

# 基于无人机技术与数学模型的 蓄滞洪区洪水演进分析

朱 昊<sup>1</sup>, 张 引<sup>2</sup>, 王茂枚<sup>1</sup>, 鲁 伟<sup>3</sup>, 徐 毅<sup>1</sup>

(1. 江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017; 2. 张家港市水利局, 江苏 苏州 215699;

3. 徐州市水利工程建设有限公司, 江苏 徐州 221006)

**摘要:**蓄滞洪区是防洪减灾体系中的重要组成部分,研究蓄滞洪区破口后洪水演进过程对灾害避险规划以及保障工程安全具有重要意义。基于无人机倾斜摄影技术快速获取研究区域密集点云数据并构建三维模型,利用高精度DEM数据构建二维水动力数学模型,对洪水影响区各处的洪水到达时间、水位变化过程、淹没深度、淹没面积进行比较分析。

**关键词:**无人机;蓄滞洪区;数学模型;洪水演进

中图分类号:TV122

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2023)06-0049-0005

## Analysis on flood routing in flood storage and detention area based on UAV and mathematical model

ZHU Hao<sup>1</sup>, ZHANG Yin<sup>2</sup>, WANG Maomei<sup>1</sup>, LU Wei<sup>3</sup>, XU Yi<sup>1</sup>

(1. Jiangsu Hydraulic Research Institute, Nanjing 210017, China;

2. Zhangjiagang Water Conservancy Bureau, Suzhou 215669, China;

3. Xuzhou Water Conservancy Construction Co., Ltd., Xuzhou 221006, China)

**Abstract:** The flood storage and detention area is an important component of the flood control and disaster reduction system. Studying the flood evolution process after the breach of the flood storage and detention area is of great significance for risk avoidance planning and ensuring engineering safety. Based on unmanned aerial vehicle tilt photography technology, dense point cloud data in the research area is obtained quickly and a three-dimensional model is constructed. High precision DEM data is used to construct a two-dimensional hydrodynamic mathematical model, and comparative analysis is conducted on the flood arrival time, water level change process, inundation depth, and inundation area in various flood affected areas.

**Key words:** unmanned air vehicle; flood storage and detention area; mathematical model; flood routing

## 1 研究背景

蓄滞洪区是防洪减灾体系中的重要组成部分,适时启用蓄滞洪区削减洪峰、分蓄洪水是保障下游和防洪重点保护区域安全的有效措施。为做好防

洪减灾工作,需要高度重视防洪规划、防洪减灾工程建设与非工程措施部署。其中,洪水演进模拟是非工程措施的重要组成部分,是洪水风险分析、洪水风险图绘制的重要依据<sup>[1-3]</sup>。

国内外众多学者针对洪水演进开展数值模拟

收稿日期: 2023-04-06

基金项目: 江苏省水利科技项目(2021074);江苏省水利科技项目(2020007);常州市科技计划项目(CJ20220113)

作者简介: 朱昊(1989—),男,博士,主要从事河湖系统治理与保护研究。E-mail:592382399@qq.com

研究<sup>[4-7]</sup>。赵琳等<sup>[8]</sup>采用一维、二维耦合的水动力模型概化了河网及防洪保护区,模拟了超标准洪水下洪水演进参数,为风险分析、防洪调度、洪灾避险提供了参考依据;Tao等<sup>[9]</sup>利用显式有限差分模型,较好地处理了非线性项的问题;李大鸣等<sup>[10]</sup>采用有限体积法建立了天津淀北洪水演进数学模型,计算了工程建设对洪水演进过程的影响作用;王欣等<sup>[11]</sup>基于MIKE FLOOD模型对溃坝洪水演进过程进行仿真模拟,对不同工况及不同溃坝方式下库区水体变化特征进行分析。近年来,无人机及其他相关产品的成熟完善,给现代防汛抗旱抢险工作提供了更高效精确的选择<sup>[12]</sup>。例如,Cobby等<sup>[13]</sup>根据从空中获得的植被和地形特征分解建立了扩散方程的有限元模型,从而模拟了二维洪水演进过程。如何将无人机倾斜摄影测量与洪水演进数值模拟技术相结合,应用于洪涝灾害的应对与服务决策,具有较强的现实意义。

