

DOI:10.11784/tdxbz202309017

## 洪水演进融合三维动态可视化关键技术与应用

来亦姝<sup>1,2</sup>, 张社荣<sup>1,2</sup>, 王超<sup>1,2</sup>, 王枭华<sup>1,2</sup>, 李政鹏<sup>3</sup>

(1. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300072;

2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072;

3. 河南省水利勘测设计研究有限公司, 郑州 450016)

**摘要:** 数字孪生流域是智慧水利建设的核心内容, 为流域管理和洪水风险决策提供重要支持. 当前中国洪涝灾害频发, 直观形象展示洪水发展趋势以及多种水力要素数据信息对于洪水结果分析至关重要. 本文对洪水演进的三维动态可视化关键技术进行了研究. 首先, 现有数字孪生流域缺少现状地形下流域洪水演进模拟的问题亟待解决, 因此利用无人航测获取现状区域内地理空间数据, 采用 MIKE 21 数值模拟软件构建洪水演进模型, 模拟现状地形下的洪水演进过程. 其次, 针对现有二维洪水模拟结果难以直观综合地向决策者三维、动态且多角度展示洪水发展趋势、水力坡降、局部风险及多类水力要素的问题, 提出了洪水演进三维映射方法, 基于 Cesium 集成现状倾斜摄影高保真场景模型和二维水动力学模型的区域, 实现了在 Web 端综合多要素的洪水演进全过程实时动态三维可视化, 其优点在于它能够提供更精确、直观的数据, 从而帮助决策者更好地解决洪水发展趋势以及局部风险等重要信息. 最后, 本文以某长距离调水工程某排水跨渠建筑物所在区域为例, 对提出的方法进行验证. 结果表明, 基于数字孪生流域的洪水模拟预测及三维可视化提供了更加直观显示的方式和综合的数据信息, 对长距离调水工程防洪安全有重要的现实意义.

**关键词:** 数字孪生; 倾斜摄影; 三维可视化; Cesium; 洪水演进

中图分类号: TV887; X43

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2024)12-1232-13

## Key Technologies and Application of Three-Dimensional Dynamic Visualization of Flood Evolution

Lai Yishu<sup>1,2</sup>, Zhang Sherong<sup>1,2</sup>, Wang Chao<sup>1,2</sup>, Wang Xiaohua<sup>1,2</sup>, Li Zhengpeng<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. Henan Water & Power Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450016, China)

**Abstract:** Digital twin watershed is the core content of intelligent water conservancy construction, providing important support for watershed management and flood risk decision-making. At present, flood disasters occur frequently in China, so it is important to visually display the development trend of flood and the data information about various hydraulic factors for the analysis of flood results. In this paper, the key technologies of three-dimensional dynamic visualization of flood evolution are studied. First, the existing digital twin watershed lacks the flood evolution simulation under the current terrain, which needs to be solved urgently. Therefore, the geographic spatial data in the current area is obtained by unmanned aerial survey, and a flood evolution model is constructed by the MIKE 21 numerical simulation software to simulate the flood evolution process under the current terrain. Then, aimed at the problem that the existing two-dimensional flood simulation results are difficult to visually and comprehensively display the flood

收稿日期: 2023-09-14; 修回日期: 2024-03-11.

作者简介: 来亦姝(1998—), 女, 博士研究生, laiishu@tju.edu.cn.

通信作者: 王超, wangchaosg@tju.edu.cn.

基金项目: 天津市青年科技人才项目(QN20230203); 天津大学自主创新基金资助项目(2023XJD-0065).

Supported by the Young Scientific and Technological Talents Foundation of Tianjin, China (No. QN20230203), the Independent Innovation Foundation of Tianjin University, China (No. 2023XJD-0065).

development trend, hydraulic gradient, local risk and multiple types of hydraulic factors to the decision-makers in a three-dimensional, dynamic and multi-angle way, a three-dimensional mapping method of flood evolution is proposed. Based on the Cesium integrated current situation oblique photography high-fidelity scene model and two-dimensional hydrodynamic model, the real-time dynamic three-dimensional visualization of the whole process of flood evolution integrated with multiple factors on the Web is realized. Its advantage is that it can provide more accurate and intuitive data, so as to help decision-makers better understand the important information such as flood development trends and local risks. Finally, the area where a drainage cross-canal building is located in a long-distance water diversion project is taken as an example to verify the proposed method. Results show that the flood simulation prediction and three-dimensional visualization based on digital twin watershed provide a more intuitive way and comprehensive data information, which is of practical significance for the flood control safety of long-distance water diversion projects.

**Keywords:** digital twin; oblique photography; three-dimensional visualization; Cesium; flood evolution

近年来中国洪涝灾害频发,严重威胁人民生命财产安全以及生态环境,因此以洪水预演为手段的防洪减灾重要性不言而喻.建设数据底板支持与算法集成的数字孪生场景,是实现“四预”功能、提升防洪智能化水平的重要途径<sup>[1]</sup>.数字流域<sup>[2]</sup>实质是基于统一地理信息系统(geographic information system, GIS)场景综合处理并多维描述流域空间、地理、气象、水文和历史信息.以高保真场景为基础的数字孪生流域作为数字流域的高级阶段<sup>[3]</sup>,是具有实时同步、虚实映射等特性的新流域科学研究工具,为防洪减灾和实现流域洪水风险分析管控提供了有效支撑.洪水演进模拟是水利行业进行洪水预演和过程预测的重要手段,如何将洪水演进全过程映射至流域场景并直观动态展示以增强决策者对洪水状态的感知及理解,一直是备受关注的问题.

现有洪水可视化多为基于 C/S 架构的 GIS 环境、WebGIS 场景进行二维平面洪水淹没分析,缺少结合现状地貌及水动力学仿真模型,且缺乏结合三维数字孪生场景进行洪水动态演进全过程的研究和应用实例,难以通过可视化交互手段获取多种水力要素数据,从而进行三维场景下的局部分析.目前以场景为载体的信息耦合向着多层次、多维度、多源方向发展,信息场景逐步由二维向三维转变,通过信息空间与物理空间的数据映射实现流域内洪水演进信息融合及统一场景下的多源数据管理;同时,获取局部特定区域多种水力要素信息有利于风险分析,有助于决策者综合现状场景高保真地理信息以直观理解洪水的宏观行进状态、过程及局部水流影响.

洪水模型是洪水风险分析的核心<sup>[4]</sup>,也是数字孪生流域的算法基础<sup>[5]</sup>.现有洪水模型可分为水文模型、水动力模型和水文-水动力耦合模型<sup>[6]</sup>.水文模型根据模型汇水面积的空间解释,又可分为集总式、半分布式和分布式水文模型;数值模拟的洪水模型目前

