DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20240504

城市河道水位对暴雨内涝影响效应及蓄水方案研究

冯思源[1],贺 蔚[1],姚启文[3],康 昀[2]

(1. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098;2. 江苏首创生态环境有限公司,
江苏 宿迁 223800;3. 广东省粤西水资源管理局,广东 湛江 524000)

摘要:为防治内涝,城市河道在汛期进行低水位或放空运行,随着降雨及洪涝预报精准度提升,需进一步优化蓄水方案。为保障城市排水安全,纾解城市内涝,同时考虑河道景观,以宿迁市西民便河流域为例,构建产汇流—二维地表—一维管网—河道多维耦合模型,采用人工实测、管道自动监测数据进行模型验证,评估了1、2、5、10、20年降雨重现期下8种不同河道边界水位的内涝积水情况,探究了水位顶托效应对城市内涝的影响,并基于此提出了较优的蓄水方案。结果表明,不同重现期下,研究区内涝积水总量均随河道水位的升高而不断增大,内涝积水总量V与淹没出流出水口占比(P_{PIO})呈三次函数关系,R^2在0.986~0.999之间;相对溢流量均随河道边界水位的升高而升高,内涝积水总量增大速率与管段上下游高差和出水口淹没水深有关;优化了梯级蓄水方案,可有效控制河道水位顶托致涝效应。

关键词:河道边界水位;排水管网;水力坡降;顶托;MIKE

中图分类号:TV122;P333.2 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-7709(2025)02-0001-05

1 引言

近年来,城市内涝灾害频发,严重影响经济社会发展,对基础设施、居民生活均造成了严重影响,每年由暴雨导致的城市内涝灾害造成国内经济损失可达1 500亿元[1]。城市内涝灾害成因复杂多样,其影响因素包括降雨特征、管道排水能力、城市河道水位等[2]。因此,研究河道水位与城市内涝特征之间的关系对内涝防治具有重要意义。当前,针对外河水位对管道排水能力的影响已进行了一定研究,如罗鸣等[3]基于SWMM模型研究了管道出水口在不同出流情形下的排水能力;林耿等[4]基于管网、河道和地表耦合城市内涝模型,分析了外江水位及降雨雨峰系数对城市内涝的影响规律。同时,在日常运行中,多数河道均保持正常蓄水位,如全部放空来预防内涝,可能会出现后期蓄水难、人力物力消耗大等弊端。已有研究多倾向于小雨时适当蓄水,无需全部开闸放空[5]。因此,如何在降低内涝风险时,又保持一定蓄水位以减少经济损失,是一个不可忽视的问题。目前研究较多关注管道排水能力与河道水位的关系,对内涝特征要素如积水水深、积水量受河道水位的影响研究较少。因此,本文以宿迁市西民便河流域为例,基于MIKE平台,结合西民便河梯级蓄水方案,模拟分析了城市河道水位变化对内涝的影响,为城市河道水位调控及内涝防治提供参考。

2 研究区域与实测数据采集

2.1 研究区概况

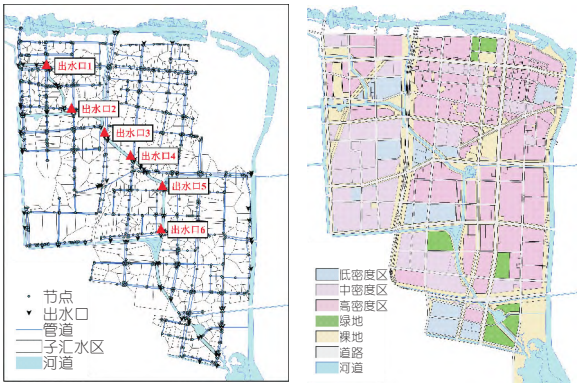
宿迁市位于江苏省北部,年平均降雨量914.9 mm,主要集中在6~9月,占年降水量的70%左右,极易形成暴雨。西民便河作为重要的排涝和景观河道,汛期往往采用低水位运行,甚至放空,不利于城市景观,需进行蓄水方案优化。本文选取西民便河位于宿迁市易涝区域的河段,全长8.47 km,流域面积18.26 km^2。研究区域下垫面分为裸地、绿地、建筑、道路四类,其中建筑区域分为低密度区、中密度区、高密度区。曼宁系数取0.012。概化结果见图1。

