

中文引用格式:吴立舟,李华,张鹏,等. 实景三维数据下城市洪涝模拟及风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(5): 237-245.

英文引用格式:WU Lizhou, LI Hua, ZHANG Peng, et al. Simulation and risk assessment of urban flooding under realistic 3D data[J].

China Safety Science Journal, 2025, 35(5): 237-245.

实景三维数据下城市洪涝模拟及风险评估*

吴立舟¹, 李华^{**1}副教授, 张鹏¹, 钱虹燕², 康飞³, 谭光丽⁴

(1 西安建筑科技大学 资源工程学院, 陕西 西安 710055; 2 镇巴县青水镇人民政府, 陕西 汉中 723600; 3 镇巴县应急管理局, 陕西 汉中 723600; 4 镇巴县气象局, 陕西 汉中 723600)

中图分类号: X915.5

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.05.0622

资助项目: 2024 年西安建筑科技大学本科生科研训练全覆盖计划项目(202410)。

【摘要】 为提高城市洪涝灾害防范和减灾能力, 以镇巴县为例, 探讨洪涝灾害的耦合成灾过程及风险评估方法。通过分析近年来降雨数据和洪涝灾害统计, 揭示该地区洪涝灾害的频发和严重性, 以及对经济社会造成的巨大损失。利用无人机技术获取高精度地形数据, 并结合土壤和水评估工具(SWAT)进行洪涝模拟, 提供准确灾害数据支持。构建基于多要素风险评估矩阵, 通过归一化处理得到综合洪涝风险指数。风险评估结果显示: 确认 14 个Ⅳ级风险区域, 且模型模拟结果与实际情况吻合度高。研究结果表明: 所构建的耦合成灾模拟与风险评估方法能较为准确地识别高风险区域。针对高风险区域提出有效应对措施, 包括提升防洪能力、加强监测预警、开展灾害宣传教育以及加强土地规划管理。

【关键词】 实景三维; 城市洪涝; 风险评估; 无人机; 土壤和水评估工具(SWAT)

Simulation and risk assessment of urban flooding under realistic 3D data

WU Lizhou¹, LI Hua¹, ZHANG Peng¹, QIAN Hongyan², KANG Fei³, TAN Guangli⁴

(1 School of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an Shaanxi 710055, China; 2 Zhenba County Qingshui Town People's Government, Hanzhong Shaanxi 723600, China; 3 Zhenba County Emergency Management Bureau, Hanzhong Shaanxi 723600, China; 4 Zhenba County meteorological Bureau, Hanzhong Shaanxi 723600, China)

Abstract: In order to enhance the capacity of urban flood prevention and disaster reduction, taking Zhenba County as an example, this paper explores the coupled disaster formation process and risk assessment methods of flood disasters. By analyzing the rainfall data and flood disaster statistics in recent years, the frequent occurrence and severity of flood disasters in this area as well as the huge losses they have caused to the economy and society were revealed. High-precision terrain data was obtained through unmanned aerial vehicle technology and combined with the SWAT for flood simulation, providing accurate disaster data support. A multi-factor risk assessment matrix was constructed, and the comprehensive flood

* 文章编号: 1003-3033(2025)05-0237-09; 收稿日期: 2025-01-11; 修稿日期: 2025-03-17

** 通信作者: 李华(1979—), 女, 陕西西安人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事企业风险评估与安全管理、建筑安全监测与监控、公共安全与应急管理等方面的研究。E-mail: lihua@xauat.edu.cn。

risk index was obtained through normalization processing. The risk assessment results show that 14 areas with grade IV risks are identified, and the simulation results of the model are highly consistent with the actual situation. The research results indicate that the constructed coupled disaster formation simulation and risk assessment method can accurately identify high-risk areas. Effective countermeasures are proposed for high-risk areas, including improving flood control capacity, strengthening monitoring and early warning, conducting disaster prevention and education, and strengthening land planning and management.

Keywords: 3D reality modeling; urban flooding; risk assessment; unmanned aerial vehicle; soil and water assessment tool(SWAT)

0 引言

洪涝灾害已成为全球城市面临的重要挑战,随着气候变化,暴雨频发,严重影响城市建设和居民生活,造成巨大的经济损失。研究洪涝灾害成因和防灾减灾措施,对应对这一挑战具有重要意义。

实景三维作为数字中国建设的核心基础设施,通过实现数字与现实空间互联互通,为数字政府和经济提供支撑^[1]。程刚等^[2]提出的滑坡隐患识别与监测预警方法对灾害预测起到了重要作用。倾斜三维模型凭借高精度和真实纹理,广泛应用于数字城市建设^[3]。无人机倾斜摄影技术相较传统遥感技术,具有高效、低成本和高精度优势,能快速生成满足灾后需求的三维模型^[4-5]。肖本夫等^[6]利用航拍影像生成高分辨率正射影像和三维模型,展示出地震重灾区的建筑破坏及周边环境;彭仪普等^[1]通过构建高精度桥梁三维点云模型,检测桥梁病害并绘制桥梁线形;刘军等^[7]利用数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据提取赵家岸滑坡地形参数,推动地理信息科学发展;ZHANG Wen 等^[8]研究了岩质边坡裂隙形态对三维裂隙网络建模的影响;黄晶等^[9]基于场所空间单元构建洪涝灾害风险评估模型,模拟不同预警策略下居民出行响应,评估其有效性^[10]。基于实景三维、倾斜摄影和地理信息技术的灾害识别、监测和风险评估方法取得了明显进展,但在实时监测和预警仍存在局限性。

