

文章编号: 2097-096X(2026)03-0357-12

基于数值模拟的山前蓄滞洪区减灾成效量化分析与评估

何欣航¹, 郝晓丽¹, 徐美¹, 刘舒¹, 胡丽楠², 石树兰³

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 北京市水务局, 北京 101117; 3. 北京市水文总站, 北京 100089)

摘要: 山区河道洪水严重威胁山前建成区安全, 通过山前建设蓄滞洪区, 可蓄滞洪水、降低洪水流速、削减河道洪峰, 有效缓解洪水对建成区的冲击。本研究以北京市温榆河流域北沙河为例, 通过基于动力学原理的数值模拟方法, 对山区河道洪水自由下泄情景以及经过蓄滞洪区调蓄后下泄情景分别进行洪水演进过程模拟计算, 对比分析北沙河修建蓄滞洪区前后不同重现期洪水可能导致的洪水风险程度与分布, 实现对蓄滞洪区防洪减灾成效的评估。分析结果认为: 不同重现期洪水情景下, 北沙河山前蓄滞洪区均能显著降低下游河道洪峰, 减少河道两岸受淹面积与水深, 降低区域洪水风险; 整体减灾成效受蓄滞洪区规模制约, 北沙河蓄滞洪区在20年一遇洪水情景下可达最高减灾效益, GDP损失减少率达27.55%, 50年一遇设计洪水次之, 为22.45%。利用洪涝过程数值模拟手段对蓄滞洪区等规划或在建防洪工程进行洪水情景分析, 通过对比分析工程前后区域洪涝风险, 可有效实现对工程减灾成效的量化分析与评估。

关键词: 数值模拟; 洪涝灾害; 水文水力模型; 蓄滞洪区; 减灾成效量化分析

中图分类号: TV122.5

文献标识码: A

doi: 10.3724/j.jiwhr.20250173

1 研究背景

在全球城市化进程加速推进的背景下, 人口与产业的高密度聚集和土地资源的高强度开发, 使得流域防洪面临前所未有的压力^[1-3]。作为流域防洪体系的关键组成部分, 蓄滞洪区通过调节洪水、削减洪峰流量, 在保障下游城市安全中发挥着不可替代的作用^[4-6]。如2023年海河流域“23·7”特大洪水中, 小清河分洪区、兰沟洼、东淀等8处蓄滞洪区通过科学调度, 有效拦蓄洪水25.3亿m³, 显著缓解了中下游河道防洪压力, 有效降低了流域内城市洪涝风险^[7-8]。

近年来, 国内外学者围绕蓄滞洪区开展了广泛而深入的研究。在数值模拟与应用方面, Hu等^[9]基于MIKE系列模型构建河道-蓄滞洪区-洪泛区-圩区-防洪保护区复合系统洪水耦合模型, 实现洪水在多单元间动态交互过程的精细化模拟; Nyame等^[10]运用HEC-HMS与HEC-RAS耦合模型, 定量评估加纳奥达瓦河流域蓄滞洪区对下游河道洪峰削减与洪量调控效果; Wang等^[11]采用MIKE一二维耦合模型, 系统分析华阳河蓄滞洪区淹没特征及分洪对下游水位影响, 并结合防洪效益评估优化分洪策略; 吴滨滨等^[12]针对海河流域漳卫河系与大名泛区联合防洪体系, 基于IFMS模型建立考虑动态下渗过程的一二维耦合模型, 揭示土壤下渗对河道行洪与蓄滞洪区分洪的影响机制; 果鹏等^[13]基于二维水动力模型, 结合灾害损失评估模型, 实现蓄滞洪区洪水风险等级的定量划分; 肖潇等^[14]基于二维非恒定流理论构建洪水演进数学模型, 深入剖析蓄滞洪区关键部位水位、流速变化及淹没演变规律; 赵然杭等^[15]则通过耦合多源洪水, 开展南四湖湖东滞洪区洪水演进模拟研究。

与平原地区相比, 山区洪水具有汇流历时短、洪峰陡涨陡落等典型特征^[16-18]。城镇化进程中, 建设地向山前平原区扩张, 建成区直接面临山洪威胁, 洪涝风险极高^[19-20]。从工程减灾角度出发,

收稿日期: 2025-08-04; 网络首发时间: 2026-05-06

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/10.1788.tv.20260430.1710.001>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3008502)

作者简介: 何欣航(1998—), 硕士生, 从事城市洪涝模拟研究。E-mail: hexinhangemail@163.com

通信作者: 刘舒(1975—), 正高级工程师, 从事城市洪涝特性及洪涝模拟研究。E-mail: fcfs2001@iwhr.com

在山前修建蓄滞洪区，减缓洪水的快速冲击，可有效降低建成区面临的洪涝灾害风险^[21-23]。既有研究多聚焦于平原蓄滞洪区，但针对山前蓄滞洪区，尤其是工程减灾效益方面的研究较少。构建适用于山前蓄滞洪区的减灾效应量化评估方法，对优化区域防洪工程布局、提升城市韧性具有重要现实意义。

鉴于此，针对山前蓄滞洪区减灾效应评估问题，以北京市温榆河流域北沙河为例，建立区域水文水动力耦合模型，对区内白羊城与南口两处蓄滞洪区修建前后的不同重现期洪水情景进行数值模拟，对比工程实施前后下游河道洪水过程及地表淹没程度，对蓄滞洪区减灾成效进行量化分析与评估，以期优化蓄滞洪区设计与调度管理，为山前建成区防洪排涝规划、防洪抢险工作提供依据。

2 研究区域概况

北沙河位于北京市温榆河流域，上游山区山高坡陡、支流众多、源短流急，中下游平原区纵坡较缓，又有较大支流汇入，历史上为洪涝灾害较为严重的地区，如汇入北沙河的南口河、高崖口沟、四家庄河，在1929年、1939年均发生过较大山洪。“23·7”降雨事件中，流域面降雨量最大的是高崖口沟、四家庄河，为446 mm(流村站537 mm、王峪村站358 mm)；其次是白羊城沟，为382 mm(王家园站水库站722 mm)，洪水行进过程中，高崖口沟、四家庄河及北沙河干流均发生较大水情及灾情，部分河段发生漫溢。

北沙河作为北京市北部地区重要的行洪通道，承担着北部地区洪水调蓄与排泄的核心功能，其防洪安全直接关系到昌平建成区、中心城区与城市副中心的防洪安全。

鉴于以上背景，选取北沙河流域昌平区新城与尖山咀接壤区域作为研究范围，区内主要有高崖口沟、白羊城沟等灾害高发山洪沟，规划在山前建设南口、白羊城两个蓄滞洪区，其中，南口蓄滞洪区50年一遇蓄洪量为744 m³，白羊城蓄滞洪区50年一遇蓄洪量为380 m³。研究区域洪水发生的时间和暴雨一致，集中在7、8月，洪峰常由24 h降雨量形成，山区洪水过程具有峰形尖瘦、陡涨陡落的特点。研究区域概况如图1所示。