收稿日期:2024-03-19,**修回日期**:2024-04-13

基金项目:国家自然科学基金项目(52379061);江苏省自然科学基金项目(BK20230099);江苏省水利科技项目(2022089)

作者简介:冯思源(1999-),男,硕士研究生,研究方向为城市内涝数值模拟,E-mail:2595437370@qq.com

通讯作者:贺蔚(1991-),男,教授,研究方向为城市水力学及水环境模拟,E-mail:hewei@hhu.edu.cn



(a) 研究区模型概化图 (b) 研究区下垫面情况

图 1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of study area

2.2 实测数据采集

对 2023-07-21～22 日降雨过程进行了内涝特征数据实测采集，以此进行模型验证：①实测雨量。通过自记雨量计监测降雨，获得精度为 5 min 的降雨时间序列。②积水点。降雨过程中及降雨后人工统计研究区域积水点位置、深度等内涝特征信息。③管道液位。在研究区域内 3 处易涝检查井安装液位计，监测降雨时管道液位变化。

3 产汇流—二维地表—一维管网—河道多维耦合模型构建

3.1 模型构建

模型根据西民便河流域管网及下垫面资料，共划分 881 个汇水区，概化节点 1 053 个，出水口 85 个，管道 1 017 条，总长度 121.26 km。基于 MIKE 构建产汇流－二维地表－一维管网－河道多维耦合模型，模拟不同河道水位下的内涝积水情况。模型基本方程及原理如下：①产汇流模型。采用等流时线法进行产汇流计算，得到汇水区流量。②管网模型。基于六点隐式差分法求解圣维南方程组，得到管道中的流量。③河道模型。利用 Abbott 六点隐格式离散一维明渠非恒定流基本方程，得到随时间变化的河道水位及流量。④二维地表淹没模型。采用有限体积法求解浅水方程。

3.2 模型验证

采用 2023 年 7 月 21～22 日实测降雨（图 2）、积水点以及管网监测数据进行模型验证。实测与模型积水点对比见表 1，太湖路、微山湖路、青海湖路 3 处监测点水位模拟与实测对比见图 3。由表 1、图 3 可知，水位达峰时间误差小于 10 min，水位峰值误差小于 20%，率定结果满足要求[6]。

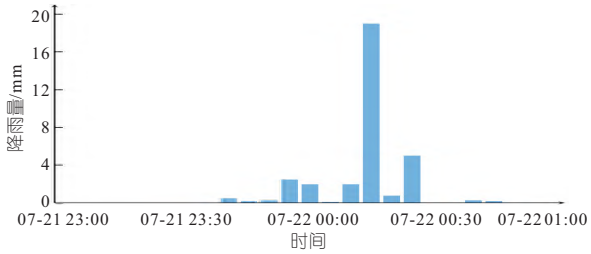


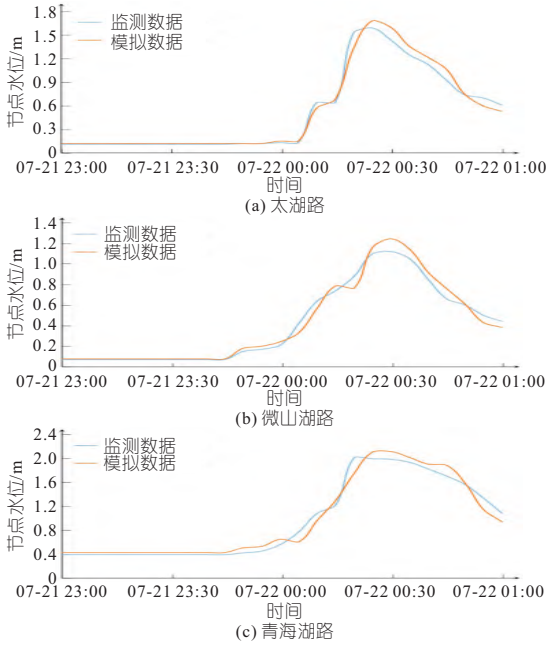
图 2 2023-07-21～22 日实测降雨数据

Fig. 2 Rainfall data(2023-07-21-22)

表 1 2023-07-21～22 降雨内涝率定结果

Tab. 1 Result of waterlogging rate determination(2023-07-21-22)

