

刘成堃, 马瑞, 张力, 等. 3D GIS 支持下的洪水淹没模拟与快速损失评估研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(12): 204-209.
LIU Chengkun, MA Rui, ZHANG Li, et al. Research on flood simulation and loss evaluation based on 3D GIS[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(12): 204-209.

3D GIS 支持下的洪水淹没模拟与快速损失评估研究

刘成堃^{1 2 3}, 马瑞^{1 2 3}, 张力^{1 2 3}, 邱鑫^{1 2 3}

(1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010; 2. 长江空间信息技术工程有限公司(武汉), 湖北 武汉 430010; 3. 湖北省水利信息感知与大数据工程技术研究中心, 湖北 武汉 430010)

摘要: 洪水过程模拟和淹没损失计算是防洪会商中的重要环节, 快速呈现洪水风险并估算淹没损失是保障决策会商时效性的基础。针对现阶段研究中洪水模拟效果单一且淹没计算耗时较长的问题, 基于 OpenSceneGraph 图形框架搭建 3D GIS 环境, 实现了三维环境下水体的四类淹没表达, 提出了三维地形瓦片支持下的 3D 射线淹没损失计算方法, 并以三峡库区洪水为例开展淹没模拟和损失评估。结果表明: 在 3D GIS 环境下利用四类水体表达方法可从多角度反映洪水淹没风险, 并可基于三维场景利用 GPU 性能加速淹没损失计算, 在可接受的精度偏差范围内将计算耗时控制在 1.5 s 左右, 较传统方法大幅减少了计算耗时。该研究可提高防洪会商中风险识别与损失计算的效率, 为防洪风险评估和应急转移提供支撑。

关键词: 3D GIS; 淹没模拟; 损失计算; 三峡库区

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.12.025

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

中图分类号: P208

文献标识码: A

文章编号: 1000-0860(2020)12-0204-06



Research on flood simulation and loss evaluation based on 3D GIS

LIU Chengkun^{1 2 3}, MA Rui^{1 2 3}, ZHANG Li^{1 2 3}, QIU Xin^{1 2 3}

(1. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd, Wuhan 430010, Hubei, China; 2. Changjiang Spatial Information Technology Engineering Co., Ltd, Wuhan 430010, Hubei, China; 3. Water Resources Information Perception and Big Data Engineering Research Center of Hubei Province, Wuhan 430010, Hubei, China)

Abstract: Flood simulation and loss calculation are important parts in flood control consultation, presenting flood risk and estimating loss quickly can guarantee the timeliness of decision-making consultation. Aiming at the problem of single flood simulation effect and long time-consuming flood calculation, a 3D GIS scene is built based on the OpenSceneGraph framework, on which four types of water expression are performed for flood simulation, and the 3D-ray method is proposed for flood calculation, the flood simulation and loss calculation experiments are then carried out using the flood data of the Three Gorges reservoir area. The results show that in the 3D GIS scene, the four types of water expression methods can reflect flood risk from multiple aspects, and the flood calculation method can be accelerated using GPU, thus can reduce calculation time to 1.5 s within the acceptable accuracy deviation range compared with traditional methods. This study can improve the efficiency of risk identification and loss calculation.

收稿日期: 2020-03-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1501206, 2017YFC1502601)

作者简介: 刘成堃(1991—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事 3D GIS 在水利水电中的应用研究。E-mail: liuchengkun@cjwsjy.com.cn

lation in flood control consultations, and provide support for flood risk assessment and emergency transfer.

Keywords: 3D GIS; flood simulation; loss calculation; Three Gorges reservoir area

0 引言

我国地处东亚季风区,是世界上气候最脆弱地区之一,特殊的地形、地貌和气候特征决定了水旱灾害频发,已成为国家经济发展的重要制约因素。为了更加科学地开展防洪决策工作,自20世纪90年代开始,国家防汛抗旱总指挥部便启动了全国防汛抗旱指挥系统建设,为防汛会商中的水工程调度、水资源配置、水生态补偿等提供了有力支撑^[1-2]。而当遇到突发性洪水灾害时,快速形成防汛会商结果和方案显得尤为重要,能为资产应急处理和人员避险转移争取宝贵的时间^[3-4]。