可分为一维、二维和三维<sup>[7]</sup>.为获取洪水的空间信息如水深、流速和洪水波动力特性等要素,洪水模拟必不可少.上述几种模型各有其适宜性.水文模型可计算产流、汇流及洪水演进过程,通过结构与参数的耦合来达到模拟流域降雨径流形成的物理图景<sup>[8]</sup>,所需计算时间较少,但代价是较少的详细物理过程<sup>[6]</sup>,可将其断面流量过程等结果加入二维水动力学模型的源项中<sup>[9]</sup>.一维洪水模型仅能获取断面洪水数据,元胞机算法、种子蔓延法可作为洪水淹没范围及历时的参考,不能用于三维洪水行进过程动态模拟.三维水动力学模型的精度较高,但其运行计算代价昂贵,限制了其在大空间范围内的适用性<sup>[10]</sup>.二维水动力学模型用于模拟坡面流(径流演进与洪水淹没),可以在局部淹没区域进行求解,保证数值精度<sup>[6]</sup>,同时也能够充分反映小尺度地形特征中的流量<sup>[7]</sup>.相比而言,基于物理参数的洪水数值模拟是近年来的研究趋势,二维非恒定流模型方法已经成为水利行业分析河道洪水、溃堤洪水和溃坝洪水时的常用技术手段<sup>[11-17]</sup>,其关键在于分析局部特定区域的水力要素以及现状高精度地形模型的建立,以为洪水预报提供科学依据.以 WebGIS 为场景载体的数字孪生流域可耦合流域信息、洪水模拟结果和风险分析反馈等,使信息空间化、时序化,且具有不限平台、高可扩展性等优势.近年来许多学者对 Web 端场景构建<sup>[18-19]</sup>及洪水演进模拟可视化开展了分析研究:刘东海等<sup>[20]</sup>提出了采用种子蔓延算法和基于 WebGIS 的任意溃口下风暴潮洪水淹没的直观逼真动态可视化方法;钟登华等<sup>[21]</sup>基于 C/S 架构并结合虚拟现实技术,开发了溃堤洪水淹没演进三维情景仿真系统;徐锐等<sup>[22]</sup>采用 WebGL 技术、3D Tiles 格式倾斜摄影及 BIM 搭建了水利水电工程三维地理信息平台;刘永志等<sup>[23]</sup>设计了动态实时洪水风险分析框架;范仲丽等<sup>[24]</sup>利用 CZML 语言及 Canvas 优化技术减轻了前端二维动态展示洪水淹

没过程中的动画渲染压力。

3S 技术的快速发展<sup>[25]</sup>为数字流域场景、分布式物理模型的应用创造了条件<sup>[26]</sup>。然而,通过公共卫星地图等传统开源方式获取的数字高程模型(digital elevation model, DEM)以及传统遥感产品分辨率低且更新缓慢,平均化的地形不能及时、精细刻画村庄面积扩大、高速公路修建形成的带状阻水以及耕地开垦侵占的河道等地貌等变化。土地利用等变化在小流域中最为重要,因为在小流域中土地利用变化的比例相对于流域面积可能很大<sup>[27]</sup>。具有速度快、测量区域广、成本低、数据实时性强等优势无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)技术<sup>[28-29]</sup>可以弥补这一关键知识缺口<sup>[30]</sup>。借助无人机搭载的数据采集设备能够克服传统遥感数据的一些限制,可在流域内以经济有效的方式和精细的分辨率获取即时的、齐全的多种类空间信息数据,可为洪涝灾害风险的监测预警评估(包括灾情监测、高清数据采集、应急指挥支持等<sup>[31-32]</sup>)提供更多的第一手资料。

本文围绕洪水演进中模拟和三维可视化显示的应用需求,针对以下问题开展洪水演进模拟和三维映射方法的研究:公共地理信息数据更新不及时且二维

地图无法多角度反映现状地形地貌及下垫面的改变,现状洪水演进分析受阻;现有二维水动力学洪水模拟的二维平面结果不直观,且其无法结合地形局部场景进行分析;目前缺少基于水动力学并综合多种水力要素的 Web 端洪水演进三维动态可视化技术。本文选用 MIKE 21 软件作为水动力学模型支撑,提出基于无人机航测采集现状地理信息模型的洪水演进仿真模拟方法和基于无人机航测实景的三维洪水演进可视化分析,采用 B/S 架构集成了基于 Cesium 的 Web 端数字孪生流域,实现了洪水演进三维动态模拟仿真与在线实时交互。

### 1 研究框架

本文通过洪水演进三维可视化关键技术,结合无人机航测、二维水动力学模型、水力数据分析处理和水利要素信息集成等手段,基于 Cesium 构建了前后端分离式 B/S 架构为分析流域局部范围内洪水演进过程及风险提供流域数字孪生场景,实现了流域场景下的洪水演进过程三维动态实时可视化交互。整体研究框架如图 1 所示。

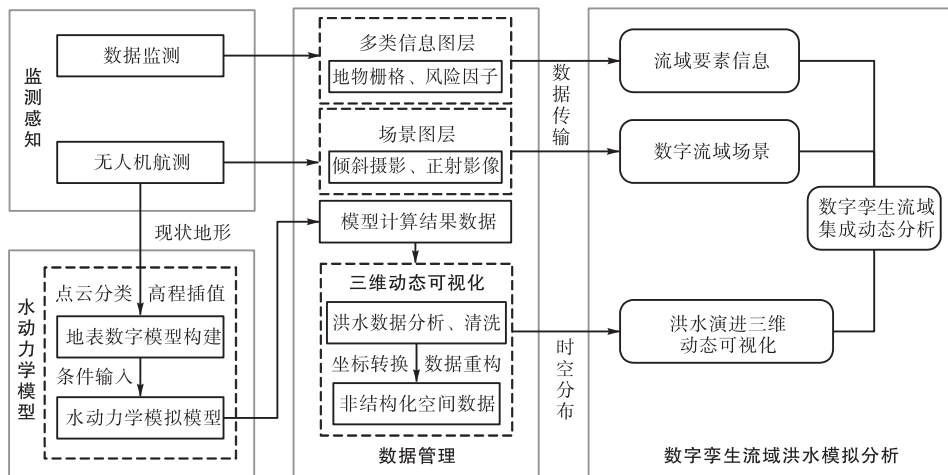


图 1 整体研究框架

Fig. 1 Overall research framework

具体实施方案如下。

(1) 基于无人机航测获取地理信息数据,重构三维倾斜摄影模型作为实景场景及现状地形数字表面模型(digital surface model, DSM)。

(2) 通过 GlobalMapper 软件对 DSM 数据提取密度为 0.1 ~ 0.5 m 的有序点云序列,借助滤波等方法进行数据去噪,剔除无用点云,保留地面、河道、阻水建筑物地形数据,采用现状地形高程的不规则三角网格模型,构建二维水动力学数值模型进行洪水演进模拟

仿真。

(3) 通过脚本编程等二次开发手段提取出洪水演进结果数据,通过数据分析、数据重构和坐标变换等方法构建洪水仿真映射接口,实现模拟仿真数据动态三维可视化映射。

(4) 基于 Cesium 集成包含地理空间信息、流域实景模型、洪水演进模型和多要素信息的数字孪生流域并进行应用。最终,基于三维场景结合动态全过程洪水演进结果、倾斜摄影实景及水力要素数据实现交

互式分析,为预案措施反馈提供支撑。

## 2 洪水演进模拟方法

现状地表数字模型基于无人机航测获取现状地表三维数据及影像构建。洪水演进是基于重构后所得现状地形地面高程并通过软件模拟洪水流域内的演进过程,从而获取任意时刻包括水深、淹没历时、最大流速、流向等水力要素信息。

### 2.1 基于 UAV 的现状地表数字模型构建

采用搭载激光雷达的无人机完整获取局部范围内的场景三维坐标和图像纹理信息,经处理可得到现状地形倾斜摄影、DSM 正射影像等数据。重构所得的 DSM 模型额外包含房屋、树木、灌木等使地表高程产生突变的地物高程,其可影响地势河道走向。为避免地形突变影响水动力学模拟结果,对 DSM 模型提取均匀密度为 0.1~0.5 m 的点云数据或直接采用 UAV 获取的 LiDAR 数据,通过点云分类方法处理三

