

Flood Simulation and Disaster Loss Assessment of Flood Storage and Detention Areas Based on HEC-RAS

Yi Wu^{1,2}, Yuntao Wang^{1*}, Yunchuan Yang², Jing Wang³, Haixing Liu¹, Guangtao Fu¹

¹School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning

²College of Architecture and Civil Engineering, Guangxi University, Nanning Guangxi

³Chongqing Branch of North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Chongqing

Email: *ytwang@dlut.edu.cn

Received: Dec. 18th, 2019; accepted: Dec. 31st, 2019; published: Jan. 7th, 2020

Abstract

In recent years, floods occurred frequently and caused huge casualties and property losses in China. Flood simulation is profound for flood risk management, which could help reduce flood disaster losses. Based on DEM with 90 m accuracy and 2D module of HEC-RAS model, the flood simulation model of the Pangtoupao storage and detention area in the Songhua river basin was built. According to the simulation results, statistical analysis and evaluation of flood losses were carried out in this study. Under the four typical floods of 1956, 1960, 1969 and 1998, the flooded areas of the Pangtoupao storage and detention areas are 792.68 km², 740.29 km², 800.87 km² and 796.01 km², respectively. Compared to the other three typical floods, the Pangtoupao storage and detention area suffers the most serious flood losses from the typical 1969 flood process, which led to the influence on 87,500 people, flooded land area of 223.99 km² and GDP losses of 2.061 billion yuan. Townships of Yishun, Minyi, Xinzhan and Haode are badly affected by the typical disaster of 1969, and most of the water depths are above 4.0 m. The results obtained in this study show that HEC-RAS model can be used for flood simulation in flood storage and detention areas with high efficiency and convenient operation. The research results can also provide a reference for the local early flood warning, risk avoidance, personnel transfer and other management works.

Keywords

HEC-RAS Model, Flood Storage and Detention Area, Flood Simulation, Flood Damage Loss Assessment

基于HEC-RAS的胖头泡蓄滞洪区洪水模拟与灾损评估

吴 仪^{1,2}, 王运涛^{1*}, 杨云川², 王 静³, 刘海星¹, 伏广涛¹

作者简介: 吴仪(1997-), 女, 汉族, 辽宁大连人, 硕士研究生, 主要从事洪水模拟研究。

*通讯作者。

文章引用: 吴仪, 王运涛, 杨云川, 王静, 刘海星, 伏广涛. 基于 HEC-RAS 的胖头泡蓄滞洪区洪水模拟与灾损评估[J]. 水资源研究, 2020, 9(1): 42-51. DOI: 10.12677/jwrr.2020.91005

¹大连理工大学水利工程学院, 辽宁 大连

²广西大学土木建筑工程学院, 广西 南宁

³中国市政工程华北设计研究总院有限公司重庆分公司, 重庆

Email: *ytwang@dlut.edu.cn

收稿日期: 2019年12月18日; 录用日期: 2019年12月31日; 发布日期: 2020年1月7日

摘要

近年来, 我国洪水灾害频繁发生并造成巨大的人员伤亡和财产损失。洪水模拟有助于洪水风险管理, 降低洪水灾害损失。本文基于90 m精度的DEM及HEC-RAS模型的2D模块构建了松花江流域胖头泡蓄滞洪区的洪水模拟模型, 并根据模拟结果统计分析并评估洪灾损失。模拟结果显示在1956、1960、1969以及1998年四个典型洪水过程下, 胖头泡蓄滞洪区的淹没面积分别为792.68 km²、740.29 km²、800.87 km²、796.01 km²。其中, 当发生与1969年典型洪水过程相同的洪水时, 胖头泡蓄滞洪区的损失最为严重, 即受灾人口8.75万人, 受灾耕地面积223.99 km², 受影响GDP为20.61亿元; 义顺蒙古乡、民意乡、新站镇、浩德乡为蓄滞洪区内受灾较严重的乡镇, 并且水深大部分分布在4.0 m以上。研究表明HEC-RAS模型的模拟效率高、操作方便, 可用于蓄滞洪区的洪水模拟。研究成果可为当地的防洪预警发布、风险规避、人员转移等管理工作提供参考。