为此,本文在实验区内执行地面控制测量方案,利用无人机采集区域影像数据,根据获得的控制点数据以及影像数据,采用空三加密及多视角影像密集匹配获得密集点云,最后通过点云滤波生成DEM数据,以高精度DEM数据为基础运用Delft 3D软件构建二维水动力学模型,并进行了洪水淹没模拟分析,对蓄滞洪区各处的洪水到达时间、水位变化过程、淹没深度、淹没面积进行比较分析,得到实验区洪水演进的时空分布,为蓄滞洪区的调度管理提供决策依据。

## 1 基于无人机倾斜影像的三维重建

### 1.1 区域概况

本文选择紧邻洪泽湖的实验区进行模拟研究,该区域位于江苏省西北部,淮河下游的泗洪县东部,洪泽湖西岸。测区三面环水,内部有水道贯通洪泽湖,整体呈东西方向狭向分布。东西方向长度约3 km,南北方向长度约1.3 km,总面积约4 km<sup>2</sup>。测区内主要地物为水塘、农田,有少量低层建筑。

### 1.2 测量方案

像控点布置:根据地面控制测量像控点布设原则,实验共布设59个像控点,分布在地势平坦区域,并选在旁向重叠中线附近,避开砖窑烟囱、垃圾桶、电线杆等地面明显凸起物。

像片控制测量:使用GPS-RTK技术获取像控点的三维坐标,用于倾斜摄影测量的绝对平差。

本文三维建模采用Smart 3D软件,该系统是一

套基于图形处理器GPU,在无人为干涉的情况下,快速高效地制作能真实还原实景的三维模型。该软件支持多种数据格式输出,可自由导入各种平台并能进行三维模型的编辑修改工作。

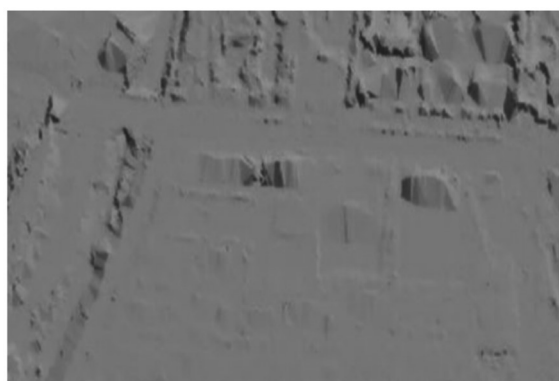
### 1.3 地形数字高程模型构建

通过相关软件自动生成地面点云,自动化空三加密完成后可在3D View中可视化显示解算成果,多次提交空三加密后可生成三维模型。通过影像密集匹配获得地表点云构建DEM,需要剔除点云中地物脚点。

通过相关软件自动生成地面点云,建立Block文件导入Smart 3D软件,检查照片组是否存在影像丢失,在3D View中查看影像点的排列,将飘离在序列外的点直接删除。数据载入之后,系统进行影像特征点提取,同名特征点匹配,采用光束法区域网平差解算出影像外方位元素,通过前方交会计算出加密点的地面坐标。自动化空三加密完成后可在3D View中可视化显示解算成果,多次提交空三加密后可生成三维模型。再通过影像密集匹配获得地表点云构建DEM,需要剔除点云中地物脚点。本文采用的滤波方法是迭代三角网,首先划分该区域,最小的划分单元的尺寸应大于区域内最大建构物。以高程最低的地面点作为种子点,先建立稀疏三角网,计算点云中其余各点与三角网夹角与距离,若都小于设定的迭代值,则视其为地面点,否则就将其剔除。重复以上迭代,直到不再有新的地面点加入,实现三角网加密的过程,如图1所示。

点云自动滤波后,可能会存在未能过滤的少量粗差点和自动分类错误的点,需进行人工编辑以控制DEM的精度。人工编辑后,利用关键点构建三角网,内插之后将格网转换成栅格数据,即可生成DEM模型。实验区生成的三维模型和DEM模型如图2所示。

从模型的效果看,无人机航摄的测量精度已基本满足水利工程测量的要求,且无人机三维实景建模较传统的建模方法更为高效、更加逼真。但是,该建模方法还存在以下问题:一是对于水域的建模存在空洞,若要完整还原地形,还需结合水下地形测量;二是影像的质量直接影响模型成果的精度,对无人机设备的要求较高,影响飞行效率;三是无人机航拍的影像数据量大,给内业数据处理工作带来诸多不便,大面积区域的影像数据会影响模型输出效率。