维有序阵列点云,获取下垫面类别,保留地面特征三维点云数据以进行后续处理。

不规则三角网模型 (triangulated irregular network, TIN) 对地形和边界的自适应性良好,可存储高程信息并充分表现地表变化细节。因此,基于 UAV 航测图像确定流域内平面网格剖分范围,并对重点区域如河道和输水建筑物等过流部位进行网格细化以保证模拟精度且避免整体网格冗余而影响模拟效率<sup>[33-34]</sup>。常用高程插值方法有克里金法、反距离加权法、最近邻插值法、局部多项式插值法、薄板样条插值法和自然近点插值法。本文采用在坡度变化下表现良好的反距离加权插值法 (inverse distance weight, IDW)<sup>[35]</sup> 构建具有地面高程的三维网格 TIN 模型。基于 UAV 构建的 DSM、滤波分类后点云及所构建的 TIN 地形模型如图 2 所示,可见地面高程的 TIN 网格相较于原始 DSM 表面平顺,且高精度的地表模型能精细刻画地形,适用于现状洪水模拟。

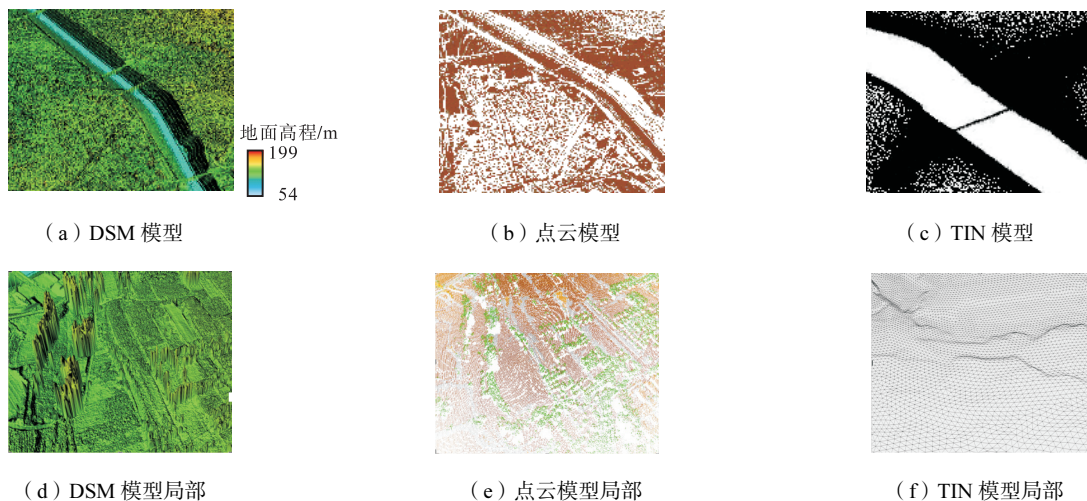


图 2 研究区域的 DSM、点云及 TIN 地形模型

Fig.2 DSM, point cloud and TIN terrain models of research area

### 2.2 洪水演进模拟

MIKE Zero 集成平台主要有 MIKE 11、MIKE 21 和 MIKE 3 共 3 类软件,其中 MIKE 21<sup>[36]</sup>是二维水动力模拟计算主流软件之一,其水动力模块是基于数值解的二维浅水方程和沿水深积分的不可压缩的雷诺平均 Navier-Stokes 方程。本文依据现状 TIN 地形模型计算洪水演进过程,通过地形、过水建筑物进行参数率定,确定边界条件及地表糙率参数,依据该流域设计暴雨图集推求设计净雨 24 h 洪水过程线。

由于地形地貌的改变,结合 UAV 航测数据并参照上节对现状地形点云滤波分类的情况等基本资料,对流域现况进行分析,对居民地、耕地、道路、空地、

河道等进行区域划分及糙率参数选取。水力学计算的关键参数糙率以曼宁系数(单位为  $m^{1/3}/s$ )表示,模拟范围内各下垫面分类及数值参考天然河道糙率表,如表 1 所示。

表 1 下垫面糙率取值

Tab.1 Roughness values of underlying surfaces

下垫面类型	糙率/ $(m^{1/3}/s)$
居民地	0.070
耕地	0.060
道路	0.025
空地	0.050
浆砌石护面	0.020
混凝土	0.014
河道	0.030

### 3 洪水演进三维可视化映射方法

洪水的三维可视化映射可以实现洪水演进过程、水力坡降及水力要素信息的三维动态显示,相较于二维平面矢量图形其能够满足对三维场景的多角度观察及数据分析需求.针对洪水模拟结果不直观、难以结合流域内实景及水工建筑物分析的问题,本文基于自然地理、洪水模拟、多源信息的数字化映射将多尺度模型和多源信息在统一坐标、规范格式后集成于三维流域虚拟实景空间中,通过接口传输洪水数据,并实时在线进行二次解析和渲染.其中洪水模拟结果的三维可视化涉及投影坐标变换方法、三维映射方法以及倾斜摄影流域场景的建立,从而实现统一场景下的洪水、要素信息和场景的融合.在 Web 端三维场景中,用户可以进行实时漫游、巡航、查询、切换渲染要素等实时交互操作,获取洪水的整体淹没范围、水深、流量、流速等多种信息,实现在流域局部区域中任意位置和各个角度观察不同时间点下的洪水状态以及流域上下游情况.同时,可结合水力水文要素信息和风险因子有效排查可能出现的风险.

#### 3.1 投影坐标变换

统一场景集成并精确表达多要素的关键在于坐标统一.基于三维地球的可视化表达要将空间数据由二维投影坐标转为三维地理坐标,需要确定其空间参考系统(spatial reference system, SRS)并统一投影

变换至同一地理空间坐标系,整体流程如图 3 所示.

基于三维空间的 Helmert 变换方法实现原始坐标系至目标坐标系的 7 参数变换.投影库 PROJ 用途广泛,是栅格地理数据处理库 GDAL 及 Python 语言 pyproj 库的基础.为实现模型三维点数据的统一批量坐标转换,选用 Python 库 pyproj 进行空间投影变换.在获取标准格式源坐标系信息和目标投影参数后,解析包含 7 参数信息 WKT 格式的空间参考信息对象或唯一对应的 EPSG 编码信息,基于 Transformer.from\_crs 函数实现变换.

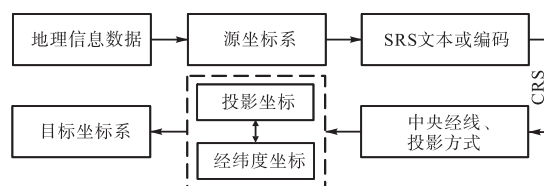


图 3 坐标转换流程

Fig. 3 Coordinate conversion process

#### 3.2 洪水演进三维映射方法

三维映射方法依据图形学原理构建具有水面高程点的空间三维矢量面,融合水力要素信息、空间信息及矢量图形信息构建数据,以展现水体随时空三维分布变化过程,其构建流程如图 4 所示.本方法基于 Python3 及以上环境和 MIKE Zero 2014 集成平台实现,三维化过程及数据共享的关键在于 GeoJSON 数据格式下的地理投影信息、三维矢量网格属性信息和水力要素信息等数据融合.

