

基于虚拟现实的淤地坝溃决模拟

王乃欣¹, 王志坚², 梁小卫³

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048; 2. 山西省水土保持科学研究所,
山西 太原 030045; 3. 陕西省水土保持局, 陕西 西安 710004)

摘要: 淤地坝溃决模拟对防洪减灾具有重要的现实意义。以延安市湫沟淤地坝为例, 针对无地形资料的小范围流域, 利用无人机扫描技术获得淤地坝实地情形, 并利用 3ds Max 等虚拟现实软件对淤地坝溃决进行仿真研究。实现了三维虚拟环境中溃口形成过程、水流运动过程的仿真模拟, 并给出了洪水淹没范围及体积。为淤地坝的应急管理、防灾减灾提供了必要的科学参考依据。

关键词: 淤地坝; 虚拟现实; 溃坝; 无人机; 3ds Max

中图分类号: TV867; S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)05-0162-06

Simulation of silt dam breach based on virtual reality

WANG Naixin¹, WANG Zhijian², LIANG Xiaowei³

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;
2. Shanxi Institute of Soil and Water Conservation Research, Taiyuan 030045, China;
3. Shaanxi Provincial Bureau of soil and water conservation, Xi'an 710004, China)

Abstract: Simulation of silt dam breach is of great importance to risk assessment and disaster alleviation. Taking Qiugou silt dam in Yanan city as an example, in the small-scale basin with no terrain data, we use UAV scanning technology to obtain the silt dam field situation and use the virtual reality software such as 3ds Max to simulate the collapse of the silt dam. The 3D virtual scene demonstrates the simulation development of dam breach and process of water flow, and the flood submerged range and volume are obtained, which provides technical support for the management and safety of silt dams.

Key words: silt dam; virtual reality; dam breach; UAV; 3ds Max

1 研究背景

淤地坝是黄土高原地区人民在长期同水土流失斗争实践中, 创造的一种行之有效的既能拦截泥沙、保持水土, 又能淤地造田、增产粮食, 具有综合作用的水土保持工程措施^[1-2]。据第一次全国水利普查统计, 截至 2011 年年底, 潼关以上黄土高原地区已共有淤地坝 56 065 座, 其中骨干坝和大型淤地坝 5487 座, 中型淤地坝 11 152 座, 小型淤地坝 39 426 座^[3]。部分淤地坝只有坝体和放水建筑物或只有坝体, 并无溢洪道, 这存在巨大洪水隐患^[4]。淤地坝一旦发生溃决, 不仅使多年拦截泥沙、保持水土的功效丧失殆尽, 还将会对下游人民群众的生命财产

安全造成巨大威胁^[5]。淤地坝所处的小流域往往缺少详细的地形地质资料, 在没有资料的情况下, 很难对洪水灾害做出预测, 这给制定抢险救灾计划带来困难。通过技术手段获得实地地形, 对淤地坝溃决过程进行仿真模拟, 可为淤地坝的应急管理、防灾减灾提供必要的科学参考依据。近年来, 许多学者针对小流域地形资料获取及溃坝洪水三维模拟问题进行了研究。王俊强等^[6]、李军等^[7]、魏永强等^[8]利用无人机低空摄影测量技术, 通过对影像数据数字空三加密提取高精度 DEM 与 DOM 数据, 获得了高精度的三维地形景观; 袁艳斌等^[9]、唐震等^[10]、罗云^[11]基于 Gis 平台, 实现了地形及河床的三维可视化模拟, 并对洪水做出三维展示, 可以计算淹没面积

收稿日期: 2017-07-03; 修回日期: 2017-07-24

基金项目: 流域水循环模拟与调控国家重点实验室自助研究课题 (岩实验科研 01160108); 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (2013CB035401); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (51609266)

