

高志国, 李毅, 张利辉, 等. 洪水灾害时空过程模拟可视化表达研究进展与展望[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(8): 43-53.

GAO Zhiguo, LI Yi, ZHANG Lihui, et al. Research overview on spatiotemporal process simulation and expression of flood disaster scenarios [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(8): 43-53.

洪水灾害时空过程模拟可视化表达研究进展与展望

高志国¹, 李毅², 张利辉¹, 龚建华²

(1. 天津城建大学 地质与测绘学院, 天津 300384; 2. 中国科学院 空天信息创新研究院, 北京 100094)

摘要:【目的】虚拟现实三维可视化技术已被广泛地应用于洪水灾害过程的展现。为了应对洪水风险并做出正确的决策, 需要对洪水灾害的时空演化过程进行科学逼真的表达。【方法】对洪水灾害时空过程模拟表达的国内外相关研究工作进行了总结和归纳, 对其方法的发展脉络进行了回顾和梳理, 重点分析了场景建模、模型计算、场景可视化等洪水时空过程表达涉及的关键技术, 并对当前的主要技术瓶颈进行了研判。【结果】结果表明, 洪水灾害时空过程模拟可视化技术的发展面临着可视化数据量大、观测数据耦合的模拟方法尚不成熟、可视化的逼真度和科学性难以兼顾、增强现实场景有待进一步提升虚实配准和融合渲染效果、可视化效果缺乏客观评价方法体系等问题和挑战。【结论】未来需要进一步结合气象、水文、地理信息系统、计算机仿真等多学科、多领域的先进技术, 以实现更逼真、科学和高效的洪水灾害模拟可视化。

关键词: 洪水灾害; 洪水时空过程; 三维可视化; 虚拟现实; 增强现实; 混合现实; 数值模拟; 洪水预报

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.08.004

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV8; X43

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2023)08-0043-11



Research overview on spatiotemporal process simulation and expression of flood disaster scenarios

GAO Zhiguo¹, LI Yi², ZHANG Lihui¹, GONG Jianhua²

(1. College of Geology and Geomatics, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: [Objective] Virtual reality 3D visualization technology has been widely used to display flood disaster process. In order to deal with flood risk and make correct decision, it is necessary to express the spatiotemporal evolution process of flood disaster scenarios scientifically and realistically. [Methods] The research works on spatiotemporal process simulation expression of flood disaster scenes at home and abroad were summarized, and the development of its method was reviewed and sorted out. Then the key technologies and technical problems involved in the expression of spatiotemporal process of flood, such as scene modeling, model calculation, scene visualization were reviewed; the current technical bottleneck was analyzed. [Results] The result indicate that the development of visualization techniques for flood disaster spatiotemporal process simulation faces several challenges.

收稿日期: 2023-04-06; 修回日期: 2023-06-02; 录用日期: 2023-06-02; 网络出版日期: 2023-06-15

基金项目: 国家自然科学基金项目“沉浸式洪灾实验场景全息建模与疏散认知研究”(41871323)

作者简介: 高志国(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事虚拟地理环境、洪水模拟与可视化等研究。E-mail: gaozhiguo0163@163.com

通信作者: 李毅(1981—), 男, 研究员, 博士, 主要从事虚拟地理环境与数字流域研究。E-mail: liyi@aircas.ac.cn

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

These challenges include large amount of visualization data, immature simulation method coupling observation data, difficult to balance the fidelity and scientificity of visualization, need to further improve the virtual reality scene registration and fusion rendering effect, and lack of objective evaluation method system of visualization effect, etc. [Conclusion] In the future, it is necessary to further integrate advanced technologies from multiple disciplines and fields such as meteorology, hydrology, geographic information systems, and computer simulation to realize more realistic, scientific, and efficient visualization of flood disaster simulation.

Keywords: flood disaster; flood spatiotemporal process; three-dimensional visualization; virtual reality; augmented reality; mixed reality; numerical simulation; flood forecast

0 引言

洪水是最典型、最常见的自然灾害, 由于城市布局不合理、防洪抗涝设施薄弱等问题, 一些位于沿海或者海拔较低的区域, 在降雨模式改变或海平面上升的情况下, 很容易遭受洪水灾害^[1]。面对洪水灾害, 公众往往缺乏对其危险性的足够认识, 对于防洪公共基础设施的改善支持力度不够, 从而在灾害发生时给生命财产造成巨大的损失。因此, 洪水时空过程的模拟表达, 对于洪涝过程的理解和灾害的防治具有重要的意义^[2-5]。

传统的一维、二维洪水演进可视化方式不能够形象生动地表达洪水的时空过程变化, 在过去几年中, 将三维可视化和虚拟现实技术用于洪水场景表达的研究越来越多^[6-9]。洪水三维时空过程模拟具有更好的视觉直观性, 更容易为公众所理解^[10], 通过立体、动态的表达, 帮助人们分析数据的特征和内涵^[11], 已成为洪水建模与模拟的重要发展方向。此外, VR (Virtual Reality, 虚拟现实)、AR (Augmented Reality, 增强现实)、MR (Mixed Reality, 混合现实) 等技术也为洪水场景的时空过程可视化发展注入了新的活力。虚拟现实的沉浸式体验、增强现实的信息扩展和混合现实的虚实融合, 都为洪水风险管理及决策提供了新的技术手段。

本文从洪水时空过程模拟表达方法的相关研究出发, 对其技术的发展脉络进行回顾和梳理; 然后就洪水灾害时空过程模拟表达这一跨学科问题, 分别探讨洪水灾害场景建模、洪水模型计算、洪水场景可视化等关键技术进展和技术难题; 最后围绕当前的洪水灾害时空模拟可视化研究的技术瓶颈等问题, 提出相应的解决措施建议, 并对未来的研究方向进行展望。

1 洪水时空过程模拟表达方法的发展

洪水灾害现象具有多主体、多因素、多尺度的特征, 其时空动态发展过程往往比最终形成的空间格局

更为重要^[12], 随着计算机图形学和地理信息技术的发展, 洪水时空过程表达方法也在不断更新, 目前洪水的时空过程模拟表达已被广泛地应用在洪涝防灾减灾领域。

在早期的研究中, 洪水可视化大多基于二维地图, 将洪水过程中不同时间的淹没范围绘制在地图上, 用颜色表示洪水的深度^[13-15]。如在二维矢量地图上叠加洪水淹没变化栅格, 来表达洪水淹没范围和对经济热点区的淹没情况, 以评价经济热点区在洪涝灾害下的脆弱性^[16]。这种方法虽然能够在一定程度上反应洪水的时空过程和分布情况, 但是对洪水三维场景的直观表达不足, 从而难以准确评估洪水对人类以及公共设施的影响。考虑到早期研究中数据获取和处理受技术限制, 模拟模型的计算精度可靠性和准确性也较低。