关键词

HEC-RAS模型, 蓄滞洪区, 洪水模拟, 洪灾损失评估

Copyright © 2020 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国是洪水灾害发生最为频繁的国家之一[1]。近年来, 由于全球气候变化和人类活动的双重影响, 极端天气出现的频率增大, 特大洪水发生也愈加频繁, 给人们带来了巨大的生命财产损失[2]。例如, 2018年我国共出现39次强降水天气, 造成全国共有3526.2万人次受到洪涝等灾害的影响, 其中死亡人数338人, 失踪人数42人, 142万人被紧急转移安置; 由强降水导致的洪涝等灾害共造成6.4万间房屋倒塌, 78.9万间房屋损坏, 造成了共计1060.5亿元的直接经济损失[3]。

洪水模拟和灾损评估是进行防洪规划、减轻洪灾损失的重要手段, 可以为洪水管理、预报预警发布、防汛抢险等工作提供科学依据[4][5]。例如, 2015年, 李长跃[6]通过构建多源洪水耦合数值模型对淮河流域中游地区的防洪保护区进行了洪水风险分析和损失评估, 并绘制了洪水风险图, 根据淹没区域实际淹没信息, 可初步确定灾区群众的安置场所和转移路线, 研究成果可为防洪保护区的多源洪水分析提供有力的参考并能够有效降低群众生命财产损失; 2017年, 果鹏等[7]创建了基于力学过程的蓄滞洪区洪水风险评估模型, 实现了荆江分洪工程启用时分洪区内群众危险等级和财产损失的快速评估, 并可推广到溃坝等极端洪水风险评估, 有助于洪泛区的洪水风险管理; 2019年, 李春红等[8]采用基于TVD隐格式的二维水动力学模型模拟了黄墩湖蓄滞洪区的洪水演进过程, 为蓄滞洪区进洪方案的选择提供了依据, 并能够更科学、更有效地降低灾害损失。

洪水模拟的基础是流域的产汇流计算。径流的形成过程包括产流和汇流两个过程, 因而洪水模拟计算主要

包括产流计算、坡面汇流计算、河网或地下排水管网汇流计算[9]。目前常用的产流计算方法有计算蓄满产流模式的降雨径流相关图法、计算超渗产流模式的下渗曲线法以及初损后损法等等[10]。汇流计算主要包括坡面汇流计算和河网或地下排水管网汇流计算。坡面汇流计算主要采用水文学和水力学两种方法，其中水文学方法主要包括等流时线法、时段单位线法、瞬时单位线法、线性水库法及非线性水库法，而水力学方法是基于浅水方程进行求解。常用的河网或地下排水管网汇流计算方法主要有马斯京根法和圣维南方程组或其简化形式求解法。基于上述发展的产汇流理论，许多学者开发了用于洪水模拟管理的洪水模型，主要包括一维洪水模型(如 SWMM)、二维洪水模型(如 EFDC)和一维、二维耦合的水动力学模型(DHI MIKE, Infoworks)。虽然 DHI MIKE 和 Infoworks 模型是发展比较成熟的模型，但是这些模型均已开发为商业软件，价格比较昂贵，因而在一定程度上限制了其使用范围。EFDC 模型采用正交曲线网格剖分整个 2D 区域，不利于拟合复杂边界[11]。而 HEC-RAS 是一款免费的软件，具有可执行文件公开、模拟效率高、操作方便、便于与 ArcGIS 耦合等优点[12] [13]。因此，本文拟采用 HEC-RAS 模型进行胖头泡蓄滞洪区洪水模拟研究。