鉴于此,笔者拟结合无人机技术和土壤和水评估工具(Soil and Water Assessment Tool, SWAT),利用无人机倾斜摄影获取高精度地形数据,生成详细的实景三维数据模型,引入基于多要素风险评估矩阵的洪涝风险评估方法,综合考虑地形、降雨量、土壤含水量等因素,生成洪涝风险指数。同时,优化无人机应用方案,提高数据采集效率和空间分辨率,支持灾后应急响应。以镇巴县洪涝灾害为例,揭示该地区洪涝灾害的形成机制,以期防灾减灾提供理

论与实践参考。

1 研究区概况及数据

1.1 研究区概况

镇巴县位于陕西省汉中市,地形复杂,涵盖高山、深谷、陡坡和沟床,易引发洪涝灾害(图1)。该区域洪水灾害频发,严重影响城市建设和居民生活。

从镇巴县气象局获取近5年(每年6月1日—10月1日)汛期的24 h降雨数据。该地区夏季降雨量大且集中,易引发山洪和泥石流。根据镇巴县气象局和应急管理局提供的近3年降雨及洪涝统计数据(表1),暴雨及其引发的灾害频繁发生,造成重大损失。

表1 镇巴县2021—2023年洪涝灾害统计情况
Table 1 Statistics of flood disasters in Zhenba county from 2021 to 2023

年份	暴雨天气/次	暴雨天数	洪涝灾害上报次数	全年洪涝灾害直接经济损失/万元
2021	15	29	10	166 145. 109
2022	8	14	6	54 716. 485
2023	12	16	6	94 936. 860

1.2 数据收集与处理

数据收集主要包括研究区高精度无人机建模数据、土壤数据、气象数据、河流路网数据和12.5 m DEM数据。

1) 通过无人机搭载DJI FC3411进行现场拍摄,记录飞行轨迹和拍摄参数,用于后期地图配准和地物提取。

2) 土壤数据使用联合国粮食及农业组织的Harmonized World Soil Database v1. 2,提供全球土壤属性、分类和水分等信息,支持土壤和水资源管理。

