别解译方法采用当前常用于监督分类的BP神经网络算法对TDOM影像进行识别、分割,大量训练建筑物、植被、道路、水体等样本,建立典型样本库,完成土地利用分类数据的初次识别和分割。图6展示了基于TDOM数据的植被自动识别和解译分割,其中识别结果基本符合植被土地类型的实际覆盖范围。自动识别和解译分割的方法提高了土地利用类型和地物识别提取的效率^[13],但自动识别结果难以避免误差和错漏。因此,本文在初次识别基础上,利用人工判读方法进行深度解译和细分,一方面修正自动识别阶段产生的错误,另一方面进一步判读细分。例如,将绿地植被细分为草体、果林、疏林、森林和灌木丛等,将居民区细分为商业、文教、住宅等不同功能区,从而最终得到准确度更高、分类更细的城市土地利用类型矢量数据。

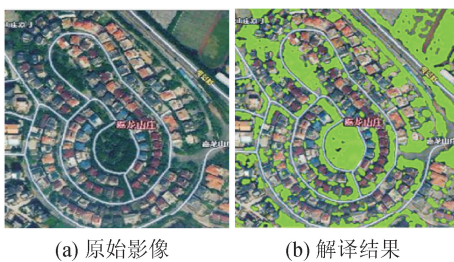


图6 基于真正射影像的植被自动解译

Fig. 6 Automatic vegetation recognition based on TDOM

1.3 高精度数字地形高程数据提取

高精度数字地形高程数据DEM为洪涝模拟水文水动力数值模型计算提供了地形数据支持。倾斜摄影后处理软件Smart3D先利用空中三角测量运算影像外方位元素,再通过多视影像密集匹配可获得高密度地表点云LAS数据。地表点云LAS数据具有密度大、细节特征全面等特点,为数字地形高程数据DEM获取提供了新的数据源。本文采用黄剑飞等^[14]提出的方法,利用Smart3D软件生成倾斜摄影三维建模数据,先对其经过处理得到高精度地表点云LAS数据,再利用TerraSolid软件进行点云滤波和人工编辑分类处理,最终生成数字高程模型DEM数据,图7展示了采用该方法获取的地表点云与DEM数据渲染效果。TerraSolid软件是运行于MicroStation系统的LiDAR点云数据处理软件,能够提供点云噪声和异常值剔除、点云滤波、点云输出、DEM自动提取与编辑、影像数据纠正和镶嵌等功能。

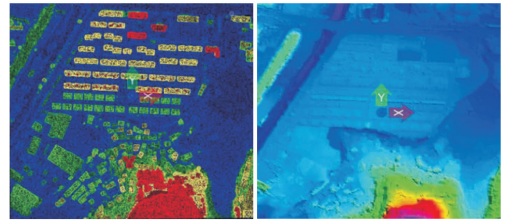


图7 地表点云与DEM渲染效果图

Fig. 7 Rendering effect of surface point cloud and DEM

1.4 洪涝模拟数据嵌入(整合)方法

洪涝模拟数值模型计算生成的洪涝淹没数据与数字高程模型、地理信息数据在格式、基准等方面往往差别较大,导致洪涝淹没数据与DEM数据难以按统一的地理空间基准、数据组织框架进行管理,淹没数据无法与DEM数据实现空间映射与套合。解决这一问题需要将洪涝淹没数据与DEM数据等进行整合,集成到统一的地理空间数据框架下。本文基于自主研制的GAST(GPU Accelerated Surface water flow and Transport model)水动力模型,首先将DEM数据与土地利用分类等数据统一转换到WGS84椭球基准、UTM投影下,开发格式转换工具将上述数据转换为GAST水动力模型数值对应格式,之后导入GAST模型进行数值计算,得到不同重现期、不同输出时间下的洪涝淹没数据。在对洪涝淹没数据复核检查WGS84椭球基准和UTM投影信息后,实施数据格式反转换处理形成与DEM格式相同、地理空间一致的数据,构成数字水深模型数据(Digital Depth Model,DDM),该数据模型使用网格单元属性存储水深值,从而实现对GAST水动力模型生成的所有DDM数据与DEM数据按照同样方式进行组织管理。三维虚拟地球可视化渲染引擎对DDM数据、DEM数据、纹理数据及实景三维模型进行实时调度和加载,在空间位置上映射、叠加,对DDM数据中不同水深网格单元设置不同渲染样式,根据模拟输出时间序列设置DDM数据加载和渲染顺序,最终实现洪涝淹没演进过程在三维实景地理空间场景中的动态可视化。