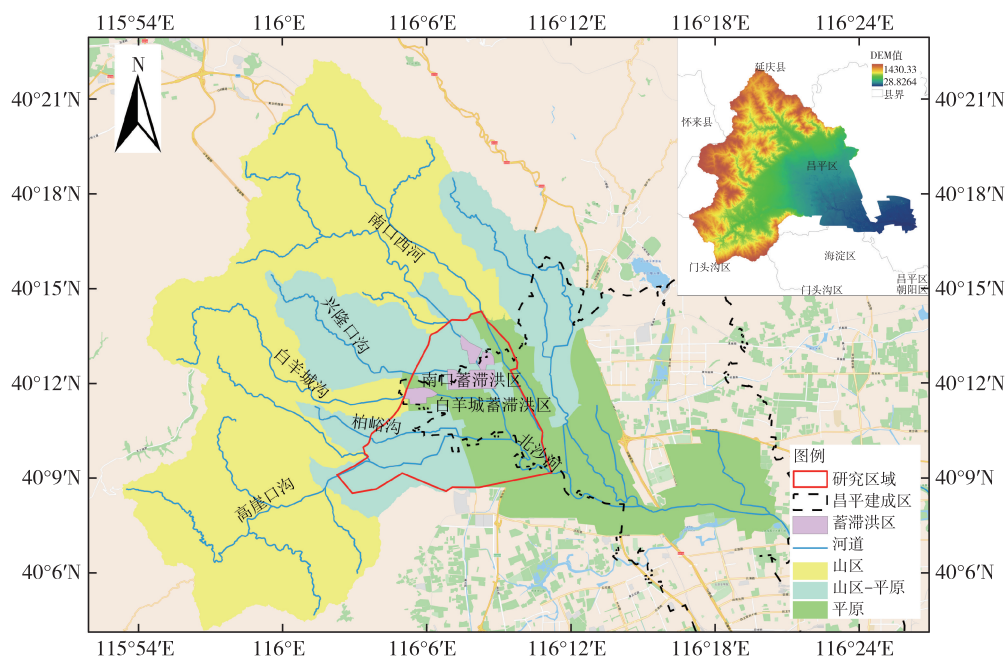


图1 研究区域示意

Fig. 1 Sketch of study area

3 洪涝数值模拟

3.1 洪涝模型原理 洪涝数值模型主要分为半分布式与全分布式两类^[24]。半分布式模型因技术成熟、计算高效被广泛应用,通过“降雨—子汇水区产流—河道汇流—漫溢演进—淹没发展”路径,耦合一、二维水动力模型模拟河道漫溢淹没,但因其产汇流与地表洪涝模块解耦,难以刻画超渗产流与河道溢流相互耦合的复杂过程,在强降雨引发的非线性、时空异质性洪涝系统模拟中存在显著局限性。全分布式模型基于二维浅水方程,依托高精度数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据,采用有限体积法或有限元法进行网格离散,实现了降雨产流、坡面汇流及淹没过程的一体化数值模拟,能够精细化解析复杂地形条件下水流的空间分布与动态演进^[25]。相较于半分布式模型,全分布式模型在物理机制层面更符合实际洪涝演变规律,尤其在强降雨事件模拟中,可显著提升内涝积水深度、淹没范围及演进时间的预测精度,对短历时强降雨引发的超标准洪涝过程模拟具有独特优势^[26]。

因此,本文选用全分布式水文水动力模型 DHMURban,该模型将计算区域离散为独立的网格产流单元,通过建立单元间水量交换机制,实现降雨产流、坡面汇流及淹没演进过程的统一模拟。

3.1.1 河道一维模型 河道一维模型采用自由表面浅水非恒定流圣维南方程组,其控制方程为:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right) + gAS_f - u_q = 0 \quad (2)$$

式中: A 为断面过水面积; Q 为流量; q 为侧向单宽入流量; u_q 为侧向来流在河道方向流速; t 为水位; α 为动量修正参数; g 为重力加速度; z 为水位; $S_f = n^2 V |V| / R^{4/3}$ 为摩阻坡降,其中 V 为流速, n 为糙率, R 为水力半径。具体求解方法见文献[27]。

3.1.2 地表二维模型 地表二维水动力汇流模型采用忽略黏性、科氏力、风应力的二维浅水方程组,其控制方程为:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{S} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{U}$ 为守恒性变量的向量; $\mathbf{F}$ 、 $\mathbf{G}$ 分别为 x 、 y 方向的对流通量; $\mathbf{S}$ 为源项,通常包括降雨,下渗,底床交换通量等。式(6)中各项为:

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \\ huv \end{bmatrix}, \mathbf{G} = \begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + \frac{1}{2}gh^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{RI} + \mathbf{S}_b + \mathbf{S}_f \quad (8)$$

式中: $\mathbf{RI}$ 为与底坡无关的源项; $\mathbf{S}_b$ 为由水底坡度引起的重力项; $\mathbf{S}_f$ 为摩擦力项; h 为水深; u 、 v 分别为水深平均的流速 x 和 y 方向的分量。具体求解方法见文献[28]。

3.2 模型构建

3.2.1 建模范围与对象 一维河道模型考虑北沙河流域北沙河、高崖口沟等8条主要河道,总长46.99 km。河道模型要素包括河道中心线、断面及闸坝。河道断面数据来源包括近期部分实测数据及部分高精度数字高程模型(DEM)提取数据,断面密度原则上按500 m一个进行布设,在河道弯曲、支流汇入段等水力特性显著变化区域,加密设置控制断面,共104个断面。河道模型上边界条件为各支流汇入研究区处断面在不同重现期设计洪水情景下的流量过程,由山丘区小流域水文模型获得;下边界为北沙河干流出研究区处断面的水位-流量关系。

二维地表模型构建范围为蓄滞洪区及其周围淹没影响区域,西边为尖山咀山麓,东边取辛店河为界,北至南雁路,南至阳八路,覆盖面积约75.14 km²。建模主要涉及网格剖分、高程赋值、基础产汇

流参数确定及边界条件设置等。网格剖分引入局部微地形处理技术，依据地形地貌特征及线性地物分布生成控制线，基于该控制线生成近 87 万个高质量贴体不规则网格，网格边长约 10 m。网格高程及道路、房屋等特殊阻水边高程均由 2022 年 5 m 分辨率 DEM 数据获取。基于 2023 年高精度土地利用数据(图 2 所示)，建立网格单元下垫面类型与糙率参数的映射关系，并结合地表下渗试验所得不同下垫面类型对应的下渗曲线，采用面积加权平均法计算各网格产汇流基础参数及地表糙率。