到了本世纪初期, 随着计算机图形学技术和数字地球概念的不断发展, 谷歌公司在 2005 年 6 月底, 推出了桌面工具软件谷歌地球 (Google Earth), 极大推动了各行各业对于三维空间信息的理解和应用, 洪水时空过程的表达技术也迎来了变革, 洪水的三维可视化技术得到了迅速发展和应用。李清泉等^[17]基于 OpenGL 技术实现了对三维场景和三维建筑实体的可视化。ZHANG 等^[18]合成了三维可视化环境中的建筑物、道路和树木等对象, 在视觉上复制了现实世界的特征以及地理参考, 并在此基础上模拟了洪水的淹没过程。JIANG 等^[19]使用开源三维引擎 World Wind, 实现了基于 WebGIS 的不同水位洪水淹没情况的三维可视化, 为决策者和科研人员提供了便捷的人机交互功能。CHAN 等^[20]基于 Google Earth 和 ArcGIS 的水文分析模块开发了基于 Web 的洪水监测系统, 并进行了三维洪水模拟。李毅等^[21]提出了一种将 GIS、水文与水力建模技术相结合的元胞自动机模型, 并基于三维可视化引擎表达洪水时空过程, 验证了其模拟溃坝洪水灾害时空过程的有效性。以上学者通过洪水模型计算出了洪水的运动的变化规律, 并以三维可视

化技术对其进行展现。

进入 2010 年后, 高分辨率对地观测技术和物联网技术得到了进一步快速发展, 洪水模拟与可视化表达中涉及到的多源数据也越来越丰富。倾斜摄影建模^[22]以及分布式水文模型^[23-25]等相关研究, 能够实现多角度的观测分析以及多尺度模拟, 从而更加全面准确地反映洪水的影响。章旭^[26]基于 Cesium 平台, 利用 SWMM 模型模拟计算引擎, 将水文模拟计算与三维可视化平台相结合, 设计了面向城市内涝的三维可视化系统, 解决了内涝模型结果展示不直观、信息共享能力差等问题。HADIMLIOGLU^[27]综合考虑了摩擦、降水和土壤吸收等多个参数, 通过流体力学模拟和三维可视化, 开展了实时洪水蔓延的可视化和分析。HUTANU^[28]通过 LiDAR 获取的高精度高程信息构建了 3D 建筑模型, 并与 HEC-RAS 软件的洪水流量分析相结合, 开展了不同流量的洪水模拟。以上学者利用水文和水动力模型结合多源数据来模拟洪水过程的变化规律。

不断丰富的多源数据同时促进了学者们采用数据挖掘、深度学习等技术来预测洪水的发生和发展, 进而展示洪水的时空过程。YANG 等^[29]考虑到全球水文模型(global hydrological models, GHM)在具体应用时其准确度的欠缺性, 采用深度学习方法, 将长短期记忆模型(Long short-term memory, LSTM)结合 GHM 水文模型实现洪水的模拟, 并验证其显著提高了洪水模拟的能力, 特别是在洪水峰值流量的幅度方面。YAN 等^[30]为满足洪水应急管理需要, 提出了一种耦合神经网络和数值模型的方法, 识别城市洪水高风险区域, 快速预测这些区域的积水深度。刘昌军等^[31]考虑到小流域洪水模拟缺乏相关资料的问题, 采用机器学习方法, 提出了一种适用于我国山丘区中小流域暴雨洪水模拟的时空变源混合产流模型, 来模拟非线性产流过程和机理。通过这类研究, 洪水时空过程模拟的精度愈来愈高, 其结果也更加准确。

随着虚拟现实技术的不断发展, 2015 年也被称为“虚拟现实元年”, 诸多厂商开始布局 VR/AR 设备的研发。Unity3D、Ureal Engine、CryEngine 等游戏引擎的成熟也进一步推动了洪水过程模拟表达的逼真度和效率的提升。在最新的虚拟现实/增强现实可视化技术中, AR 具有将灾难场景在现实生活中重建, 并帮助用户迅速理解和分析数据深层含义的能力。VR 具备沉浸式体验, 眼动追踪、全身动作捕捉等功能, 它们都一定程度上弥补了传统可视化手段的缺陷^[32], 拓展了交互性。由于 VR/AR 的洪水可视化具

备沉浸度高、交互性强、模拟程度强等优势, 因此在洪水灾害可视化的应用越来越广泛, 且具有重要的发展前景。基于相关技术的洪水模拟演练包括严肃游戏^[33]和指挥系统^[34]等形式, 目前主流的交互方式有眼动^[35]、手势、位姿、触觉^[36]、情感反应、大数据交互^[37]等方法, 其中大数据交互有助于预测自然灾害, 同时允许用户快速评估情况并迅速采取行动^[38]。但是, 对于洪水的大场景模拟需要较高的硬件计算能力, 目前相关设备还难以满足需求, 因此需要更加高效的场景加载优化方法和数据调度算法以提升洪水场景大数据调度效率。

综上所述, 洪水过程可视化主要经历了二维地图表达、三维可视化和虚拟现实可视化三个阶段。到目前, 洪水时空过程的表达, 在数据质量和实时性、过程表达逼真性、用户的体验和交互性上都取得了显著的进展。高分辨率地形数据、遥感数据以及三维模型数据的广泛获取, 结合虚拟现实技术和增强现实技术的应用, 极大提升了洪水时空过程可视化效果的交互性和沉浸感。

2 洪水时空过程模拟表达关键技术研究进展

从目前洪水时空过程模拟可视化表达的相关研究工作来看, 其涉及到的主要关键技术包括洪水场景建模技术、洪水模型计算和洪水场景可视化等技术, 以下分别进行介绍, 并对其中不同的方法进行对比分析。

2.1 洪水场景建模技术

洪水灾害真实场景的建模, 按照建模对象主要可分为两类: 地形建模和地物建模。地形建模是流域场景模拟的基础, 地物建模用于表现流域环境的特征, 是洪水真实场景模拟的主要内容。国内外学者对场景建模提出了不同的方法, 成毅^[39]使用遥感影像与 DEM 进行三维建模, 将高分辨率遥感影像映射到 DEM 上, 以快速生成具备真实纹理的三维地形; 张慧莹等^[40]使用机载 LiDAR 结合倾斜摄影测量技术提取地物表面纹理特征并映射到白模上以获得精度高、面积大的实景三维模型; 李德仁等^[41]提出基于倾斜影像的自动空中三角测量方法, 实现了快速自动获取城市三维表面模型且效果逼真。COSTABILE 等^[42]采用三维激光扫描技术对城市进行实景三维建模, 并将二维洪水模拟、三维视觉技术和地面激光扫描相结合, 可以对处于危险中的要素(如人、建筑)提供淹没程度的形象表示。NOFAL 等^[43]通过将 BIM 模型叠加到虚拟地理环境当中, 模拟计算了洪水灾害情景中的洪水

