

马强, 赵治尚, 李郑森, 等. 雨带北移影响下永定河泛区防洪情势[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(5): 875-883. MA Q, ZHAO Z S, LI Z M, et al. Flood scenario in the Yongding River flood detention area with impacts of rain belt northward-moving[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(5): 875-883. (in Chinese)

## 雨带北移影响下永定河泛区防洪情势

马强<sup>1</sup>, 赵治尚<sup>2</sup>, 李郑森<sup>1</sup>, 袁山水<sup>2</sup>, 杨邦<sup>3</sup>, 于汪洋<sup>1</sup>, 杨学军<sup>3</sup>, 刘昌军<sup>1</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 河海大学水文与水资源学院, 南京 210098;  
3. 水利部海河水利委员会, 天津 300181)

**摘要:** 采用国产水动力学模型(integrated flood model system, IFMS), 对“23·7”海河流域永定河系特大洪水中永定河泛区洪水演进及淹没范围变化进行精细化模拟复盘。将模拟结果与卫星遥感监测获取的泛区淹没范围进行对比, 最大淹没面积误差仅为 8.8%, 验证了该模型在永定河泛区洪水模拟中的可靠度。构建的永定河泛区模型可以准确反映分洪口门启闭、蓄滞洪量变化及泛区进退淹没过程。基于该模型, 进一步研究雨带北移对该地区未来防洪情势的影响。结果表明: 同等重现期的设计洪水受雨带北移影响后, 将导致泛区防洪情势愈加严峻, 雨带北移影响下的 20 a 一遇设计洪水最大淹没范围与现状情景下 50 a 一遇设计洪水最大淹没范围持平。因此, 为更好地应对未来防洪情势的发展, 需要针对永定河泛区提出更加合理的防洪规划并科学制定工程与非工程相结合的防洪措施。

**关键词:** 永定河泛区; 雨带北移; 水动力学模拟

**中图分类号:** TV87; P33 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0087

蓄滞洪区是我国防洪工程体系的重要组成部分, 在流域性洪水防御中起到了重要的分洪滞洪作用。近年来, 随着我国流域性洪水防御水平的提升与洪水管理思路的转变, 蓄滞洪区内部的经济社会发展速度逐步加快, 如何科学地管理和运用蓄滞洪区已成为流域洪水防御中的重要研究方向之一<sup>[1-2]</sup>。永定河泛区是国家设置的 98 个蓄滞洪区之一, 是永定河流域内最重要的行蓄洪区, 担负着下游“缓洪、沉沙、削峰”的任务, 并承担着保障周边重大城市及重要基础设施安全的责任<sup>[3]</sup>。由于独特的地理位置, 永定河泛区历来是国家和区域防洪研究的重点, 众多学者<sup>[4-6]</sup>对永定河泛区以上山峡区间的洪水形成机理以及泛区内部分区行洪、滞洪策略开展了大量研究。范玉等<sup>[7]</sup>采用一、二维耦合水动力学模拟方法对永定河泛区防洪调度问题进行了探讨, 通过计算分洪口门启用时的水位流量关系, 为区域防洪调度策略的制定提供科学依据。赵明雨等<sup>[8]</sup>提出单个网格与分洪口门衔接的方法, 并通过构建永定河泛区一、二维耦合水动力学模型还原了“56·8”大洪水泛区淹没过程, 对永定河泛区分洪口门的联合调度进

行了研究。李大鸣等<sup>[9]</sup>则提出了嵌套式水动力学模型构建思路, 通过历史典型洪水验证后, 对大兴机场建设后对泛区防洪能力的影响进行了评估, 研究结论支撑了机场建设的可行性。综上, 采用水动力学方法对永定河泛区洪水演进进行模拟分析可以帮助相关决策者更好地理解泛区分区调度在河系防洪体系中的作用及效果, 并对未来防洪情势发展及决策制定提供科学依据。

现在, 全球气候变化导致极端降雨事件及洪涝灾害发生的频次和强度逐渐上升<sup>[10]</sup>。研究<sup>[11-12]</sup>表明, 在多种气候模式驱动下, 未来我国降雨及径流都将呈现“北增南减”的趋势。永定河泛区作为我国北方海河流域国家级蓄滞洪区将可能面临更加严峻的洪水挑战。持续开展永定河泛区洪水复盘模拟及防洪情势分析可对未来区域洪水防御决策制定提供技术参考。基于永定河泛区 2 m 分辨率高精度数字高程数据(digital elevation model, DEM), 采用国产 IFMS(integrated flood model system)水动力学模型对“23·7”海河流域永定河系特大洪水进行复盘模拟, 分析研究此次极端洪水灾害中泛区分区运

收稿日期: 2024-02-17 修回日期: 2024-08-26 网络出版时间: 2024-09-06

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240905.0915.008>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3006702); 水利部重大科技项目(SK2022034)

作者简介: 马强(1987—), 男, 天津人, 高级工程师, 博士, 主要从事水信息学研究。E-mail: [maqiang@iwhr.com](mailto:maqiang@iwhr.com)

通信作者: 李郑森(1992—), 女, 河北石家庄人, 工程师, 主要从事水信息学研究。E-mail: [lizhengmiaowork@163.com](mailto:lizhengmiaowork@163.com)

用成效。基于复盘模型,对不同“雨带北移”预估情景下的永定河泛区未来防洪情势变化进行预测分析,为未来永定河系防洪预案编制及防洪措施制定提供科学依据。

## 1 研究区概况

永定河泛区位于永定河系中下游,始于河北省廊坊市固安县梁各庄,至天津屈家店枢纽,泛区内河道总长度为 67 km,左右大堤间距约为 6~7 km,总面积 522.65 km<sup>2</sup>,主要涉及河北省、北京市和天津市。永定河泛区洪水主要来自官厅水库以下的官厅山峡区间,由于该区域位于燕山迎风坡,雨量较为充沛