3) 气象数据使用加拿大圭尔夫大学和当地气象局提供的2013—2023年数据集,涵盖降雨量、温度、湿度等参数,用于气候模拟和洪涝分析。

4) 河流路网数据来自中国科学院的河流路网

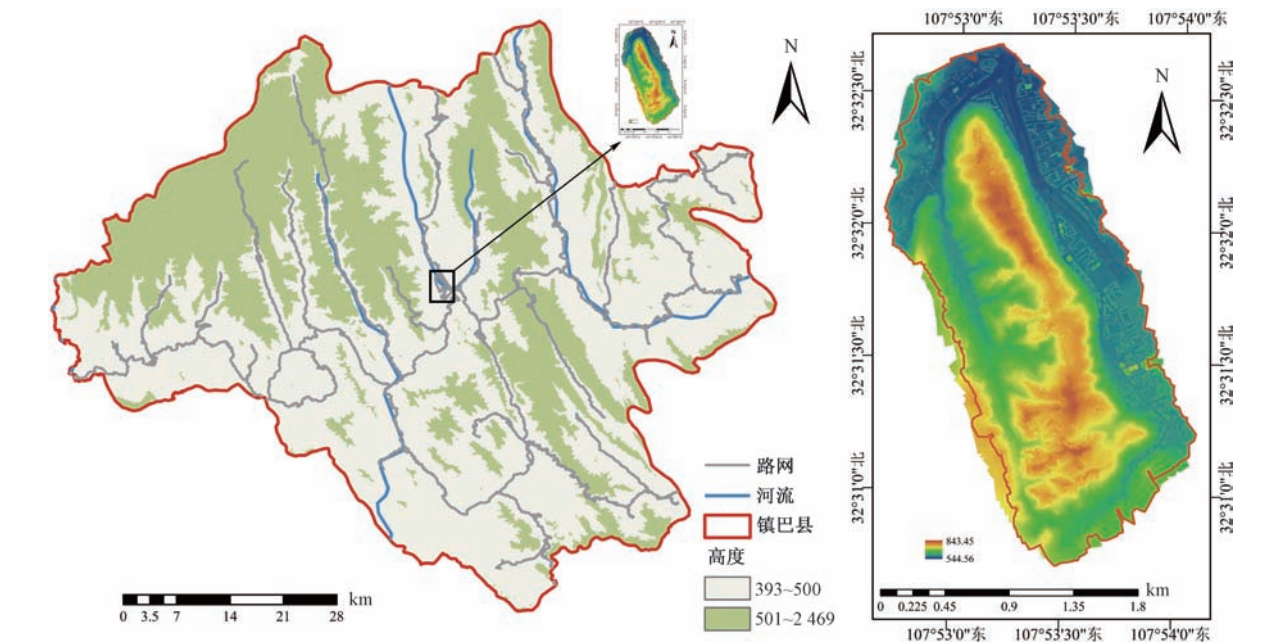


图 1 研究区域范围

Fig. 1 Scope of study area

数据,包含河流流向、流量、河道长度等信息,如图 1 所示。

5) 12.5 m DEM 数据使用阿拉斯加太空设备公司提供的高程数据,用于地形分析和水文模拟,如图 1 所示。

研究流程包括数据收集、无人机倾斜摄影建模、洪涝模拟仿真和综合风险评估方法。洪涝模拟及风险评估流程如图 2 所示。

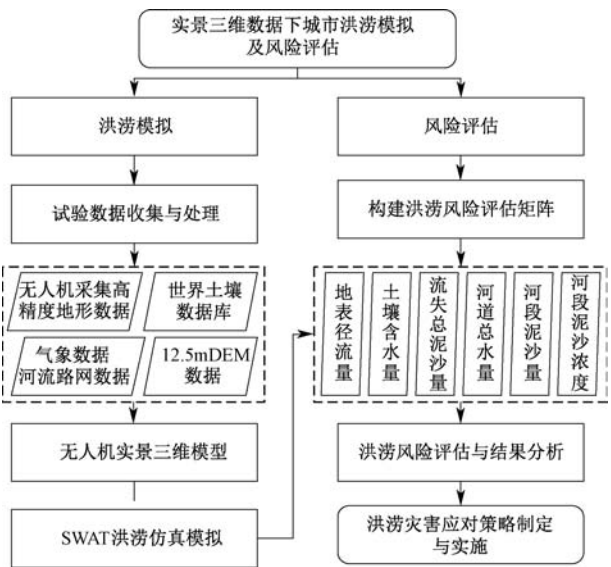


图 2 城市洪涝模拟及风险评估流程

Fig. 2 Urban flood simulation and risk assessment process

1.3 无人机实景三维建模

根据《低空数字航摄与数据处理规范》(GB/T 39612—2020)的要求,针对陡峭山区,需适当增加航线重叠度,以提高图像精度和覆盖度,同时考虑地形条件和飞行效率。

随着传感器技术的进步和需求的多样化,新的航空摄影测量技术在复杂场景中的三维重建中表现出更高的适用性和精度^[11]。LI Yuan 等^[12]通过 ContextCapture 技术获取无人机影像的时间、高度、地理坐标、拍摄方向和俯仰角等信息,从而精确确定模型中像素点的属性。山区勘察的无人机倾斜摄影和建模作业流程分为外业图像采集和内业三维模型构建,如图 3 所示。外业作业包含目标区域的评估、采集方案选择、航线规划及设备参数设置。内业则侧重三维模型构建,通过空中三角测量和近地补充摄影来提升模型的精度。

2 实景三维数据下城市洪涝模拟

2.1 实景三维模型构建

姜佩奇等^[13]指出,洪水演进的准确性与 DEM 精度密切相关。基于重建 DEM 设计洪水与校核洪水模拟显示,模拟结果与原始地形数据高度吻合,能够准确反映真实地形。由于测试区域较大且无人机续航有限,区域被划分为 11 个区块进行测绘,总面积为 2 176 265 m²,覆盖整个测试范围,共采集

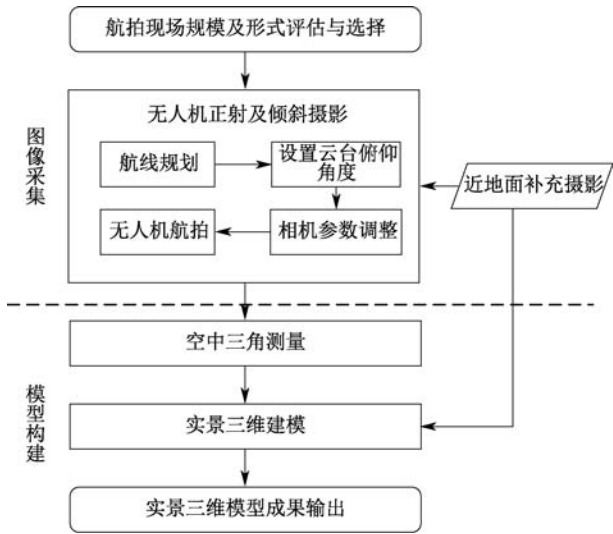


图3 无人机摄影及建模作业流程

Fig. 3 UAV photography and modeling process

2 249 张符合建模要求的照片。空中三角测量结果的分辨率范围为 0.034 7~0.154 2 m/px,中位值为 0.084 7 m/px,满足高精度空间定位需求。

针对试验区拍摄的 2 249 张图片,使用 Agisoft Metashape 进行照片对齐。基于最新的多视图立体匹配、运动恢复和结构算法,,导出相机参数(XML 格式)。并将这些数据导入 ContextCapture,并提交生产项目。

2.2 SWAT 模拟方法

SWAT 被广泛用于模拟流域水文模型,评估土地利用变化、土壤管理实践以及气候变化对水文循环和水资源的影响。其模拟结果可用于洪涝风险评估,并提供分析数据。洪涝自然灾害仿真遵循水文循环、地表径流和土壤含水量等公式。这些公式构成 SWAT 模拟的基础,具体如下:

1) 水文循环公式如下:

$$W_t = W_0 + \sum_{i=1}^t (R_d - Q_s - E_a - W_s - Q_g)_i \quad (1)$$

式中: W_t 为最终土壤含水量,mm; W_0 为初始土壤含水量,mm; t 为计算时长,d; R_d 为日降雨量,mm; Q_s 为日地表径流量,mm; E_a 为日蒸发散发量,mm; W_s 为土壤剖面日侧向渗流和渗漏量,mm; Q_g 为日地下径流量,mm。