本文以松花江流域胖头泡蓄滞洪区为研究对象开展洪水模拟与灾害损失评估研究。首先，选取四场典型洪水过程，基于 HEC-RAS 的二维模块来实现蓄滞洪区的洪水模拟；其次，借助 ArcGIS 对 HEC-RAS 模型的模拟结果进行后处理，实现模拟结果可视化，从而直观地、动态地显示出洪水演进的全过程，并计算得出最大淹没水深值、淹没面积等致灾因素；最后，依据洪水模拟结果对该蓄滞洪区进行洪水灾害损失评估。

2. 研究区域与数据

2.1. 研究区域概况

胖头泡蓄滞洪区位于黑龙江省大庆市肇源县的西北部，嫩江、松花江干流的左岸[14]。涉及民意乡、古恰乡、超等蒙古乡、茂兴镇、新站镇、头台镇、大兴乡、浩德乡、古龙镇、太阳升镇、义顺蒙古乡、腰新乡、双榆树乡共 13 个乡镇。胖头泡蓄滞洪区总面积为 2029.6 km²，东西长为 64 km，南北长为 58 km。胖头泡地处大陆性季风区，雨热同期，年平均气温 5.1℃，年平均降水量约为 465.5 mm。附近水系众多，西北部为嫩江，北部为南引水库，东部有安肇新河，东南部为松花江，西南部为第二松花江。蓄滞洪区附近泡沼较多，有库里泡、库木泡等。西南方向是大赉水文站，扶余水文站位于胖头泡的东南方向。区内有 40 m 的通让铁路穿过。详见图 1。

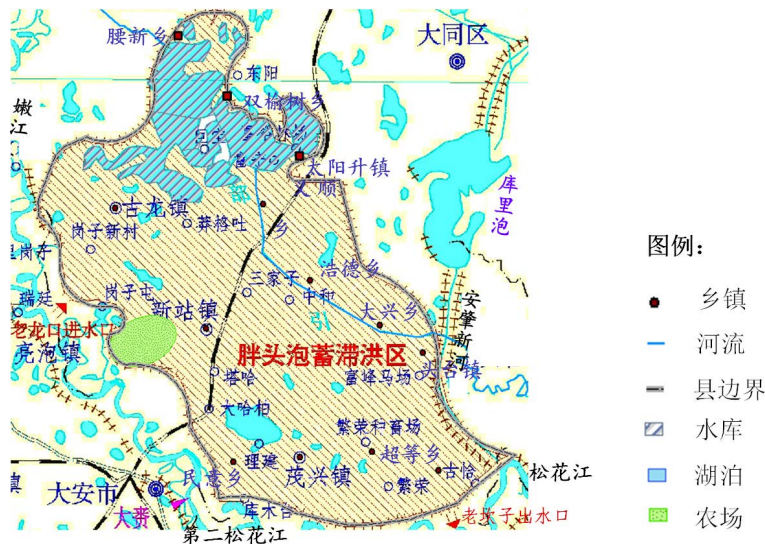


Figure 1. Distribution map of main counties and water system in the Pangtoupao flood storage and detention area

图 1. 胖头泡蓄滞洪区主要市县及水系分布图

2.2. 地形数据

研究区地形数据来源于地理国土监测云平台提供的 90 m 分辨率的 DEM 资料。胖头泡蓄滞洪区地势总体上比较平坦,起伏不大,研究区高程值集中分布在 33 m 到 201 m 之间。DEM 数据经 ArcGIS 裁剪后导入 HEC-RAS 模型中。

2.3. 入流和出流边界条件

查找松花江流域历史洪水资料,选取 1956、1960、1969 以及 1998 年四个典型洪水过程下胖头泡蓄滞洪区的分洪流量和排水流量过程分别作为模型的入流和出流边界条件。在分洪前无水流进入蓄滞洪区,所以网格的初始水深值为默认值 0。四个典型的流量过程如图 2 所示。