作者简介: 王乃欣 (1992-), 男, 天津人, 硕士研究生, 研究方向为溃坝研究。

和体积;何原荣等^[12]、成鹏等^[13]通过 SketchUp、3ds Max 等软件构建真实三维场景,在 RealFlow 中进行了堤坝溃决模拟和淹没模拟;钟登华等^[14]运用 3ds Max 等虚拟现实技术实现了大规模城市场景中的溃堤洪水动态演进仿真;高学平等^[15]采用虚拟现实和 Virtools 仿真技术,构建了大型景观湖三维虚拟现实场景,实现了湖区全景仿真。目前洪水模拟研究通常针对于大地形,对于无地形资料的小地形模拟研究较少。

本文将以延安市湫沟淤地坝为例,运用无人机扫描技术和虚拟现实模拟技术,将精确的三维地面模型、城市街道、建筑物等融合,再现淤地坝实地情形。在虚拟的淤地坝场景中,表现溃口的发展、边坡的坍塌、溃决洪水的演进以及洪水淹没情况,为淤地坝的管理和安全防护提供技术支持。

2 工程概况

湫沟淤地坝位于延安市宝塔区柳林镇燕沟流域内,湫沟小流域系延河三级支流,流域面积 8.15 km²,内辖 2 个行政村,340 人。上游主沟道长 4.85 km,沟道比降 2.8%。

黄土高原地区降水时空分布极不均匀,汛期 6~9 月降水量就占全年降水量的 60%~70%,且具有强度大、历时短的特点。这种降雨条件,极易造成漫顶溃坝事故^[16]。

湫沟坝由坝体和左岸防水工程构成,并无溢洪道。大型淤地坝的设计洪水标准通常只有 20~30 a 一遇,小型淤地坝设计洪水标准只有 10~20 a 一遇^[17]。由于洪水标准较低,极易遇到超标准洪水,当遭遇超标准洪水时,无溢洪道的淤地坝往往都会发生洪水漫顶,甚至导致溃决。

该工程设计控制面积 6.65 km²,总库容 1.1847 × 10⁶ m³ (其中拦泥库容 5.911 × 10⁵ m³,滞洪库容 5.936 × 10⁵ m³)。湫沟坝筑坝材料为黄土,其主要的物理力学特性见表 1。

表 1 湫沟坝筑坝材料(湫沟 1#)物理力学特性

制样时	有效强度指标		强度指标	
干密度/ (g · cm ⁻³)	Φ' / (°C)	C' / kPa	Φ_{cu} / (°C)	C_{cu} / kPa
1.40	31.6	0	29.5	0

3 淤地坝三维场景的构建

3.1 三维地形的构建

很多淤地坝所处的小流域缺乏基础的地形资

料,淤地坝下游重要的生产生活设施分布及高程信息并不十分清楚。地形资料的匮乏给溃决洪水模拟带来巨大的困难。传统的数据获取方法不适用于淤地坝洪水问题的研究,随着测量领域的技术发展,无人机航测系统应用于洪水、干旱和山洪灾害应急监测中^[18]。无人机根据机翼形式可分为固定翼和旋翼 2 种。本文采用固定翼无人机搭载数码相机、数码摄像机对地形进行航拍航测,拍摄小流域地形的高精度遥感影像。针对湫沟淤地坝,对延安市湫沟进行 1:1000 无人机航空摄影,获得工作区初始数据。通过对航拍数据的处理解译实现以下两个目的:(1)获得小流域三维地形数字化信息,如 TIN 图像、等高线和 DEM 数据等;(2)获得航拍正射投影影像并了解淤地坝下游重要的生产生活设施的分布状况,如图 1。

在 Arcgis 平台中,将 Tin 图像按其高度属性展示形成三维 Tin 图像(图 2),并将影像数据和三维 Tin 图像叠加,即可产生淤地坝小流域真实三维地形,如图 3。

3.2 三维实体模型建立

通过高清的无人机航拍图片,发现下游有村庄、住宅区、加油站等设施。但这些设施在图片中以二维平面的形式存在,并不能给人真实感和沉浸感。运用三维模型制作软件 3ds Max 进行三维实体建模,可逼真还原实体形状、颜色、材质,以达到虚拟现实效果。