识别洪水的淹没风险和损失是防汛会商中的重要环节,如何直观呈现洪水淹没概况、评估洪水淹没损失也成为了近年来学术界和工业界研究热点和关注焦点^[5]。随着计算机和GIS技术的快速发展,洪水模拟和损失评估研究在国内外取得了较大的进展,各类方法和模型被广泛地应用于洪水模拟和损失评估当中。

在洪水过程的模拟仿真方面,二维GIS地图与洪水淹没范围叠加能直观呈现影响范围并划分风险等级,至今仍被广泛使用在洪水风险图的制作中^[6]。然而洪水淹没的二维GIS表达往往只能以静态专题图描述历史洪水风险和规律,无法形成对淹没区域动态空间格局和演变形势的认知,亟需形成能反映淹没区细节的三维虚拟环境以辅助决策会商^[7]。随着图形学技术的快速发展,一系列可视化工具和类库的提出为三维可视化提供了基础。韩敏等^[8]利用OpenGL技术构建三维虚拟环境,实现对湿地的洪水演进和模拟;王伟等^[9]在完成大区域不规则河道的三维建模后,借助DirectX图形框架实现河流水体的动态仿真,并优化了水面反射、波浪、动态高光等效果;耿敬等^[10]使用3D GIS技术结合MIKE21洪水风险建模,动态模拟依兰航电枢纽区段的洪水过程;曾微波等^[11]采用Unity3D游戏引擎建立三维场景,对区域分散闸站的调度过程及其水面变化情况进行了模拟。水体淹没仿真效果随着各类研究的深入而逐步提升。

在洪水损失计算方面,多类计算模型被广泛使用。参数统计模型通过建立洪灾损失与其影响因子之间的统计关系,采用统计推断方法确定模型参数,从而计算洪灾损失^[12],如SCAWTHORN等^[13]统计分析

了区域不同频率洪水与淹没范围及水深的回归关系,运用美国陆军工程兵团提供的900多种损失率曲线来评估各种不同淹没土地类型的洪灾损失。参数统计模型在快速评估洪灾损失上提供了方法和可能,但该模型仍存在不能全面考虑影响因子等不足的缺点;水文水动力学模型通过基于物理机制的分布式水文模型或1D和2D水力学模型以及水文与水动力学两者的耦合模型进行计算以提供洪水的流动特性^[14],能够提供较为全面的洪灾影响因子,但其过程繁琐且耗时较长;数字地形高程模型通常是指基于数字高程模型(DEM)来获取洪水淹没范围和淹没水深的模型,在进行洪水淹没分析时,有无源淹没和有源淹没两种算法,能分别模拟区域大面积均匀情况和小范围精细化情况^[15]。

现有的洪水模拟方法往往采用单一方式进行淹没仿真,少有对水体表达效果的动态切换以从多角度提升对淹没认知;且洪水模拟往往与淹没损失计算独立分开,少有利用三维虚拟场景借助GPU性能进行淹没损失计算的研究。鉴于此,本文改进OpenScene-Graph框架,开展了在3D GIS环境下洪水淹没模拟与风险表达研究,并借助已搭建的三维场景实现快速损失计算。试验以三峡库区为例,使用该方法直观模拟洪水淹没和风险,并结合库区规划用地资料快速计算淹没损失。

1 基于3D GIS的淹没模拟与损失计算

1.1 扩展OSG技术的3D GIS场景构建

随着图形学技术和GIS的快速发展,市场上出现了大量商业三维GIS平台,但受软件接口等限制,难以灵活对洪水过程进行表达。本文拟选用开源图形开发包OpenSceneGraph(OSG)搭建3D GIS环境。OSG主要面向飞行器仿真、游戏、虚拟现实、科学计算可视化等高性能图形应用,它基于场景图的概念,提供一个在OpenGL之上的面向对象框架,把开发者从实现和优化底层图形的调用中解脱出来,并提供了三维地形生成插件VirtualPlanetBuilder,可以将数字地形和数字正射影像融合,将DEM的灰度信息插值转变为真实空间的三维地理坐标。在三维地形渲染时,相邻的三个点组成三角形,再将所有的三角形联接成网状,形成反映高低起伏变化的地形三角网,从而为洪