对于洪涝模拟数值结果中记录的流速、流量等水情信息,本文利用数据库管理系统建立一系列不同输出时间的对应淹没数据表分别存储管理,淹没数据表中的淹没网格单元记录与DDM数据中的网格单元通过网格唯一编号建立一一映射关系,保证由淹没数据表网格记录快速定位到DDM网格单元,以及由DDM网格单元快速查询淹没数据表网格单元水情信息的双向互查效率。

2 城市洪涝过程模拟三维可视化展示系统

2.1 系统设计与开发

本文基于 WebGL 和 3DGIS 设计开发了城市洪涝过程模拟三维可视化展示系统(Flood-3DGIS)。该系统采用 B/S 架构,划分为三层体系(见图 8)分别为:

1) 数据服务层

将自主研发的 GAST 水动力模型计算的洪涝数值模拟结果数据分别存储在不同输出时间对应下的淹没数据表;将 DEM、影像、其他栅格数据、实景三维建模数据按照 LOD 切片数据集组织,洪涝淹没数据生成的数字水深模型 DDM 数据按照栅格数据集管理;将土地利用分类及其他矢量地理信息数据采用 PostgreySql 空间数据库存储管理。

2) 应用分析层

提供 GAST 水动力数值模拟模型组件、三维仿真可视化渲染引擎组件、空间查询分析与检索统计组件等平台核心应用与功能服务,其中,三维仿真可视化渲染引擎组件采用开源三维虚拟地球框架 Cesium 定制开发。

3) 前端交互层

主要是定制开发用户交互操作页面,用于启动功能触发和各种用户请求,呈现和展示应用服务层、数据服务层经过分析计算、实时动态渲染后的响应结果,前端以浏览器和插件方式供用户访问。该系统采用 Webservice 技术和 SOAP 协议,支持跨平台,可根据业务需求兼容扩展,以融合更多分析模块和数据,支持应用范围更广的洪涝灾害可视化管理和成果发布共享。

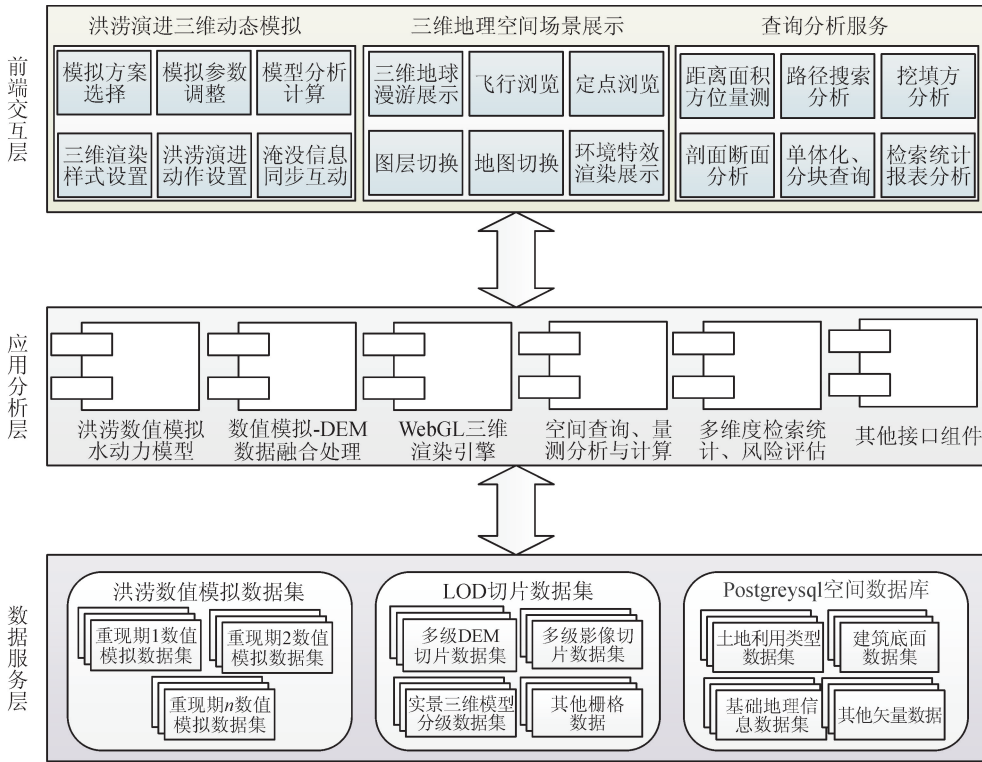


图 8 洪涝过程模拟三维可视化展示系统(Flood-3DGIS)框架图

Fig. 8 Framework of Flood-3DGIS

2.2 城市洪涝过程三维动态可视化

在研究中基于 GAST 水动力模型数值计算得到的模拟结果,采用该系统进行不同区域尺度、不同洪涝情境下的城市洪涝过程模拟三维动态可视化展示,对本文研究方法进行应用和验证。