淤地坝场景模拟的关键之一就是对淤地坝区域内的建筑物进行真实建模,通过实地调查和航拍图像,运用 3ds Max 对淤地坝土石坝体、村庄、样板房、新建小区、加油站等建筑物建模,部分模型如图 4。

3.3 场景整合

将 Arcgis 中生成的三维地形模型和制作完成的三维实体模型导入到 3ds Max 软件,将三维实体模型移动到相应的地理位置,使模型反映其现实情况,最后对模型进行优化,减少模型面数,以减轻计算机的运算负担,形成完整的场景(图 5)。整体场景是后期坝体坍塌模拟和洪水模拟的基础。

4 淤地坝溃决过程模拟

4.1 溃口发展模拟

南京水利水电科学研究院通过土石坝溃坝模型试验,总结土石坝溃坝过程如下:漫坝水流首先对下游坝坡进行冲蚀,形成初始冲槽,然后冲槽在水流作用下持续下切变深,冲槽侧壁附近的螺旋流也持续

对侧壁进行淘刷,使其不断变宽。随着溃口流量的加大和流速加快,冲槽逐渐向坝体上游推进,冲槽边坡发生间歇性失稳坍塌,溃口出现横向扩展^[19]。本

文运用 3ds Max 软件,重点模拟了水流冲蚀所引起的溃口边坡失稳坍塌从而造成溃口间歇横向扩展的过程。

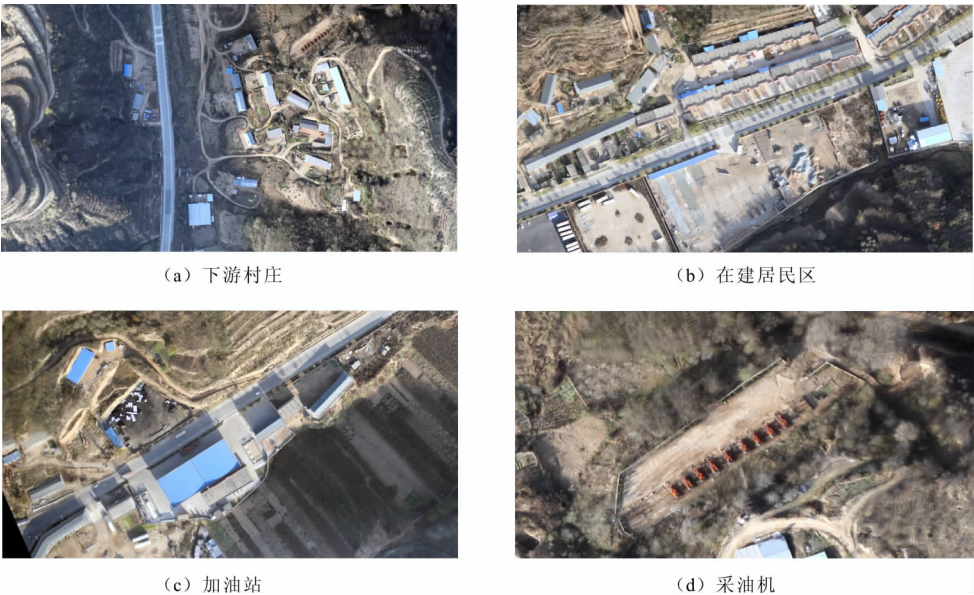


图 1 湫沟淤地坝下游生产生活设施

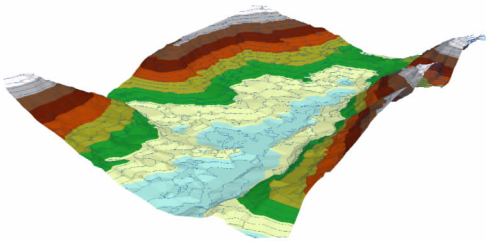


图 2 湫沟淤地坝流域 Tin 三维图像



图 3 湫沟淤地坝流域三维地形