序号	位置	积水深度/cm	
		实测内涝积水点	模拟内涝积水点
1	洪泽湖路与青年路交叉口	10	10～20
2	市政府南门	15	10～20
3	太湖路(兴鸿一品)	15	10～20
4	青海湖西路	10	10～20
5	丽都水岸南门	15	10～20
6	龙庭别院	20	10～30
7	世纪大道(阳光华城东门辅道)	20	10～20
8	北京路与发展大道交叉口		10～20



(a) 太湖路 (b) 微山湖路 (c) 青海湖路

图 3 检查井监测点水位模拟结果

Fig. 3 Water level simulation results of inspection well monitoring points

4 工况设置

4.1 降雨工况设计

参考《宿迁市暴雨强度公式编制报告》中的暴雨强度公式进行设计降雨计算，暴雨重现期 P 为 1、2、5、10、20 年，设计暴雨采用芝加哥雨型，历时 3 h。暴雨强度公式为：

$$i=61.2(1+1.05\lg T)/(t+39.4)^{0.996} \quad (1)$$

式中，i 为设计暴雨强度，mm/min；T 为设计重现期，年；t 为设计降雨历时，min。

不同重现期 3 h 降雨时程曲线见图 4。

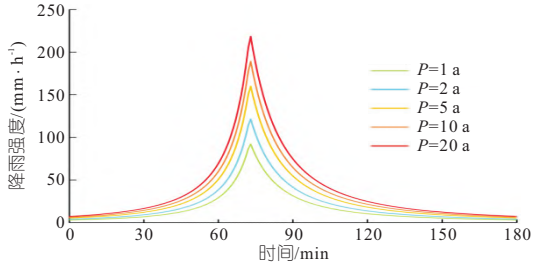


图 4　不同重现期设计暴雨过程

Fig. 4　Design rainstorm processes with different recurrence periods

4.2　河道水位边界设置

采用西民便河河道水位作为模型边界条件。研究区域内西民便河分为 2 个河段,现状正常蓄水位分别为 19.13、18.83 m。围绕西民便河正常蓄水位,设置了 8 种河道蓄水工况:①工况 1。无蓄水。②工况 2、3。采用单一蓄水方案,全河段分别按低、高正常蓄水位运行。③工况 4～8。为梯级蓄水方案,正常梯级蓄水位情况下,河道淹没出流的出水口数量为 66 个,占全部出水口的 77%。为探究预降水位对内涝积水的改善情况及淹没出流出水口占比与内涝积水总量之间的关系,按淹没出流出水口数量占比设置工况 4～7,占比依次为 70%、50%、30%、10%;工况 8 为正常梯级蓄水位。8 种水位边界条件模拟工况见表 2。

表 2　水位边界条件

Tab. 2　Water level boundary condition

工况	描述	河段 1 水位/m	河段 2 水位/m	淹没出流出水口数量占比/%
1	单一蓄水方案	无蓄水(初始状态放空)	无蓄水(初始状态放空)	0
2	单一蓄水方案	18.83	18.83	78
3	单一蓄水方案	19.13	19.13	74
4	梯级蓄水方案	16.33	16.13	10
5	梯级蓄水方案	17.13	16.83	30
6	梯级蓄水方案	17.83	17.53	50
7	梯级蓄水方案	18.63	18.33	70
8	梯级蓄水方案	19.13	18.83	77

5　研究结果

5.1　城市河道单一和梯级蓄水方案的暴雨内涝影响对比分析

运用所构建模型得到研究区域不同降雨重现期下单一蓄水方案工况的内涝积水情况,见图 5。由图 5 可知,工况 3 的内涝积水总量最大,工况 1 的内涝积水总量最小。随着降雨重现期的增大,内涝积水总量受河道水位变化的影响越来越显著。

图 6 为正常蓄水位下单一水位工况与梯级水位工况产生的内涝积水总量统计图。由图 6 可知,工况 8 产生的内涝积水总量介于工况 2、3 之间。因此,针对不同河段设置梯级水位有助于减少河道水位顶托产生的积水。