风险与建筑物损失, 并提出不同的应对措施。

洪水三维可视化的逼真效果依靠场景建模技术和水体仿真技术, 根据目前的主流三维建模方法可分为以下几类, 如表 1 所列。对于大面积的三维场景建模, 一般选择倾斜摄影建模或基于 DEM 贴图的方法; 若需要高精度的建筑物模型, 可采用 BIM 的人工建模方法或者三维点云建模的方法, 但效率较低。

表 1 三维场景建模方法对比

Table 1 Comparison of 3D scene modeling methods

建模方法	描述
基于卫星遥感影像与 DEM 的三维建模 ^[39]	快速建模, 适合大面积三维建模, 需平衡建模效率与高精度影像的矛盾
基于倾斜摄影建模技术 ^[41]	建模效率高, 适用于大范围建模, 降低建模成本
机载 LiDAR 结合倾斜摄影测量建模 ^[40, 42]	适用于大范围建模, 精确模拟真实地形, 三维模型精度高
基于 BIM 建模技术 ^[43]	人工将建筑物进行三维数字化还原, 包含详细的内部空间信息, 精度高但效率一般

2.2 洪水模型计算

洪水运动规律的研究主要是基于水动力模型, 依据数学模型对洪水实现模拟, 并实现形象和直观的洪水灾害时空过程表达。MEHTA 等^[44]基于一维水动力模型, 对 Ambica 河进行了洪水模拟, 分析了水流剖面、速度、流量。BELLOS 等^[45]将 SWMM 模型和基于栅格的二维水动力模型进行耦合, 模拟城市洪涝以实现量化的可视化模拟结果, 为洪水风险管理提供决策帮助。YANG 等^[46]采用 FLOW-R2D(二维流体动力学)构建二维模型, 重建了希腊阿提卡的洪水演进过程。林源君等^[47]采用一二维耦合水动力模型, 模拟了松阴河流域多尺度的洪水灾害, 进行了淹没分析, 为小流域洪水风险评价提供依据。GHIMIRE 等^[48]为评估一维(1D)、二维(2D)、耦合的一维/二维(HEC-RAS)模型的预测能力, 分别进行了洪水模拟, 得出二维模型精度高、HEC-RAS 模型敏感度高的结论。王自明等^[49]采用地表二维水动力模型与 SWMM 模型耦合, 对城市暴雨内涝进行模拟, 其结果较为准确。王旭滢等^[50]对浦阳江流域上游山区采用新安江水文模型模拟降雨径流过程, 模拟了历史洪水, 分析极端降水下的淹没情况。上述学者的研究工作, 主要是基于水文水动力模型的洪水建模方法, 为降低洪水模型的复杂性, 还涌现了基于波动方程、CA(cellular automaton, 元胞自动机), 基于 GIS 的模拟方式, 其中针对 CA 模型的研究越来越多, 学者们还提出将数值方程结合到 CA 模型之中^[51-53]来模拟洪水。

综上所述, 依据洪水模型能够计算流域洪水的时空变化, 如水深、流速、淹没面积等, 但单一的模型难以满足复杂流域洪水模拟的要求, 水文水动力耦合模型、CA 模型的研究越来越广泛。另外大部分研究针对小流域开展模拟计算, 解决大型复杂水域模型计算和复杂城市模型计算的研究尚不多^[54]。

2.3 洪水场景可视化技术

2.3.1 场景渲染技术

场景的渲染技术决定了虚拟洪水场景的真实感与沉浸感, 是洪水灾害场景的时空过程模拟表达中的重要研究内容。JIANG 等^[19]使用 Unity3D 软件加载了城市模型, 渲染了大面积的城市场景。CHAN 等^[20]使用 ArcGIS Engine 结合 DEM 与遥感影像数据, 搭建了澜沧江流域的三维地形场景。KUMAR 等^[55]通过 cesium 可视化引擎提供的 API 接口, 加载渲染了 GLTF 格式的三维模型数据、地形高程数据、影像数据。赵忠琛^[56]使用 Unity3D 软件加载渲染了城市建筑三维模型和城市内设施模型(汽车、路灯等), 逼真地还原了城市部分的三维场景。LUO 等^[57]使用 OpenSceneGraph 三维可视化引擎, 将 DEM 与影像重叠并加载矢量数据构建三维场景, 展现了环境植被覆盖、水分布、地形坡度、高度等特征。朱海南等^[58]使用 UE4 加载 Global Mapper 解析过的 DEM 文件, 并添加 3DMAX 模型(基础设施、植被等)搭建了高逼真度流域场景。

综上所述, 目前应用洪水模拟可视化引擎如表 2 所列, 相比于 unity3D、UE4/5 等游戏引擎来说, cesium 等 GIS 引擎更注重准确的还原事物在真实世界的位置, 而游戏引擎更侧重于渲染的效果。

表 2 虚拟洪水可视化引擎

Table 2 Virtual flood visualization engine

可视化引擎	适用性
Cesium	浏览器端的可视化引擎, 能够展示多源数据, 支持多种数据格式展示, 具有出色的三维动态展示能力
ArcGIS	GIS 引擎, 多用于洪水时空变化的空间分析可视化
Unity3D/UE4	游戏引擎, 更加侧重构建逼真的场景, 多用于城市内涝三维可视化, 支持多种场景特效的渲染
OpenSceneGraph	开源三维引擎, 封装了 OpenGL 渲染代码, 支持多种场景特效的渲染

2.3.2 水流渲染

水流渲染主要包括水流视觉渲染和水流科学可视化方式, 水流渲染指将已有的水流数据或者水流仿真的结果, 以图像或者视频的形式呈现出来, 强调视觉效果和艺术表现, 使得人们能够直观地感受水流的特

性。洪涝中的水体的实时动态建模和渲染,一方面能够提高流域虚拟场景的真实感和沉浸感,另一方面也能为洪涝风险管理提供决策帮助。不同的洪水场景(如山洪溃堤、城市内涝等),适用的水体渲染方法也不尽相同。李贺^[59]基于噪声函数的思想,利用凹凸/多重纹理映射技术并添加风速因子,使用 OpenSceneGraph 三维引擎对河道水体渲染,实现了具有波纹效果的虚拟水体。王少辉等^[60]根据水底 DEM 建立 TIN,复制水底 TIN 各个顶点作为水面高程顶点,建立水面模型,对城市内的湖泊、水库、河流进行了渲染。GARCIAFEAL 等^[61]在平滑粒子流体动力学 (SPH) 技术的基础上加入了流体和固体碰撞的溅射效果,模拟了浅水区域动态水体逼真的视觉效果。王志强等^[62]提出一种基于多项式函数的实时水波模拟算法,通过对比传统的波形函数算法,发现该方法能更出色地对水波、卷浪进行模拟。