1) 实例一

本文研究前期对西安理工大学教学区完成了无人机激光点云和倾斜摄影测量,并采用 GAST 水动力模型对 2019 年 7 月 22 日超标暴雨致涝过程进行

了数值模拟计算,输出 10 h 降雨历时下数值计算结果,再以计算结果作为数据源,对积涝过程实现三维动态可视化展示。如图 9 所示,系统将淹没水深按照 0~1.5 m 区间设置了平滑过渡的色带,即从深蓝过渡至淡蓝、草绿、橙红最后至深红,针对淹没水深值小于或等于 0 的网格单元采用透明色渲染,其他网格单元按其实际水深值对应色带中的颜色值进行渲染,渲染颜色越深代表淹没数值越大。在本文构建的校园实景三维仿真场景中,三维虚拟地球可

可视化引擎按模拟输出时间序列依次加载淹没数据,渲染展示积涝演进过程,图 9(a)~(i)分别呈现了从降雨发生后第 1 h 至第 9 h 不同输出时间下的数值模拟结果,在实景三维地理空间场景中渲染生成的淹没水深、范围动态变化过程。其中,图 9(a)和图 9(b)显示了在输出时间 $t=1$ h 和 $t=2$ h 时,校园内篮球场及锅炉房周边开始出现局部轻度积水;图 9(c)和图 9(d)显示了在 $t=3$ h 和 $t=4$ h 时,校园内积水面积扩大,前述区域积涝程度加深,且足球场跑道、理工大厦等区域出现大范围积水;图 9(e)和图 9(f)显示了在 $t=5$ h 和 $t=6$ h 时,校园积涝区域积涝程度达到最大,积水淹没范围也达到最大;图 9(g)~(i)则显示了从 $t=7$ h 开始本次超标暴雨导致的校园积涝开始转入退水阶段,积涝区域水深逐步降低,积水淹没范围逐步缩小,从 $t=9$ h 直至往后积涝程度和淹没面积逐渐减弱直到完全消退。

2) 实例二

本文采用 GAST 模型对已完成倾斜摄影三维实景建模的某城市局部地块 48 h 持续降雨历时条件下的严重洪涝过程进行数值模拟计算,再以数值计算结果作为数据源,对洪涝过程模拟三维动态可视化展示。如图 10 所示,系统对淹没水深值小于或等于 0 的网格单元渲染时设置采用透明色,其他网格单元按半透明蓝色渲染样式进行渲染。图 10(a)~(d)显示了不同输出时间下的数值模拟计算结果,在实景三维地理空间场景中渲染的淹没水深、范围动态变化过程。图 10(a)显示了输出时间 $t=4$ h 时,该地块出现轻度积水内涝;图 10(b)显示了 $t=12$ h 时,该地块淹没范围扩大,积涝程度达到中度;图 10(c)显示了 $t=24$ h 时,淹没范围进一步扩大,已基本全部覆盖低洼地,积涝程度进一步加深至重度以上;图 10(d)显示了 $t=48$ h 时,该区域低洼地全部被淹,挡水建筑物低层和地面车辆等物品均遭到积涝淹没,积涝程度发展至最大。