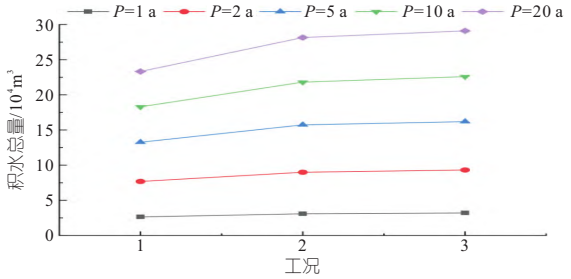


图 5　单一蓄水方案工况内涝积水总量

Fig. 5　Waterlogging in single water level

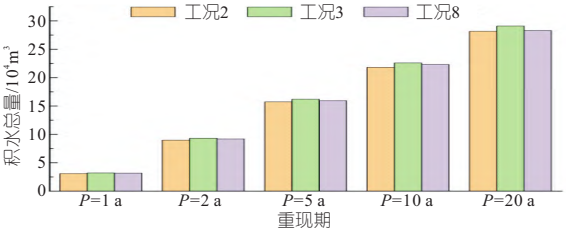


图 6　单一蓄水位与梯级蓄水位内涝积水总量

Fig. 6　Waterlogging in single and cascade water level

5.2　不同梯级蓄水方案的暴雨致涝效应揭示

不同降雨重现期下梯级蓄水工况的内涝积水情况见图 7。由图 7 可知,工况 4 内涝积水总量最小,工况 4～8 积水总量变化趋势与工况 1～3 近似。对内涝积水总量(V)和淹没出流出水口占比(P_{PIO})进行回归分析(图 8),可见 V 与 P_{PIO} 呈三次函数关系,$R^2>0.986$。

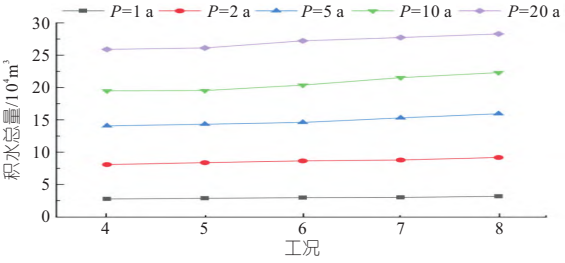


图 7　梯级蓄水方案工况内涝积水总量

Fig. 7　Waterlogging in cascade water level

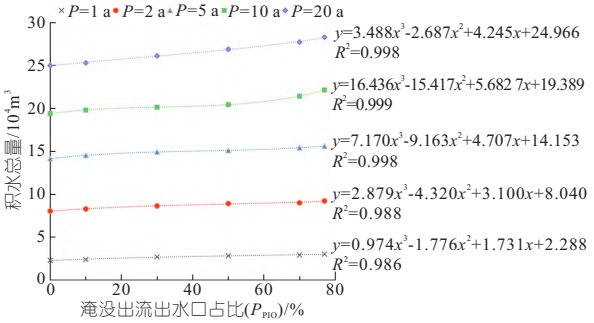


图 8　梯级蓄水方案内涝积水总量与淹没出流出水口占比的关系

Fig. 8　Relationship between waterlogging and inundation outlet

5.3 河道水位顶托致涝效应机理分析

根据罗鸣等[3]的研究成果，淹没出流状态下的管道排水能力对河道水位的变化更敏感。因此，为探究河道水位顶托致涝效应的影响因素，选取了受河道水位变化影响较大的 6 处淹没出流出水口（图 1）及其对应的管段，分析这些出水口对应管段的特征参数与相对溢流量之间的关系（相对溢流量指各工况溢流量与未受水位顶托影响下的溢流量之比）。各出水口对应管段的坡度、高差等参数见表 3。

表 3 各出水口对应管段参数

Tab. 3 Parameter of corresponding pipe segment of each water outlet

出水口	长度/m	高差/m	坡度
1	84.62	2.30	0.027 2
2	38.84	1.30	0.033 5
3	308.62	5.23	0.016 9
4	84.62	4.84	0.057 2
5	191.18	1.95	0.010 2
6	92.89	0.08	0.000 9

以 $P=5$ a 时的模拟结果为例，分析图 9 发现，出水口 1～6 对应管段的相对溢流量均与出水口河道水位呈正相关关系，但不同出水口随河道水位的变化程度有所不同。其中出水口 3 对应管段的相对溢流量增长幅度最小，出水口 6 相对溢流量增长幅度最大，其余各重现期相对溢流量变化规律均与 $P=5$ a 一致。采用 Pearson 相关性分析法，分析管段特征参数与相对溢流量关系，结果见表 4。由表 4 可看出，上下游高差与相对溢流量呈显著负相关关系，显著性水平＜0.05。