目前主流的水体渲染方法如表 3 所列,其中水体渲染方法的适用性和优缺点各不相同,需要针对不同的场景选择合适的水体渲染方法。如果对水面的仿真要求较低,一般选择几何曲面,同时结合粒子系统模拟水花飞溅效果;如果在河道水体平稳的地方要求较高的仿真效果,一般会选择噪声函数的方式模拟水体。

水流科学可视化研究的重点则不在水流模拟的视觉效果,而是以图形或动画形式展示流体的运动状态和流线分布情况,让人直观地了解流体的特性和行为,便于人们对流体的运动规律和行为进行分析和研究。如粒子跟踪的方式,利用大量粒子的运动变化模拟洪水的传播过程^[27,63],使用不同颜色,增强洪水可视化的信息,如在洪水地图上使用渐变颜色表达水深^[64],使用不同颜色表达洪水溃堤后的到达时间^[65]。还有使用流线、箭头线模拟洪水的演进方向和速度快慢^[66-67]。水流的科学可视化方式虽然在视觉效果上表现一般,但能直观地显示洪水水流的运动

状态、特征属性等信息,让人迅速的理解洪水时空过程的传播变化。

2.3.3 基于 AR/VR 载体的洪水可视化

本文对近年来 AR/VR 载体的洪水可视化研究工作进行了归纳,并对不同方法的场景适用性进行了分析。

ZAALBERG 等^[68]在三维虚拟环境中使用 VR 来表达真实世界洪水风险和应对威胁时个人的反应。SIMPSON 等^[69]基于 Unity 3D 搭建了一种真实地理信息系统数据三维可视化的风暴潮模拟系统,通过将地面高程与开放街道地图(open street map, OSM)提供的建筑信息结合在一起以重建现实生活中的城市,再集成到计算机增强虚拟环境(I-CAVE)中,使用户能够以第一人称视角沉浸式体验风暴洪水。HAYNES 等^[70]提出了一个实时沉浸式原型 MAR(mobile augmented reality, 移动增强现实)应用程序结合现场内容创作和洪水可视化技术,并将沉浸式 AR 应用于洪水风险管理,为洪水风险管理决策提供建议。胡亚等^[71]将移动虚拟现实与洪水灾害场景三维可视化相结合,提出了移动 VR 洪水灾害场景构建与交互方法,实现了在智能手机上对洪水灾害场景进行流畅地沉浸式展示与交互探索分析。TSAI 等^[72]实现了一种沉浸式 VR 系统,通过游戏的方式为用户普及防洪知识以应对灾害发生。张国永等^[73]提出了一种基于 3D 打印地形的洪水 AR 可视化方法,将虚拟洪水场景叠加到物理地形模型(PTM)上,直观地表达了洪水与地形环境的关系,帮助参与者了解洪水灾害。阮舜毅等^[74]在 Unity 3D 中使用数字高程模型(DEM)、遥感影像以及 3D MAX 制作的建筑模型,构建了洪水灾害模拟基础场景,使用 Microsoft HoloLens VR 设备实现了对江西瑞金市的洪水无源淹没可视化,并针对场景调度效率问题,提出了一种基于流的场景加载优化方法。WANG 等^[75]基于 Microsoft HoloLens 开发了一种虚拟现实工具,能够让将用户带入模拟世界,让用户

表 3 水流渲染方法对比

Table 3 Comparison of water flow rendering methods

水流渲染方法	描述	适用范围
纹理贴图 ^[59,61]	模拟方法简单快速,包括静态、动态纹理贴图和凹凸纹理映射三种方式	远景或静止水面,无交互
波形函数 ^[62]	通过构造的函数近似模拟水波形状以及传播过程	不同波形函数适应水面形态不同,如卷浪,波浪等
粒子系统 ^[61]	将整个水体看作一个由大量的粒子构成的一个粒子集。通常模拟火、烟、云、雾、雪、尘等抽象视觉效果	瀑布、喷泉、浪花、洪水等细节部分
Perlin 噪声函数 ^[59]	通过叠加不同频率和振幅得噪声函数来模拟水波的状态,缺点是交互难以实现	适用于平静的水面
几何曲面 ^[60]	采用几何参数曲面来表示水面的起伏效果,建模过程简单,参数控制灵活,远点的视觉效果好,近距离观察的真实感较低	适用于深水区的水面模拟

在洪水发生地点以第一人称视角了解洪水造成的破坏。MOL 等^[76]在沉浸式虚拟现实实现了洪水模拟,以测试模拟灾害是否会影响人们在风险措施投资方面的决策。王峰等^[77]通过 3DMax 软件制作三维实景模型,基于 Unity3D 软件实现了洪水模拟仿真,使用 VR 头盔,搭建了基于 VR 的洪水灾害模拟教学实验平台,为用户感知城市洪涝灾害、学习洪水防灾减灾科普知识提供了 VR 教学体验环境支撑。SIMPSON 等^[78]在沉浸式环境中评估风暴潮洪水以进行风险分析,研究表明,基于 VR 技术更容易进行洪水影响的风险分析,同时用户可以在沉浸式虚拟现实中了解不同洪水水位的影响。KIKUCHI 等^[79]实现了一种基于数字孪生的洪水模拟系统,用于模拟大规模城市洪水场景,使用 AR 遮挡处理,用户可以从高处鸟瞰或以第一人称视角观看城市洪水淹没的可视化模拟状况。

综上所述,对目前的洪水灾害可视化方式进行总结,如表 4 所列。

2.4 当前洪水灾害模拟可视化的主要技术瓶颈

从前文内容的论述中可以看出,洪水灾害模拟可视化是一个涉及多学科领域的复杂问题,并且当前仍存在以下若干技术瓶颈和关键性技术难题。

(1)大规模洪水数据可视化的挑战。我国大江大河纵横交错,流域面积广袤,洪水时空过程的模拟通常涉及到大范围流域区域,因此在进行洪水模拟可视化时常常需要解决海量地理和流域专题数据的组织和调度的技术问题。

(2)观测数据耦合的模拟计算方法尚不成熟。洪水灾害模拟模型的建立和参数的调整对模拟结果的准确性和可靠性具有重要影响。洪水模型的建立需要大量的数据支持,从数据的输入到模型的建立是一个复杂的过程,目前数据驱动模型构建技术逐渐崭露头角。机理驱动模型基于人对流域水循环及其伴生过程的机理认知,取决于人对自然规律理解的深刻性,数据驱动模型基于样本数据对隐含的内在规律进行挖掘,如何将机理驱动模型与数据驱动模型耦合也是后