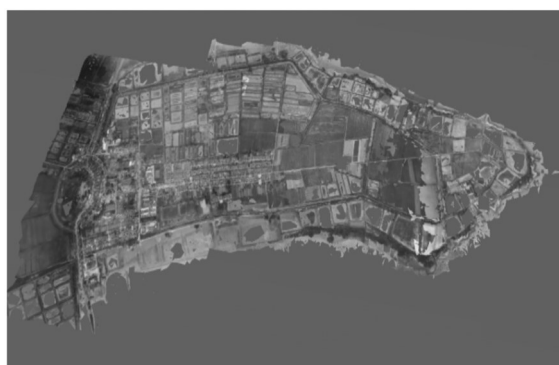


(a) 滤波前



(b) 滤波后

图1 滤波前后对比



(a) 模型预览



(b) 模型细节

图2 模型显示效果

## 2 蓄滞洪区洪水演进数学模型的建立

### 2.1 糙率场的构建

糙率是一个联合多种因素的无因次量,用来表示对水流阻力的影响,是表征河道、岸坡和洪泛区地表影响水流阻力的综合系数,是水力计算的重要灵敏参数,也是水动力数学模型中最重要的参数。糙率的大小取决于边界的表面光滑程度,表面越光滑糙率越小。相对于河道而言,河道的阻水程度与糙率的大小成正比。河道形状、河床组成、河岸类型、河道植被情况等诸多河流地形因数都是影响河道糙率的相关因素。本文根据参考相关试验及文献研究成果<sup>[14-15]</sup>,结合地区地形、地貌和河道实际情况确定初始糙率值如表1所示。最后,根据无人机三维倾斜摄影生成的高精度DEM信息,进行糙率分区。

表1 糙率取值

序号	地形及植被	采用糙率
1	河道	0.018~0.025
2	湖面	0.025~0.033
3	田地	0.075
4	荒草地	0.030
5	林地	0.130
6	绿地	0.040
7	狭长林带	0.130
8	旱地	0.030
9	城区	0.030
10	园地	0.040

### 2.2 水动力基本方程

本文采用的水动力模型控制方程为基于浅水假设以及 Boussines 假设的不可压缩流 Navier-Stokes 方程,其中垂直动量方程基于浅水假设可以忽略垂向加速度,因此可以简化为静压方程。通过合适的边界条件与控制方程组成定解条件,方程在空间上采用有限差分法进行离散,在时间上采用欧拉向前差分法离散。求解变量在网格中交错布置,采用 ADI 交替隐式方法进行求解。将 Navier-Stokes 方程沿水深积分并取平均值可得平面二维连续方程以及动量方程,即浅水方程,以此作为控制方程采用贴体坐标技术,通过坐标转换可得正交曲线坐标系下的 Navier-Stokes 方程。



### 2.3 模型范围及计算条件

研究区域面积约 2.76 km<sup>2</sup>, 根据相关调度规则, 当模拟水位达到 14.5 m 且有上涨趋势时, 周边滞洪区一次性破坏滞洪。利用构建的二维水动力模型<sup>[16]</sup>对滞洪区进行滞洪模拟, 不仅可以得到不同时刻的淹没要素, 还能得到洪水演进过程中的行进路线。

本次模型计算时分洪爆破口设置在远离城镇的东部堤坝上, 此处堤内高程约为 13.7 m, 口门宽 20 m 左右, 设计滞洪水位为 14.5 m, 数模中设置 14.5 m 和 15.0 m 水位进行模拟, 最大模拟时间为 96 h。中部及东部区域高程较大, 基本都在 13~14 m 之间, 接近破口处的高程普遍大于 13.5 m, 这就导致洪水入侵时水头差较小, 洪水入流流量不大, 洪水演进速度相对较缓, 而居民区所在的西部也属于高程较大的区域, 北部大面积区域和最南部区域高程最低, 因此洪水演进将首先从北部和南部区域开始, 最后才会淹没西部和东部。

## 3 计算结果

当模拟水位达到设计滞洪水位 14.5 m 时, 数学模型计算得到研究区域滞洪 96 h 内水位变化过程。图3分别给出了滞洪 1 h、2 h、6 h、12 h、24 h、48 h、72 h、96 h 后的淹没情况。模拟结果表明, 洪水演进过程为由东边破口处水流分为 2 股, 分别向北和西南 2 个方向蔓延, 但是由于中部及东部大片区域高程较高, 北边水流在 1 h 后不再蔓延, 而西南方向水流在 12 h 内淹没南方部分区域, 再从中部向北蔓延。北部及南部大片区域 24 h 后被淹没, 至 48 h 后仅剩中部及东部部分区域未被淹没。