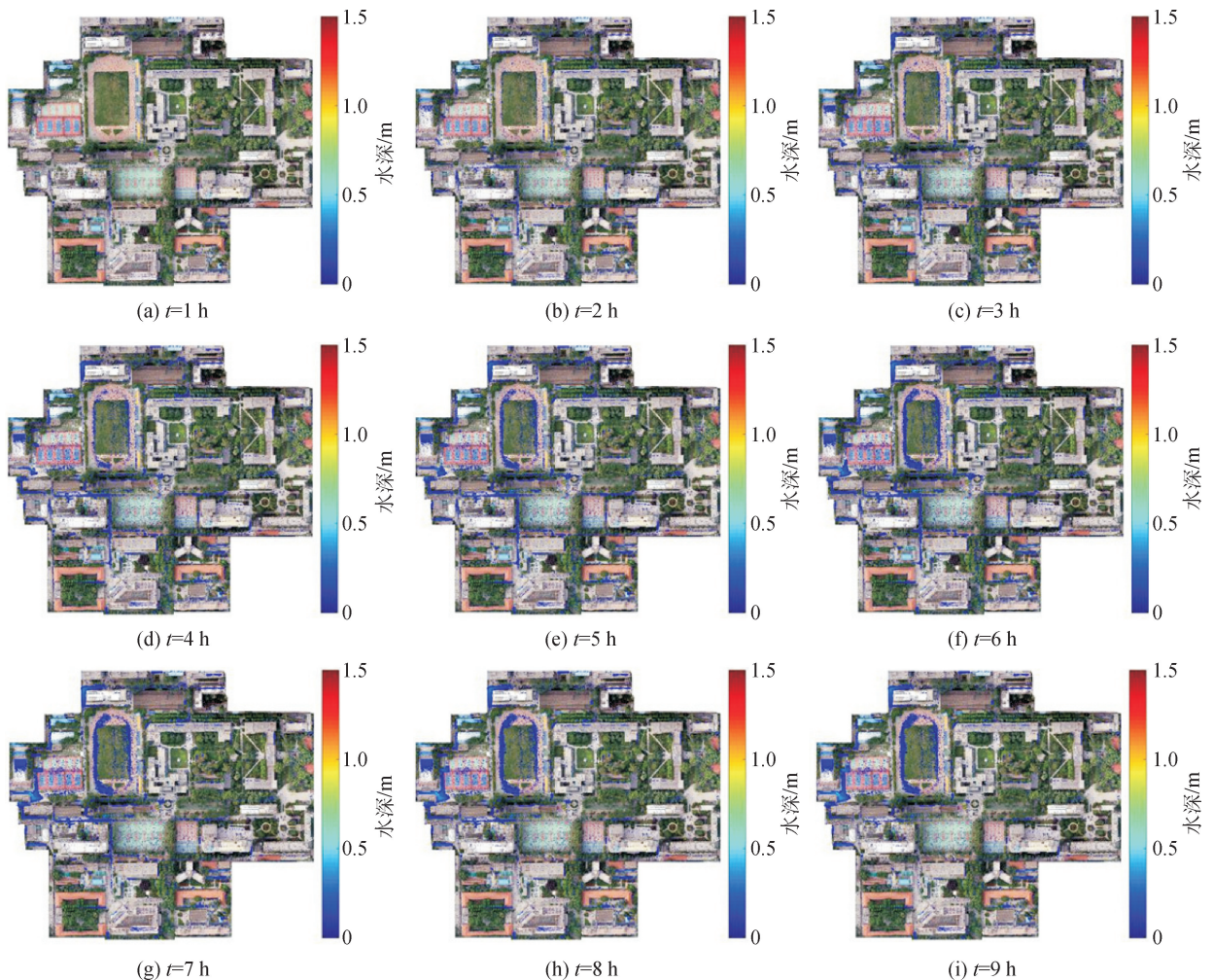


图 9 西安理工大学教学区 2019 年 7 月 22 日超标暴雨致涝过程模拟三维动态可视化图

Fig. 9 3D dynamic visualization of waterlogging caused by excessive rainstorm in teaching area of Xi'an University of Technology on July 22, 2019

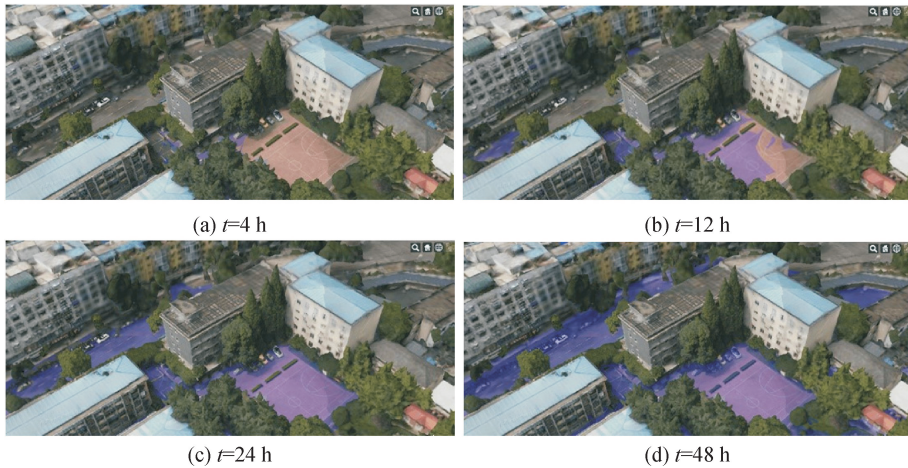


图 10 城市局部地块积涝过程模拟三维动态可视化应用

Fig.10 Application of 3D dynamic visualization in simulation of waterlogging process in local urban land