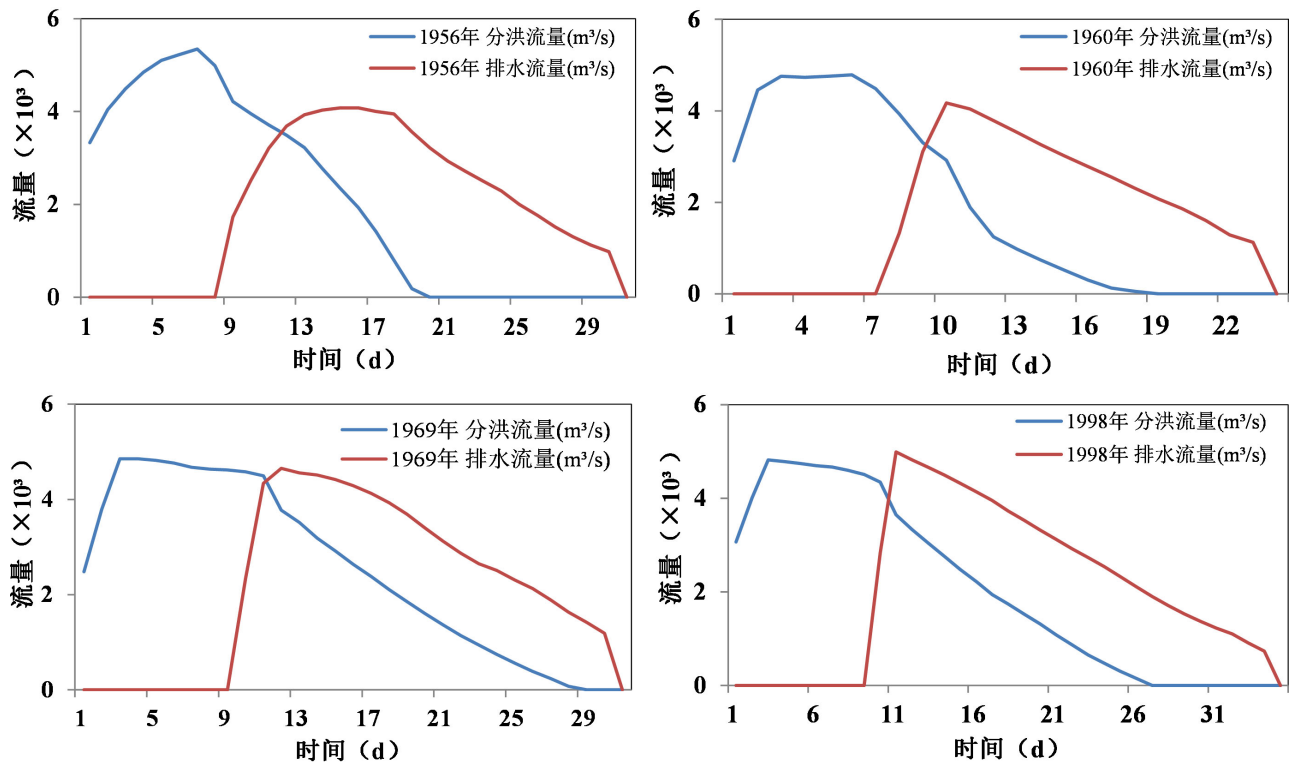


Figure 2. Diagram of flow process for boundary condition

图 2. 边界条件流量过程图

2.4. 社会经济数据

收集、整理胖头泡蓄滞洪区 2018 年的社会经济情况。胖头泡蓄滞洪区及其所辖乡镇的总面积、人口、耕地面积及 GDP 数据如表 1 所示。本次研究未能收集到各个乡镇的 GDP 数据,只得到了整个胖头泡蓄滞洪区的总的 GDP 数据为 52.76 亿元。因此,在进行洪水灾害损失评估时,本文假设各个乡镇的 GDP 数量与相应的所辖总面积成正比,进而简单估算各个乡镇的 GDP 数据。