(年平均降雨量 700 mm),易形成突发性暴雨洪水<sup>[13]</sup>。历史上永定河洪水多发生在 7—8 月,其特点是洪水持续时间短(一般 5 d 左右)、传播速度快(从官厅山峡出口至泛区入口洪水传播时间一般小于 10 h)。例如,1956 年永定河系洪水由官厅山峡出口传播到泛区入口梁各庄仅用时 6.5 h<sup>[14]</sup>。永定河泛区的启用标准为发生 3~20 a 一遇洪水,当泛区上游卢沟桥枢纽下泄洪峰达到 2 500 m<sup>3</sup>/s 时,永定河泛区启用。

由于历史原因,永定河泛区内存在多条小埝及河流故道。泛区内有南北小埝、南北前卫埝、龙河左右小埝和南北围埝等,形成了泛区内分区蓄洪的格局<sup>[15]</sup>。泛区内小埝及分洪口门位置分布见图 1。

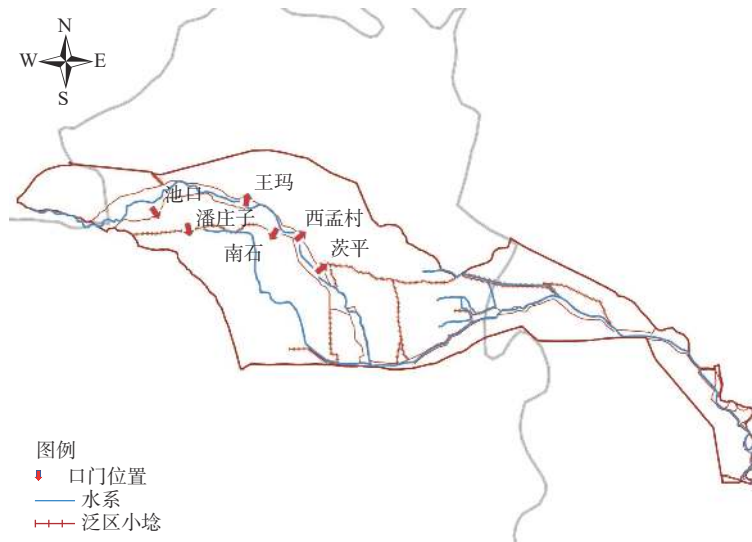


图 1 永定河泛区及分洪口门分布

Fig. 1 The Yongding River flood detention area and the distribution of flood gates

2023 年 7 月 28 日—8 月 2 日,台风“杜苏芮”残余环流携丰沛水汽北上,在海河流域造成一轮历史罕见极端暴雨<sup>[16]</sup>。在此期间,永定河系发生自 1924 年以来最大洪水过程,官厅山峡区间累计降雨量达 376 mm,卢沟桥枢纽在 2 h 内洪水从 1 000 m<sup>3</sup>/s 迅速涨至 4 650 m<sup>3</sup>/s<sup>[17-19]</sup>。7 月 31 日 16 时 51 分,永定河固安县监测断面水位起涨,8 月 2 日 0 时 10 分出现洪峰流量 2 250 m<sup>3</sup>/s。永定河泛区自 8 月 2 日 6 时启用。灾后调查分析表明,在此次特大洪水中永定河泛区最大蓄滞洪量约为 2.56 亿 m<sup>3</sup>,最大淹没面积约为 105.25 km<sup>2</sup>,累计淹没时长 17 d 左右,造成泛区内约 10 万人进行了紧急转移<sup>[20]</sup>。

## 2 模型构建

### 2.1 模型算法

采用中国水利水电科学研究院自主研发的

IFMS 水动力软件构建永定河泛区二维水动力学模型<sup>[21-22]</sup>。IFMS 软件是一款集成了一维河网模拟、城市管网模拟和二维地表水动力学模拟并实现一、二维耦合以及管网与二维模型耦合模拟的国产洪水分析软件<sup>[23]</sup>。该软件基于 Godunov 型格式的有限体积法求解二维浅水方程,底坡源项采用了特征分级离散以保证模型的守恒性,阻力源项则采用了式离散提高模型的稳定性。IFMS 采用 MUSCL 空间重构和预测矫正法使得模拟结果具有时空二阶精度。模型中的二维浅水方程表达式为

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right) + \frac{\partial huv}{\partial y} = s_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( hv^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right) + \frac{\partial huv}{\partial x} = s_y \quad (3)$$

式(1)至(3)中:  $h$ 为水深, m;  $u$ 为 $x$ 方向的流速, m/s;  $v$ 为 $y$ 方向的流速, m/s;  $g$ 为重力加速度,  $m/s^2$ ;  $t$ 为时间, s;  $s_x$ 为 $x$ 方向上的源项,  $m^2/s$ ;  $s_y$ 为 $y$ 方向的源项,  $m^2/s$ 。源项表达式为

$$s_x = -\frac{h}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial x} - gh \frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{\tau_{ax} - \tau_{bx}}{\rho} + c_x \quad (4)$$

$$s_y = -\frac{h}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial y} - gh \frac{\partial z_b}{\partial y} + \frac{\tau_{ay} - \tau_{by}}{\rho} + c_y \quad (5)$$

式(4)和(5)中:  $p_a$ 为水面大气压力, Pa;  $z_b$ 为床面底高程, m;  $\rho$ 为水的密度,  $kg/m^3$ ;  $\tau_{ax}$ 为 $x$ 方向风载作用力, N;  $\tau_{ay}$ 为 $y$ 方向风载作用力, N;  $\tau_{bx}$ 为 $x$ 方向河底阻力, N;  $\tau_{by}$ 为 $y$ 方向河底阻力, N;  $c$ 为地转科氏力, N。IFMS同时支持在模拟区域人为设定分洪口门启闭规则, 口门分洪单宽流量采用以下公式计算:

$$q = \begin{cases} 0.35h_1 \sqrt{2gh_1} & \frac{h_2}{h_1} \leq \frac{2}{3} \\ 0.91h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} & \frac{2}{3} < \frac{h_2}{h_1} \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $h_1 = \max(Z_u) - Z_b$ ;  $h_2 = \min(Z_u - Z_d) - Z_b$ ;  $q$ 为通过分洪口门的单宽流量,  $m^2/s$ ;  $Z_u$ 和 $Z_d$ 分别为分洪口门内外的水位, m;  $Z_b$ 为口门处的高程, m。