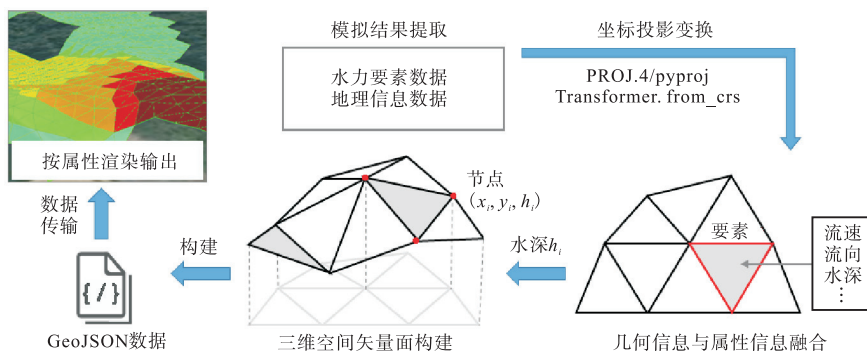


图 4 GeoJSON 数据构建流程

Fig.4 GeoJSON data construction process

作为三维映射场景基础的 Cesium 支持多种地理空间数据交换格式,可读写文本有 XML、TopoJSON 及 GeoJSON. GeoJSON 提供标准方法编码的各种地理数据,所包含特征“features”可扩展多种属性信息,其中特征“geometry”部分可为多种几何类型,相较于二维栅格数据可单独文件存储三维空间信息,且为 Web 数据交换提供多种接口服务.基于此,构建包

含空间几何信息和洪水演进二维水力信息多维数组.

MIKE 21 模型包括模型文件(m21 fm)、地形模型文件(Mesh)以及包含设定步长下各时刻水力要素数据的模拟结果 Dfsu 文件.首先,解析 Mesh 文件获取相应二维坐标节点(Node)和以几何图形规则为要素(Element)单元的节点序列;其次,解析 Dfsu 数据,获取以节点为序列的水深数据和以要素为序列的

全部水力要素数据. 并按序列赋予节点二维坐标数据水深高程信息  $h_i$  构建三维空间矢量面, 节点可以表示为

$$N = \{(x_i, y_i, z_i), i = 0, 1, 2, \dots, n\} \quad (1)$$

以三角顶点索引序列及几何描述构建的三维面要素合集可表示为

$$\begin{cases} (x_1, y_1, z_1) \rightarrow (x_1, y_1, h_1) \rightarrow (N_1) + P(SE, TWD, CS, CD) \\ (x_2, y_2, z_2) \rightarrow (x_2, y_2, h_2) \rightarrow (N_2) + P(SE, TWD, CS, CD) \\ \vdots \\ (x_{n+3}, y_{n+3}, z_{n+3}) \rightarrow (x_{n+3}, y_{n+3}, h_{n+3}) \rightarrow (N_{n+3}) + P(SE, TWD, CS, CD) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $(x_1, y_1, h_1)$  为将地面高程替换为洪水模拟结果(洪水水位高程)后的三维节点坐标;  $(N_1)$  为包含 4 个三维节点的三角面单元;  $P(SE, TWD, CS, CD)$  为包含洪水水力要素空间信息的属性(properties)数组, 其中 SE 为地面高程(surface elevation), TWD 为总水深(total water depth), CS 为流速(current speed), CD 为流向(current direction). 式(3)中其他变量的含义可依此类推.

在应用数据重组等方法后, 根据前文所述坐标转换方法对空间坐标统一进行投影变换至 WGS84 坐标系. 随后进行数据清洗, 地理坐标系 6 位浮点数即满足厘米级精度, 因而在满足坐标精度的前提下进行数据去冗, 同时仅保留包含水面高程的数据. 最后, 基于 `gpd.GeoDataFrame` 函数完成包含面对像、空间坐标及水力要素的多维数组结构数据, 如图 5 所示.

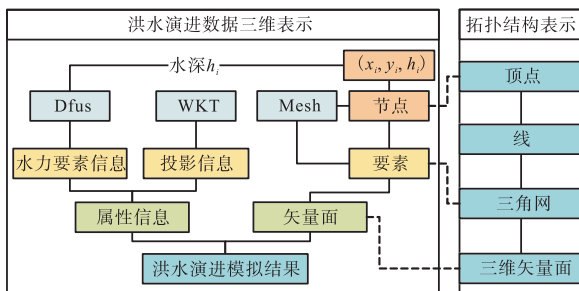


图 5 矢量数据结构

Fig.5 Vector data structure

### 3.3 基于 UAV 倾斜摄影的流域场景建立方法

构建流域场景首先需要通过无人机航测获取具有时效性的地理信息数据. 无人机航测数据作为洪水演进模拟的地形基础, 相较于公共地图数据具有更高精度, 且其涵盖近期人为因素导致的地形改变, 避免影响仿真结果的时效性; 通过 Web 端系统平台集成航测成果倾斜摄影构建流域场景, 基于 WebGIS 引擎通过接口提供空间数据发布、空间查询与检索、空间模型服务、Web 资源的组织等功能, 实现流域场景的实时交互.

$E = \{[N_i, N_{i+1}, N_{i+2}, N_{i+3}], i = 0, 1, 2, \dots, a\}$  (2)  
 式中:  $n$  为节点个数;  $a$  为三角面要素个数. 具有坐标及各时刻洪水高程数据三角面要素 POLYGON 多维数组可以表示为:  $[(x_1, y_1, h_1), (x_2, y_2, h_2), (x_3, y_3, h_3), (x_1, y_1, h_1)]$ . 与水力要素融合的过程可以表示为

无人机航测数据内业通过 Context Capture 软件进行处理, 在完成初步处理、空中三角测量、光束法局域网平差后生成的流域范围倾斜摄影最高精度不小于 0.1 m, 为 LOD 金字塔瓦片结构的 OSGB 格式现状流域场景. Cesium 通过其专有的三维瓦片模型格式 3DTiles 实现基于 HLOD 分细节级别优化渲染加载, 倾斜摄影加载效果与原地图服务效果对比如图 6 所示. 流域变化情况细部展示(图 6(b))与原开源地图(图 6(a))相比, 能更好地表现草丛树木、弃土排渣、河道边坡等实景情况, 相较于实地探查耗资少且更为全面, 有利于工程分析. 高精度倾斜摄影基于统一的地理坐标系转为 3DTiles 瓦片格式文件, 通过 Cesium.Cesium3DTileset 函数将 tileset.json 索引文件引入三维地球作为流域三维实景场景.



(a) Cesium 开源地图场景



(b) 3DTiles 倾斜摄影场景

图 6 倾斜摄影流域场景

Fig.6 Oblique photography of watershed scene

### 3.4 模型集成方法

Cesium 是依赖 WebGL 渲染方式的显示三维地球和地图的 WebGIS 引擎, 可跨平台、跨浏览器在多

种设备进行数据查询及场景交互. 为构建基于 Cesium 地球集成融合包含地理空间信息、流域三维实景、水力学模型、要素信息层等的数字孪生流域(图 7), 关键在于多源数据一致性处理、多类型多尺

度空间数据融合处理和空间数据与业务数据融合<sup>[37]</sup>. 通过数据接口、软件接口等实现数据格式统一、坐标统一的动态三维可视化平台的集成, 从而实现 Web 端的三维数字映射及可视化管理与分析.