Table 1. Social and economic situation of Pangtoupao flood storage and detention in 2018

表 1. 2018 年胖头泡蓄滞洪区基本情况

涉及乡镇名称	区内总面积/km ²	人口/×10 ⁴	耕地面积/km ²	GDP/×10 ⁸
民意乡	171.28	1.90	68.33	—
古恰乡	28.46	0.49	11.88	—

Continued

超等蒙古乡	200.89	1.45	40.65	—
茂兴镇	224.67	2.11	74.67	—
新站镇	404.05	6.10	177.33	—
头台镇	98.10	0.80	27.13	—
大兴乡	54.74	0.38	11.87	—
浩德乡	125.91	0.67	13.16	—
古龙镇	285.84	2.29	89.48	—
太阳升镇	19.88	0.71	5.34	—
义顺蒙古乡	266.40	1.33	38	—
腰新乡	46.77	0.27	15.63	—
双榆树乡	102.60	3.91	0.03	—
汇总	2029.59	22.41	573.50	52.76

3. HEC-RAS 模型

3.1. 模型的原理和应用

HEC-RAS 是美国陆军工程兵团水文工程中心于 1995 年开发的用于计算水面线的软件包。在 2016 年 4 月发布的 5.0.1 版本中增加了 2D 模块，可执行二维洪泛区模拟、一维和二维非恒定流组合建模、模拟溃坝或者溃堤等，适用于城市化地区、宽广的洪水平原、冲积扇、溃坝后的洪水流动、洪水流况复杂的地方等。

二维非恒定流模块的控制方程由二维连续性方程和二维动量方程组成[15]。

1) 二维连续方程：

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

式中： H 表示水面高程， h 表示水深， u 和 v 分别代表水深在 x 和 y 坐标上的平均速度， q 代表项源，代表降雨等来自外部的信息。

2) 二维动量方程

X 方向动量平衡：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + fv \quad (2)$$

Y 方向动量平衡：

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + fu \quad (3)$$

式中： H 表示水面高程， ν_t 表示动力黏性系数， c_f 表示摩擦系数， u 和 v 分别为 x 和 y 方向的平均速度。利用曼宁公式，摩擦系数 c_f 可以表示为(x 方向)：

$$c_f = \frac{n^2 g |u|}{R^{4/3}} \quad (4)$$

式中： n 表示曼宁系数， g 表示重力加速度， R 为水力半径。

3.2. 模型构建及参数率定

3.2.1. 模型构建

输入模型的数据包括：①地形数据：导入地形图和投影文件 WGS_1984_UTM_ZONE_50N；②建立 2D 流动区；③网格划分：共生成了 1913 个网格，最大网格面积为 2.33 km²，最小网格面积为 0.59 km²，平均每个网格的面积为 1.03 km²；④确定溃口位置和宽度，绘制边界条件线；⑤输入边界条件及其他数据：参考对松花江流域蓄滞洪区洪水模拟的已有研究及研究区的实际情况，糙率值初步取为 0.06；⑥确定模拟时间步长：综合考虑模型计算效率、计算精度和稳定性，输入模型的进出口边界流量过程的时间间隔确定为 24 h，计算时间间隔设为 1 min，结果输出间隔为 1 h；⑦执行非恒定流模拟，将结果文件导入 ArcGIS 进行后处理。

3.2.2. 参数率定

2017 年，王静采用 EFDC 模型对胖头泡蓄滞洪区进行了洪水演进模拟研究[16]。采用王静《基于 EFDC 的胖头泡蓄滞洪区洪水演进模拟研究》论文中的模拟结果对 HEC-RAS 模型的参数进行率定，选取相同的洪水过程作为边界条件，即 1957 年典型洪水过程，如图 3 所示。将本次模拟结果与《基于 EFDC 的胖头泡蓄滞洪区洪水演进模拟研究》中的结果进行对比，二者模拟结果基本吻合，因此认为本文模型选用的参数是合理的。