两处规划蓄滞洪区均采用二维模型进行概化，蓄滞洪区内部生成 6.4 万个边长为 10 m 的网格。白羊城蓄滞洪区的调度方式为：在上游分水堰水位达 172 m 时启用，20 年一遇洪水下蓄洪总库容为 290 万 m³，50 年一遇时增至 380 万 m³。南口蓄滞洪区的调度方式为：起调水位为 56.2 m，20 年一遇洪水时蓄洪总库容为 591 万 m³，50 年一遇时为 744 万 m³。

河道一维模型与地表二维模型采用侧向耦合方式进行连接，通过堤防实现河道与地表间的双向水量交换：当河道水位高于堤防及周边地表网格水位时，河水发生漫溢；反之，当地表水位超过堤防高程及河道水位时，地表积水将回流至河道内。模型示意图见图 3。

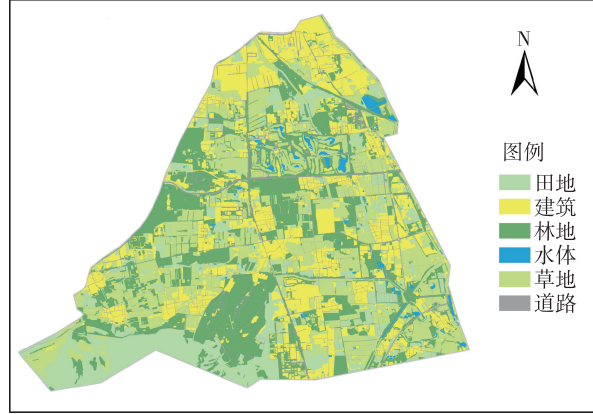


图 2 土地利用类型图
Fig. 2 Land use type map

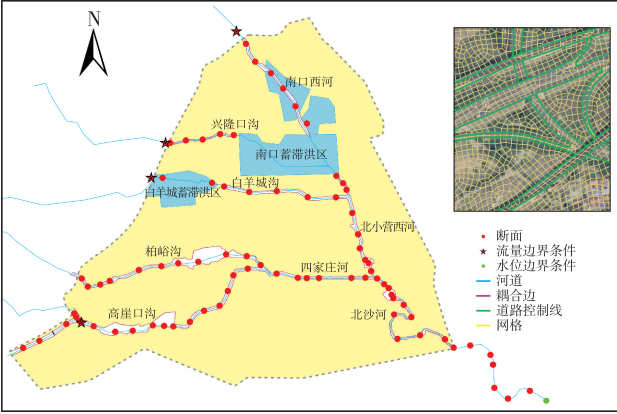


图 3 模型示意图
Fig. 3 Model schematic diagram

3.2.2 模型参数设置 通过多场次典型暴雨洪水的率定，已形成一套适用于北京市北运河流域片下垫面特征的产汇流参数^[25]。依据河道类型，参照文献[29]，一维河道模型中白羊城沟、北沙河河道糙率设为 0.03，其余河道糙率设为 0.025。二维地表模型中，主要依据下垫面类型对网格产汇流基础参数进行设置^[30-31]。地表产汇流基础参数及地表糙率取值如表 1 所示。

表 1 产汇流基础参数及地表糙率取值

Table 1 Basic parameters of runoff generation and concentration and surface roughness values

地类名称	前损量/mm	初始下渗率/(mm·h ⁻¹)	稳定下渗率/(mm·h ⁻¹)	衰减系数/h ⁻¹	排水能力/(mm·h ⁻¹)	糙率
建筑	5	0	0	0.20	8.00	0.070
草地	10	30	20	0.20	4.00	0.065
道路	5	0	0	0.00	15.00	0.035
水体	0	0	0	0.00	0.00	0.035
田地	12	32	22	0.20	5.00	0.070
林地	15	35	24	0.20	8.00	0.080

3.2.3 模型边界条件 模型上边界主要考虑外部河道(高崖口沟、白羊城沟、兴隆口沟、南口西河)入研究区的洪水过程及研究区内降雨过程；模型下边界主要考虑北沙河出研究区处断面的水位-流量关系。地表模型边界分别为自然高地、阻水道路或水系，因此地表不考虑跟外部水交换，模型边界为固定边界。

3.3 模型验证 选择两个历史典型场次实测暴雨的洪水模拟结果，从洪水过程、河道水位及地表积水

三个方面进行模型精度验证。

在沙河闸水文站上游流域建立更大尺度的一、二维水动力模型，采用沙河闸水文站的实测流量资料对模型进行流量过程合理性分析。选取近年来温榆河流域两场典型场次降雨，即2012.7.21场次降雨及2023.7.30场次降雨，进行洪水过程验证。2012.7.21场次暴雨洪水确定性系数为0.93，2023.7.30场次暴雨洪水确定性系数为0.88，峰现时间均不超过1 h，洪峰误差小于10%，计算结果与实际洪水过程较吻合(图4)。部分时段模拟流量高于实测值，主要原因是实际调度中沙河闸下泄流量大于模型采用的预案值所致。综合分析表明，模型中河道糙率设置较为合理。

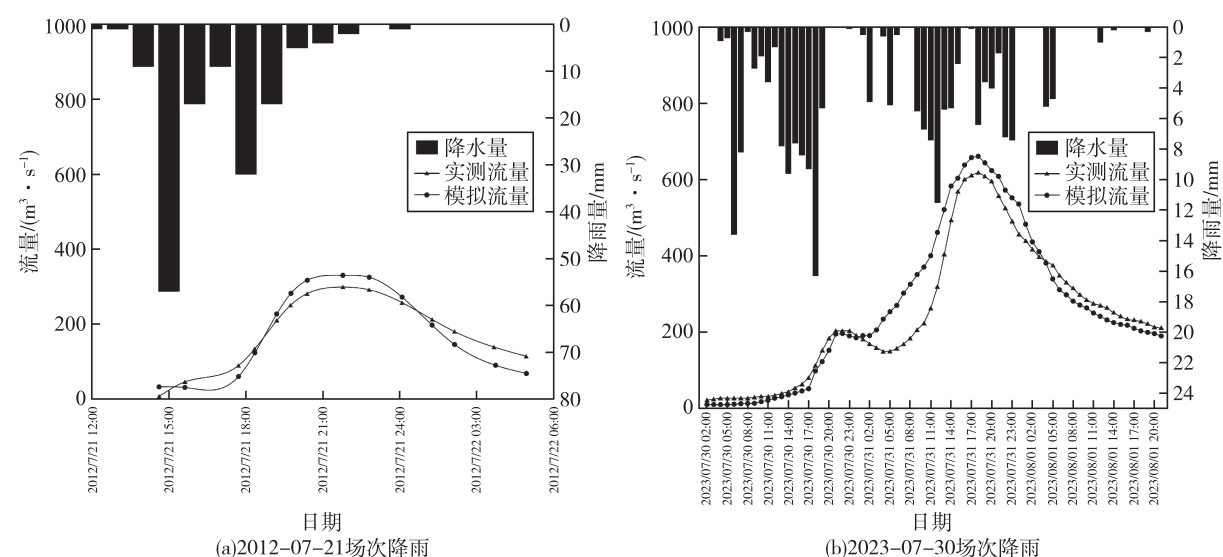


图4 洪水模拟流量与实测流量对比

Fig. 4 Comparison of simulated flood flow and measured flow

根据《“23·7”流域性特大洪水北京市北三河流域洪水调查评价报告》^[32]及《海河：“23·7”流域性特大洪水北京市山洪调查报告》^[33]等资料中关于“23·7”洪水实测与调查数据，选择7处河道断面及4处洪痕点位，用来验证模拟结果中对应河道断面的水位与地表积水点水深。