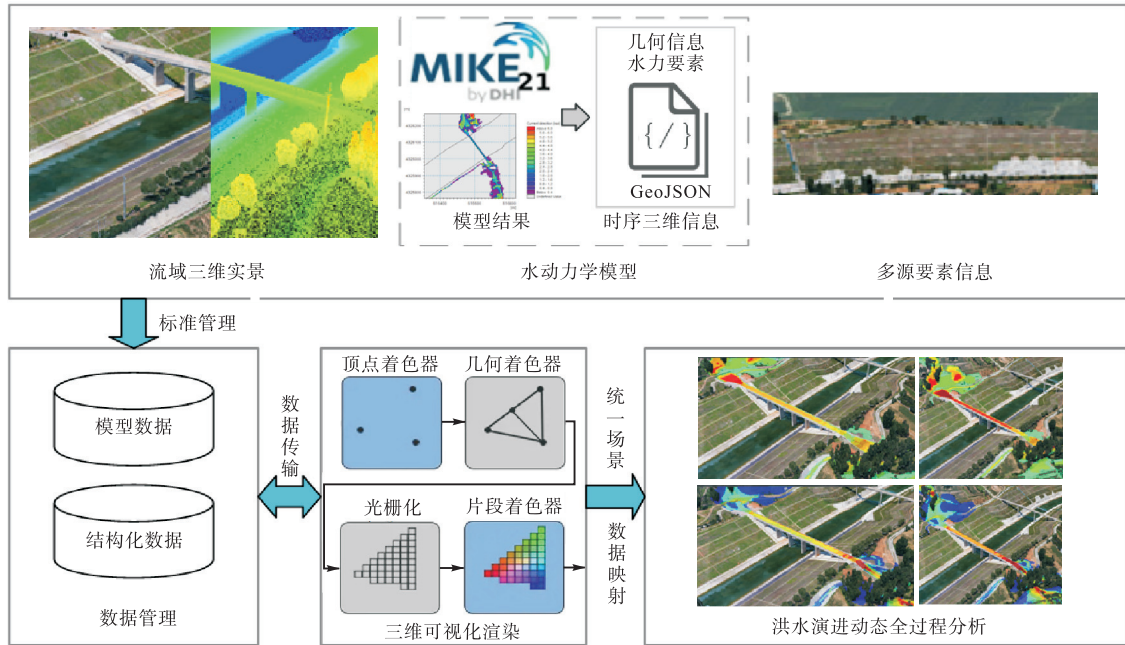


图 7 数字孪生流域集成

Fig.7 Digital twin watershed integration

基于水动力学模拟结果, 利用三维可视化映射关键技术实现在数字孪生场景中洪水演进动态过程的可视化. Cesium 通过 Primitive 和 Entity 两种构造方式将 GeoJSON 数据转为三维实体并渲染, 使用图形学术语几何 (Geometry) 和外观 (Appearance) 属性构造几何图形. 本文通过 DataSource API 加载空间地理数据, 基于时间顺序构建 Instance 将水体数据整体作为 Primitive 实体渲染, 根据水力要素 (如水深、流速等数值) 以 Entity API 编写数据 Material 属性进行分图例色阶渲染. 具体而言, 为实现洪水演进的时序动态展示, 通过遍历获取各类水力要素数据和数据的最大值和最小值, 并将区间等分为 6 个子区间, 对每个子区间中的三维矢量面赋予不同颜色及多类水力要素信息, 并将区间边界数据动态反映至前端图例中, 同时可增加水流纹理效果, 更加美观真实.

#### 4 工程应用案例

某长距离调水工程是一项跨流域、大流量、长距离的水利工程, 其总干渠与大量各体量河流相交, 全线共有河渠交叉建筑物多座, 包括渡槽、渠道倒虹吸和涵洞. 该工程自运行以来, 工程沿线的地物地貌发

生了较大的改变, 对交叉建筑物进行洪水风险复核可为长距离调水工程系统的安全运行提供保证, 具有重要工程价值. 为了验证上述方法的有效性, 本文以该工程沿途某排水建筑物所在小流域为例, 分析现状地形下区域内洪水演进过程及左排建筑物过流情况. 通过无人机采集流域现状地形资料, 基于 MIKE 21 进行洪水演进模拟, 并基于三维可视化关键技术结合流域倾斜摄影场景进行洪水分析. 所选取跨渠排水渡槽交叉断面处 50 年一遇设计洪峰流量为  $32.2 \text{ m}^3/\text{s}$ , 200 年一遇设计洪峰流量为  $56.9 \text{ m}^3/\text{s}$ , 孔口尺寸 (槽数  $\times$  宽  $\times$  高) 为  $1 \times 8.0 \text{ m} \times 2.10 \text{ m}$ .

选用航测范围较大的丹麦 Little Smart Things 公司的积云 1 号智能型固定翼无人机系统进行高精度测量, 无人机以某排水渡槽为中心采集基础现状资料, 总测量面积约为  $4 \text{ km}^2$ , 排水建筑物交叉断面以上该区域集水面积为  $1.4 \text{ km}^2$ . 使用 Context Capture 软件重建不小于  $1 : 2000$  的 DSM 数据, 影像分辨率为不小于  $0.1 \text{ m}$ , 网格剖分对河道、重要过流建筑物处进行网格加密处理.

本次研究区域集水面积为  $1.4 \text{ km}^2$  (小于  $50.0 \text{ km}^2$ ), 运用推理公式法, 根据计算区域对应的流域设计洪水暴雨图集中 24 h 雨型分配表, 由设计暴雨资料推求

设计净雨,再根据概化方法由设计净雨推求设计洪水过程线.采用的设计洪水与初步设计成果一致,洪水流量过程依据上述图集的 24 h 洪水过程线如图 8 所示,按照 50 年一遇和 200 年一遇设计洪水流量校核.模型入流边界位于排水建筑物北部 1 km 处,模型主要参数如表 2 所示.本文使用 MIKE 21 模型对渡槽进行建模和参数调整以确保模型的准确性.经过计算,如表 3 所示,渡槽的过流模拟结果与初始设计数据的最大水位差为 0.03 m,远小于《洪水风险图编制技术细则(试行)》中规定的 0.2 m,故满足模型整体模拟要求.

进过程、最大淹没范围、最大水深分布、最大流速分布和到达时间等水力要素.图 9 为 MIKE 21 模拟结果中局部洪水淹没范围及水深分布<sup>[38]</sup>.

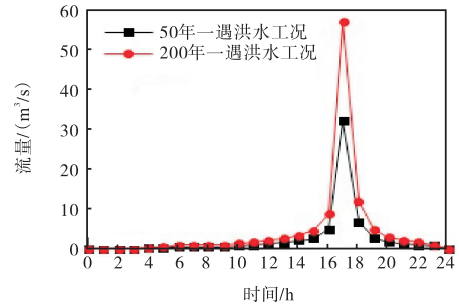


图 8 复核方案设计洪水过程线

Fig.8 Design flood hydrograph of review scheme

最终模拟计算得到现状地形下 2 种工况洪水演

表 2 洪水演进模型主要参数

Tab.2 Main parameters of flood evolution model

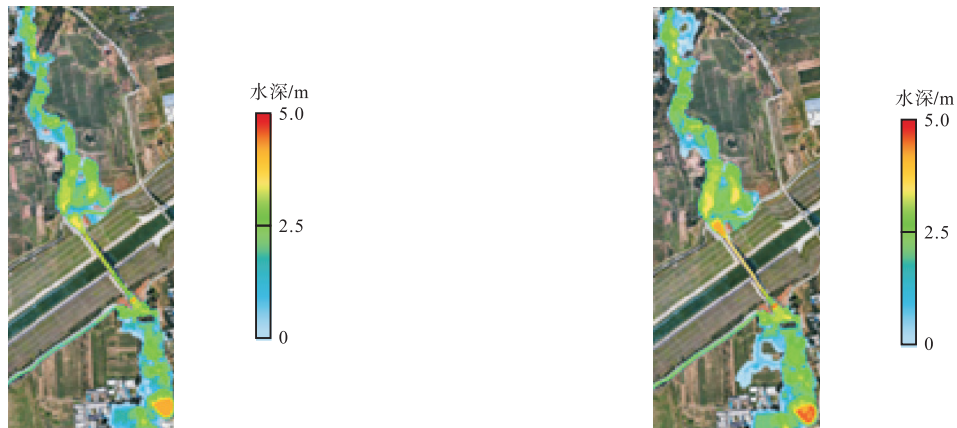
参数	参数说明	补充信息
模块	MIKE 21 FM HD 水动力模型	模拟模块
地形文件	某排水渡槽流域集水面积 1.4 km <sup>2</sup> (CGCS_2000_3_Degree_GK_CM_114E)	地形坐标及现状地表高程
网格形式	TIN 网格,129 741 个三角面(网格大小在最密处为 0.5 m,边界处为 15 m, 中间渐变过渡,渡槽处为 0.5~1.0 m,河道处为 1~5 m,周边区域处为 5~15 m)	模型局部加密,整体渐变过渡
模拟时间	24 h	模型总模拟时间,对应洪水过程
步长及步数	步长为 60 s,步数为 1 440 步	模型设置时间步长
结果输出	间隔为 600 s,步数为 144 步	模拟结果输出频率
干湿边界	干水深为 0.005 m,湿水深为 0.100 m	避免过强的浅水效应及模型运算失稳
边界条件	上边界为流量边界,下边界为水位边界	初始边界条件设定
糙率	糙率取值见表 1	受到下垫面现状影响