洪水从分洪口处进入蓄滞洪区后，先向北部的低洼处迅速扩散，然后同时向东部和东北部淹没，还有部分洪水呈现向南和东南方向流动的趋势。向南最远抵达古恰乡，向北直遥南引水库。分洪第 17 天时，水深达到最大。之后随着排洪量的不断增大，蓄滞洪区内的水量逐渐减少，水位及淹没面积也随之缩减。分洪口关闭后，洪水最终滞留在蓄滞洪区的西部和东南部低洼处。

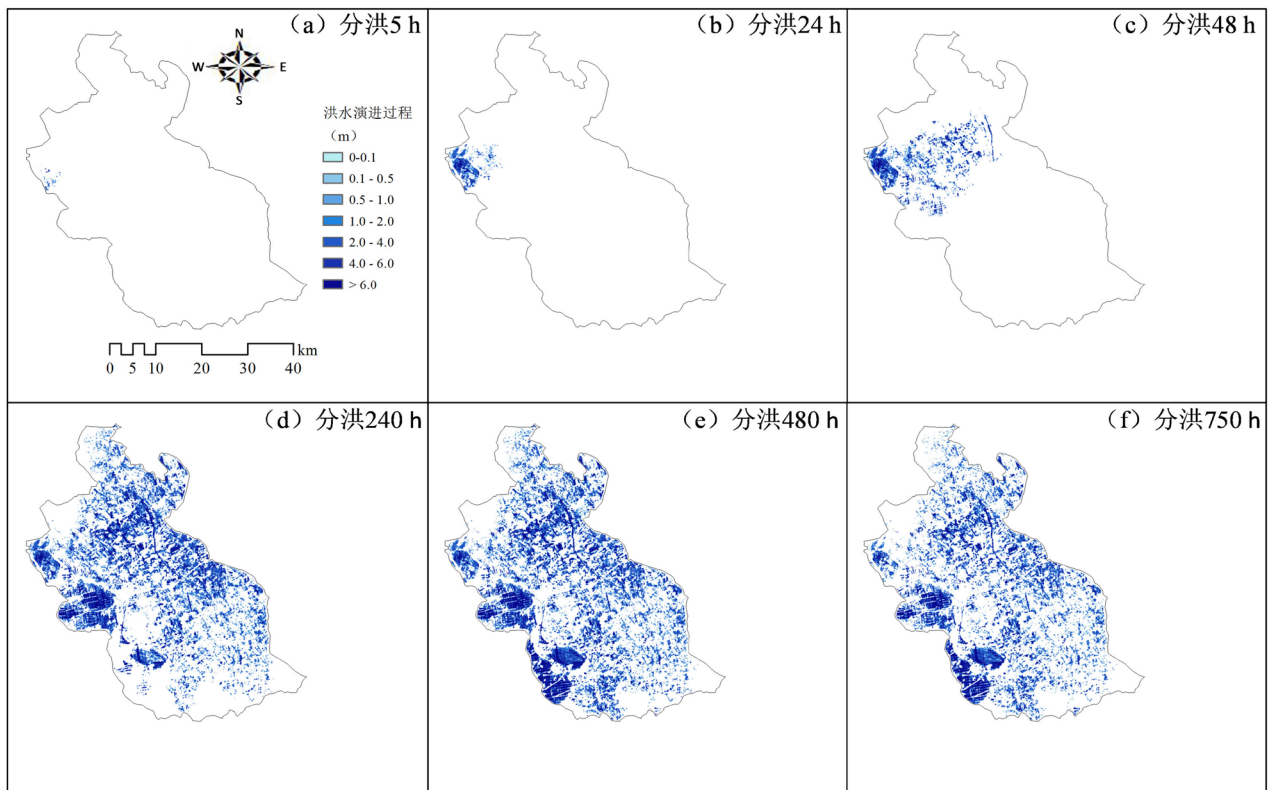


Figure 3. Flood routing process in the Pangtoupao storage and detention area under typical flood process in 1957