续需要突破的关键技术。

(3)洪水灾害可视化的逼真度和科学性难以兼顾。洪水模型的计算往往是基于时空离散的计算单元来开展,与目前基于游戏引擎为主的可视化技术所采用的数据存储格式并不相同。然而,洪水灾害模拟可视化的逼真程度是决定用户理解洪水风险的重要因素,如果逼真程度不够,不仅会降低用户对可视化模拟的信任度和使用意愿,还会使用户无法准确判断洪水灾害的影响和趋势,从而做出错误的决策。因此,如何在洪水模型科学计算结果的基础上,更加充分地与可视化渲染技术相结合,提供逼真的表达效果,也是当前洪水灾害模拟可视化面临的挑战。

(4)增强现实洪水场景的虚实配准和融合渲染问题。增强现实洪水场景表达将灾难场景在现实生活中重建,是未来的重要发展趋势。但是需要将真实世界的地形地物与模拟计算得到的虚拟场景对象进行空间精确配准,并开展场景融合以确保虚实场景的一致性和逼真度。

(5)可视化效果缺乏客观评价方法体系。洪水灾害模拟的结果的可视化表达的目的是为了便于用户理解和决策,但是洪水可视化的外观效果通常为创作者主观评价,目前缺少客观的评价体系,难以制作出能为公众快速理解洪水灾害风险的洪水时空可视化系统。

3 未来展望

在未来,随着水利模型计算、对地观测、大数据以及 VR/AR 等信息技术的持续进步,洪水灾害时空过程模拟与可视化表达也将继续得到迅速发展,并且将在数据、模型和可视化表达等方面进一步突破相关的技术瓶颈。表 5 对于主要技术难题以及相关的解决措施和未来建议进行了分析和展望。

从表 5 中可以看出,洪水灾害模拟可视化研究的重点不仅局限在对洪水数据的表达方面,洪水数据的处理、模型的建立、效果的评价也同样重要。大规模洪水数据可视化能帮助人们更加清晰地了解洪水的分

表 4 洪水可视化方式
Table 4 Flood visualization method

可视化方式	特点	适用性
屏幕端可视化 ^[19-26]	基于屏幕的可视化方式,包括电脑、手机、平板多用户端	适用于数字流域、虚拟防洪等业务系统
AR 可视化 ^[70-71,79]	基于 AR 的洪水三维可视化,具备对洪水信息增强显示	适用于虚实场景融合的洪水现场体验和应急演练
沙盘 AR 可视化 ^[73]	基于沙盘场景的洪水时空过程三维表达,更加直观的表达洪水与地理环境的关系	结合地形数据和洪水溃堤演进、淹没的可视化表达
VR 可视化 ^[68-69,72,74-78]	基于 VR 的可视化表达,具有良好的沉浸式体验	适用于沉浸式的洪水应急演练、科普教育等

表 5 洪水灾害模拟可视化的主要技术难题和解决措施

Table 5 Main technical problems and solutions of flood disaster simulation visualization

洪水灾害模拟可视化主要技术难题	解决措施和未来建议
大规模洪水数据可视化	通过构建洪水场景多层次细节 LOD, 开展数据结构优化, 同时结合高性能并行计算等方法提高数据的处理和渲染速度
观测数据耦合的模拟计算方法	结合洪水机理驱动模型与数据驱动模型的特点, 开展模型融合, 数据模型修正机理模型, 机理模型驱动数据模型等方式提高计算结果的准确性和可靠性
兼顾逼真度和科学性的洪水灾害可视化	综合考虑现实需求合理利用视觉效果, 在科学性和逼真度之间做出取舍, 研究更先进的洪水模拟计算和渲染表达策略
增强现实洪水场景的虚实配准和融合渲染	使用精确的配准算法来对洪水场景进行空间配准, 对增强现实场景中虚实目标对象的光影等效果进行进一步融合
可视化效果的客观评价方法	深入分析可视化表达的不同需求, 根据洪水的物理过程表达、场景的还原度、洪水风险的感知能力、用户的理解程度等指标建立科学的评价体系

布情况和演化趋势, 这对数字孪生流域和智慧水利建设有着重要作用; 观测数据耦合的模拟计算方法通过取长补短, 能更好的满足实际应用需求, 但未来需要进一步深入分析模型与观测数据之间的关联作用关系; 可以通过使用激光雷达和倾斜摄影技术构建精细的三维场景, 提高洪水场景的逼真程度, 使洪水风险造成的危害更加直观, 兼顾逼真度和科学性的洪水模拟可视化是未来的研究重点; 基于 AR、VR 技术的洪水灾害可视化因其沉浸性和信息扩展能力的优势, 未来仍是洪水风险可视化、防洪抗灾等领域的重要部分, 增强现实洪水可视化需要注重虚实场景配准和一致性的问题, 而虚拟现实洪水可视化可以从图像、声音等方面加强洪水场景的真实度, 给人们提供更加全面深入的洪水信息。

总之, 洪水时空过程三维模拟可视化表达技术未来的研究重点在于海量洪水数据组织的高效性、模拟计算的准确性、场景表达的逼真性三方面的有机结合。这就需要跨领域合作的加强, 包括气象、水文、地理信息系统、计算机仿真等多个领域的专家共同参与, 以提高研究的全面性和可操作性。因此, 未来的洪水灾害模拟可视化研究将更加注重数据、算法、可视化技术、跨领域合作以及实时预警和响应系统等方面的创新, 以实现洪水灾害的更加精准、全面、高效的模拟和表达。

4 结论

本文从洪水时空过程模拟可视化方法的发展脉络出发, 并详细探讨了洪水时空过程模拟可视化涉及的关键技术和技术难题, 主要得出如下结论:

(1)洪水过程可视化主要经历了二维地图表达、三维可视化和虚拟现实可视化三个阶段。在洪水过程表达的逼真度、科学性、多样性、交互性、实时性上

都取得了显著的进展。目前, 洪水的三维可视化是主要的研究方向, 在应急管理, 灾害评估, 风险管理决策、数字孪生流域建设等领域具有重要价值。

(2)洪水时空过程模拟可视化涵盖多个学科领域的知识, 包括洪水场景建模、洪水模型计算、洪水场景可视化等多种技术手段, 需要平衡和互补多种技术之间的优缺点, 实现洪水时空过程模拟的科学逼真可视化。

(3)洪水时空过程可视化的表达方式主要包括桌面式、沉浸式、增强现实式等, 其中虚拟现实技术因其良好的用户体验和交互性, 是目前洪水时空过程可视化表达研究的一个研究热点, 在应急管理、VR/AR 教学、风险感知、逃生训练等领域广泛应用。