表 1 三维环境下的水体淹没表达方法

序号	淹没表达方法	具体实施方法描述	优势
1	透明水	使用带 alpha 通道的颜色面赋予高程信息, 与场景叠加	能透过水面看到地形的淹没情况
2	波纹方向水	使用 shader 技术进行纹理变换, 模拟水流方向特征	能对不同区域水体流速、方向进行模拟
3	透明预警水	在透明水的基础上, 对水面分片设定水位阈值, 超过阈值的水面改变颜色进行预警	保留透明效果的同时, 能通过颜色变化进行淹没预警
4	分级设色水	对不同断面的水位进行分级统计, 使用颜色色带渲染不同区域的淹没风险级别	能直观显示不同断面淹没风险的强弱程度

水过程模拟和分析过程提供了详实的地形依据。

为进一步提升访问速度和空间分析性能, 本文采用 PostgreSQL 扩展的 PostGIS 空间数据库存储三维地形瓦片和专题图层, 并开发相应的访问接口与 OSG 衔接, 避免了大量瓦片和专题数据的碎片化问题以减少访问开销。

1.2 三维环境下的水体淹没模拟表达方法

水体的淹没表达主要目的是模拟区域的淹没状况, 直观了解洪水风险。为了能够更好地进行水体淹没模拟, 表 1 给出了 4 种在三维环境下的水体表达方法, 分别为透明水、波纹方向水、透明预警水、分级设色水, 并列出了其对应的具体实施方法与效果优势。

透明水通过带 alpha 通道的颜色面赋予高程信息, 能最直观的与三维地形叠加, 发现被水体淹没的土地、房屋等信息, 同时可扩展为透明预警水, 通过水体颜色变化给出水位超设定阈值的预警信息; 波纹方向水使用 shader 技术进行纹理变换, 模拟水流特征, 能最真实地反应水体的淹没概况, 通过水面波纹大小、流速快慢、水流方向等信息, 模拟水体的演进和淹没过程; 分级设色水在对不同断面的水位进行分级统计后, 使用颜色色带渲染不同区域的淹没风险级别, 如使用由浅到深的色带时, 颜色越深则淹没损失风险越大, 能直观反映出不同区域风险的强弱程度。

1.3 三维环境下的快速损失计算方法

传统的淹没损失计算方法往往需要通过复杂的数学模型或水动力学演算来获取淹没区域, 虽然有较高的精度和准确性, 但时效性较差, 难以满足对灾情的快速响应和评估。而已搭建形成的 3DGIS 场景则为快速损失计算提供了基础。

在 3DGIS 场景中, 包括河道、土地规划区、水面在内的要素都在显卡的 GPU 核心中完成了顶点坐标解析、图元装配、几何着色、光栅化等渲染流程, 快速形成了对象间的叠加关系。而此时, 借助 GPU 性能在场景中采用射线法相交测试就能够快速得出某一像素点处的对象叠加关系, 并进一步将各

像素点的结果累加形成总体损失结果。基于这种计算思路, 本文提出了三维环境下基于 3D 射线相交测试的损失统计方法, 算法的原理和具体执行流程如图 1 所示。

图 1(a) 描述了该方法的思路, 即在 3DGIS 场景中利用射线与 DEM、水面、土地分类图斑叠加计算。首先基于 DEM 数据生产三维金字塔地形, 然后将河道水面外扩形成一个覆盖岸线合适范围的缓冲区, 并根据动态水位值与三维场景叠加, 最后通过垂直方向射线与地形和水面求交, 若满足淹没阈值条件则进一步将当前视点分辨率的像素点与土地分类图斑叠加, 获取淹没的区块属性值。