图 3. 1957 年典型洪水过程下胖头泡蓄滞洪区的洪水演进过程图

4. 洪水灾害损失评估

4.1. 不同场景洪水模拟结果分析

四场典型洪水过程下胖头泡蓄滞洪区的最大淹没水深如图 4 所示。从图中可以看出，淹没面积集中在胖头泡蓄滞洪区的低洼地势处，西部的淹没水深值最大。各个典型洪水过程下，胖头泡蓄滞洪区的水深大部分都分布在 2.0 m 以上。

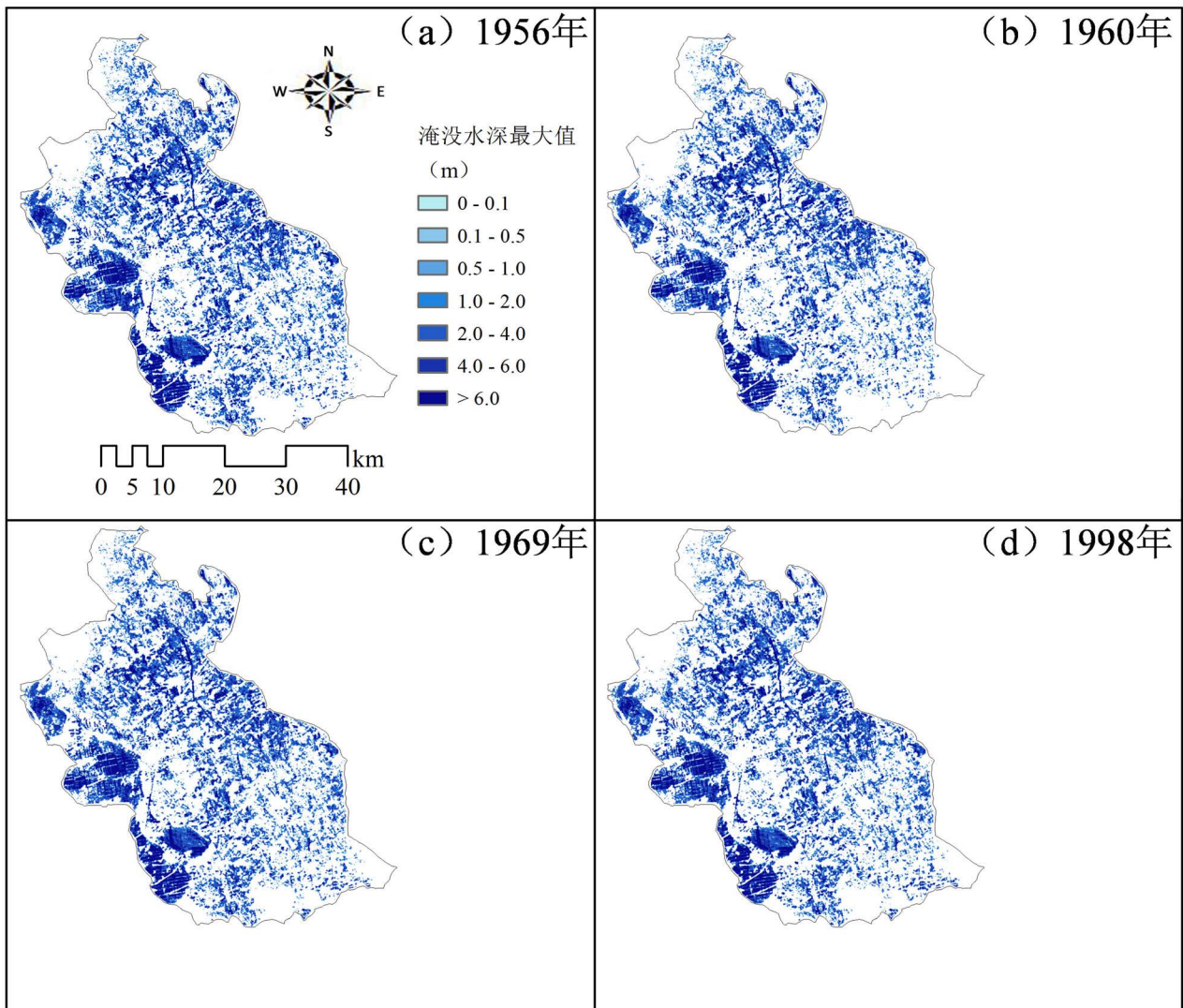


Figure 4. Maximum submerged depth map of four typical flood processes

图 4. 四个典型洪水过程最大淹没水深图

利用 ArcGIS 中的栅格计算器将淹没水深分为 0~0.1 m、0.1~0.5 m、0.5~1.0 m、1.0~2.0 m、2.0~6.0 m 以及 >6.0 m 六个范围。然后利用“以表格显示分区统计”工具统计不同淹没水深对应的淹没范围，统计结果如表 2 所示。

Table 2. Submerged area with maximum water depth in the Pangtoupao under four typical floods

表 2. 四个典型洪水过程下胖头泡蓄滞洪区最大淹没水深相应面积统计表(km²)

最大淹没水深(m)	≤0.1	0.1~0.5	0.5~1.0	1.0~2.0	2.0~4.0	4.0~6.0	>6.0	汇总
-----------	------	---------	---------	---------	---------	---------	------	----

Continued

1956年	5.16	46.87	61.82	106.38	177.91	128.72	265.82	792.68
1960年	6.64	72.27	31.43	100.92	166.93	118.20	243.91	740.29