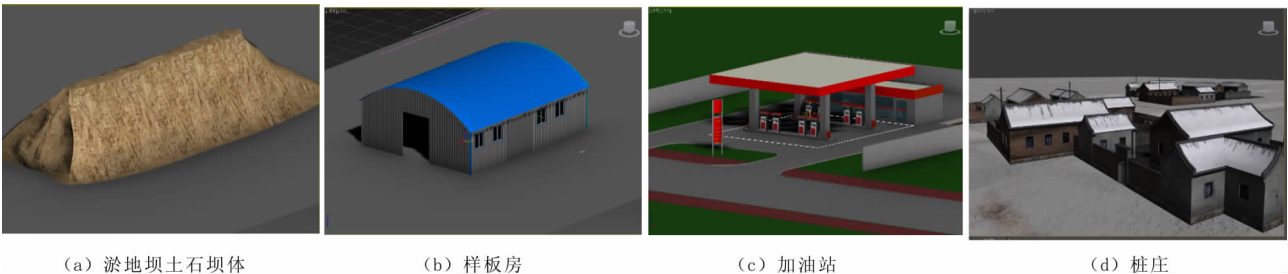


图 4 3ds Max 制作的实体模型

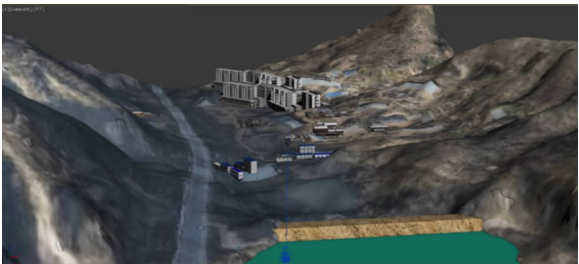


图 5 3ds Max 中完整场景

4.1.1 物理模型 Fread^[20]等学者都采用楔形体分析方法模拟冲槽侧壁突然坍塌而造成的溃口扩张过程,这种分析方法的滑动面是直线滑动面,而在岩土工程中常用的是滑弧形式的边坡稳定分析方法,本文采用圆弧滑面边坡稳定分析方法^[21]模拟溃口横向扩展过程。具体模拟过程如下。

Step 0:图 6(a)中折线段 ABCD 为边坡线,做任意滑面作为初始滑裂面,计算安全系数为 2.912,用

STAB 程序搜索到临界滑裂面,其安全系数 $F_m = 1.928$,说明边坡不会坍塌。

Step 1:随着冲槽侧壁的侵蚀,斜坡坡趾逐渐降低并向河岸靠近。为了模拟侵蚀过程,Step 0 中的边坡坡趾点 C 同时向下和向外下切 Δz ,直至产生一个临界滑裂面 AEC*F,如图 6(b)。通过试算,当下切深度 Δz 等于 0.5 m 时,找到 F_m 等于 1.001 的临界滑裂面。

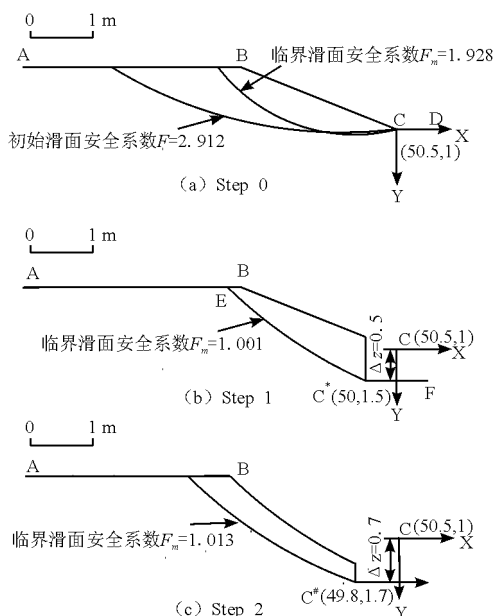
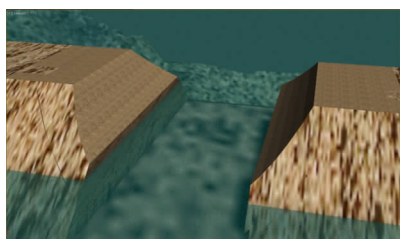
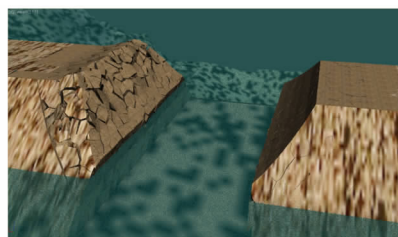