(4)随着计算机技术和地理信息系统技术的发展, 洪水的时空模拟可视化研究取得了显著进展。但也遇到了很多技术难题, 目前主要包括大规模洪水数据可视化、洪水模型可靠性、计算效率和精度、可视化效果、可视化手段等问题。这些难题和瓶颈的解决有望提升我国的洪水风险应急处置水平, 促进多学科、多领域的共同进步。

参考文献 (References):

- [1] 林琚, 吴贤宇, 潘家祯, 等. 中国城市洪涝实时预报研究: 现状与挑战[J]. 测绘学报, 2022, 51(7): 1306-1316.
LIN Hui, WU Xianyu, PAN Jiayi, et al. Realtime forecast of urban flood in China: past, present and future [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(7): 1306-1316.
- [2] 刘成堃, 张力, 范青松, 等. 基于 3DGIS 的洪水时空态势推演与调度模拟研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(8): 50-57.
LIU Chengkun, ZHANG Li, FAN Qingsong, et al. Research of flood spatiotemporal deduction and control dispatching simulation based on 3DGI S[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022,

- 53(8): 50-57.
- [3] 李雨凡, 周亮, 于世永, 等. 过去两千年长江干流历史洪水事件的时空变化研究[J]. 地球与环境, 2022, 50(2): 241-251.
LI Yufan, ZHOU Liang, YU Shiyong, et al. Temporal and spatial variations of flood events of the Yangtze River over the past 2000 years [J]. Earth And Environment, 2022, 50(2): 241-251.
- [4] DENG P, ZHANG M, HU Q, et al. Pattern of spatio-temporal variability of extreme precipitation and flood-waterlogging process in Hanjiang River basin [J]. Atmospheric Research, 2022, 276: 106258.
- [5] NILSSON H, PILESJÖ P, HASAN A, et al. Dynamic spatio-temporal flow modeling with raster DEMs[J]. Transactions in GIS, 2022, 26(3): 1572-1588.
- [6] JACQUINOD F, BONACCORSI J. Studying social uses of 3d geovisualizations: Lessons learned from actionresearch projects in the field of flood mitigation planning[J]. ISPRS International Journal of GeoInformation, 2019, 8(2): 84.
- [7] HENSTRA D, MINANO A, THISTLETHWAITE J. Communicating disaster risk? An evaluation of the availability and quality of flood maps[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2019, 19(1): 313-323.
- [8] MACCHIONE F, COSTABILE P, COSTANZO C, et al. Moving to 3D flood hazard maps for enhancing risk communication[J]. Environmental Modelling & Software, 2019, 111: 510-522.
- [9] LI W, ZHU J, HAUNERT J H, et al. Three-dimensional virtual representation for the whole process of dam-break floods from a geospatial storytelling perspective [J]. International Journal of Digital Earth, 2022, 15(1): 1637-1656.
- [10] LAI J S, CHANG W Y, CHAN Y C, et al. Development of a 3D virtual environment for improving public participation: Case study-The Yuansantze Flood Diversion Works Project[J]. Advanced Engineering Informatics, 2011, 25(2): 208-223.
- [11] LESKENS J G, KEHL C, TUTENEL T, et al. An interactive simulation and visualization tool for flood analysis usable for practitioners [J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2017, 22(2): 307-324.
- [12] 朱军, 尹灵芝, 曹振宇, 等. 时空过程网络可视化模拟与分析服务: 以溃坝洪水为例[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(2): 215-221.
ZHU Jun, YIN Lingzhi, CAO Zhenyu, et al. Network simulation and visual analysis of spatiotemporal process: A case study of dambreak flood routing[J]. Journal of Geoinformation Science, 2015, 17(2): 215-221.
- [13] 刘仁义, 刘南. 基于 GIS 的复杂地形洪水淹没区计算方法[J]. 地理学报, 2001, 56(1): 1-6.
LIU Renyi, LIU Nan. A GIS based model for calculating of flood area [J]. Acta Geo-graphica Sinica, 2001, 56(1): 1-6.
- [14] MARK O, WEESAKUL S, APIRUMANEKUL C, et al. Potential and limitations of 1D modelling of urban flooding [J]. Journal of Hydrology, 2004, 299(3/4): 284-299.
- [15] DEMIR I, KRAJEWSKI W F. Towards an integrated flood information system: centralized data access, analysis, and visualization[J]. Environmental Modelling & Software, 2013, 50: 77-84.
- [16] VEEN A V D, LOGTMEIJER C. Economic hotspots: visualizing vulnerability to flooding[J]. Natural hazards, 2005, 36: 65-80.
- [17] 杨必胜, 李清泉, 梅宝燕. 3 维城市模型的可视化研究[J]. 测绘学报, 2000, 29(2): 149-154.
YANG Bisheng, LI Qingquan, MEI Baoyan. Study of the Visualization of Three-Dimension Urban Model[J]. Acta Geodaetica et Geographica Sinica, 2000, 29(2): 149-154.
- [18] ZHANG K, CHEN S C, SINGH P, et al. A 3D visualization system for hurricane storm-surge flooding[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2006, 26(1): 18-25.
- [19] JIANG R, XIE J, LI J, et al. Analysis and 3D visualization of flood inundation based on WebGIS[C]//XIE Shengli. 2010 International Conference on E-Business and E-Government. Guangzhou: IEEE, 2010: 1638-1641.
- [20] CHAN Y, MORI M. Web-based flood monitoring system using Google Earth and 3D GIS[C]//CURRAN A. 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Vancouver: IEEE, 2011: 1902-1905.
- [21] LI Y, GONG J H, ZHU J, et al. Spatiotemporal simulation and risk analysis of dam-break flooding based on cellular automata[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2013, 27(10): 2043-2059.
- [22] 王伟, 黄雯雯, 镇姣. Pictometry 倾斜摄影技术及其在 3 维城市建模中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2011, 34(3): 181-183.
WANG Wei, HANG Wenwen, ZHEN Jiao. Pictometry oblique photography technique and its application in 3D city modeling[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2011, 34(3): 181-183.
- [23] 郑子彦, 张万昌, 徐精文. 山区流域暴雨洪水的数值模拟[J]. 山地学报, 2012, 30(2): 222-229.
ZHENG Ziyang, ZHANG Wanchang, XU Jingwen. Numeric simulation of torrential rainfall and flash-flood in a mountainous basin [J]. Mountain Research, 2012, 30(2): 222-229.
- [24] VAN DER KNIJFF J M, YOUNIS J, DE ROO A P J. LISFLOOD: a GIS-based distributed model for river basin scale water balance and flood simulation[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(2): 189-212.
- [25] WANG J, HONG Y, LI L, et al. The coupled routing and excess storage (CREST) distributed hydrological model [J]. Hydrological sciences journal, 2011, 56(1): 84-98.