### 2.2 模型构建

研究对永定河泛区 2 m 分辨率的 DEM 对进行网格剖分, 将主要道路等作为内部约束边界, 对地形起伏大的区域进行加密处理。网格剖分区域中, 考虑泛区主河道左右大堤间距约为 6~7 km, 采用精密网格表征河道地形, 其余区域则适当降低网格精度以减少模型计算量。本研究构建永定河泛区二维水动力模型由 76 349 个非结构网格组成。模型中的地表及河道糙率设定则参考全国山洪灾害调查分析评价数据、土地利用及土壤质地分布图(图2): 河道糙率取值为 0.03~0.04; 村庄及较大的阻水建筑物周围网格糙率取 0.10; 农田面积覆盖网格糙率为 0.045。

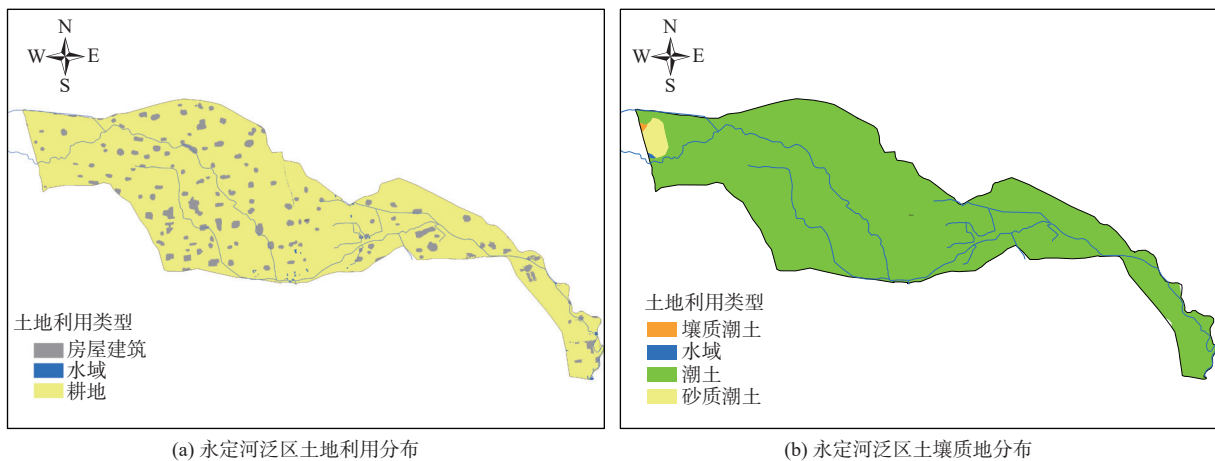


图2 永定河泛区下垫面条件数据

Fig. 2 The data of the underlying surface condition of Yongding River detention area

在模型中设置茨平、西孟村、南石、王码、池口和潘庄子 6 个分洪口门, 相关参数取自《国务院关于永定河洪水调度方案的回复》<sup>[24-25]</sup>。自泛区入口至泛区出口, 分洪口门位置关系见图3。本研究以固安站洪水过程作为永定河泛区入口边界条件, 屈家店枢纽水位流量关系作为模型出口边界条件见图4。

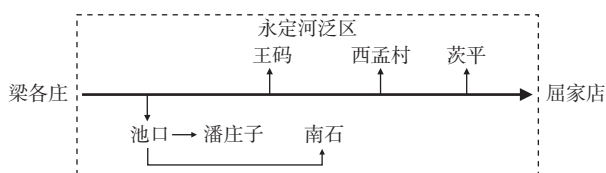


图3 永定河泛区分洪口门拓扑关系概化图

Fig. 3 Diagram of flood gates of Yongding River flood detention area

### 3 复盘模拟

在“23·7”海河流域永定河系特大洪水过程中, 永定河泛区实际启用为 8 月 2 日 6 时, 为了更好地模拟复盘永定河泛区分区运用及洪水演进全过程, 设定模型模拟时间为 2023 年 7 月 30 日 8 时至 8 月 21 日 8 时。将模拟结果与洪水过程中遥感卫星实时监测获得的淹没范围进行对比, 模拟泛区洪水演进过程及淹没面积变化与实际基本一致。8 月 5 日, 监测获得的泛区淹没面积达到最大值 96.88  $km^2$ , 在同一时刻模拟淹没面积也达到最大值 105.46  $km^2$ , 模拟与实测误差仅为 8.8%(图5、图6)。造成对比误差的主要原因推测为淹没区内部种植的高秆作物对水面提取产生了干扰, 导致提取面积偏小。

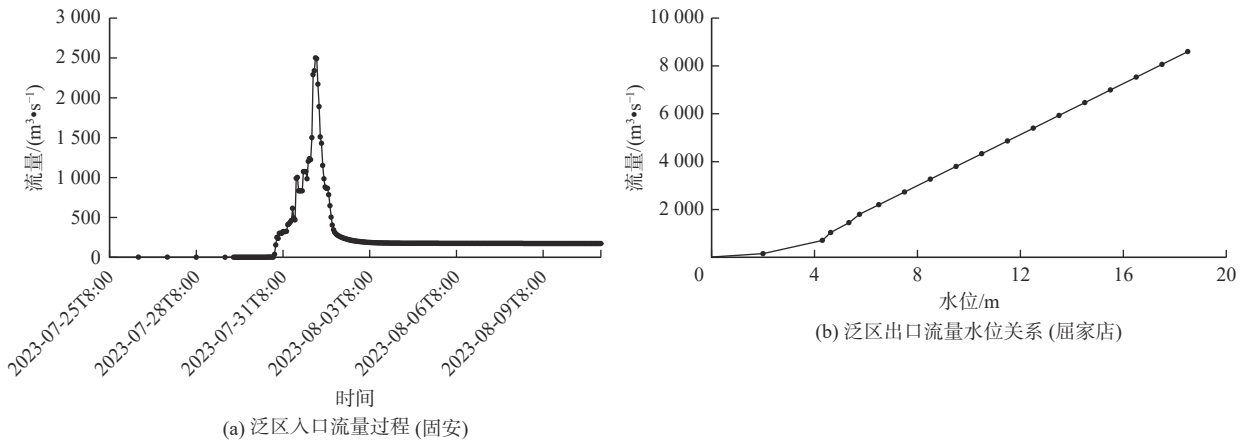


图 4 模型上下游边界输入数据  
Fig. 4 The up and downstream boundary conditions of Yongding River flood detention area model