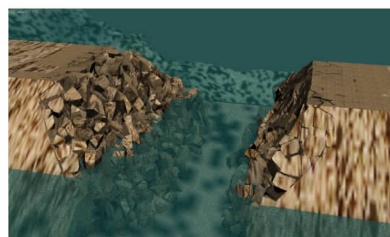
图6 圆弧滑面边坡稳定分析方法模拟溃口扩展过程



(a) 冲槽变深变宽



(b) 土体失稳坍塌



(c) 碎块滚落滑落

图8 溃口坍塌模拟过程

4.2 溃坝洪水模拟

水作为自然界中一种常见的物质,对其研究和仿真具有重要的理论意义和实用价值。由于水在形态上是不规则的,同时也是动态变化的,因此水体的建模与仿真一直是计算机图形学中的一个研究难点^[22]。在淤地坝溃坝模拟中,洪水的表现是至关重要的。本文运用 RealFlow 软件动态模拟溃坝洪水,并在 3ds Max 中直观地显示在给定水位情况下洪水的淹没情况。

4.2.1 溃坝洪水动态模拟 传统的 3ds Max 动画方法并不能制作出动态的水流现象,为了达到最真

Step 2: 第二步计算中边坡线是图 6(b) 中第一步的临界滑弧面 AEC*F。图 6(c) 表明,第二步计算过程中,下切 Δz 等于 0.7 m 时到达临界滑面。

重复上述计算过程,直到计算到所需溃口发展高程,图 7 展示了溃口的发展过程。

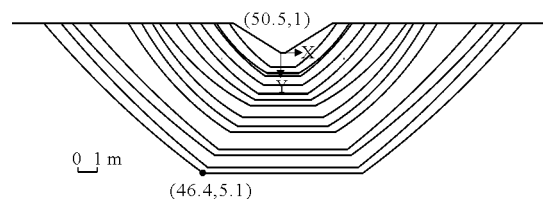


图7 溃口横向扩展计算结果图

4.1.2 崩塌效果模拟 通过计算得到的溃口发展过程是静态的,并不能给人以真实感。本文采用基于 PhysX 物理引擎的 rayfire 插件,模拟溃口崩塌过程,逼真的展示了溃口边坡失稳坍塌现象。溃口坍塌效果模拟过程如下:(1)运用 3ds Max 将溃口计算结果制作成三维滑坡体;(2)运用 Voronoi (泰森多边形)破碎法将某一步滑坡体破碎成小碎块;(3)用 rayfire 插件,为破碎后的小块体添加重力和块体间作用力,在力的作用下,块体滑动滚动,模拟出真实感较强的坍塌效果。图 8 依次展示了冲槽在水流作用下变深变宽、冲槽两侧土体失稳坍塌、冲槽两侧坍塌碎块滑落滚落的过程。

实的水流效果,本文采用了 RealFlow 软件来模拟水流动态流动。RealFlow 软件运用光滑粒子动力学方法 (SPH) 求解纳维斯托克斯方程组。SPH 将连续的流体用相互作用的粒子组来描述,每个粒子点上携带独立的物理信息,包括质量、速度、密度等。通过求解粒子组的动力学方程和跟踪每个粒子的运动轨迹,便可求得整个流体系统的力学行为。

本文运用 3ds Max 和 RealFlow 模拟溃坝洪水的具体步骤如下:(1)运用 3ds Max 良好的兼容性,将整合好的场景文件导出为 RealFlow 软件能识别的 *.SD 文件;(2)将 *.SD 文件导入 RealFlow 软件,