- [26] 章旭. 基于 SWMM 模型的城市内涝模拟与可视化方法研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2019.
- ZHANG Xu. Study on Urban Waterlog-ging Simulation and Visualization Method Based on SWMM[D]. Nanjin: Nanjing Normal University, 2019.
- [27] HADIMLIOGLU I A, KING S A, STAREK M J. FloodSim: flood simulation and visualization framework using positionbased fluids[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2020, 9(3): 163.
- [28] HUTANU E, MIHU-PINTILTIE 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.
- [29] YANG T, SUN F, GENTINE P, et al. Evaluation and machine learning improvement of global hydrological model-based flood simulations[J]. Environmental Research Letters, 2019, 14(11): 114027.
- [30] YAN X, XU K, FENG W, et al. A rapid prediction model of urban flood inundation in a high-risk area coupling machine learning and numerical simulation approaches[J]. International Journal of Disaster Risk Science, 2021, 12(6): 903-918.
- [31] 刘昌军, 周剑, 文磊, 等. 中小流域时空变源混合产流模型及参数区域化方法研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(1): 99-114.
- LIU Changjun, ZHOU Jian, WEN Lei, et al. Research on spatio temporally-mixed runoff model and parameter regionalization for small and medium-sized catchments[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2021, 19(1): 99-114.
- [32] 林琿, 游兰, 胡传博, 等. 时空大数据时代的地理知识工程展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 2205-2211.
- LIN Hui, YOU Lan, HU Chuanbo, et al. Prospect of Geo-Knowledge Engineering in the Era of Spatio Temporal Big Data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(12): 2205-2211.
- [33] SAJJADI P, EWAIS A, DE TROYER O. Individualization in serious games: a systematic review of the literature on the aspects of the players to adapt to[J]. Entertainment Computing, 2022, 41: 100468.
- [34] ZHU Y, LI N. Virtual and augmented reality technologies for emergency management in the built environments: A state-of-the-art review [J]. Journal of Safety Science and Resilience, 2021, 2(1): 1-10.
- [35] SOUCHET A D, PHILIPPE S, LOURDEAUX D, et al. Measuring visual fatigue and cognitive load via eye tracking while learning with virtual reality head-mounted displays: A review [J]. International Journal of Human-Computer Interaction, 2022, 38(9): 801-824.
- [36] RODRIGUEZ J L, VELAZQUEZ R, DEL-VALLE-SOTO C, et al. Active and passive haptic perception of shape: Passive haptics can support navigation[J]. Electronics, 2019, 8(3): 355.
- [37] ZHANG Z, WEN F, SUN Z, et al. Artificial intelligence-enabled sensing technologies in the 5G/internet of things era: from virtual reality/augmented reality to the digital twin[J]. Advanced Intelligent Systems, 2022, 4(7): 2100228.
- [38] YU M, YANG C, LI Y. Big data in natural disaster management: a review[J]. Geosciences, 2018, 8(5): 165.
- [39] 成毅. 基于 DEM 的三维地形建模及集输管道路径优化研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2019.
- CHENG Yi. Research on 3D Terrain Modeling Based on DEM and Path Optimization of GatheringPipeline[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2019.
- [40] 张慧莹, 董春来, 王继刚, 等. 基于 Context Capture 的无人机倾斜摄影三维建模实践与分析[J]. 测绘通报, 2019(S1): 266-269.
- ZHANG Huiying, DONG Chunlai, WANG Jigang, et al. Practice on 3D-modeling based on tilt photogrammetry and Context Capture software[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(S1): 266-269.
- [41] 李德仁, 肖雄武, 郭丙轩, 等. 倾斜影像自动空三及其在城市真三维模型重建中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(6): 711-721.
- LI Deren, XIAO Xiongwu, GUO Bingxuan, et al. Oblique Image Based Automatic Aerotriangulation and Its Application in 3D City Model Reconstruction [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2016, 41(6): 711-721.
- [42] COSTBILE P, COSTANZO C, De LORENZO G, et al. Terrestrial and airborne laser scanning and 2-D modelling for 3-D flood hazard maps in urban areas: New opportunities and perspectives[J]. Environmental Modelling & Software, 2021, 135: 104889.
- [43] NOFAL O M, VAN DE LINDT J W. High-resolution flood risk approach to quantify the impact of policy change on flood losses at community-level[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2021, 62: 102429.
- [44] MEHTA D J, ESLAMIAN S, PRAJAPATI K. Flood modelling for a data-scare semi-arid region using 1D hydrodynamic model: a case study of Navsari Region[J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2022, 8(2): 2675-2685.
- [45] BELLOS V, PAPAGEORGAKI I, KOURTIS I, et al. Reconstruction of a flash flood event using a 2D hydrodynamic model under spatial and temporal variability of storm[J]. Natural Hazards, 2020, 101(3): 711-726.
- [46] YANG Q, MA Z, ZHANG S. Urban pluvial flood modeling by coupling raster-based two-dimensional hydrodynamic model and SWMM [J]. Water, 2022, 14(11): 1760.
- [47] 林源君, 王旭滢, 包为民, 等. 基于一二维水动力模型的山丘区小流域洪水模拟与淹没分析[J]. 水力发电, 2022, 48(3): 10-14.
- LIN Yuanjun, WANG Xuying, BAO Weimin, et al. Flood simulation