通过模拟计算, 该区域最大淹没面积约为 1.96 km<sup>2</sup>, 最大淹没历时 90 h。随着淹没水深、淹没历时的增大, 淹没面积均相应增大, 且洪水演进路线与地形地貌关系密切。此外, 淹没面积在初始的 12 h 之内增加较快, 12 h 的淹没面积达到 0.76 km<sup>2</sup>, 约占总淹没面积的 38.78%, 此时平均淹没水深为 0.58 m。12~48 h 淹没面积增加速度有所减缓, 这主要和地形有关, 由于东部靠近破口区域地形较高, 淹没水位达到一定高度后才可被淹没, 水流相对行进路线受到限制。同时, 由于淹没水位的逐渐增大, 破口入流流量也会有所减小, 因此淹没面积增加趋势减缓, 且平均淹没水深在 24 h 后增幅变缓。在 48 h 后, 由于淹没水位逐渐增大, 加之地势较低的区域已经基本被淹没, 只剩地势较高的局部区域, 因此淹没面积增加幅度急剧减小, 至 96 h 全部淹没的最终淹没水深为 1.01 m。

当水位达到 15.0 m 时, 数学模型计算得到滞洪 12 h 内水位变化过程(图4)。结果表明, 洪水演进过程为由东边破口处水流分为 2 股, 分别向北和西南 2 个方向蔓延, 与水位 14.5 m 时类似, 中部区域由于高程较大, 最后被淹没, 可以看到当水位提高 0.5 m 后, 淹没速度明显加快, 演进速度提高了数倍。

通过模拟计算, 该区域最大淹没面积约为 1.96 km<sup>2</sup>, 最大淹没历时 12 h。随着淹没水深、淹没历时的增大, 淹没面积均相应增大, 且洪水演进路线与地形地貌关系密切。相比水位为 14.5 m 时, 相同历时下, 洪水淹没面积和淹没水深明显增大, 水位 14.5 m 时需要 12 h 才能淹没 0.72 km<sup>2</sup>, 而 15.0 m 时只需要 2 h 就能淹没该面积, 可见水位的提高对于淹没速度是指数型增长。因此当较大洪水发生

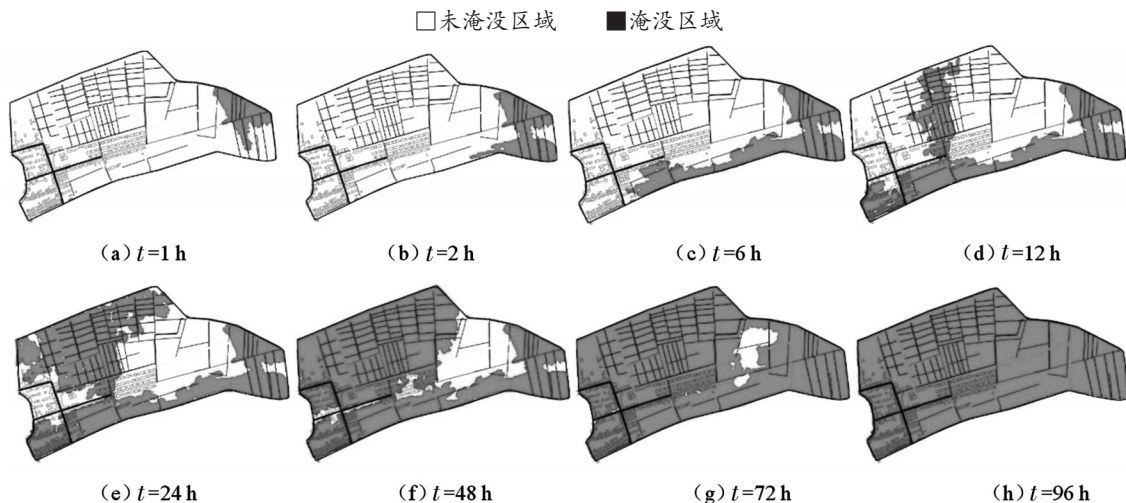


图3 不同洪水历时的淹没范围(14.5 m)