图 1(b) 给出了详细的算法流程, 该方法将损失统计的复杂计算转换为在当前三维视口下的像素单元损失结果叠加, 因此形成像素单元面积在三维视口中的计算改正是算法的重点。在计算开始时, 三维视口移动至待计算淹没损失区域, 并逐像素点进行 3D 射线相交运算。对某一计算像素点 $vecC$, 可计算主视点到该点方向上的单位形变向量 $vecS$, 计算函数为

$$vecS = matP \times matE \times \frac{vecC - vecE}{|vecC - vecE|} \quad (1)$$

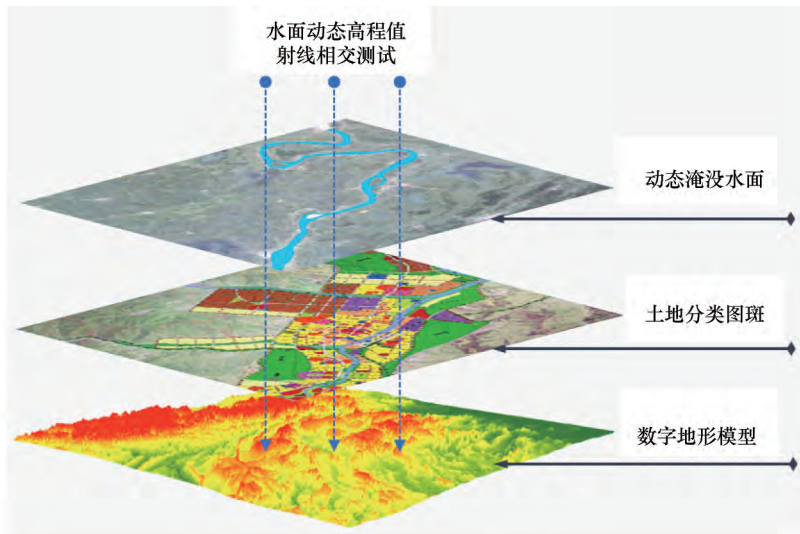
式中, $matP$ 为视口投影变换矩阵; $matE$ 为主视点相机姿态矩阵; $vecE$ 为主视点坐标。

假定当前像素点 $vecC$ 处在所在的瓦片层级对应的起始 LOD 调度距离为 D_0 , 单位像素对应面积为 $Cell$, 当主视点距离到像素点距离大于 D_0 时, 像素点会被拉远, 对应的面积会增大。除视点距离外, 像素点代表的面积还会受主视点相机姿态的影响发生变形, 需要根据距离和形变系数计算面积的改正值 $Cell'$ 为

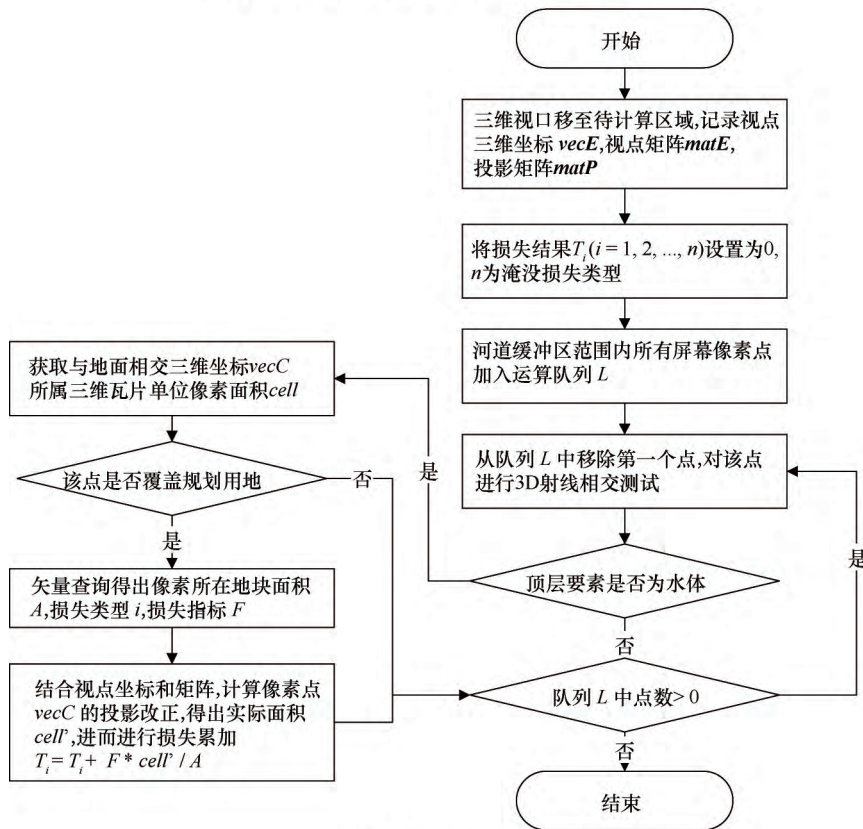
$$Cell' = \frac{Cell \times |vecS| \times |vecC - vecE|}{D_0} \quad (2)$$