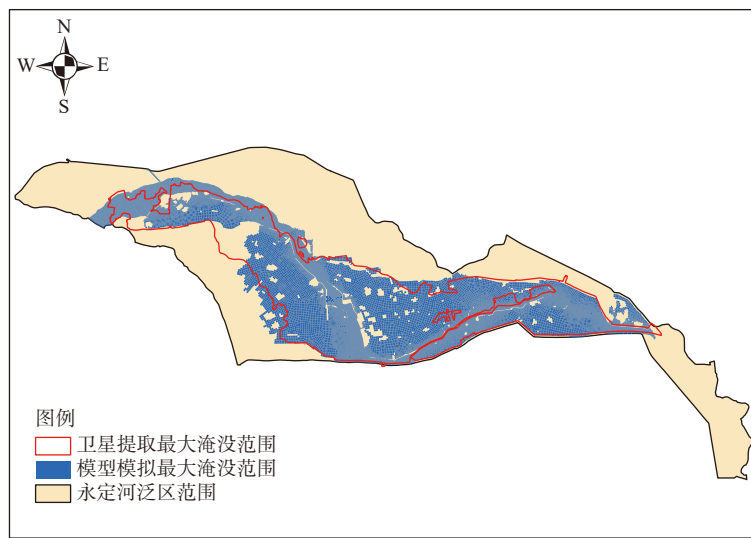


图 5 永定河泛区模拟与卫星遥感提取最大淹没范围对比  
Fig. 5 Comparison between simulated and remote science detected maximum flooded area in Yongding River flood detention area

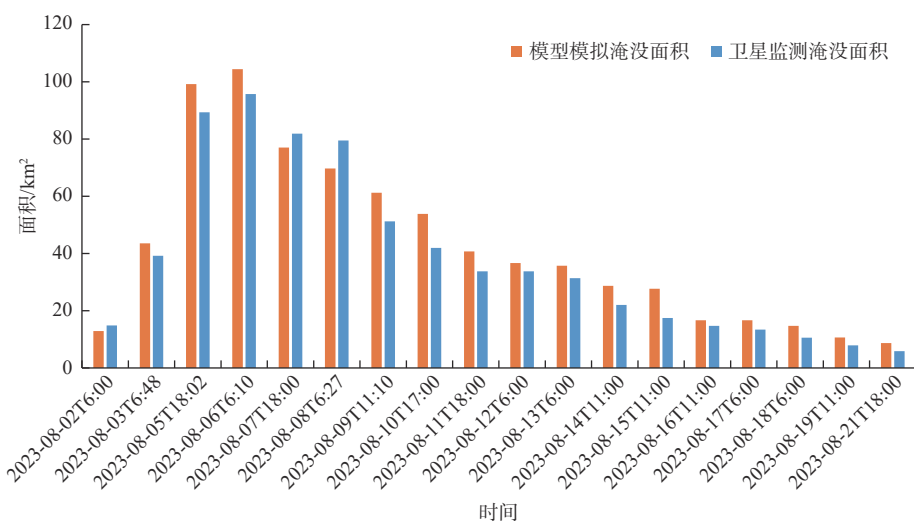


图 6 永定河泛区模拟与卫星实测淹没面积变化对比  
Fig. 6 The comparison between the monitored and simulated flooded area of Yongding River flood detention area

自永定河泛区启用开始至 8 月 21 日 8 时, 永定河泛区实际进洪总量 3.57 亿  $m^3$ , 模拟进洪总量 3.62 亿  $m^3$ , 误差为 1.4%。永定河泛区实际退洪总量 2.11 亿  $m^3$ , 模拟退洪总量 1.94 亿  $m^3$ , 误差为 8%。永定

河泛区实测最大滞洪量 2.29 亿  $\text{m}^3$  出现在 8 月 6 日 21 时,模拟最大滞洪量 2.38 亿  $\text{m}^3$  出现时间与实测一致,误差为 3.9%。综合考虑模型网格高程与实际微地形存在一定的差异、模型地表糙率赋值具有一定不确定性以及实测数据存在一定检测误差等因素,认为本研究所建复盘模型模拟结果基本符合实际情况,可以作为进一步分析评估永定河泛区洪水防御措施效果的主要技术工具。

本次洪水过程中,永定河泛区内部共启用 6 个

分洪口门进行分区泄洪,实际口门启用时间与模拟口门启用时间对比见表 1<sup>[26]</sup>。模拟分洪口门启用后的流量过程见图 7。各个口门模拟启用时间与实际启用时间有数个小时的时间差,但整体保持在 $\pm 2$  h 以内,模型可以较好地还原“23•7”海河流域永定河系特大洪水过程中泛区分洪口门启用顺序及时间。此外,模型口门处网格地形与实际情况仍存在一定差异,在一定程度上使模拟分洪流量略大于实际情况。

表 1 口门实际与模拟启用时间对比

Tab. 1 Comparison of actual and simulated activated time of the flood gates

口门名称	实际启用时间	模型启用时间	模拟与实际时间差
池口	8月1日23时	8月2日01时	+2 h
茨平	8月2日06时	8月2日05时	-1 h
西孟村	8月2日10时	8月2日12时	+2 h
南石	8月2日10时	8月2日08时	-2 h
潘庄子	未启用	未启用	
王玛	未启用	未启用	