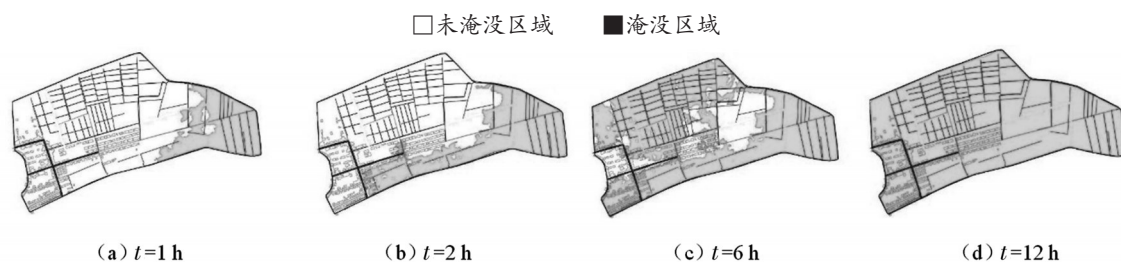


图4 不同洪水历时下淹没范围(15.0 m)

时,在高洪水水位主动破口滞洪时,洪水演进及滞洪区内撤离时间将大大缩短,应在制定滞洪及撤退预案时充分考虑这一点。

## 4 结 语

本文采用无人机倾斜摄影技术采集研究区域影像数据,根据获得的控制点数据以及影像数据获得密集点云,通过点云滤波生成DEM数据,实现了快速获取区域地理信息,解决了由于模型精度问题对后期洪水淹没分析造成的影响。基于高精度DEM构建了洪水演进数值模型,对滞洪区各处的洪水到达时间、水位变化过程、淹没深度、淹没面积进行比较分析,得到滞洪区洪水演进的时空分布。本文是将无人机倾斜摄影技术和水动力数值模拟相结合来进行蓄滞洪区洪水演进分析的一种有益探索,所得成果为蓄滞洪区的洪涝灾情快速监测与分析提供了参考。未来可进一步研究利用无人机遥感技术实时传递影像信息,立体查看地貌、溃口、淹没等情况,结合数值模拟精确预测洪水演进过程,以为决策部门提供有效的灾情预警与辅助决策支持。

### 参考文献:

- [1] 果鹏,夏军强,陈倩,等. 基于力学过程的蓄滞洪区洪水风险评估模型及应用[J]. 水科学进展, 2017, 28(6): 858-867.
- [2] 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.
- [3] 肖玉红,李大鸣,白玲,等. 蓄滞洪区洪水演进过程数值模拟及洪灾损失分析[J]. 中国农村水利水电, 2012(12): 143-147.
- [4] 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.
- [5] 杨志,冯民权. 溃口近区二维数值模拟与溃坝洪水演进耦合[J]. 水利水运工程学报, 2015(1): 8-19.
- [6] 马利平,侯精明,张大伟,等. 耦合溃口演变的二维洪水演进数值模型研究[J]. 水利学报, 2019, 50(10): 1253-1267.
- [7] 吴滨滨,喻海军,穆杰,等. 考虑下渗的河道与蓄滞洪区洪水演进过程模拟[J]. 水资源保护, 2019, 35(6): 68-75.
- [8] 赵琳,李少卿,黄燕. MIKE FLOOD在五泄江漫堤洪水演进模拟中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2018(5): 138-143.
- [9] TAO Z, CUI Z, YU J, et al. Finite difference modelings of groundwater flow for constructing artificial recharge structures[J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2022, 46(2): 1503-1514.
- [10] 李大鸣,范丽虹,胡永文,等. 淀北蓄滞洪区洪水模型及局部冲刷特性的研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(11): 85-91.
- [11] 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.
- [12] 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, 2022(2): 1-16.
- [13] COBBY D M, MASON D C, HORRITT M S, et al. Two-dimensional hydraulic flood modelling using a finite-element mesh decomposed according to vegetation and topographic features derived from airborne scanning laser altimetry[J]. Hydrological Processes, 2003, 17(10): 1979-2000.
- [14] 蒋水华,黄中发,黄劲松,等. 蓄滞洪区洪水演进模拟及堤防溃决损失评估方法[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(1): 131-139.
- [15] 王扬,黄本胜,倪培桐,等. 韩江南北堤防洪保护区溃坝洪水演进数值模拟研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(5): 175-179.
- [16] 吴娟,林荷娟,姜桂花,等. 太湖流域超标特大洪水风险预警系统建设及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 164-170.