表 3 渡槽模型计算结果与初始设计数据对比

Tab.3 Comparison between calculation results of aqueduct model and preliminary design data

参数	50 年一遇洪水工况			200 年一遇洪水工况		
	初始设计数据	计算结果	差值	初始设计数据	计算结果	差值
流量/(m <sup>3</sup> /s)	32	31	-1	57	55	-2
进口水位/m	90.05	89.98	-0.07	90.90	90.60	-0.30
出口水位/m	86.60	86.64	0.04	87.45	87.67	0.22

水动力学模拟结果与三维融合可视化效果对比如图 10 所示.根据无人机航测结果和洪水模拟结果,将其集成到 Web 端的三维可视化流域系统中,实时渲染并展示不同时间点下洪水演进情况,可实时交互动态查询各演进步长下的洪水水深、流速、流向、总淹没面积、水量等结果信息.将局部区域的水力要素数据与倾斜摄影实景模型同步查看,相较于二维平



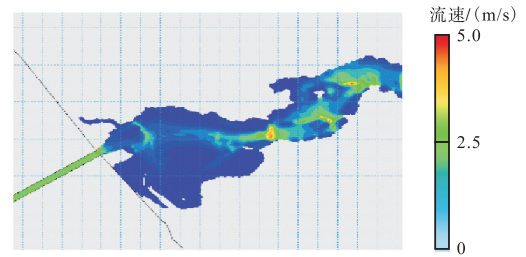
(a) 50 年一遇洪水工况

(b) 200 年一遇洪水工况

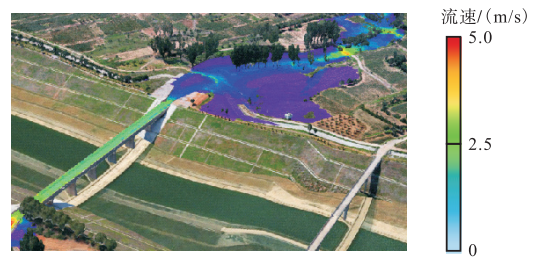
图 9 MIKE 21 模拟结果中局部洪水淹没范围及水深分布

Fig.9 Part of flood submerged area and water depth distribution from MIKE 21 simulation results

面模拟结果可更直观地明确洪水对排水建筑物及总干渠的影响,并可结合三维洪水演进全过程动态模拟获知该区域上下游各处洪水在各个时刻的状况. 根据洪水模拟结果,渡槽进出口的水位满足了过流要求. 通过系统进行可视化场景分析,并结合点击事件查询,发现渡槽连接段的翼墙高程与总干渠挖方段顶部高程相同,故在 2 种工况的洪水下,渡槽进口左侧都会有水流流向总干渠内边坡. 总干渠为浆砌石护坡,根据渠道糙率及护坡类别可知护坡允许不淤不冲流速为  $v \leq 4 \text{ m/s}$ ,因此可能产生冲刷风险. 引起左排渡槽防洪风险升高的风险因子可能是渡槽淤积、糙率增加造成的渡槽本身泄洪能力减小以及下游河道行洪能力不足<sup>[39-42]</sup>,渡槽出口排水存在带状土堆,出口处杂草生长茂盛且部分缠绕在周边区域围网上,汛期易产生阻水风险,导致出口水位壅高. 如图 11 所示,对于不同水力要素实现了不同色阶渲染. 图 11(a)和 (b)分别为 200 年一遇洪水工况下 17 h 时整体水深分布及 19 h 时渡槽出口渐变段处水深分布情况(其

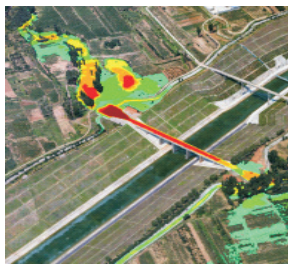


(a) 水动力学模拟结果局部

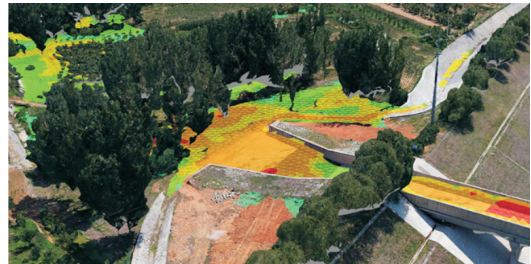


(b) 洪水演进三维可视化效果局部

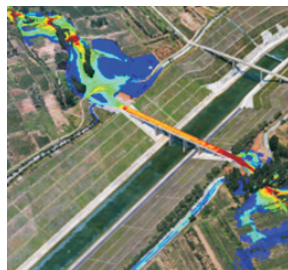
图 10 水动力学模拟结果与三维融合可视化效果对比  
Fig.10 Comparison between hydrodynamic simulation result and three-dimensional visualization result



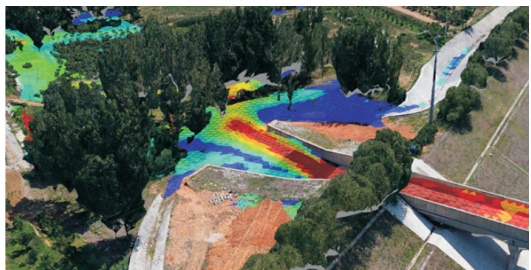
(a) 200 年一遇洪水工况下 17 h 时整体水深分布



(b) 200 年一遇洪水工况下 19 h 时渡槽出口渐变段处水深分布



(c) 200 年一遇洪水工况下 17 h 时整体流速分布



(d) 200 年一遇洪水工况下 19 h 时渡槽出口渐变段处流速分布



(e) 200 年一遇洪水工况下 19 h 时渡槽下游可视化效果



(f) 200 年一遇洪水工况下 19 h 时渡槽出口渐变段处可视化效果

图 11 三维可视化模拟效果

Fig. 11 Three-dimensional visualization simulation result

对应水深标尺见图 9), 图 11(c) 和(d) 分别为 200 年一遇洪水工况下 17 h 时整体流速分布及 19 h 时渡槽出口渐变段处流速分布情况(其对应流速标尺见图 10). 图 11(e) 和(f) 分别为 200 年一遇洪水工况下 19 h 时渡槽下游及出口渐变段处三维模拟效果.

## 5 结 论

本文基于数字孪生流域集成无人机航测现状倾斜摄影模型和二维水动力学模型实现洪水演进全过程三维动态可视化方法, 并以某长距离调水工程某排水跨渠建筑物区域现实场景为例开展应用验证, 主要结论如下.

(1) 通过无人机航测获取高精度现状地形数据并构建三维瓦片格式倾斜摄影实景模型, 结合 GIS 引擎搭建 B/S 架构的三维局部流域场景, 能精细化反映流域现状地形、地貌和地物.