式中, $|vecS|$ 为发生投影变换后 xyz 三个方向上的综合改正倍率; $|vecC - vecE|$ 为主视点 $vecE$ 到像素点 $vecC$ 的距离。

若该像素点通过矢量查询获得所在土地统计图



(a) 利用GPU性能进行3D射线相交计算的示意



(b) 计算淹没损失的算法流程

图 1 基于水面动态高程值射线相交测试的损失统计方法

斑的类型为 i , 面积为 A , 指标为 F , 则可对该像素点的面积对应指标进行累加

$$T_i = T_i + F \times Cell' / A \quad (3)$$

该方法将高精度 DEM 的计算转换为了不同视点条件下的地形瓦片高程射线相交计算, 在不同的瓦片级别下能给出对应精度和速率的计算结果, 满足快速评估的需求。

2 实例应用及分析

2.1 实例选取与系统构建

为验证本文方法, 以三峡库区洪水为例, 利用库区 4 m 分辨率影像和 2.5 m 分辨率 DEM 构建三维场景进行淹没模拟, 结合库区的土地规划用地分类 GIS 数据(包括林地、耕地、居民地等)开展损失评估。

利用 OpenSceneGraph 框架搭建 3DGIS 并将本文提出的洪水模拟与损失计算方法进行扩展开发实现, 最终形成的系统界面如图 2 所示, 其中左侧功能对话框为淹没模拟和损失评估的主功能区; 右侧面板区域为库区专题矢量数据和三维模型数据的控制列表; 中间主视图则是系统的三维交互操作和展示区。系统除提供数据漫游、数据查询定位、空间量算等三维 GIS 基础功能外, 重点解决淹没模拟和损失评估的应用, 其中淹没模拟包括透明水面、波纹水面、预警水面和渐变水面, 损失评估包括移民线叠加分析、历史洪水淹没线展示、数据查询定位和淹没损失计算。

2.2 洪水淹没模拟效果分析

在系统中进行库区洪水三维淹没模拟的效果如图 3 所示, 其中 (a) (b) (c) (d) 分别展示了本文提出的四种不同的淹没模拟表达方法, 分别突出不同的淹没信息。

图 3(a) 通过透明水面与三维地形叠加, 能从三维场景中直观发现库区被水体淹没的土地、房屋等信息; 图 3(b) 将透明水扩展为透明预警水面, 将超移民线的断面标红, 给出了长寿县水位的预警信息; 图 3(c) 通过水面波纹大小、流速快慢、水体方向等信息, 最真实地反应水体的淹没概况, 模拟水体的演进和淹没过程; 图 3(d) 通过颜色带给出不同断面水位的风险情况, 图中使用由蓝色渐变到红色的色带, 颜色由黄到红则表示淹没损失风险越大, 能直观反映出不同区域风险的强弱程度。



图2 三峡库区洪水淹没与评估系统界面

2.3 洪水淹没损失评估实例分析

在系统的淹没损失计算模块中移动水尺对应的水位,能够在场景中观察到水位的涨落,同时能快速计算得出与土地分类图斑叠加分析产生的土地分类淹没损失结果。

试验选取了三峡库区的重庆涪陵区域和湖北巴东区域,分别计算水位达到 175.5 m 时的淹没损失,如图 4 所示。其中图 4(a) 为较为平坦的重庆涪陵区域,图 4(b) 为较为陡峭的湖北巴东区域,利用本文方法计算得出的各类用地淹没面积在图中左上角列出。

为分析本文方法与传统淹没计算方法在计算精度和计算速率上的差异,选取了常用的种子点淹没计算方法进行对比。种子点淹没计算方法通过在淹没区域 DEM 中定义一个种子点和搜索范围边界,以该点的 8 邻域作为搜索区,满足条件的像素点纳入淹没区并递归搜索,最终得出水体淹没范围,进而与土地分类图斑叠加计算,得出各类用地淹没面积。种子点淹没计算方法直接使用 DEM 计算,精度较高,因此可将其淹没面积计算结果作为基准值与本文方法进行比较。