下表2列出南口西河(入华彬庄园)等7处断面模拟水位与调查水位的对比。误差(模拟值减调查值)介于-0.22 m与0.33 m之间。S1、S2断面误差相对较大，主要是两处在本次洪水期间的实际调度操作与模型中采用的设计调度规则存在差异所致。综合各断面对比结果可见，模型对河道水位的再现总体可靠。

表2 “23·7”洪水河道水位模拟值与调查值对比

Table 2 Comparison of simulated and measured water level values for “23·7” flood

调查点编号	调查点位置	模拟水位/m	调查水位/m	误差/m
S1	南口西河(入华彬庄园)	66.11	65.80	0.31
S2	北小营西河(出华彬庄园)	58.18	57.85	0.33
S3	白羊城沟(温南路下游)	59.80	59.60	0.20
S4	白羊城沟(亭阳路下游)	54.46	54.68	-0.22
S5	兴隆口沟(南雁路下游)	82.59	82.37	0.21
S6	高崖口沟(京礼高速下游)	119.96	119.73	0.23
S7	高崖口沟(北葛路)	70.48	70.27	0.21

表3为某村、京礼高速桥下等4处洪痕调查点位的淹没水深模拟值与调查值对比结果，模拟水深误差均小于0.3 m，调查淹没水深由灾后洪痕研究得出，其受多方面因素影响，本次模拟与调查值基本吻合，模拟结果较可靠。

表3 模拟淹没水深与调查值对比

Table 3 Comparison of simulated inundation water depth with measured values

调查点编号	位置	调查淹没水深/m	模拟淹没水深/m	误差/m
D1	某村	1.00	1.20	0.2
D2	京礼高速桥下	2.00	2.28	0.28
D3	下店村	0.84	1.08	0.24
D4	北京大学(昌平校区)	1.50	1.70	0.2

3.4 情景设计与模拟 综合考虑区域暴雨与洪水重现期及两处蓄滞洪区工况,共设计4种情景(如表4所示)。

表4 研究区模拟情景设计

Table 4 Design of simulated scenarios for the study area

情景编号	降雨重现期/a	洪水重现期/a	模拟内容	工况
情景1	20	20	河道流量、水位、地表淹没深度及范围	蓄滞洪区建设前
情景2	20	20	河道流量、水位、地表淹没深度及范围	蓄滞洪区建设后
情景3	50	50	河道流量、水位、地表淹没深度及范围	蓄滞洪区建设前
情景4	50	50	河道流量、水位、地表淹没深度及范围	蓄滞洪区建设后

对于情景1和情景2,河道模型上边界取各条河道20年一遇设计洪水过程,研究区地表模型上边界取北沙河流域20年一遇(24 h)设计暴雨过程;对于情景3、情景4,河道模型上边界取各条河道50年一遇设计洪水过程,地表模型上边界取北沙河流域50年一遇(24 h)设计暴雨过程(图5所示);作为