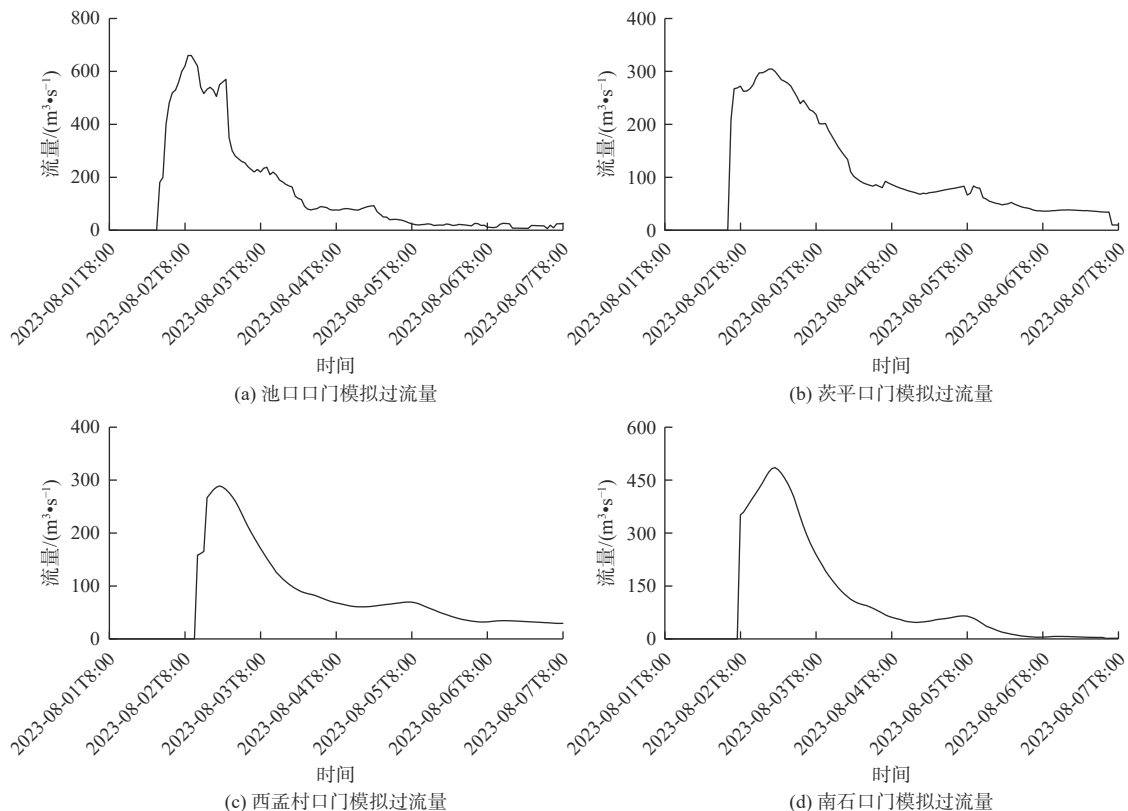


图 7 启用分洪口门模拟流量过程

Fig. 7 The flow process of activating flood gates

#### 4 未来情势分析

我国地处东亚季风区,东部夏季雨带的分布受季风影响,存在多次明显的年代调整<sup>[27]</sup>。近几十年

来,随着我国东部沿海海洋年平均气温升高,副热带高压系统在太平洋西北的膨胀使得低纬度水汽更容易向北输送,大大增加了华北地区降水的可能性,在我国形成了雨带北移的趋势<sup>[28-31]</sup>。目前,我

国华北区域的雨带北移趋势是多层次和多尺度因素的共同作用导致的,将为未来该地区的水资源管理、防洪减灾以及农业生产等带来更为严峻的挑战<sup>[31-32]</sup>。本研究基于中国气象中心 25 km 未来降雨变化预测成果开展雨带北移情景下的永定河泛区防洪情势分析。该数据采用 RegCM4.4 区域气候模式,选择了对中国气候有较好模拟效果的参数化组合(表 2)<sup>[33-35]</sup>。

本研究重点研究雨带北移趋势可能导致的永定河泛区未来夏季暴雨增幅中最不利情景下的防洪情势。见图 8,永定河泛区在 2025 年、2035 年和 2050 年 3 个不同遇见期情境下,单位网格的雨量变化程度不尽相同。在 2025 年情境下,永定河泛区入口处单位时间极端降雨量将比现状增加 19%,在 2035 年情境下则可能短暂减少 1.6%,之后在 2050

年情景下再次增幅至 16.4%。按照未来不同遇见期情景,基于“23·7”海河流域永定河系特大洪水永定河泛区实测降雨分布,同时结合泛区入口处(固安站)20 a、50 a 和 100 a 一遇设计洪水过程,对现状地形条件下泛区发生极端洪水进行模拟分析。

表 2 永定河未来降雨变化预测参数

Tab. 2 The parameters of future rainfall change estimation in Yongding River flood detention area

参数名称	参数方案
辐射	CCM3方案
行星边界层	Holtstag方案
大尺度降水	SUBEX方案
积云对流	Emanuel方案
陆面	CLM3.5方案
土地覆盖	1 : 100万植被图