在相应位置(溃口)添加粒子发射器,设置粒子的相关性质,如密度、黏度、速度等,设置地形的粗糙度;(3)在 RealFlow 中添加相关场,如重力场,杀死多余粒子的 k. Volume 场;(4)在 RealFlow 中模拟水流流动,并将结果储存为. bin 文件;(5)将. bin 导入 3dMax 软件,为水流增加水的材质,水流模拟完成。图 9 为在 3ds Max 软件中模拟结果。

4.2.2 洪水淹没范围模拟 洪水淹没范围是防洪抢险救灾中重要的决策依据,在 3ds Max 提供的真实三维场景中,可直观地展示洪水的淹没范围,评估淹没的影响,为淤地坝的管理和安全防护提供技术支持。本文在 3ds Max 软件中,按给定水位条件进行洪水淹没范围三维展示,实现的方法为:先设置三维场景基础高程(本文以坝底高程为基础高程),然

后在不同的关键帧上设置水面相对于基础高程的相对高程,在 3ds Max 软件中自动形成水面淹没范围的动画,图 10 展示了水面相对于坝底 0、5、10、15 m 时的淹没情况。运用 Arcgis 体积表面工具,可以快速地计算出不同高程水面下淹没面积及淹没体积,具体的计算结果见表 2。

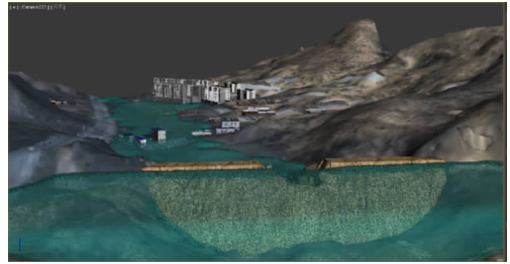


图9 3ds Max 模拟结果

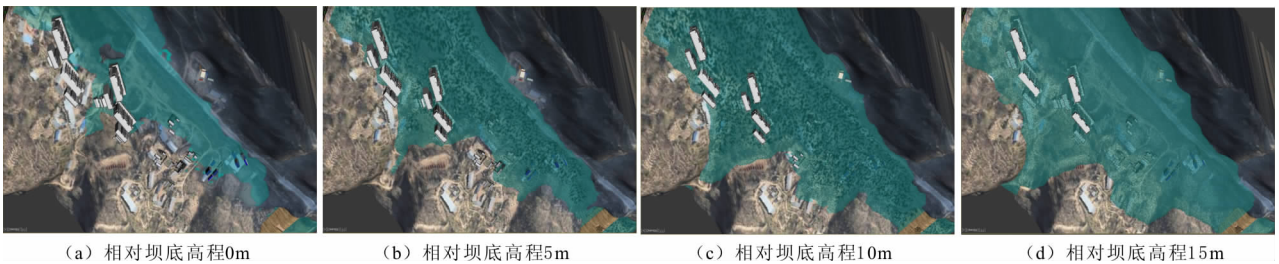


图10 洪水淹没范围

表2 淹没范围及淹没体积

水面相对高程/m	淹没面积/m ²	淹没体积/m ³
0	58887.94	304010
5	91518.13	710425
10	120069.33	1258149
15	147137.22	1947614

5 结 论

淤地坝溃决模拟研究对防洪预警和应急指挥与决策具有重要的现实意义和使用价值。本文以延安湫沟淤地坝为例,研究了无人机扫描技术和虚拟现实技术在淤地坝溃坝模拟中的应用,得出以下结论:

(1)无人机扫描技术具有快速、灵活及分辨率高等特点,可快速建立淤地坝小流域的真实三维地形。

(2)虚拟现实建模技术可创造出沉浸感、真实性很强的虚拟场景,可逼真地还原淤地坝下游建筑物分布情况及洪水的淹没情况,为防洪减灾提供技术支持。

(3)虚拟现实仿真技术的物理引擎将运动规律引用到虚拟场景中,使得物体交互性和互动性大大增强,如制作土体崩塌效果及水体流动效果。

(4)目前虚拟现实仿真技术的物理引擎和专业数值计算软件有差距,如边坡稳定计算、洪水演进计算都需要借助相关专业软件来获得计算结果。

(5)本文借助多个虚拟现实软件完成淤地坝溃坝模拟,其中涉及多次数据格式转换问题,降低了工作效率,开发一款集产汇流计算、边坡稳定分析、溃坝洪水计算、洪水演进、洪水预警等功能的虚拟现实工作平台是未来的研究方向。