表 2 给出了重庆涪陵区域和湖北巴东区域分别使用两种淹没计算方法的计算时间和淹没面积。在计算耗时方面,种子点计算方法耗时较长,且随着计算范围的增大计算耗时显著增加,而本文的 3D 射线方法以屏幕像素为计算对象,通过逐像素点矩阵计算改正得出淹没面积,计算耗时与实际淹没面积无关,在本文试验 1920×990 的三维视口分辨率下,用时稳定在 1.5 s 左右,可近乎实时得出淹没损失结果;在计算精度方面,本文方法对面积的计算改正以屏幕中三维金字塔瓦片为数据源,当实际计算范围增大,调用的三维瓦片精度降低,最终得到的面积结果精度也会下降,以种子点方法计算的面积为基准值,图 4(a)

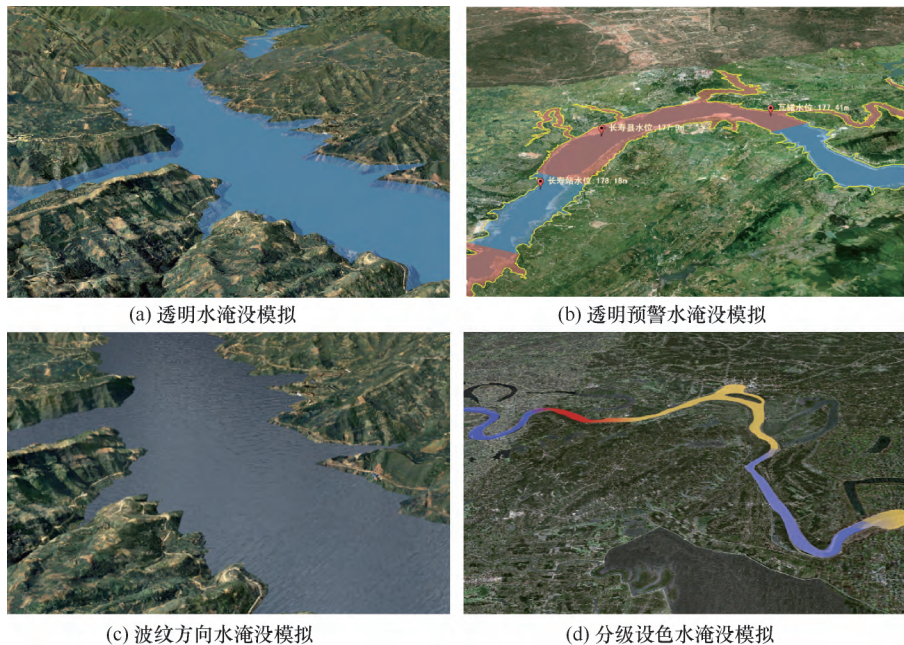
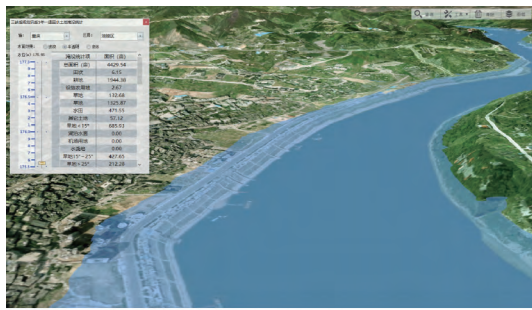


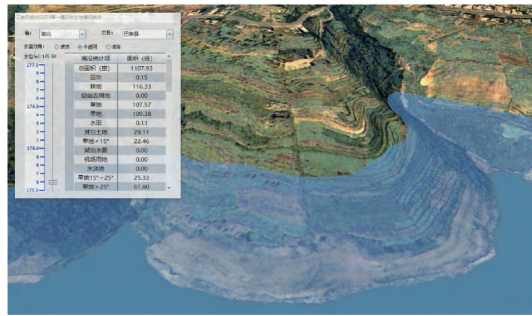
图3 三峡库区洪水的四种淹没模拟效果

表2 本文方法与种子点淹没方法的计算速率和精度对比

序号	试验区域	本文方法 淹没面积/hm ²	种子点方法 淹没面积/hm ²	本文方法 计算耗时/s	种子点方法 计算耗时/s	淹没面积 计算偏差/%
1	重庆涪陵区域	295.30	276.47	1.61	438.56	6.81
2	湖北巴东区域	73.86	71.31	1.45	152.73	3.58