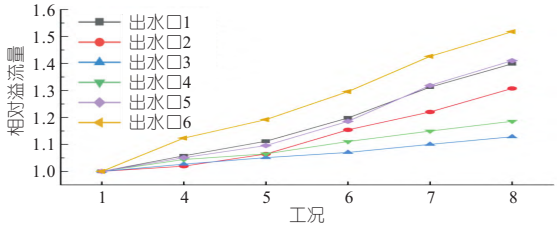


图 9 $P=5$ a 时各出水口对应管段的相对溢流量

Fig. 9 Relative overflow of each water outlet pipeline ($P=5$ a)

表 4 管段特征参数与相对溢流量的相关性分析

Tab. 4 Correlation analysis of pipe segment characteristic parameters and relative overflow

系数	长度	坡度	上下游高差
与相对溢流量的相关系数	−0.39	−0.59	−0.82
与相对溢流量的显著系数	0.42	0.04	0.22

进一步分析上下游高差与相对溢流量呈显著负相关关系的原因：对相同管道，其流量仅受水力坡度 I 影响，公式为：

$$Q=Av \tag{2}$$

$$v=R^{2/3}I^{1/2}/n \tag{3}$$

式中，Q 为设计流量，m^3/s；A 为水流有效断面面积，m^2；v 为流速，m/s；R 为水力半径，m；I 为水力坡度；n 为粗糙系数。

由于出水口为淹没出流，对单位长度管道，水力坡度为测压管水头差。因此，对比不同管段上下游高差大小，即可判断其溢流量受河道水位影响程度。

同时，图 9 还显示出水口 5、1 对应管段的相对溢流量增大较快，超过出水口 2。这是由于影响管段测压管水头差的因素除了上下游高差，还有出水口淹没水深。统计各出水口淹没水深（表 5），对比图 9 与表 5 可以发现，对不同出水口，淹没水深较大也会影响管段相对溢流量。因此，在分析内涝积水增长速率时，应同时考虑管段上下游高差与出水口淹没水深。

表 5 各出水口对应淹没水深

Tab. 5 Parameter of corresponding pipe segment of each water outlet

出水口	出水口淹没水深/m							
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6	工况 7	工况 8
1	0	3.52	3.82	1.02	1.82	2.52	3.32	3.82
2	0	3.31	3.61	0.61	1.31	2.01	2.81	3.31
3	0	2.68	2.98	0.18	0.98	1.68	2.48	2.98
4	0	3.15	3.45	0.65	1.45	2.15	2.95	3.45
5	0	4.07	4.37	1.37	2.07	2.77	3.57	4.07
6	0	3.72	4.02	1.02	1.72	2.42	3.22	3.72

综上所述，当河道边界水位发生变化时，内涝积水增长的速率与对应管段高差及出水口淹没水深有关，管段高差越小，出水口淹没水深越大，其产生的内涝积水增长速率越快，反之越缓慢。

5.4 考虑河道水位顶托的梯级蓄水方案优化

当前梯级蓄水方案下西民便河排水片区受内涝影响较大，因此汛期来临时需要预降水位以降低内涝灾害风险。根据图 8 中反映出的梯级蓄水方案内涝积水总量与淹没出流出水口占比的关系可知，随着河道水位降低，积水总量的减少速率会呈先减小再增大的趋势。因此，为减少不必要的放水量，选取图 8 中积水总量减少速率达到最小时的梯级水位组合作为建议蓄水方案，可以得到不同重现期下的梯级蓄水方案，见表 6。

表 6 不同重现期下的梯级蓄水方案

Tab. 6 Cascade water level scheme under different recurrence period

重现期/a	淹没出流出水口占比（P_{PIO}）/%	蓄水方案水位/m	
		河段 1	河段 2
1	60.8	18.13	17.83
2	50.0	17.83	17.53
5	42.6	17.43	17.13
10	31.3	17.13	16.83
20	25.7	16.83	16.53