- and submergence analysis of small mountain watershed based on 1D and 2D coupled hydrodynamic model[J]. *Water Power*, 2022, 48(3): 10-14.
- [48] GHIMIRE E, SHARMA S, LAMICHHANE N. Evaluation of one-dimensional and two-dimensional HEC-RAS models to predict flood travel time and inundation area for flood warning system[J]. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 28(1): 110-126.
- [49] 王自明, 查良瑜, 王斌. 二维地表水动力模型与 SWMM 耦合研究及应用[J]. *浙江水利科技*, 2019, 47(4): 1-4.
WANG Ziming, ZHA Liangyu, WANG Bin. Research and application of coupled model of 2D surface hydrodynamics and SWMM[J]. *Zhejiang Hydraulics*, 2019, 47(4): 1-4.
- [50] 王旭滢, 阮跟军, 马婷, 等. 基于水文水动力模型的浦阳江流域洪水情景模拟[J]. *中国农村水利水电*, 2021(2): 113-118.
WANG Xuying, RUAN Genjun, MA Ting, et al. Flood scenario simulation based on hydrologic-hydrodynamic integrating model in Puyang River Catchment[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2021(2): 113-118.
- [51] CHEN J, HILL A A, URBANO L D. A GIS-based model for urban flood inundation[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 373(1/2): 184-192.
- [52] 刘达, 黄本胜, 赵璧奎, 等. 北江流域洪水资源可利用途径分析[J]. *水利发展研究*, 2023, 23(1): 50-53.
LIU Da, HUANG Bensheng, ZHAO Bikui, et al. CHEN Hui. Analysis of the available approach of flood resources in Beijiang River Basin[J]. *Water Resources Development Research*, 2023, 23(1): 50-53.
- [53] NKWUNONWO U C, WHITWORTH M, BAILY B. Urban flood modelling combining cellular automata framework with semi-implicit finite difference numerical formulation[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2019, 150: 272-281.
- [54] 龚政, 郭蕴哲, 杭俊成, 等. 沿海城市溃堤洪水模拟技术研究进展[J]. *水利水电科技进展*, 2020, 40(3): 78-85.
GONG Zheng, GUO Yunzhe, HANG Junchen, et al. Advances in dike-breaking flood simulation technology in coastal cities[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2020, 40(3): 78-85.
- [55] KUMAR K, LEDOUX H, STOTER J. Dynamic 3D visualization of floods: Case of the Netherlands[J]. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2018, 10(3): 66-70.
- [56] 赵忠琛. 基于 Unity3D 的城区内涝分析与风险评估[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2018.
ZHAO Zhongchen. Based on Unity3D Urban Waterlogging Analysis and The Risk Assessment[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2018.
- [57] LUO L, ZHU J, FU L, et al. A suitability visualisation method for flood fusion 3D scene guided by disaster information[J]. *International Journal of Image and Data Fusion*, 2021, 12(4): 301-318.
- [58] 朱海南, 万定生, 余洋. 基于 UE4 的洪水淹没仿真技术研究与应用[J]. *信息技术*, 2020, 44(3): 13-18.
ZHU Hainan, WAN Dingsheng, YU Yang. Research and application of flooding simulation technology based on UE4[J]. *Information Technology*, 2020, 44(3): 13-18.
- [59] 李贺. 基于 OSG 的水流仿真研究与可视化[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2017.
LI He. Based on OSG Flow Simulation and Visualization[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2017.
- [60] 王少辉, 周敏, 马云波. 水资源体三维建模与可视化[J]. *现代测绘*, 2021, 44(5): 6-9.
WANG Shaohui, ZHOU Min, MA Yunbo. Three dimensional modeling and visualization of water resources body[J]. *Modern Surveying and Mapping*, 2021, 44(5): 6-9.
- [61] GARCIAFEAL O, CRESPO A J C, GOMEZ-GESTEIRA M. Visual-SPHysics: advanced fluid visualization for SPH models[J]. *Computational Particle Mechanics*, 2022, 9(5): 897-910.
- [62] 王志强, 马海波. 多项式函数的实时水波模拟算法[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(4): 580-585.
WANG Zhiqiang, MA Haibo. Real-time water wave simulation algorithm by polynomial function[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(4): 580-585.
- [63] CHEN X, CHEN L, STONE M C, et al. Assessing connectivity between the river channel and floodplains during high flows using hydrodynamic modeling and particle tracking analysis[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 583: 124609.
- [64] SEIPEL S, LIM N J. Color map design for visualization in flood risk assessment[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2017, 31(11): 2286-2309.
- [65] CHEONG L, KINKELDEY C, BURFURD I, et al. Evaluating the impact of visualization of risk upon emergency route-planning[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2020, 34(5): 1022-1050.
- [66] BUJACK R, MIDDEL A. State of the art in flow visualization in the environmental sciences[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020, 79(2): 65.
- [67] ZELENAKOVA M, FIJKO R, LABANT S, et al. Flood risk modeling of the Slatvinec stream in Kruzlov village, Slovakia[J]. *Journal of cleaner production*, 2019, 212: 109-118.
- [68] ZAALBERG R, MIDDEN C J H. Living behind dikes: mimicking flooding experiences[J]. *Risk Analysis*, 2013, 33(5): 866-876.
- [69] SIMPSON M, PADILLA L, KELLER K, et al. Immersive storm

- surge flooding: Scale and risk perception in virtual reality[J]. *Journal of Environmental Psychology*, 2022, 80: 101764.
- [70] HAYNES P, HEHLANGE S, LANGE E. Mobile augmented reality for flood visualisation [J]. *Environmental modelling & software*, 2018, 109: 380-389.
- [71] 胡亚, 朱军, 李维炼, 等. 移动 VR 洪水灾害场景构建优化与交互方法[J]. *测绘学报*, 2018, 47(8): 1123-1132.
HU Ya, ZHU Jun, LI Weilian, et al. A Construction optimization and interaction method for flood disaster scenes based on mobile VR[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(8): 1123-1132.
- [72] TSAI M H, CHANG Y L, SHIAU J S, et al. Exploring the effects of a serious game-based learning package for disaster prevention education: The case of Battle of Flooding Protection[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2020, 43: 101393.
- [73] ZHANG G Y, GONG J H, LI Y, et al. An efficient flood dynamic visualization approach based on 3D printing and augmented reality[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2020, 13(11): 1302-1320.
- [74] 阮舜毅. 洪水灾害混合现实可视化模拟及场景加载优化方法研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2020.
RUAN Shunyi. Simulation and Loading Optimization Technology of Flood Disaster Visualization System On Mixed Reality[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2020.
- [75] WANG S, WANG J, GOURBESVILLE P, et al. Visualization of flood simulation with Microsoft HoloLens[C]//Philippe Gourbesville. *Advances in Hydroinformatics*. Singapore: Springer, 2020: 91-101.
- [76] MOL J M, BOTZEN W J W, APPENDICES J E. After the virtual flood: Risk perceptions and flood preparedness after virtual reality risk communication[J]. *Judgment and Decision Making*, 2022, 17(1): 189.
- [77] 王峰, 李智星, 王俊琿, 等. 基于 VR 的水模拟水灾害教学实验平台研究[J]. *科技与创新*, 2022(18): 166-168.
WANG Feng, LI Zhixing, WANG Junhui, et al. Research on teaching experiment platform of water simulation water disaster based on VR [J]. *Science and Technology & Innovation*, 2022(18): 166-168.
- [78] SIMPSON M, PADILLA L, KELLER K, et al. Immersive storm surge flooding: Scale and risk perception in virtual reality[J]. *Journal of Environmental Psychology*, 2022, 80: 101764.
- [79] KIKUCHI N, FUKUDA T, YABUKI N. How a Flooded city can be visualized from both the air and the ground with the city digital twin approach[J]. *System Integration of Flood Simulation and Augmented Reality with Drones*, 2022, 20(4): 608-614.

(责任编辑 王海锋)