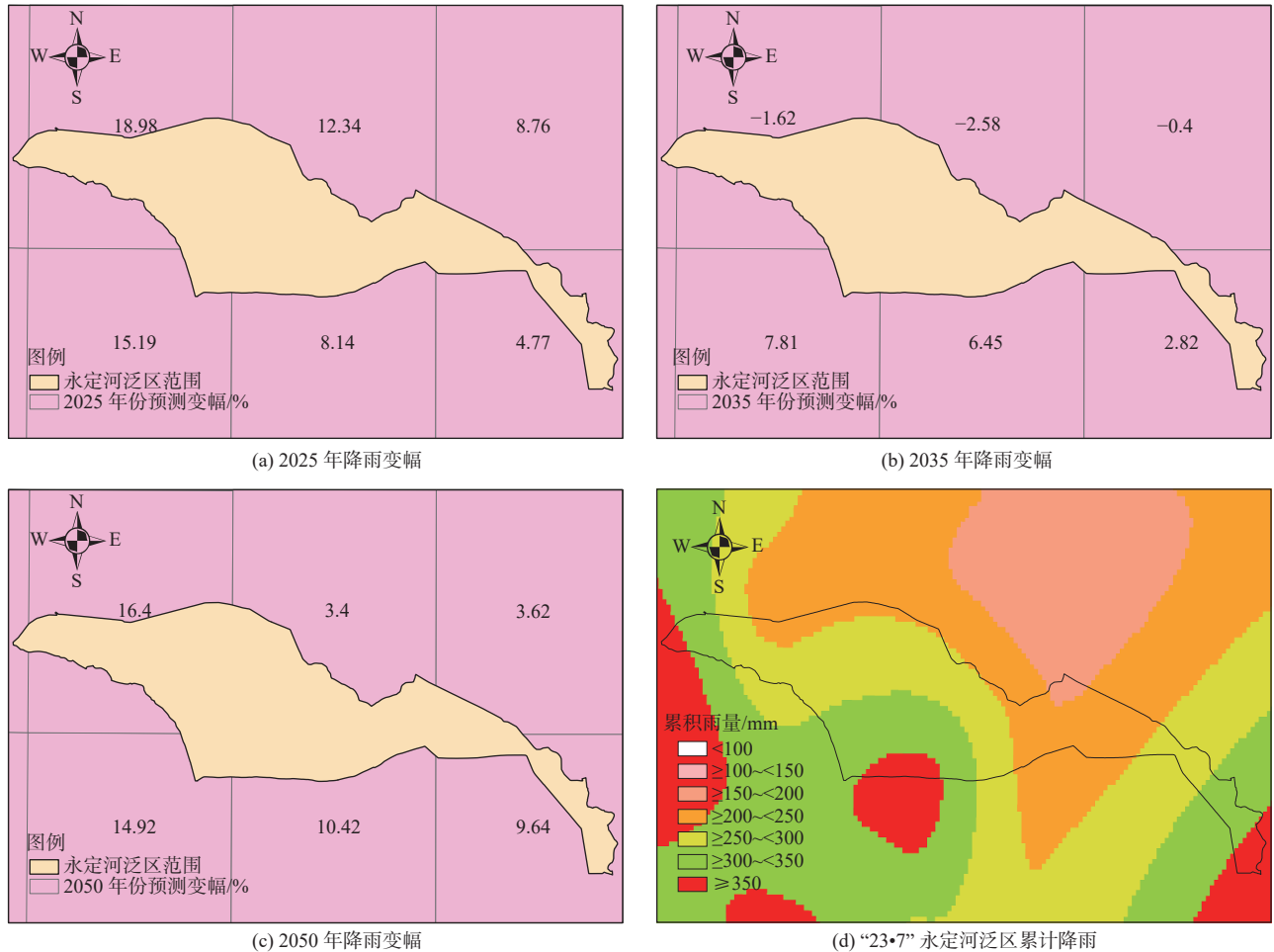


图 8 永定河泛区不同遇见期夏季最大降雨变幅及“23·7”永定河泛区累计雨量分布

Fig. 8 The maximum changing ratio of summer rainfall and “23·7” rainfall distribution in Yongding River flood detention area

结果表明,考虑雨带北移对未来降雨的影响,各个设计频率下的洪水过程造成的最大淹没范围及最大滞洪量均在不同程度上得到了放大(表 3)。如

图 9 所示,考虑雨带北移影响永定河泛区入口处遭遇 20 a 一遇设计洪水时,泛区最大淹没范围与未考虑“雨带北移”影响泛区入口遭遇 50 a 一遇设计洪

水所造成的最大淹没范围相近。推测在未来雨带北移趋势影响下,永定河泛区洪水灾害情势将更加严峻。

表3 不同模拟情景下永定河泛区最大滞洪量统计  
Tab.3 Statistical analysis of maximum water storage of Yongding River flood detention area 单位:亿m<sup>3</sup>

降雨情景	20 a一遇设计洪水	50 a一遇设计洪水	100 a一遇设计洪水
现状降雨	2.56	2.78	3.21
2025年降雨	3.17	3.72	3.99
2035年降雨	2.72	3.26	3.89
2050年降雨	3.15	3.69	3.99

## 5 结论

永定河泛区是全国98个重要蓄滞洪区之一,是

永定河系防洪工程体系的核心。为了深入研究永定河泛区现状防洪能力及未来雨带北移趋势影响下的防洪情势变化,本文提出了基于国产IFMS水动力软件的模拟分析方法,通过对“23·7”海河流域永定河系特大洪水模拟复盘,验证所构建模型的合理性与精确性,基于校准后的模型对未来永定河泛区防洪情势发展进行探讨,为今后泛区防洪规划制定提供技术参考。

通过与“23·7”海河流域永定河系特大洪水中卫星遥感监测实时提取的泛区淹没面积进行对比,本研究所建模型在洪水演进的各时期模拟淹没面积与实际对比误差均在10%以内。模拟获得的泛区进、退洪总量及最大蓄滞洪总量均与实测数据基本保持一致。因此,本研究所建立的永定河泛区二维水动力学模型具备针对“23·7”海河流域永定河系特大洪水进行精细化模拟复盘的能力。