6　结论

a. 不同降雨重现期下,研究区域内涝积水总量随河道水位的升高而增大。梯级水位变化对积水总量的影响与单一水位相同,且针对不同河段设置梯级水位可减少水位顶托产生的积水。内涝积水总量 V 与淹没出流出水口占比 P_{PIO} 呈三次函数关系,R^2 在 0.986～0.999 之间。

b. 不同重现期设计暴雨条件下,相对溢流量均随河道边界水位的升高而升高,内涝积水的增长速率与管段上下游高差和出水口淹没水深有关。

c. 在暴雨到来之前,推荐采用考虑河道水位顶托的梯级蓄水方案以应对内涝。

参考文献:

[1] 《中国水旱灾害防御公报》编写组.《中国水旱灾害防御公报 2022》概要[J].中国防汛抗旱,2023,33(10):78-82.

[2] 赵超辉,万金红,张云霞,等.城市内涝特征、成因及应对研究综述[J].灾害学,2023,38(1):220-228.

[3] 罗鸣,叶兴成,王以超,等.河道边界水位对管道排水能力的影响分析[J].水资源与水工程学报,2018,29(3):169-174.

[4] 林耿,徐以希,宋利祥.外江水位及雨峰系数对典型城市片区内涝的影响规律研究[J].人民珠江,2023,44(12):73-79.

[5] 张高嫄,高斌,庄宝玉.河道调蓄在城市内涝防治中的应用研究[J].给水排水,2015,41(增刊 1):105-108.

[6] 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司.城镇内涝防治系统数学模型构建和应用规程:T/CECS 647-2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.

Study on Effect of Urban River Level on Rainstorm Waterlogging and Water Storage Scheme

FENG Si-yuan[1], HE Wei[1], YAO Qi-wen[3], KANG Yun[2]

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Jiangsu Capital Eco-Environment Co., LTD., Suqian 223800, China;
3. West Guangdong Water Resources Management Bureau, Zhanjiang 524000, China)

Abstract: To prevent waterlogging, urban river channels are kept low or empty during floods. As rainfall and flood forecasts improve, water storage plans need to be optimized. In order to ensure the safety of urban drainage, relieve urban waterlogging, and consider river landscape, the Ximinbian River basin in Suqian City was taken as an example. A multi-dimensional coupling model of water production and confluence-two-dimensional surface-one-dimensional pipe network-river channel was established. The model was verified by manual measurement and pipeline automatic monitoring data. Under 1-year, 2-year, 5-year, 10-year, 20-year rainfall return period, the waterloggings were evaluated under 8 kinds of river boundary water levels. The impact of water level topping on urban waterlogging was explored, and an optimization storage plan was proposed. The results show that under different recurrence periods, the total amount of waterlogging water increases with the increase of river level. The total waterlogging volume V is a cubic function of the proportion of submerged outlet (P_{PIO}), and the R^2 is between 0.986 and 0.999. The relative discharge increases with the increase of river water level, and the increase rate of the waterlogging is related to the elevation difference between upper and lower reaches of pipeline section and inundation depth of outlet. The optimized cascade water storage scheme can control the waterlogging effect caused by river top water level.

Key words: river boundary water level; drainage network; hydraulic gradient; jacking; MIKE

(上接第 29 页)

Refined Evaluation of Engineering Loss Induced by Flood Disasters Based on 3D Laser Point Cloud Technology

HUANG Fei-hu[1], LI Le[1], WANG Mi[2], ZHAO Ke-fei[1]

(1. School of Management, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510520, China;
2. Guangzhou Ningwen Technology Service Limited Company, Guangzhou 510220, China)

Abstract: Flood disaster loss assessment is crucial for national engineering project disaster prevention, civil management, and insurance verification. Traditional methods of obtaining flood disaster engineering data require significant human and material resources, and satellite-derived DEM data often lack the precision needed for accurate loss assessment. This study proposes a method for flood loss assessment using 3D laser point cloud data. We quantitatively assessed the losses caused by a seasonal flood on the Nalinggale River in Haixi Prefecture, Qinghai Province, on August 8, 2022, focusing on the damage to local hydraulic infrastructure. The volume of earthwork loss in the dam body was calculated. The results indicate that the 3D laser point cloud data can replace traditional field measurements, enabling precise assessment of earthwork loss in affected areas and providing more accurate disaster information.

Key words: flood disaster; airborne radar; three-dimensional laser point cloud; flooding model; loss assessment