2) SWAT 模型采用径流曲线法 (Soil Conservation Service, SCS) 计算。SCS 模型的降雨-径流基本关系表达式为

$$Q = \begin{cases} \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} & P \geq 0.2S \\ 0 & P \leq 0.2S \end{cases} \quad (2)$$

式中: P 为降水量,mm; S 为流域降雨前的最大可能入渗量,mm; Q 为实际径流量 mm

3) 土壤侧向流计算公式为

$$Q_1 = 0.024 \times \frac{2 \times W_e \cdot K_s \cdot G}{\Phi \cdot L_h} \quad (3)$$

式中: W_e 为土壤饱和区内可流出的水量,mm; K_s 为土壤饱和导水率,mm/h; G 为坡度; Φ 为土壤层总孔隙度; L_h 为山坡坡长,m; Q_1 为侧向流流量,mm/d。

利用 SWAT 模型模拟流域水文过程,考虑地形、土壤、土地利用和气象数据。地形参数通过 DEM 提取,影响水流路径和速度;土壤参数结合数据库和实地调查,描述水分运移和下渗;土地利用通过遥感和图确定,影响地表径流和蒸散发;气象参数由气象站提供,驱动水文模拟。精确的参数设置使 SWAT 模型有效模拟不同降雨情景,为流域管理和水资源规划提供科学依据。

2.3 SWAT 模拟结果

采用八向倾点算法 (D-8) 识别地表水流路径并绘制流域区域。该算法基于最陡坡度法确定水流流向,并通过自下而上的方式处理平坦和凹陷地形,确保流域完整性。假设地表不透水且降雨均匀,水流始终朝最低点流动。在处理 3×3DEM 栅格时,水流被限定为 8 个方向,依据栅格中心点的距离权重差选择流向。填充凹陷后,水势波动和流向分布得到明确。

利用 SWAT 模型详细模拟和分析镇巴县的洪涝灾害。图 4 展示模拟结果的各项指标,包括地表径流、土壤含水量、总泥沙流失量、河道总水量,以及各河段的泥沙量和质量浓度。

在 59 号流域中,地表径流量达到峰值 18.429 mm,表明雨水集中流出。而 28 号流域的径流量相对较低,为 17.164 mm。土壤含水量上,59 号流域达到 128.875 mm,显示该地区土壤高度饱和;相比之下,28 号流域的含水量稍低,为 127.816 mm。79 号流域经历显著的雨水侵蚀,导致总泥沙流失量达到 0.101 t/ha,而 59 号流域的泥沙流失为 0,反映出较轻微的侵蚀情况。

在河道水量方面,5 号流域积水最显著,总水量为 348.902 mm,而 59 号流域较少,仅有 156.83 mm,受地形因素影响。泥沙量的最高值出现在 1 号流域,为 27.81 t,原因是植被稀少导致土壤易被侵蚀。相比之下,125 号流域的泥沙量仅为 0.030 4 t,土壤保持良好。泥沙质量浓度在 23 号流域最高,达 17.65 mg/kg,主要由土壤侵蚀引起。而 28 号流域的泥沙浓

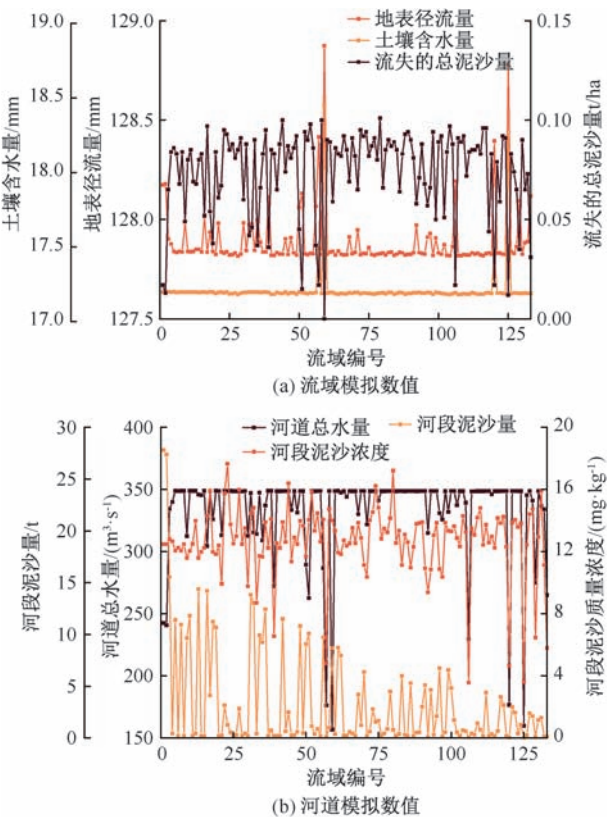


图 4 SWAT 模拟数值结果

Fig. 4 SWAT simulation numerical results

度较低,仅为 3.566 mg/kg,得益于植被覆盖的保护。

地表径流量、土壤含水量、流失总泥沙量、河道总水量以及河段泥沙量和泥沙质量浓度是评估洪涝灾害固有风险的关键要素。图 5 采用自然间断点分级法展示这些要素,具体如下:

- 1) 地表径流量是指雨水通过地表径流流出的量,直接影响洪水的形成和发展。
- 2) 土壤含水量表示土壤中储存的水分量,影响植被生长、农田灌溉以及地表径流。
- 3) 流失的总泥沙量指土地侵蚀导致的泥沙流失总量,反映土地资源流失程度和水土保持需求。
- 4) 河道总水量表示流域内河道的水流量,关系到河流水位、流速及洪水危害的程度。
- 5) 河段泥沙量和泥沙质量浓度,反映河流中的泥沙输移情况,影响河流生态系统和水质。

图 5a 的颜色深浅反映流域内地表水流的汇集程度,北部地区汇流较大。图 5b 的颜色越深表示雨水储存量越大,主要集中在山脚下和坡度较小的区域。图 5c 的颜色越深表示泥沙流失越严重,主要集中在坡度较陡的地区。图 5d 中,河道线条越粗表示水量越大,反映降水汇集情况。图 5e 和图 5f 的线条越粗,表示该河段泥沙含量和质量浓度较高,呈现

由北至南的分布趋势。

3 城市洪涝风险评估

3.1 城市洪涝风险评估方法

城市洪涝风险评估是综合评价洪涝灾害可能性和严重性的过程,旨在确定潜在的洪涝风险区域,并为灾害管理和应对措施制定提供科学依据。采用基于 6 个要素(地表径流量、土壤含水量、流失的总泥沙量、河道总水量、河段泥沙量和泥沙质量浓度)的洪涝风险评估方法。研究构建一个 133 行 6 列的风险系数矩阵,如下式所示。其中,行表示 133 个不同流域,列表示 6 类风险因素,通过矩阵综合评估各流域的洪涝风险。

$$X = [a_{ij}]_{133 \times 6} \tag{4}$$

首先,归一化处理模拟得到的地表径流量、土壤含水量、流失的总泥沙量、河道总水量、河段泥沙量和泥沙质量浓度等实际数值。该步骤的目的是消除不同指标之间的量纲和数值差异,使各指标具有可比性。采用自然间断点分级法归类数据,从而更好地反映数据的内在特征和分布特征。

数据归一化后,按照一定权重将各个指标叠加在一起,得到综合洪涝风险指数。在叠加过程中,依据各指标的重要性和影响程度确定权重,确保综合指数能准确反映洪涝风险的综合情况。根据综合洪涝风险指数的大小,将研究区域划分为不同的风险区域,如高风险区、中风险区、低风险区和较低风险区。综合洪涝风险指数如下式:

$$\tilde{X} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^{133} a_{ij}} \tag{5}$$

流域编号与城市洪涝灾害风险等级如图 6 所示,通过以上步骤全面评估研究区洪涝灾害的固有风险。

3.2 城市洪涝灾害风险评估分析

在洪涝风险评估分析中,采用自然间断点分级法对比分析模拟结果与实地情况,有助于更好地理解洪涝灾害的风险分布情况。选择 34 和 48 这 2 个流域进行分析,帮助确定这些区域的洪涝风险等级,并比较它们之间的差异。

洪涝风险评估与现场验证如图 7 所示。固有危险等级分布图通过颜色深浅和符号表示不同风险等级的区域,直观展现洪涝风险的分布情况。基于模拟结果计算得到洪涝风险指数,将研究区域划分为