(2) 基于无人机获取的地理信息数据, 构建现状地表高程网格模型, 对不同量级洪水进行水动力学仿真模拟, 获得流量、流速、流向、水深、洪水历时、淹没范围等水力要素结果.

(3) 基于洪水演进三维映射关键技术, 实现了平面洪水演进结果的三维矢量化重构及全过程三维可视化映射, 实现了洪水矢量信息与水力要素信息的融合.

(4) 以统一坐标、统一场景和标准格式实现了模型集成, 在 Cesium 中融合高精度场景和基于时序的三维水动力学仿真结果, 突破了平面分析的局限, 实现了矢量要素和实景的动态交叠, 并通过三维数字孪生场景下的可视化交互等操作实现了洪水风险分析评估.

综上所述, 本文提出的基于数字孪生流域的洪水演进三维可视化集成分析方法融合了高保真地形的数字孪生场景和水动力学模型, 不仅能形象直观地展示洪水演进过程和水位细节, 还能将局部水力要素信息用于对实景地物状态的综合分析, 更有利于工程措施和决策的制定, 为洪水预警提供了 1 种直观科学的手段. 同时, 集成结果可为洪水风险图、洪水风险评估、灾害损失分析、水工建筑物防洪安全复核、汛期防灾抢险及措施预案提供数据支撑和科学决策基础.

## 参考文献:

[1] 张建云, 刘九夫, 金君良. 关于智慧水利的认识与思考[J]. 水利水运工程学报, 2019(6): 1-7.

Zhang Jianyun, Liu Jiufu, Jin Junliang. Understanding and thinking of smart water conservancy[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(6): 1-7(in Chinese).

[2] 刘家宏, 王光谦, 王 开. 数字流域研究综述[J]. 水利学报, 2006, 37(2): 240-246.

Liu Jiahong, Wang Guangqian, Wang Kai. Review on advancement of study on digital riverbasin in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(2): 240-246(in Chinese).

[3] 冶运涛, 蒋云钟, 梁犁丽, 等. 数字孪生流域: 未来流域治理管理的新基建新范式[J]. 水科学进展, 2022, 33(5): 683-704.

Ye Yuntao, Jang Yunzhong, Liang Lili, et al. Digital twin watershed: New infrastructure and new paradigm of future watershed governance and management[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(5): 683-704(in Chinese).

[4] Antwi-Agyakwa K T, Afenyo M K, Angnuureng D B. Know to predict, forecast to warn: A review of flood risk prediction tools[J]. Water, 2023, 15(3): 427.

[5] 张文婷, 刘永志, 张行南, 等. 联安围防洪保护区洪水演进模拟分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(2): 1-6. Zhang Wenting, Liu Yongzhi, Zhang Xingnan, et al. Flood routing simulation and analysis of Lian'anwei flood protection zone[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 1-6(in Chinese).

[6] Shen Y X, Jiang C B. A comprehensive review of watershed flood simulation model[J]. Natural Hazards, 2023, 118(2): 875-902.

[7] Jodhani K H, Patel D, Madhavan N. A review on analysis of flood modelling using different numerical models[J]. Materials Today: Proceedings, 2023, 80: 3867-3876.

[8] 芮孝芳. 论流域水文模型[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(4): 1-7, 58. Rui Xiaofang. Discussion of watershed hydrological model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(4): 1-7, 58(in Chinese).

[9] Avila-Aceves E, Plata-Rocha W, Monjardin-Armenta S A, et al. Geospatial modelling of floods: A literature review[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2023, 37: 4109-4128.

[10] Huțanu E, Mișu-Pintilie A, Urzica A, et al. Using 1D

- HEC-RAS modeling and LiDAR data to improve flood hazard maps accuracy: A case study from Jijia floodplain (NE Romania) [J]. *Water*, 2020, 12(6): 1624.
- [11] 黄萍, 雷文韬, 李德龙, 等. MIKE21 模型在南新联圩洪水模拟中的应用[J]. *人民长江*, 2017, 48(17): 1-5.
- Huang Ping, Lei Wentao, Li Delong, et al. Application of MIKE21 model in flood routing simulation in Nanxinlianwei polder area[J]. *Yangtze River*, 2017, 48(17): 1-5 (in Chinese).
- [12] 陈平, 傅长锋, 于京要, 等. 基于 MIKE 21 数值模拟蓄滞洪区洪水演进研究[J]. *中国农村水利水电*, 2017(8): 113-116, 120.
- Chen Ping, Fu Changfeng, Yu Jingyao, et al. Research on the numerical simulation of flood routing for the flood detention basin based on MIKE 21 [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2017(8): 113-116, 120 (in Chinese).
- [13] 李小天, 戚蓝, 胡琳琳, 等. 基于 MIKE 耦合模型的西苕溪洪水演进及风险分析[J]. *水力发电*, 2019, 45(7): 24-28.
- Li Xiaotian, Qi Lan, Hu Linlin, et al. Flood routing and risk analysis in Xitiaoqi river based on MIKE coupling model [J]. *Water Power*, 2019, 45(7): 24-28 (in Chinese).
- [14] 孙依, 王洁, 丁曼, 等. 基于 MIKE 模型的中小河流洪水风险分析[J]. *中国农村水利水电*, 2020(6): 40-45.
- Sun Yi, Wang Jie, Ding Man, et al. An analysis of flood risk of middle and small rivers based on MIKE model [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2020(6): 40-45 (in Chinese).
- [15] 李政鹏, 皇甫英杰, 李宜伦, 等. 基于 BIM+GIS 技术的前坪水库溃坝洪水数值模拟[J]. *人民黄河*, 2021, 43(4): 160-164.
- Li Zhengpeng, Huangfu Yingjie, Li Yilun, et al. Numerical simulation of dam break flood in Qianping reservoir based on BIM [J]. *Yellow River*, 2021, 43(4): 160-164 (in Chinese).
- [16] 和宛琳, 王振. 基于 MIKE21 模型的河口地区洪水风险分析[J]. *水利技术监督*, 2022(7): 138-141.
- He Wanlin, Wang Zhen. Flood risk analysis in the estuary region by using MIKE21 model [J]. *Technical Supervision in Water Resources*, 2022(7): 138-141 (in Chinese).
- [17] 康志伟. 佛山市高明区洪水风险水力模型构建及预警[J]. *水科学与工程技术*, 2022(4): 10-14.
- Kang Zhiwei. Flood risk hydrodynamic model building and early warning in Gaoming District, Foshan City [J]. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2022(4): 10-14 (in Chinese).
- [18] 乐世华, 张煦, 张尚弘, 等. 基于 Cesium 的 WebGIS 流域虚拟场景搭建[J]. *水利水电技术*, 2018, 49(5): 90-96.
- Le Shihua, Zhang Xu, Zhang Shanghong, et al. Cesium-based construction of WebGIS watershed virtual scene [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49(5): 90-96 (in Chinese).
- [19] 方孟元, 罗年学, 许毅, 等. 基于 Cesium 的 BIM 与实景三维模型集成可视化研究[J]. *测绘地理信息*, 2022, 47(2): 111-114.
- Fang Mengyuan, Luo Nianxue, Xu Yi, et al. Research on integrated visualization of BIM and real-scene 3D model based on Cesium [J]. *Journal of Geomatics*, 2022, 47(2): 111-114 (in Chinese).
- [20] 刘东海, 左文涛, 王晓玲, 等. 基于 WebGIS 的风暴潮洪水演进动态可视化技术[J]. *系统仿真学报*, 2013, 25(5): 999-1004, 1040.
- Liu Donghai, Zuo Wentao, Wang Xiaoling, et al. WebGIS-based visual simulation of storm surge flood routing [J]. *Journal of System Simulation*, 2013, 25(5): 999-1004, 1040 (in Chinese).
- [21] 钟登华, 李超, 孙蕊蕊, 等. 长距离调水工程高填方渠道溃堤三维洪水演进情景仿真[J]. *水力发电学报*, 2015, 34(1): 99-106.
- Zhong Denghua, Li Chao, Sun Ruirui, et al. Scene simulation of levee-breach flood routing for high embankment canals in long-distance water diversion project [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2015, 34(1): 99-106 (in Chinese).
- [22] 徐锐, 罗天文, 刘明. 基于 WebGL 的水利水电工程三维地理信息平台研究[J]. *中国农村水利水电*, 2019(1): 148-151.
- Xu Rui, Luo Tianwen, Liu Ming. Research on 3D geographic information platform of water conservancy and hydropower project based on WebGL [J]. *China Rural*