3 结 语

综上,针对倾斜摄影测量可快速获取高精度城市地表三维实景和数字地形高程等数据成果,能有效提升城市洪涝数值模拟结果的准确性和可靠性,并且倾斜摄影具备支持三维实景展示的优势,本文提出并研究了基于倾斜摄影的城市洪涝过程的三维可视化展示方法,以倾斜摄影测量获取的高精度城市地表三维实景、数字地形高程、土地分类数据成果作为 GAST 水动力模型数值计算的数据源,得到高精度数值模拟计算结果,参照数字高程模型 DEM 整合洪涝淹没数据,构建数字淹没数据模型,保证了三维动态展示数据源的精度和多源数据的地理空间基准统一化。本文设计了城市洪涝过程的三维动态可视化方法流程,开发了城市洪涝过程三维可视化展示系统(Flood-3DGIS),从不同区域尺度、不同洪涝情境对城市洪涝过程三维动态可视化进行实例展示,实现了城市洪涝淹没范围、水深变化过程的三维实景动态可视化。本文研究成果能够改善传统城市洪涝过程表达与展示的不足,三维动态化展示效果更加直观、生动、准确,可以有效提升城市洪涝过程的可视化认知水平,并作为城市防洪减灾非工程措施的重要技术支撑,具有良好的实际应用价值。

参考文献:

- [1] 杨爱玲,朱岩隆,周泉,等.洪水风险图编制技术研究[J].测绘与空间地理信息,2019,42(4):197-199.
YANG Ailing, ZHU Yanlong, ZHOU Quan, et al. Research on flood risk map compilation technology[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2019, 42(4): 197-199.
- [2] 王欣,王玮琦,黄国如.基于 MIKE FLOOD 的城区溃坝洪水模拟研究[J].水利水运工程学报,2017(5):67-73.

- WANG Xin, WANG Weiqi, HUANG Guoru. Simulation research of urban dam break flood based on MIKE FLOOD model [J]. HydroScience and Engineering, 2017(5): 67-73.
- [3] 张成才,常静,孙喜梅.基于 GIS 的洪水淹没场景三维仿真可视化研究[J].北京师范大学学报(自然科学版),2010,46(3):329-332.
ZHANG Chengcai, CHANG Jing, SUN Ximei. Three-dimensional visualization of flooding scene based on GIS[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2010, 46(3): 329-332.
- [4] 房晓亮,张阳,张云菲.基于 Skyline 的洪水风险图三维仿真可视化系统构建[J].科技创新与应用,2018(33): 21-23.
FANG Xiaoliang, ZHANG Yang, ZHANG Yunfei. Construction of 3D simulation visualization system of flood risk map based on Skyline[J]. Technology Innovation and Application, 2018(33): 21-23.
- [5] 刘成堃,马瑞,义崇政.3DGIS 支持下的洪水风险三维动态推演[J].长江科学院院报,2019,36(10):117-121.
LIU Chengkun, MA Rui, YI Chongzheng. Three-dimensional dynamic deduction of flood risk supported by 3DGIS[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(10):117-121.
- [6] 关丽,丁燕杰,张辉,等.面向数字城市建设的三维建模关键技术研究与应用[J].测绘通报,2017(2):90-94.
GUAN Li, DING Yanjie, ZHANG Hui, et al. Key technologies research and application of 3D modeling for digital city construction[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017(2): 90-94.
- [7] 谭仁春,李鹏鹏,文琳,等.无人机倾斜摄影的城市三维建模方法优化[J].测绘通报,2016(11):39-42.
TAN Renchun, LI Pengpeng, WEN Lin, et al. Improvement of 3D urban modeling method based on unmanned aerial vehicle oblique photography[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2016(11): 39-42.
- [8] 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.
- [9] 余江顺. 城市雨洪数值模拟研究与应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- YU Jiangshun. Research and application of numerical simulation of urban rainfall flood [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [10] 蔡雨亭, 徐慧珺, 孙玮妍, 等. 基于 GIS 和 SWMM 的城市局部区域雨洪模型构建方法研究[J]. 现代测绘, 2017, 40(2): 46-49.
- CAI Yuting, XU Huijun, SUN Weiyan, et al. Research in the storm water model building for the district of urban based on GIS and SWMM [J]. Modern Surveying and Mapping, 2017, 40(2): 46-49.
- [11] 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, 66.
- LIU Bin, TANG Yaling, MA Chenyan, et al. Application of 3D modeling of UAV tilt photography in urban rain flood risk assessment [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(10): 46-50, 66.
- [12] 郭林凯. 利用倾斜摄影进行 TDOM 制作的研究[J]. 测绘通报, 2017(2): 79-81, 97.
- GUO Linkai. Research on TDOM production with use of oblique photography [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017(2): 79-81, 97.
- [13] 宋晓阳, 黄耀欢, 董东林, 等. 融合数字表面模型的无人机遥感影像城市土地利用分类[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(5): 703-711.
- SONG Xiaoyang, HUANG Yaohuan, DONG Donglin, et al. Urban land use classification from UAV remote sensing images based on digital surface model [J]. Journal of Geo-information Science, 2018, 20(5): 703-711.
- [14] 黄剑飞. 基于 Smart3D 和 TerraSolid 软件的无人机倾斜摄影生产 DEM 方法研究[J]. 经纬天地, 2018(3): 35-41.
- HUANG Jianfei. DEM production method of UAV tilt photography based on Smart3D and TerraSolid software [J]. Survey World, 2018(3): 35-41.
- (责任编辑 卢秀, 周 蓓)