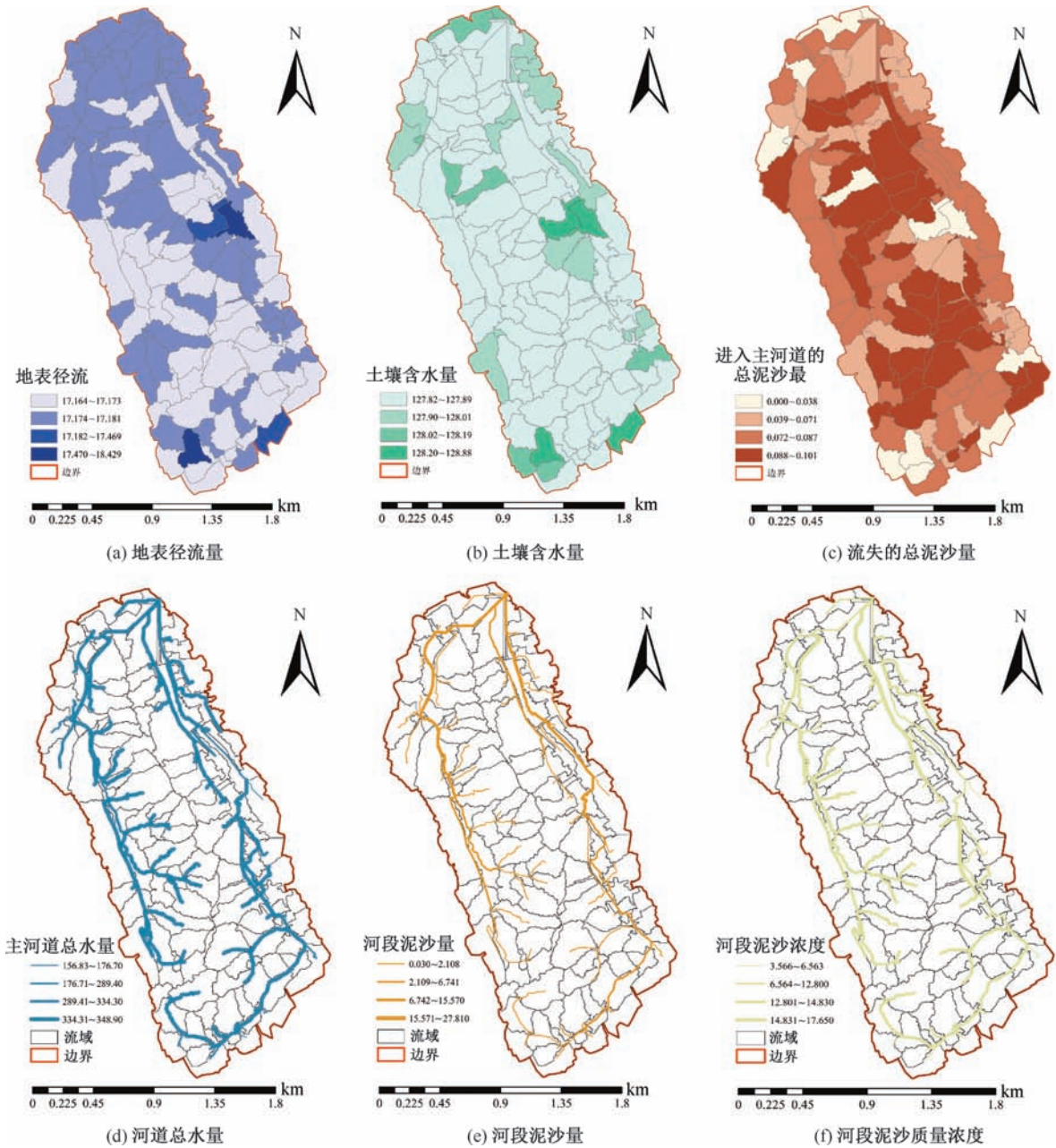


图 5 SWAT 降雨模拟结果
Fig. 5 SWAT rainfall simulation results

I、II、III和IV风险区。

对比分析模拟结果与真实结果,能够评估模型的准确性和可靠性,验证模拟结果的有效性。在实际情况下,对比模拟得到的固有危险等级分布图与真实的洪涝灾害历史数据,能够分析它们之间的一致性 & 差异性。这种对比分析有助于发现模型可能存在的偏差或不足之处。

34A 号和 48B 号流域分别发生滑坡及泥石流灾害。通过对比分析,发现这 2 个流域的模拟结果与真实结果之间存在较高的一致性,表明模型具有较高的准确性和可靠性。34A 号和 48B 号流域的模拟

结果见表 2,表明该模型能够为洪涝灾害的风险评估提供可靠依据。根据固有危险等级分布图的结果,结合实际情况,可制定相应的灾害管理和应对措施。特别是要重点加强对高风险区域的监测和防范工作,以减少洪涝灾害对社会经济的影响。

表 2 风险区域模拟数值表

Table 2 Numerical table of simulated risk areas		
风险因素类型	34A	48B
地表径流量/mm	17.18	17.175
土壤含水量/mm	127.845	127.832
流失总泥沙量/(t·ha ⁻¹)	0.09	0.086

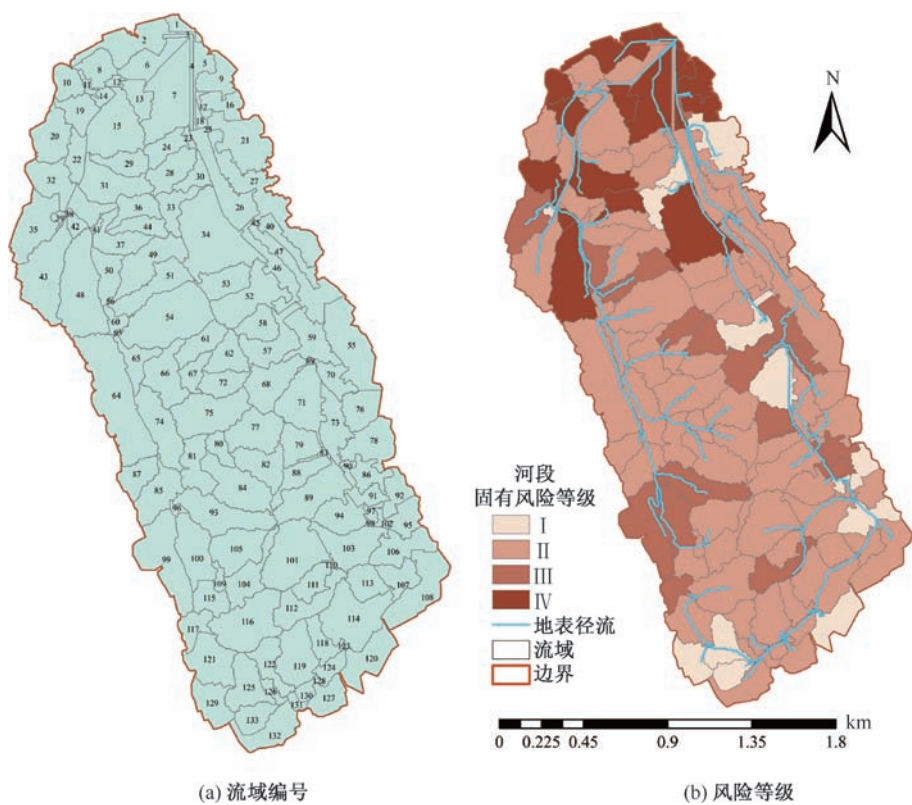


图 6 流域编号与城市洪涝灾害风险等级

Fig. 6 Watershed numbering and flood risk grade map

续表 2

风险因素类型	34A	48B
河道总水量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	347. 431	348. 765
河段泥沙量/t	9. 945	10. 82
河段泥沙质量浓度/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	11. 72	13. 99
风险等级	IV	IV