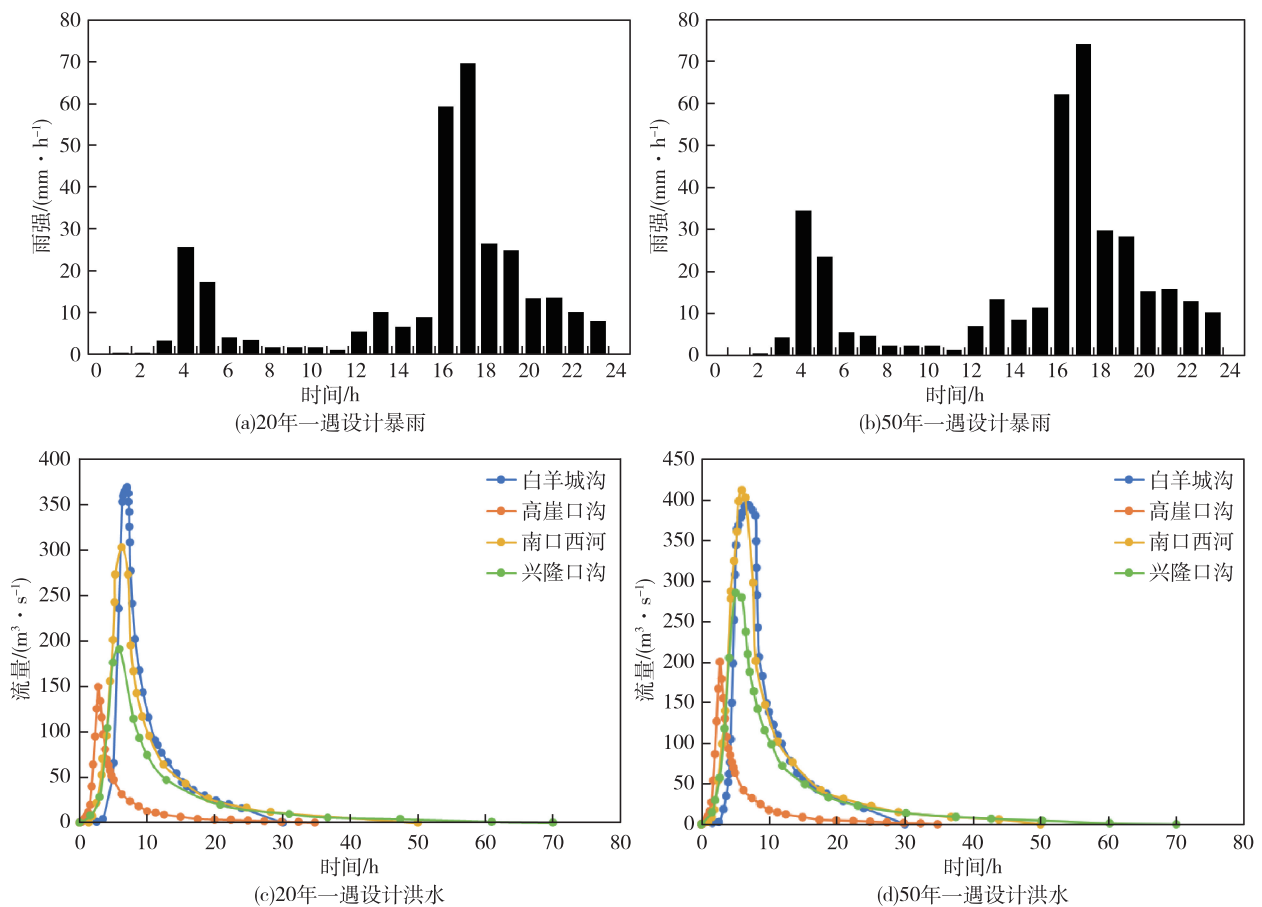


图5 边界条件

Fig. 5 Boundary condition

模型上边界的河道设计洪水，均由入研究区处断面的上游流域采用推理公式法计算获得。

4 模拟结果与分析

4.1 河道水情 北沙河河道水位模拟结果如图6所示，蓄滞洪区建设后，20年一遇情景下，北小营西河、北沙河平均水位降低1.26 m；50年一遇情景下，平均水位降低1.32 m。选择高崖口沟与北沙河汇合口下游3 km处位置作为代表断面，其洪水过程模拟结果如图7所示，蓄滞洪区建设后，20年一遇情景，洪峰流量由647.25 m³/s降低到308.85 m³/s，减幅为52.28%；50年一遇情景，洪峰流量由659.47 m³/s降低到393.56 m³/s，减幅为40.32%。

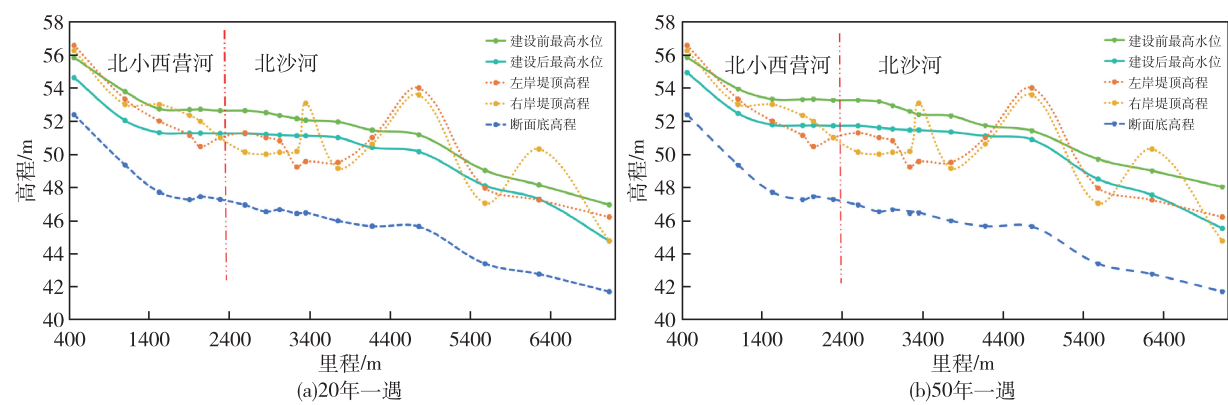


图6 河道水位模拟结果
Fig. 6 River water level simulation results

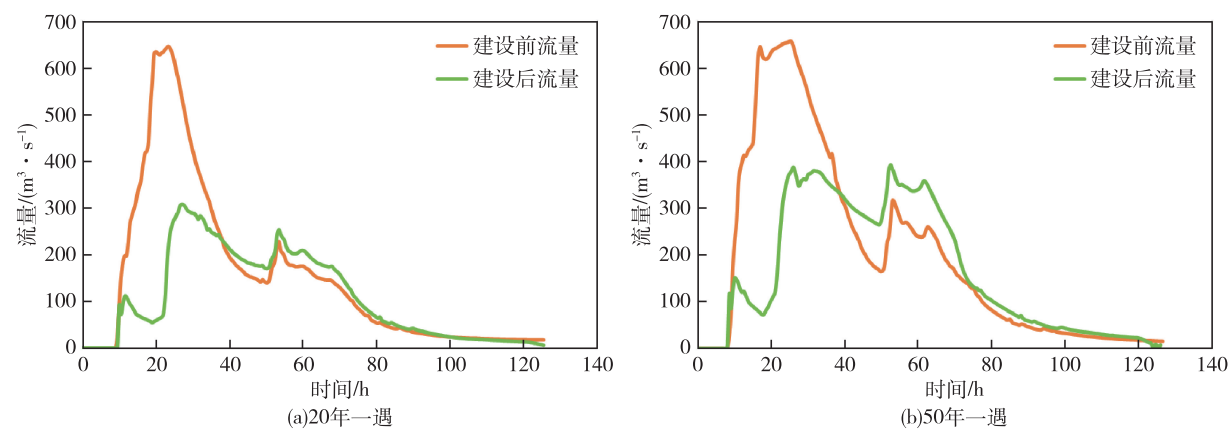


图7 代表断面洪水过程
Fig. 7 Representative cross-section flood hydrograph

河道模型模拟结果显示，蓄滞洪区建设后，河道水位与流量得到有效调控。在20年一遇情景下，北小西营河与北沙河部分河段水位低于堤防高程；50年一遇情景下，大部分河段水位突破堤顶高程，暴露出堤顶高程设计不足的安全隐患。进一步分析代表性断面的流量模拟结果发现，蓄滞洪区建成后洪峰流量显著削减，流量过程呈现多峰特征。此外，各情景下，代表断面第二峰值高于建设前洪峰流量，表明蓄滞洪区建设后河道流量显著降低，为降雨径流提供了更多入河空间，导致河道流量增加。

4.2 地表淹没情况 根据地表二维模拟结果(如表5所示)，蓄滞洪区建设后，20年一遇情景中，淹没面积减少率为17.37%，高风险淹没面积减少率最大，为43.88%；50年一遇情景下，淹没面积减少率为16.44%，高风险区淹没面积减少率最大，为38.12%。

研究区域的淹没分布特征详见图8。模拟结果符合蓄滞洪区“分洪滞蓄—削减洪峰—缩减淹没”的基础原理。蓄滞洪区建设方案显著降低了洪水淹没范围，建设后50年一遇情景淹没面积均小于建设

表5 地表二维模拟结果对比

Table 5 Comparison table of surface 2D simulation results

设计洪水重现期/a	设计降雨重现期/a	风险等级	淹没深度/m	建设前淹没面积/km ²	建设后淹没面积/km ²	淹没面积减少率/%
20	20	较低风险	0.15~0.27	4.88	5.25	-7.58
		中等风险	<0.27~0.40	2.80	3.08	-10.00
		较高风险	<0.40~0.60	2.53	2.22	12.25
		高风险	>0.60	8.50	4.77	43.88
		合计		18.71	15.32	17.37
50	50	较低风险	0.15~0.27	5.54	5.94	-7.12
		中等风险	<0.27~0.40	3.29	3.44	-4.40
		较高风险	<0.40~0.60	3.01	2.80	6.97
		高风险	>0.60	10.51	6.50	38.12
		合计		22.35	18.68	16.44