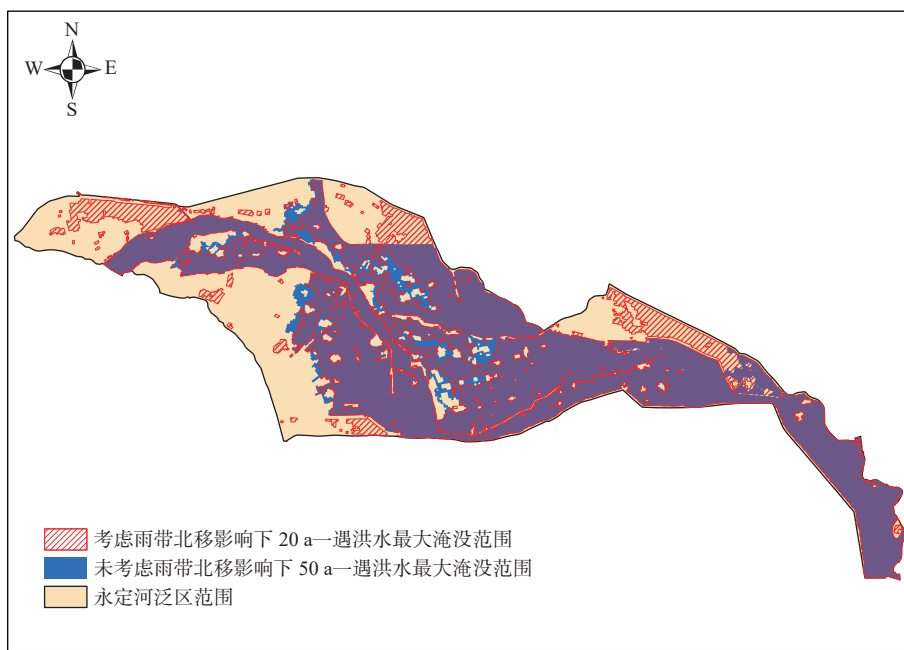


图9 雨带北移趋势对20 a一遇设计洪水淹没范围的增幅作用

Fig.9 The increase of flooded area produced by 20-year return period flood with rain belt northward-moving affects

依托校准后的模型,本研究将雨带北移影响下遇见期的降雨变化结合泛区入口处(固安站)设计洪水,设定不同模拟情景,对永定河泛区未来防洪情势进行了预估。发现雨带北移对极端降雨的放大效应将导致未来20 a一遇设计洪水最大淹没范围增大至现状50 a一遇洪水最大淹没范围,泛区未来可能面临更大的洪水灾害风险。

当然,一定程度上受限于地形数据的精度,本研究在口门开启时间与过流量模拟计算方面仍有改进空间。此外,经过“23·7”海河流域永定河系特大

洪水,泛区内外地形也会发生相应改变。因此,进一步收集完善相关地形数据,持续改进泛区水动力模型提升模拟精度,将会是未来永定河泛区研究工作的重心之一。

### 参考文献:

- [1] 关成达,李娜,俞茜,等.基于组合赋权法的蓄滞洪区建设与管理评估[J].水利水电技术(中英文),2023(4):97-107. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.04.009.

- [2] 英若智, 杜维素. 关于防洪新理念的几点思考 [J]. *南水北调与水利科技*, 2003(6): 22-24. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1683.2003.06.008.
- [3] 冯雪丽. 海河流域“23·7”特大洪水期间永定河泛区的应用分析 [J]. *河北水利*, 2023(10): 30-31. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7700.2023.10.019.
- [4] 欧阳晓红. 永定河泛区洪水演进模拟 [J]. *水利水电工程设计*, 1996(4): 27-29.
- [5] 王艺璇, 沈彦军, 高雅, 等. 永定河上游环境变化和水质资源演变研究进展 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(4): 656-668. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2021.0069.
- [6] 丁爱中, 赵银军, 郝弟, 等. 永定河流域径流变化特征及影响因素分析 [J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(1): 17-22.
- [7] 范玉, 李大鸣, 赵明雨. 一二维衔接洪水演进模型在永定河泛区的应用研究 [J]. *中国农村水利水电*, 2014(11): 39-42. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2014.11.012.
- [8] 赵明雨, 李大鸣. 永定河泛区洪水演进特性的数值模拟 [J]. *水电能源科学*, 2015, 33(8): 46-49.
- [9] 李大鸣, 王笑, 赵明雨, 等. 永定河泛区洪水调度数值模拟 [J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2015, 48(1): 76-86. DOI: 10.11784/tdxbz201307063.
- [10] ASADIEH B, KRAKAUER N Y. Global trends in extreme precipitation: Climate models versus observations [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, 19(2): 877-891. DOI: 10.5194/hess-19-877-2015.
- [11] LI J, CHEN Y D, ZHANG L, et al. Future changes in floods and water availability across China: linkage with changing climate and uncertainties [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2016, 17(4): 1295-1314. DOI: 10.1175/JHM-D-15-0074.1.
- [12] 孙楠. 主雨带现北移信号 [N]. *中国气象报*, 2012-09-28(003).
- [13] 王毅, 王振宇, 闫悦新, 等. 北京永定河官厅山峡暴雨洪水特性及防范对策 [J]. *中国防汛抗旱*, 2018, 28(12): 100-102. DOI: 10.16867/j.issn.1673-9264.2017300.
- [14] 陈建华. 1956 年永定河洪水的启示 [J]. *河北水利*, 2003(5): 18-18.
- [15] 刘春波. 浅析永定河泛区在永定河防洪体系中的作用 [J]. *中国水利*, 2003(4): 109-109. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2003.04.070.
- [16] 李素菊, 刘明, 金晟玥. 卫星遥感动态监测“杜苏芮”台风灾害链 [J]. *中国减灾*, 2023(19): 14-15. DOI: 10.3969/j.issn.1002-4549.2023.19.008.
- [17] 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. DOI: 10.12406/byzh.2023-187.
- [18] 张启义. 北京房山区“23·7”特大暴雨灾害的成因及启示 [J]. *中国防汛抗旱*, 2023, 33(10): 43-47. DOI: 10.16867/j.issn.1673-9264.2023407.
- [19] 张大伟, 毕吴瑕. 从下游视角浅谈海河“23·7”流域性特大洪水应对方略 [J]. *中国防汛抗旱*, 2023, 33(10): 27-30. DOI: 10.16867/j.issn.1673-9264.2023361.
- [20] 水利部海河委员会. 海河“23·7”流域性特大洪水暴雨洪水调查分析报告(简本提交)定稿 [R]. 2023.
- [21] 马建明, 喻海军. 洪水分析软件 IFMS/Urban 特点及应用 [J]. *中国水利*, 2017(5): 74-75. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2017.05.024.
- [22] 喻海军, 马建明, 张大伟, 等. IFMS Urban 软件在城市洪水风险图编制中的应用 [J]. *中国防汛抗旱*, 2018, 28(7): 13-17. DOI: 10.16867/j.issn.1673-9264.2018059.
- [23] 向立云, 张大伟, 何晓燕, 等. 防洪减灾研究进展 [J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2018, 16(5): 362-372. DOI: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2018.05.005.
- [24] 任东红, 郭英卓, 冯亚耐. 永定河洪水调度方案研究 [J]. *海河水利*, 2006(5): 23-26. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7328.2006.05.009.
- [25] 国务院关于永定河防御洪水方案的批复 [J]. *中华人民共和国国务院公报*, 2003(28): 22-24.
- [26] 水利部海河水利委员会. 海河“23·7”流域性特大洪水防御纪实 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2024: 68.
- [27] 黄荣辉, 顾雷, 陈际龙, 等. 东亚季风系统的时空变化及其对我国气候异常影响的最近研究进展 [J]. *大气科学*, 2008, 32(4): 691-719. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.02.
- [28] 郝春洋, 贾仰文, 龚家国, 等. 海河流域近 50 年气候变化特征及规律分析 [J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2010, 8(1): 39-43. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3031.2010.01.007.
- [29] SI D, DING Y. Oceanic forcings of the interdecadal variability in East Asian summer rainfall [J]. *Journal of Climate*, 2016, 29(21): 7633-7649. DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0792.1.
- [30] ZHANG G, ZENG G, LI C, et al. Impact of PDO and AMO on interdecadal variability in extreme high temperatures in North China over the most recent 40-year period [J]. *Climate Dynamics*, 2020, 54(5-6): 3003-3020. DOI: 10.1007/s00382-020-05155-z.
- [31] WANG J, YANG B, OSBORN T J, et al. Causes of East Asian temperature multidecadal variability since 850 CE [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(24): 13485-13494. DOI: 10.1029/2018GL080725.
- [32] 陈颖, 张冬峰, 王林, 等. RegCM4 对华北区域 21 世纪气候变化预估研究 [J]. *干旱气象*, 2022, 40(1): 1-10. DOI: 10.11755/j.issn.1006-7639(2022)-01-0001.