(a) 重庆涪陵区域



(b) 湖北巴东区域

图 4 三维环境下的三峡库区淹没快速损失评估

重庆涪陵区域和图 4(b) 湖北巴东区域的淹没面积偏差分别在 7% 和 4% 左右。在实际运用中, 关注的淹没区域面积往往更小, 结果精度也会进一步提高。

与传统方法相比, 尽管本文方法有一定计算精度偏差, 但在计算耗时上有显著的优势, 能在三维浏览的同时实时计算淹没结果, 满足决策会商等应用场景对计算时效性的需求, 且在计算区域实际面积不大的情况下能得出较高精度的结果。

3 结 论

(1) 本文针对洪水淹没模拟直观性和损失评估时效性的需求, 提出了 3DGIS 环境下的四类洪水模拟方法, 从多角度反映洪水淹没及风险, 并进一步利用射线法进行 3D 相交计算, 快速得出不同瓦片层级和精度的淹没损失结果。

(2) 本文通过建立三峡库区洪水淹没分析系统, 有效验证了该方法模拟洪水淹没和风险的直观性, 并能快速计算淹没损失。

(3) 相较于传统洪水模拟和水利学计算方法, 本

文方法能更加快捷直观地给出洪水淹没概况和损失指标, 为防洪评估和应急转移提供依据。

在后续的研究中, 可考虑对本文方法的计算速率和精度评价部分进行深化。在计算速率的提升上, 可进一步研究利用 CUDA 技术加速淹没损失的计算; 在精度评价上, 可研究不同三维视点姿态、透视投影参数等对精度的影响。

参考文献:

- [1] 张顺利, 陶诗言, 张庆云. 长江中下游致洪暴雨的多尺度条件[J]. 科学通报, 2002, 47(6): 467-473.
- [2] 陈敏. 长江防洪工程体系建设及在 2017 年 1 号洪水中发挥的作用[J]. 中国水利, 2017(14): 17-21.
- [3] 李观义. 基于 3S 的防洪决策方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [4] 刘春腊, 马丽, 刘卫东. 洪水灾害社会经济损失评估方法研究述评[J]. 灾害学, 2014, 29(2): 136-141.
- [5] 周惠成, 何斌, 梁国华. 防汛会商系统集成化管理研究及应用[J]. 水科学进展, 2006, 22(2): 283-287.
- [6] 李帅杰. 城市洪水风险管理及应用技术研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013.
- [7] 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.
- [8] 韩敏, 陈明, 李威国. 基于 OpenGL 的湿地洪水演进模拟仿真系统的研究[J]. 计算机应用研究, 2005, 22(3): 155-157.
- [9] 王伟, 王鹏, 陈能成. 一种面向大区域不规则河道的水流仿真方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(5): 510-513.
- [10] 耿敬, 张洋, 李明伟, 等. 洪水数值模拟的三维动态可视化方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(7): 1179-1185.
- [11] 曾微波, 王卫平, 王本林, 等. 水利工程集成管理框架研究[J]. 人民黄河, 2018, 40(11): 135-139.
- [12] 冯平, 崔广涛. 城市洪涝灾害直接经济损失的评估与预测[J]. 水利学报, 2001(8): 64-68.
- [13] SCAWTHOM C, FLORES P, BLAIS N. HAZUS-MH flood loss estimation methodology. II. Damage and loss assessment [J]. Natural Hazards Review, 2006, 21(2): 148-153.
- [14] 石林. 基于 GIS 和 Hydran 的复杂河网地区洪水风险管理及水资源联合调度应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
- [15] 聂汉江, 刘彬, 何立新, 等. 基于库群联合调度和 DEM 的区域洪水淹没范围模拟[J]. 水电能源科学, 2014, 32(5): 43-46.

(责任编辑 康健)