- Water and Hydropower, 2019(1): 148-151 (in Chinese).
- [23] 刘永志, 张文婷, 崔信民, 等. 动态实时洪水风险分析及管理系统[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(4): 1160-1171.
- Liu Yongzhi, Zhang Wenting, Cui Xinmin, et al. Dynamic real-time flood risk analysis and management system[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2021, 51(4): 1160-1171 (in Chinese).
- [24] 范仲丽, 江雨田, 张焱, 等. 洪水演进三维动态可视化方法研究与应用[J]. 中国农村水利水电, 2021(9): 91-95.
- Fan Zhongli, Jiang Yutian, Zhang Yan, et al. Research and application of 3D dynamic visualization method for flood evolution[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(9): 91-95 (in Chinese).
- [25] 王达桦. 小流域水文水动力耦合模型的研究及应用[D]. 郑州: 华北水利水电大学水利学院, 2020.
- Wang Dahua. Research and Application of Hydrological and Hydrodynamic Coupling Model in Small Watershed[D]. Zhengzhou: School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, 2020 (in Chinese).
- [26] Diaconu D C, Costache R, Popa M C. An overview of flood risk analysis methods[J]. Water, 2021, 13(4): 474.
- [27] Merz B, Blöschl G, Vorogushyn S, et al. Causes, impacts and patterns of disastrous river floods[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2021, 2(9): 592-609.
- [28] 崔激, 高德宇, 王轩毫, 等. 基于航空影像的高陡边坡突岩识别方法[J]. 地球科学, 2023, 48(9): 3378-3388.
- Cui Wei, Gao Deyu, Wang Xuanhao, et al. Identification of rocky ledge on steep and high slopes based on aerial photogrammetry[J]. Earth Science, 2023, 48(9): 3378-3388 (in Chinese).
- [29] 刘昌军, 郭良, 岳冲. 无人机航测技术在山洪灾害调查评价中的应用[J]. 中国防汛抗旱, 2014, 24(增1): 31-35.
- Liu Changjun, Guo Liang, Yue Chong. Application of the UAV aerial technique in evaluation of flash flood disasters[J]. China Flood and Drought Management, 2014, 24(Suppl 1): 31-35 (in Chinese).
- [30] Annis A, Nardi F, Petroselli A, et al. UAV-DEMs for small-scale flood hazard mapping[J]. Water, 2020, 12(6): 1717.
- [31] 石林, 张志斌, 汤喜春, 等. 无人机技术在湖南省防汛抗旱工作中的探索与应用[J]. 中国防汛抗旱, 2016, 26(3): 40-42, 48.
- Shi Lin, Zhang Zhibin, Tang Xichun, et al. Research and application of UAV technology in flood control and drought relief work in Hunan province[J]. China Flood and Drought Management, 2016, 26(3): 40-42, 48 (in Chinese).
- [32] 廖永丰, 聂承静, 杨林生, 等. 洪涝灾害风险监测预警评估综述[J]. 地理科学进展, 2012, 31(3): 361-367.
- Liao Yongfeng, Nie Chengjing, Yang Linsheng, et al. An overview of the risk assessment of flood disaster[J]. Progress in Geography, 2012, 31(3): 361-367 (in Chinese).
- [33] 程涛, 黄本胜, 邱静, 等. 基于 UAV 精细化地表数据的城市洪涝模拟与分析——以济南市海绵城市示范区为例[J]. 水力发电学报, 2021, 40(5): 110-124.
- Cheng Tao, Huang Bensheng, Qiu Jing, et al. Urban flood simulation and analysis using UAV-based refined surface data. Case study for sponge city pilot area of Jinan City[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(5): 110-124 (in Chinese).
- [34] 李建柱, 李磊菁, 张婷, 等. DEM 数据源及分辨率对流域洪水模拟影响研究[J]. 水力发电学报, 2023, 42(3): 26-40.
- Li Jianzhu, Li Leijing, Zhang Ting, et al. Effect of DEM data sources and resolutions on watershed flood simulations[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(3): 26-40 (in Chinese).
- [35] 杨秋丽, 魏建新, 郑江华, 等. 离散点云构建数字高程模型的插值方法研究[J]. 测绘科学, 2019, 44(7): 16-23.
- Yang Qiuli, Wei Jianxin, Zheng Jianghua, et al. Comparison of interpolation methods of digital elevation model using discrete point cloud data[J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44(7): 16-23 (in Chinese).
- [36] 许婷. 丹麦 MIKE21 模型概述及应用实例[J]. 水利科技与经济, 2010, 16(8): 867-869.

- Xu Ting. Calculation principle and application example of a two-dimensional flow model—MIKE21 HD[J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2010, 16(8): 867-869(in Chinese).
- [37] 刘业森, 刘昌军, 郝苗, 等. 面向防洪“四预”的数字孪生流域数据底板建设[J]. *中国防汛抗旱*, 2022, 32(6): 6-14.
- Liu Yesen, Liu Changjun, Hao Miao, et al. Data base-board construction on digital twin river basins for flood management with four functions of FEDE[J]. *China Flood and Drought Management*, 2022, 32(6): 6-14(in Chinese).
- [38] Fang X, Wu J, Jiang P Q, et al. A rapid assessment method for flood risk mapping integrating aerial point clouds and deep learning[J]. *Water Resources Management*, 2024, 38(5): 1753-1772.
- [39] 张启义, 姚秋玲, 丁留谦, 等. 南水北调中线工程左排渡槽防洪风险识别[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2021, 52(3): 112-121.
- Zhang Qiyi, Yao Qiuling, Ding Liuqian, et al. Identification of flood risk on left bank drainage aqueducts of South-to-North Water Diversion Middle Route Project[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2021, 52(3): 112-121(in Chinese).
- [40] 陈进, 黄薇. 跨流域长距离引调水工程系统的风险及对策[J]. *水利水电技术*, 2004, 35(5): 95-97, 103.
- Chen Jin, Huang Wei. Risk and countermeasures for an inter-basin long distance water transfer system[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2004, 35(5): 95-97, 103(in Chinese).
- [41] 姜蓓蕾, 刘恒, 耿雷华, 等. 层次分解法在南水北调东线工程风险因子识别中的运用[J]. *水利水电技术*, 2009, 40(3): 65-67, 73.
- Jiang Beilei, Liu Heng, Geng Leihua, et al. Application of hierarchic decomposition approach to identification of risk factors for East Route of South-to-North Water Transfer Project[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2009, 40(3): 65-67, 73(in Chinese).
- [42] 韩迅, 安雪晖, 柳春娜. 南水北调中线大型跨(穿)河建筑物综合风险评价[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2018, 58(7): 639-649.
- Han Xun, An Xuehui, Liu Chunna. Integrated risk evaluation of large river-crossing buildings in the Middle of the South-to-North Water Diversion Project[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2018, 58(7): 639-649(in Chinese).

(责任编辑: 武立有)