前20年一遇对应情景。风险等级分析显示，该建设方案对高风险及较高风险区域的淹没面积削减效果较为显著，20年一遇情景下减淹效益更为突出。

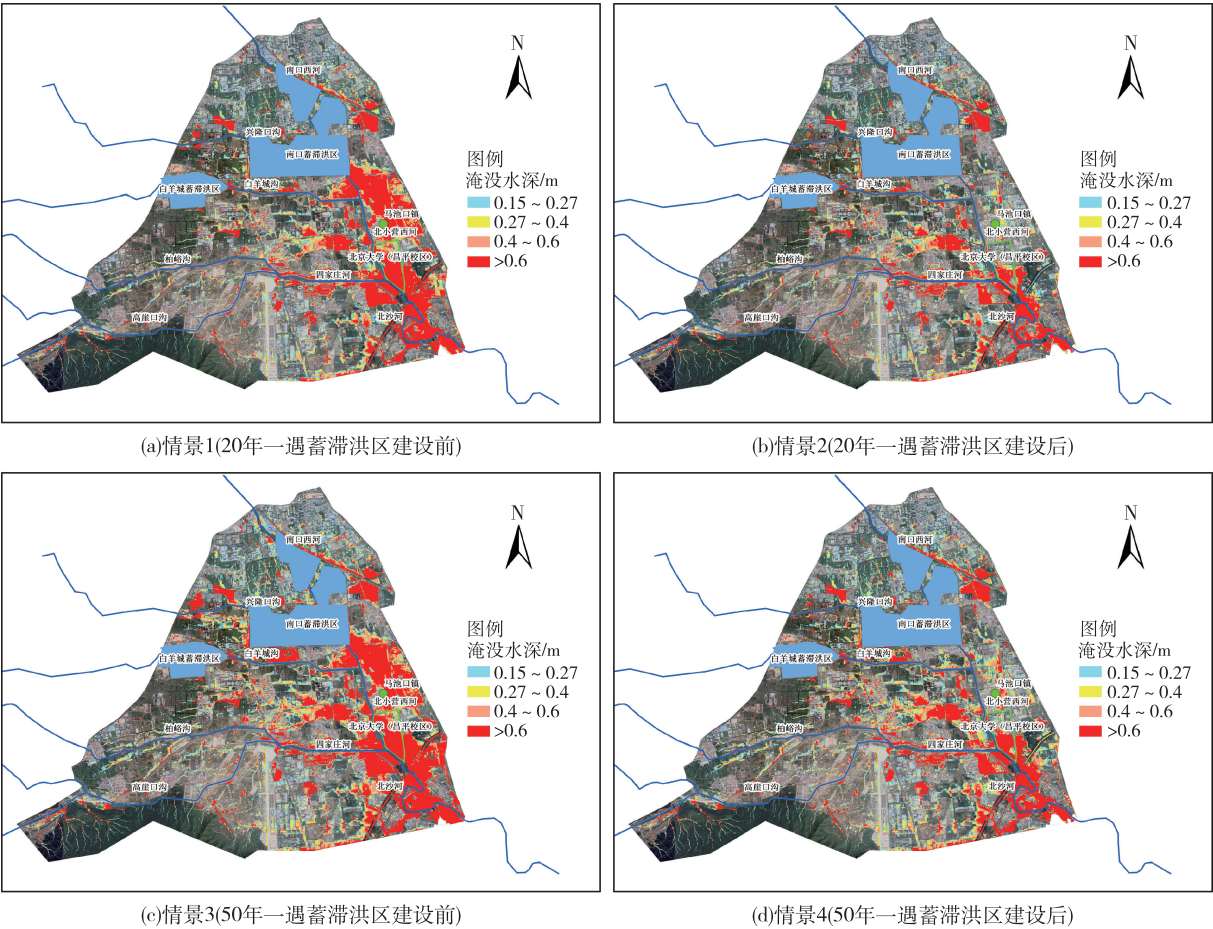


图8 各情景淹没情况

Fig. 8 Inundation conditions under different scenarios

蓄滞洪区建设后各情景下，较低风险区和中等风险区的淹没面积呈现负增长趋势，其原因为部分高风险区域通过蓄滞洪区的调蓄作用实现了风险等级的降低。研究区域高风险区淹没主要分布在河道

两侧，地势较低，除北京大学(昌平校区)，其余高风险地区多为草地、林地，糙率较大，泄流较慢。此外，蓄滞洪区建设后，北小营西河右岸基本不发生漫溢，左岸马池口镇的淹没面积显著缩减。高崖口沟与北沙河汇合处(北京大学昌平校区附近)为持续淹没高发区，结合河道模拟结果，该段淹没水位高于堤顶高程，堤防防洪标准不达标是洪水漫溢的主因。

4.3 蓄滞洪区减灾效果 根据北京市应急局提供的2022年格网数据，研究区域社会经济基础数据为：地区生产总值126.8亿元，常住人口9.6万人，建筑存量2.39万栋，耕地面积98.5 hm²。

根据模拟结果计算受灾损失，结果如表6所示，蓄滞洪区的建设对不同重现期的设计洪水与降雨条件下的淹没损失呈现显著调控效果。

20年一遇情景下，非蓄滞洪区GDP损失减少率27.55%，受灾人口减少率20.24%，受灾房屋减少率15.52%，淹没耕地减少率23.81%；50年一遇情景下的经济损失状况呈现显著改善，非蓄滞洪区GDP损失量由建设前的39.99亿元降至31.01亿元，减少率达22.45%；受灾人口减少率达18.12%；淹没耕地面积均减少率为14.53%；房屋受灾数量减少率为19.97%。

表6 受灾损失
Table 6 Disaster impact loss inventory

设计洪水 重现期/a	设计降雨 重现期/a	淹没区GDP/亿元		减少率/ %	受灾人口/万人		减少率/ %	受灾房屋/栋		减少率/ %	淹没耕地/hm ²		减少率/ %
		建设前	建设后		建设前	建设后		建设前	建设后		建设前	建设后	
20	20	34.27	24.83	27.55	2.52	2.01	20.24	4960	4190	15.52	27.68	21.09	23.81
50	50	39.99	31.01	22.45	2.98	2.44	18.12	5765	4927	14.53	32.44	25.96	19.97

由蓄滞洪区减灾效果量化分析可见，无论是20年一遇还是50年一遇暴雨洪水情景下，蓄滞洪区建设后研究区受灾指标(GDP损失、受灾人口数量、受灾房屋栋数及淹没耕地面积)均显著低于建设前，表明蓄滞洪区的建设能够有效减少洪水损失。此外，结合河道与地表模拟结果，表明河道有了更多调蓄空间，降雨经过产汇流汇入河道，可有效减少地表积水，进而减少内涝损失。

5 结论与建议

本研究以北京市温榆河流域北沙河为例，采用了更符合实际水量移动路径的全分布式水文水动力模型，对山区与城市过渡带区域的复杂地形采用局部微地形概化处理技术，实现了与实际地貌高度吻合的汇流路径模拟；针对规划蓄滞洪区，考虑了所有洪水来源，即同步考虑上游洪水与本地降雨，通过模拟蓄滞洪区修建前后不同重现期降雨、洪水耦合情景下研究区可能受灾情况，定量评估了山前蓄滞洪区的综合减灾能力。研究表明：