- [33] 程阳,周波涛,韩振宇,等. 一组 RegCM4 动力降尺度对中国群发性高温事件的模拟评估 [J]. *气候变化研究进展*, 2020, 16(6): 657-666. DOI: [10.12006/j.issn.1673-1719.2019.226](https://doi.org/10.12006/j.issn.1673-1719.2019.226).
- [34] 周波涛,蔡怡亨,韩振宇. 中国区域性暴雨事件未来变化: RegCM4 动力降尺度集合预估 [J]. *地学前缘*, 2022, 29(5): 410-419. DOI: [10.13745/j.esf.sf.2021.9.61](https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2021.9.61).
- [35] 蔡怡亨,韩振宇,周波涛. 对基于 RegCM4 降尺度的中国区域性暴雨事件模拟评估 [J]. *气候变化研究进展*, 2021, 17(4): 420-429. DOI: [10.12006/j.issn.1673-1719.2020.197](https://doi.org/10.12006/j.issn.1673-1719.2020.197).

## Flood scenario in the Yongding River flood detention area with impacts of rain belt northward-moving

MA Qiang<sup>1</sup>, ZHAO Zhishang<sup>2</sup>, LI Zhengmiao<sup>1</sup>, YUAN Shanshui<sup>2</sup>, YANG Bang<sup>3</sup>,  
YU Wangyang<sup>1</sup>, YANG Xuejun<sup>3</sup>, LIU Changjun<sup>1</sup>

( 1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Colleague of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Hydrology Bureau of Haihe River Water Conservancy Commission, MWR, Tianjin 300181, China )

**Abstract:** As one of the main sub-catchments of Haihe River basin, the Yongding River covers Beijing, Tianjin and Hebei, Inner Mongolia and Shanxi province, with control area more than 47,000 km<sup>2</sup>. Since the beginning of 20th century, the Yongding river has frequently suffered super large flood disasters which often caused serious economic damages and casualties. Under this condition, many big reservoirs at the upstream and one detention area at the downstream of the catchment had been set up for intercepting the flood flow and reducing the peak to the cities in this area. Nowadays, the Yongding detention area with 522.65 km<sup>2</sup> is the most important construction measure of flood defense and prevention which demands scientific management according to different flood scenarios.

In order to have comprehensive understanding of the flood evolution process in the detention area for supporting the decision-making process, many hydrodynamic studies and models were set up in this area for assessing the effects of applying different regions of the detention area under various flood conditions. However, most of previous studies were either based on the modeling representation of past flood events or according to the simulation of designed scenarios. The modelling analysis of the future flood condition under the influence of rain belt northward-moving affected by the climate change was still missing in this area. By the Integrated Flood Model System (IFMS) developed by China Institute of Water Resources and Hydropower Research (IWHR), the flood progress of “23•7” super large flood in Yongding detention area was simulated and validated with the real-time monitoring data collected by satellite remote sensing during the flood period. The model was set up with 76,349 unstructured mesh based on 2 m resolution DEM which could well represent the topography variation in the modelling area.

The difference between simulated and observed maximum flooded area was only 8.8%. And the accumulated flood storage calculated by IFMS model was 0.23 billion m<sup>3</sup> which is almost as same as observation (0.24 billion m<sup>3</sup>). Therefore, the model applied for the Yongding detention area had been approved to be able to represent the flood progress and to be further used as one of operational tools for estimating future conditions. With the increasing ratio calculated with RegCM4.4 mode, the future summer heavy rainfall in 2025, 2035 and 2050 were estimated based on the “23•7” super large flood rainfall records. Integrated with the designed flood of 10, 20 and 50 year return periods at the upstream boundary, the modelling simulation shows that under the estimated rainfall in 2025, the maximum flooded area caused by 20 year return period designed flood would be similar as 50 year return period without taking into account the impacts of rain belt northward-moving.

The modelling results of this study had indicated the amplification effect of rain belt northward-moving on the flood disaster. The potential flood risk of the Yongding detention area will show an increasing trend in the future. Therefore, for the future flood defense, it is important to the decision-makers to take into account the enlargement of disaster caused by the rain belt northward-moving impacts. Moreover, the model applied in this study showed higher potentiality to be applied as one of the main reference tools for the future flood management in other river basins.

**Key words:** Yongding flood detention area; rain belt northward-moving; hydraulic simulation