(上接第 493 页)

- [6] 沈泰, 殷瑞兰. 论长江中游洪灾与对策[J]. 中国水利, 2003(3): 35-38.
- SHEN Tai, YIN Ruilan. On the flood disaster and countermeasures in the middle reaches of the Yangtze River [J]. China Water Resources, 2003(3): 35-38.
- [7] 刘文标. 三峡水库运行初期对鄱阳湖汛期高水位变化趋势的影响研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2007.
- LIU Wenbiao. Study on the impacts of the Three Gorge Reservoir running in initial stages on the trend of high water level in Poyang Lake [D]. Nanchang: Nanchang University, 2007.
- [8] 汪迎春, 赖锡军, 姜加虎, 等. 三峡水库调节典型时段对鄱阳湖湿地水情特征的影响[J]. 湖泊科学, 2011, 23 (2): 191-195.
- WANG Yingchun, LAI Xijun, JIANG Jiahu, et al. Effect of the Three Gorge Reservoir on the water regime of the Lake Poyang wetlands during typical water regulation period [J]. Journal of Lake Science, 2011, 23(2): 191-195.
- [9] 郭铁女, 余启辉. 长江防洪体系与总体布局规划研究[J]. 人民长江, 2013, 44(10): 23-27, 36.
- GUO Tienü, YU Qihui. Research on general layout planning of flood control system of Yangtze River [J]. Yangtze River, 2013, 44(10): 23-27, 36.
- [10] 周建中, 李纯龙, 陈芳, 等. 面向航运和发电的三峡梯级汛期综合运用[J]. 水利学报, 2017, 48(1): 31-40.
- ZHOU Jianzhong, LI Chunlong, CHEN Fang, et al. Integrated utilization of the Three Gorges Cascade for navigation and power generation in flood season [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(1): 31-40.
- [11] 唐婷. 洪水来了, 为啥要给它编号? [N]. 科技日报, 2020-07-09 (4).
- [12] 陈思, 杨莹. 马建华: 三峡水库防洪功能无可替代 [N]. 中国水利报, 2020-08-06(5).
- [13] 秦志伟, 张东东, 熊莹, 等. 2016 年长江中下游干流高水位成因及特点 [J]. 水资源研究, 2017, 6(4): 349-356.
- QIN Zhiwei, ZHANG Dongdong, XIONG Ying, et al. Analysis of the reason and characteristics of the high water level in the middle and lower reaches of Yangtze River in 2016 [J]. Journal of Water Resources Research, 2017, 6(4): 349-356.
- [14] 王乐, 要威, 王翠平, 等. 长江流域防洪规划中期评估 [J]. 中国防汛抗旱, 2020, 30(4): 12-16, 24.
- WANG Le, YAO Wei, WANG Cuiping, et al. Mid-term assessment of flood control planning for the Yangtze River Basin [J]. China Flood & Drought Management, 2020, 30(4): 12-16, 24.
- (责任编辑 卢秀, 周 蓓)