参考文献:

- [1] 刘卉芳,曹文洪,秦伟,等. 淤地坝在流域水土保持措施中的贡献研究[J]. 中国农村水利水电, 2011(1):55-58+64.
- [2] 曲 婵,刘万青,刘春春,等. 黄土高原淤地坝研究进展[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6):339-342.
- [3] 刘晓燕,高云飞,王富贵. 黄土高原仍有拦沙能力的淤地坝数量及分布[J]. 人民黄河, 2017, 39(4):1-5+10.
- [4] 张 双. 浅谈淤地坝坝体部分除险加固措施[J]. 甘肃水利水电技术, 2013, 49(7):51-52.
- [5] 山西省水利厅. 山西省黄土高原地区淤地坝坝系工程建设项目后评价[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2014.
- [6] 王俊强,韩宏强,孙建霖. 基于无人机低空摄影高分辨率三维地形景观的实现[J]. 测绘技术装备, 2013, 15

- (4):10-13.
- [7] 李军,李永树,蔡国林. 利用无人机影像制作地震灾区三维景观图[J]. 测绘工程, 2012, 21(1):50-53.
- [8] 魏永强,田大作,吕石生. 基于无人机航测技术的洪水演进三维可视化仿真研究[J]. 中国防汛抗旱, 2016, 26(4):39-42.
- [9] 袁艳斌,袁晓辉,张勇传,等. 洪水演进三维模拟仿真系统可视化研究[J]. 山地学报, 2002, 20(1):103-107.
- [10] 唐震,李勇,茅昌平,等. 基于 ArcGIS Engine 的洪水淹没模拟系统构建[J]. 人民长江, 2016, 47(S2):1-3+51.
- [11] 罗云. 基于 ArcGIS Engine 的洪水淹没三维可视化研究[J]. 科技信息, 2012(33):126-127.
- [12] 何原荣,徐礼来,江源通. 基于真实三维场景的水利工程溃坝模拟[J]. 世界地震工程, 2015, 31(3):33-38.
- [13] 成鹏,陈蓓青. 3ds max 在荆江分洪区分洪演示系统中的运用[J]. 人民长江, 2005, 36(1):38-39.
- [14] 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.
- [15] 高学平,唐朝阳,张晨. 大型景观湖三维仿真演示研究[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(4):756-759+784.
- [16] 段菊卿,王逸冰. 黄土高原地区淤地坝防洪安全分析[J]. 中国水利, 2003(17):47+46.
- [17] 王银山,王英顺,田安民. 淤地坝运行管理技术手册[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2013.
- [18] 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(s1):31-35.
- [19] 陈生水,徐光明,钟启明,等. 土石坝溃坝离心模型试验系统研制及应用[J]. 水利学报, 2012, 43(2):241-245.
- [20] Fread D L. Dam - Breach Floods [M]// Hydrology of Disasters. Springer Netherlands, 1996:85-126.
- [21] Chen Zuyu, Ma Liqiu, Yu Shu, et al. Back Analysis of the Draining Process of the Tangjiashan Barrier Lake[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 141(4):05014011-1-14.
- [22] 方贵盛,潘志庚. 水体虚拟仿真与应用综述[J]. 计算机仿真, 2012, 29(10):30-33+361.

喜 讯

《水资源与水工程学报》被中国科学引文数据库(Chinese Science Citation Database, 简称 CSCD)收录为 2017-2018 年度来源期刊。2017 年又被中国科学评价中心(RCCE)、武汉大学图书馆和中国科教评价网联合完成的第五版《中国学术期刊评价报告(2017-2018)》评价为 A 类核心期刊。