3.3 城市洪涝灾害应对措施

在确定高风险区域后,需要采取一系列的洪涝灾害应对措施,以减少其对社会经济的影响。这些措施主要包括:

1) 提升防洪能力。根据流域的地形和水文特征,加强堤坝、河堤、河道加固及防洪闸门等设施建 设,有效控制河流水位,减轻洪水冲击。对 34A 号 和 48B 号等高风险流域,重点升级排水系统,清理 河道和疏通排水渠,提高水流畅通能力,减少滞水带 来的洪涝风险。加强对易涝地区的防洪投入,确保 暴雨袭击时能够有效应对。

2) 加强监测预警。建设完善的实时监测网络, 涵盖降雨量、河流水位、泥沙含量等关键监测点,实 时采集数据,科学评估洪水风险。结合历史洪灾数 据,制定不同洪水等级的警戒线和应急响应方案,确 保及时发布预警信息,并迅速启动应急响应机制。

3) 开展灾害宣传教育。基于风险评估结果,制 作洪水防范知识宣传资料(如海报、手册、视频等), 提高居民的防洪意识和应急能力。通过讲座、研讨 会等形式向社区居民普及防洪知识,并定期组织应 急演练,模拟洪水灾害时的应急响应,增强居民的 应急能力和团队协作精神。

4) 加强土地规划管理。结合流域水文特征和 历史洪灾数据,建立洪水风险评估体系,制定合理的 土地利用规划,明确洪水易发区和安全区的范围,并 限制高风险区域的开发。强化河道周边土地利用的 管控,保护生态系统,提高洪水排放能力。建立有效 的监督检查机制,确保土地规划的执行,提高洪涝灾 害的防控能力。

4 结 论

1) 通过洪涝模拟数据分析发现,地形、降水强 度和土地利用结构等因素影响洪涝灾害的严重程度。 模拟结果显示,不同流域的地表径流量差异显著,土 壤含水量高的地区导致径流增加。这表明洪 涝灾害具有复杂性,需综合评估多因素。

2) 创新性地运用无人机技术获取高精度地形 数据,结合 SWAT 工具进行洪涝模拟,结果为灾害

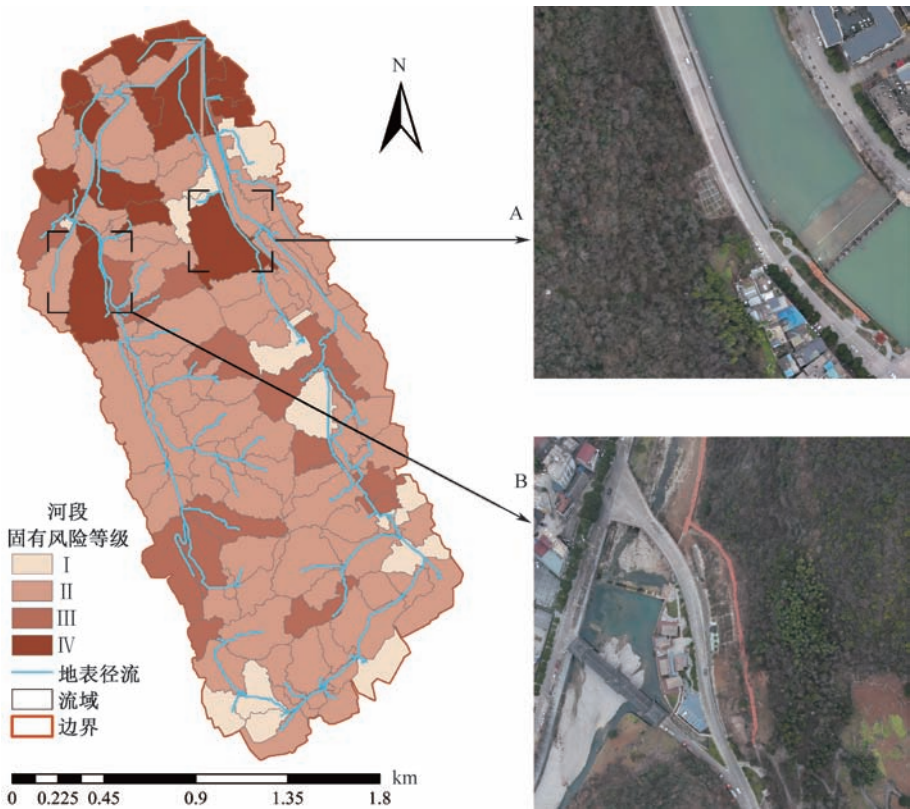


图 7 洪涝风险评估与现场验证

Fig. 7 Flood risk assessment and field verification diagram

预防提供可靠数据支持。基于 SWAT 模拟,提出提升防洪能力、加强监测预警、开展灾害宣传教育等防灾措施。

3) 建议加强城市排水系统建设、优化地表覆盖类型并提升土壤渗透性,减少洪涝风险。同时,加强

降水监测和预警,提高城市应对灾害的能力。研究重点分析山区城市洪涝灾害的地形和降雨特征,提出新的分析方法。通过揭示这些因素对洪涝灾害的影响,未来将扩展分析范围,纳入其他因素,提升洪涝灾害风险评估的准确性。

参 考 文 献

[1] 彭仪普,李剑,邹魁,等. 地面激光扫描点云与无人机影像点云融合应用[J]. 铁道科学与工程学报,2024,21(7): 2 804-2 814.
PENG Yipu,LI Jian,ZOU Kui, et al. Integration application of terrestrial laser scanner point clouds and unmanned aerial vehicle image point clouds[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2024,21(7): 2 804-2 814.