- (1)白羊城与南口蓄滞洪区减灾效果显著。一是直接减灾成效明显，淹没面积减少约16%~18%，非蓄滞洪区GDP损失减少约22%~28%；二是能显著削减河道洪峰流量并降低水位，减轻下游防洪压力，为区域防洪安全提供有力支撑。三是蓄滞洪区建设为下游河道拓展了调蓄空间，有利于促进降雨更多汇入河道，进而减少内涝风险及洪水损失，显著提升了流域整体的洪水管理能力，充分印证了蓄滞洪区的积极减灾效应。
- (2)全分布式水动力模型通过耦合流域产汇流过程与河道洪水演进机制，能够精准刻画不同降雨情景下洪水的时空演变规律。该模型在山前蓄滞洪区减灾效果模拟中展现出良好的适用性，可实现从降雨产流、地表漫流到河道汇流的全过程动态模拟，为山前蓄滞洪区防洪减灾决策提供科学依据。
- (3)尽管山前蓄滞洪区具有显著减灾作用，但北沙河部分堤防未达标，面对超标准暴雨洪水时其调控能力有限。为此，建议进一步完善避险风险图编制、推进韧性城市建设及制定极端灾害应对预案，构建多维度灾害风险防控体系，有效降低超标准暴雨洪水的潜在风险。

参 考 文 献:

- [1] 徐宗学, 卢兴超, 施奇妙. 城市暴雨洪涝灾害特征与风险评估研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(1): 1-9, 46. (XU Zongxue, LU Xingchao, Shi Qimiao. Progress on the study of urban flooding disaster characteristics and risk assessment[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1): 1-9, 46. (in Chinese))
- [2] 张建云, 王银堂, 贺瑞敏, 等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展, 2016, 27(4): 485-491. (ZHANG Jianyun, WANG Yintang, HE Ruimin, et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(4): 485-491. (in Chinese))
- [3] 马强, 李郑森, 董芳睿, 等. 流域数字孪生防洪模型的构建: 以子牙河“23·7”大洪水复盘为例[J]. 水利学报, 2025, 56(1): 73-84. (MA Qiang, LI Zhengmiao, DONG Fangrui, et al. Construction of a Digital Twin Flood Control Model for river basins: A case study of the ‘2023·7’ major flood in the Ziya River Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025, 56(1): 73-84. (in Chinese))
- [4] 王浩, 王佳, 刘家宏, 等. 城市水循环演变及对策分析[J]. 水利学报, 2021, 52(1): 3-11. (WANG Hao, WANG Jia, LIU Jiahong, et al. Analysis of urban water cycle evolution and countermeasures[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(1): 3-11. (in Chinese))
- [5] 冷栋, 才莉莉. 国内外防洪措施的探讨[J]. 黑龙江水利科技, 2020, 48(6): 41-43. (LENG Dong, CAI Lili. Discussion on flood control measures at home and abroad [J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2020, 48(6): 41-43. (in Chinese))
- [6] 刘树坤. 国外防洪减灾发展趋势分析[J]. 水利水电科技进展, 2000(1): 2-9, 69. (LIU Shukun. Analysis of development trend of overseas flood control and disaster mitigation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2000(1): 2-9, 69. (in Chinese))
- [7] 李致家, 张心愿, 白云鹏, 等. 海河“23·7”流域性特大洪水复盘模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(5): 13-19. (LI Zhijia, ZHANG Xinyuan, BAI Yunpeng, et al. Retrospective simulation on the Haihe “23·7” basin-wide extreme flood[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(5): 13-19. (in Chinese))
- [8] 杨舒楠, 张芳华, 胡艺, 等. “23·7”华北特大暴雨过程的基本特征与成因初探[J]. 暴雨灾害, 2023, 42(5): 508-520. (YANG Shunan, ZHANG Fanghua, HU Yi, et al. Analysis on the characteristics and causes of the “23·7” torrential rainfall event in North China[J]. Torrential Rain and Disasters, 2023, 42(5): 508-520. (in Chinese))
- [9] HU Y, QIN T, DONG G, et al. Flood modeling in a composite system consisting of river channels, flood storage areas, floodplain areas, polder areas, and flood-control-protected areas[J]. Water, 2024, 16(6): 825-845.
- [10] NYAME A J, CHARLES G, EMMANUEL A. Impacts of retention basins on downstream flood peak attenuation in the Odaw River Basin, Ghana[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2023, 47: 101363-101383.
- [11] KUN W, ZONGZHI W, KELIN L, et al. Optimizing flood diversion siting and its control strategy of detention basins: A case study of the Yangtze River, China[J]. Journal of Hydrology, 2021, 597: 126201-126215.
- [12] 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. (WU Binbin, YU Haijun, MU Jie, et al. Flood simulation in river and flood storage-detention area considering[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(6): 68-75. (in Chinese))
- [13] 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. (GUO Peng, XIA Junqiang, CHEN Qian, et al. A mechanics-based model of flood risk assessment and its application in aflood diversion zone[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(6): 858-867. (in Chinese))
- [14] 肖潇, 麻林, 庞爱磊. 童家湖蓄滞洪区洪水演进数值模型研究[J]. 人民长江, 2018, 49(7): 6-10. (XIAO Xiao, MA Lin, PANG Ailei. Study on numerical simulation for flood routing of Tongjia Lake Flooddetention Area [J]. Yangtze River, 2018, 49(7): 6-10. (in Chinese))

- [15] 赵然杭, 徐悦华, 齐真, 等. 多源洪水影响下南四湖湖东滞洪区洪水演进模拟[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(32): 13983-13995. (ZHAO Ranhang, XU Yuehua, QI Zhen, et al. Simulation of flood routing in east flood detention basin of Nansi Lake under the influence of multi-source flood[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(32): 13983-13995. (in Chinese))
- [16] 宿辉, 武春晓, 周帅, 等. 山洪灾害风险空间分异性评估及其驱动力研究[J]. 人民黄河, 2025, 47(2): 60-66. (SU Hui, WU Chunxiao, ZHOU Shuai, et al. Study on spatial differentiation assessment and driving force of flash flood disaster risk[J]. Yellow River, 2025, 47(2): 60-66. (in Chinese))
- [17] 张馨仁, 王瑛, 刘天雪, 等. 山洪灾害建筑物脆弱性曲线研究进展[J]. 山地学报, 2021, 39(3): 356-366. (ZHANG Xinren, WANG Ying, LIU Tianxue, et al. Research progress of building vulnerability curve associated with mountain torrent[J]. Mountain Research, 2021, 39(3): 356-366. (in Chinese))
- [18] 刘昌军, 文磊, 周剑, 等. 小流域暴雨山洪水文模型与水动力学方法计算比较分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2019, 17(4): 262-270. (LIU C J, WEN L, ZHOU J, et al. Comparative analysis of hydrological models and hydrodynamic methods for rainstorm mountain floods in small basins[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019, 17(4): 262-270. (in Chinese))
- [19] 徐宗学. 北京市城市化对暴雨洪水过程的影响及其数值模拟[J]. 中国防汛抗旱, 2018, 28(2): 4. (XU Zongxue. Impact of urbanization on rainstorm-flood processes in Beijing and its numerical simulation[J]. China Flood & Drought Management, 2018, 28(2): 4. (in Chinese))
- [20] 丁志雄. 河北省涿州市“23.7”洪水模拟反演分析及思考[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2024, 22(2): 121-128. (DING Z X. Simulation and inversion analysis of the “2023·7” flood in Zhuozhou City, Hebei Province[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2024, 22(2): 121-128. (in Chinese))
- [21] 张景, 郝瑞霞, 何晓燕, 等. 蓄滞洪区设立对汾河下游防洪的影响[J]. 人民黄河, 2017, 39(1): 47-50. (ZHANG Jing, HAO Ruixia, HE Xiaoyan, et al. Effect on flood control from the establishment of detention basin of the Lower Fenhe River[J]. Yellow River, 2017, 39(1): 47-50. (in Chinese))
- [22] 鲍文. 蓄滞洪区减灾与可持续发展研究[J]. 人民黄河, 2007(10): 14-15. (BAO Wen. Research on disaster reduction and sustainable development of flood storage and detention areas[J]. Yellow River, 2007(10): 14-15. (in Chinese))
- [23] 赫磊, 范亭君, 冉静, 等. 美国蓄滞洪区规划与管控的经验及对我国的启示[J/OL]. 国际城市规划, 1-16 [2025-10-08]. <https://link.cnki.net/urlid/11.5583.TU.20240511.1531.003>. (HAO Lei, FAN Tingjun, RAN Jing, et al. Planning and control experience of flood storage and detention area in the United States and the implications for China[J/OL]. Urban Planning International, 1-16 [2025-10-08]. <https://link.cnki.net/urlid/11.5583.TU.20240511.1531.003>. (in Chinese))
- [24] 张红萍, 李敏, 贺瑞敏, 等. 城市洪涝模拟应用场景及相应技术策略[J]. 水科学进展, 2022, 33(3): 452-461. (ZHANG Hongping, LI Min, HE Ruimin, et al. Application scenarios and corresponding technical strategies of urban flood modeling[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(3): 452-461. (in Chinese))
- [25] 徐美, 孙杨, 刘舒. 北京城市精细化洪涝模型初步构建与应用[J]. 中国防汛抗旱, 2020, 30(7): 16-21. (XU Mei, SUN Yang, LIU Shu. Preliminary building and application of Beijing urban flood models[J]. China Flood & Drought Management, 2020, 30(7): 16-21. (in Chinese))
- [26] ZHANG H, WU W, HU C, et al. A distributed hydrodynamic model for urban storm flood risk assessment[J]. Journal of Hydrology, 2021, 600: 126513-126534.
- [27] 臧文斌. 城市洪涝精细化模拟体系研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019. (ZANG Wenbin. Research on urban flood refined simulation system[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019. (in Chinese))
- [28] 赵文举, 樊新建, 范严伟. 工程水文学与水利计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016: 313. (ZHAO Wenju, FAN Xinjian, FAN Yanwei. Engineering hydrology and hydraulic calculations[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2016. (in Chinese))
- [29] 程银才, 王军, 李明华. 基于霍顿下渗公式超渗产流计算几个问题的探讨[J]. 水文, 2016, 36(5): 14-16.

- (CHENG Yincai, WANG Jun, LI Minghua . Some problems in runoff yield excess calculation based on horton infiltration formula[J]. Journal of China Hydrology, 2016, 36(5): 14–16. (in Chinese))
- [30] 胡昌伟. 太湖流域洪水风险模拟研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013. (HU Changwei. Research on flood risk simulation in Taihu Lake Basin [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2013. (in Chinese))
- [31] 刘家宏, 梅超, 向晨瑶, 等. 城市水文模型原理[J]. 水利水电技术, 2017, 48(5): 1–5. (LIU Jiahong, MEI Chao, XIANG Chenyao, et al. Principles of urban hydrological models [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(5): 1–5. (in Chinese))
- [32] 北京市水务规划研究院. “23·7”流域性特大洪水北京市北三河流域洪水调查评价报告[R]. 北京: 北京市水务规划研究院, 2023. (Beijing Water Planning and Design Institute. Investigation and evaluation report on the flood in the North Three River Basin of Beijing during the “23·7” basin-wide extreme flood[R]. Beijing: Beijing Water Planning and Design Institute, 2023. (in Chinese))
- [33] 北京市水科学技术研究院. “23·7”流域性特大洪水北京市山洪调查报告[R]. 北京: 北京市水科学技术研究院. 2024. (Beijing Institute of Water Science and Technology. Investigation Report on Mountain Torrents in Beijing during the “23·7” Basin-wide Extreme Flood [R]. Beijing: Beijing Institute of Water Science and Technology, 2024. (in Chinese))

Quantitative analysis and evaluation of disaster reduction effectiveness of flood storage and detention areas based on numerical simulation

HE Xinhang¹, HAO Xiaoli¹, XU Mei¹, LIU Shu¹, HU Linan², SHI Shulan³

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Beijing Water Authority, Beijing 101117, China; 3. Beijing Municipal Hydrological Station, Beijing 100089, China)

Abstract: Mountain river floods pose a serious threat to the safety of foothill urban areas. Constructing flood detention and storage zones in front of mountainous regions can retain floodwater, reduce flow velocity, attenuate flood peaks, and effectively mitigate the impact of floods on developed areas. Taking the Beisha River in the Wenyu River Basin, Beijing, as a case study, this research employs a numerical simulation method based on hydrodynamic principles to simulate the flood evolution processes under two scenarios: free flood discharge and discharge regulated by flood detention zones. By comparing the flood risks and spatial distributions under different return-period floods before and after the construction of detention zones, the effectiveness of flood control and disaster mitigation was evaluated. The results indicate that: under various return-period flood scenarios, the foothill detention zones along the Beisha River can significantly reduce downstream flood peaks, inundation extent, and water depth, thereby lowering regional flood risk; the overall mitigation effect is constrained by the scale of the detention zones — under the 20-year flood scenario, the Beisha River detention zone achieves the highest mitigation benefit, reducing GDP losses by 27.55%, followed by 22.45% under the 50-year design flood; numerical simulation of flood processes provides an effective means to quantitatively analyze and assess the mitigation performance of planned or ongoing flood control projects, through comparative analysis of flood risks before and after project implementation.

Keywords: numerical simulation; flood and waterlogging disasters; hydrological-hydraulic model; flood storage and detention area; quantitative analysis of disaster mitigation effectiveness

(责任编辑: 鲁 婧)