[2] 程刚,王振雪,李刚强,等. 滑坡一体化全维度监测预警技术进展与展望[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(1): 105-114.
CHENG Gang,WANG Zhenxue,LI Gangqiang, et al. Progress and prospect of integrated full-dimensional monitoring and early warning technology for landslides[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(1): 105-114.

[3] 王莹,李泽邦,杨彦梅,等. 倾斜三维实景模型与 BIM 模型融合的室内外一体化场景构建[J]. 测绘通报, 2023(增 1): 49-53.
WANG Ying,LI Zebang,YANG Yanmei, et al. Indoor and outdoor integrated scene construction based on integration of tilt 3D scene model and BIM model[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(S1): 49-53.

[4] 郑金子,杨奇,刘君,等. 道路交通事故现场实景三维建模技术研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(增 1): 138-144.

- ZHENG Jinzi, YANG Qi, LIU Jun, et al. Research on 3D real scene reconstruction for road traffic accidents[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(S1): 138–144.
- [5] 罗嘉琦, 帅向华, 李继赓. 基于深度学习的倾斜摄影建筑物表面损毁信息提取[J]. 中国地震, 2023, 39(2): 271–281.
- LUO Jiaqi, SHUAI Xianghua, LI Jigeng. Deep learning-based extraction of destruction information on building surface through oblique photography[J]. Earthquake Research in China, 2023, 39(2): 271–281.
- [6] 肖本夫, 张露露, 陈波, 等. 四川泸县 M_s6.0 地震极震区无人机影像震害分析[J]. 震灾防御技术, 2023, 18(2): 301–308.
- XIAO Benfu, ZHANG Lulu, CHEN Bo, et al. Seismic damage analysis of UAV remote sensing images in the extreme seismic zone of the M_S6.0 earthquake in Luxian, Sichuan[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2023, 18(2): 301–308.
- [7] 刘军, 王磊. 基于无人机倾斜摄影的黄土滑坡调查与危险性评价[J]. 水土保持通报, 2023, 43(2): 139–147.
- LIU Jun, WANG Lei. Investigation and risk assessment of a loess landslide based on UAV tilt photogrammetry[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(2): 139–147.
- [8] ZHANG Wen, WEI Ming, ZHANG Ying, et al. Discontinuity development patterns and the challenges for 3D discrete fracture network modeling on complicated exposed rock surfaces[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2024, 16(6): 2154–2171.
- [9] 黄晶, 王子勃, 戴强, 等. 考虑人群活动的城市场所洪涝灾害风险动态评估: 以深圳市为例[J]. 地理科学, 2024, 44(4): 711–720.
- HUANG Jing, WANG Ziqing, DAI Qiang, et al. Dynamic assessment of flood disaster risk in urban places considering crowd activities: a case study in Shenzhen, China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2024, 44(4): 711–720.
- [10] 黄晶, 蔡思琴, 庞甜甜, 等. 基于主体建模的城市暴雨洪涝灾害预警策略仿真研究[J]. 地球信息科学学报, 2024, 26(5): 1151–1165.
- HUANG Jing, CAI Siqin, PANG Tiantian, et al. Agent-based modelling of urban rainstorm flood disaster early warning strategy simulation[J]. Journal of Geo-information Science, 2024, 26(5): 1151–1165.
- [11] 张力, 刘玉轩, 孙洋杰, 等. 数字航空摄影三维重建理论与技术发展综述[J]. 测绘学报, 2022, 51(7): 1437–1457.
- ZHANG Li, LIU Yuxuan, SUN Yangjie, et al. A review of developments in the theory and technology of three-dimensional reconstruction in digital aerial photogrammetry[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(7): 1437–1457.
- [12] LI Yuan, YANG Mengsheng, BAI Huanxia, et al. A novel outdoor thermal comfort simulation model for heritage environments (OTC-SM-HE): verify the effectiveness in Gulangyu, China[J]. Building and Environment, 2023, 242: DOI:10.1016/j.buildenv.2023.110568.
- [13] 姜佩奇, 伍杰, 张社荣, 等. 基于深度学习的点云分割与洪水风险模拟方法[J]. 水科学进展, 2024, 35(1): 62–73.
- JIANG Peiqi, WU Jie, ZHANG Sherong, et al. Point clouds segmentation and flood risk simulation method based on deep learning[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(1): 62–73.

作者简介: 吴立舟 (2000—), 男, 陕西汉中, 硕士研究生, 主要研究方向为智能施工与安全管理, 计算机视觉和无人机视觉。E-mail: wulizhou@xauat.edu.cn。