1969年	4.92	38.00	72.13	107.87	180.02	130.03	267.90	800.87
1998年	5.72	48.60	59.68	106.77	178.56	129.35	267.33	796.01

1956年典型洪水过程下,胖头泡蓄滞洪区的总淹没面积为792.68 km²,占胖头泡总面积的39.07%。此外,1960、1969及1998年三场典型洪水过程下,胖头泡蓄滞洪区的总淹没面积分别为740.29 km²,800.87 km²和796.01 km²,其占胖头泡总面积的比例分别为36.47%、39.46%和39.22%。因此,从淹没面积上来看,1969年典型洪水过程下的胖头泡蓄滞洪区受灾最严重,1960年典型洪水过程下的胖头泡受灾较轻。

其中,1956年典型洪水过程下,水深在0.1~0.5 m之间的淹没范围为46.87 km²,占胖头泡总淹没面积的5.91%;水深在0.5~1.0 m之间的淹没范围为61.82 km²,占总淹没面积的7.80%;水深在1.0~2.0 m之间的淹没范围为106.38 km²,占13.42%;水深在2.0~4.0 m之间的淹没范围为177.91 km²,占22.44%;水深在4.0~6.0 m之间的淹没范围为128.72 km²,占16.24%;水深>6 m的淹没范围为265.82 km²,占33.53%。在其余3个典型洪水过程下,胖头泡蓄滞洪区也是水深>6 m的淹没范围最大,其次是水深在2.0~4.0 m之间的淹没范围,水深在0.1~0.5 m之间的淹没范围最小。

4.2. 洪水灾害损失评估

基于2018年胖头泡蓄滞洪区的人口和经济情况进行洪水灾害损失评估。将最大淹没水深图和乡镇区划图叠加,通过人口、经济在空间上的密度展布来评估蓄滞洪区的洪灾经济损失,认为淹没水深是主要致灾因素[17]。以1998年典型洪水为例,统计各个乡镇的洪水灾害损失情况,见表3。四种典型洪水过程下,2018年的胖头泡蓄滞洪区洪灾损失情况汇总见表4。

如表4所示,当发生与1969年典型洪水过程同样大小的洪水时,胖头泡蓄滞洪区的损失情况最为严重。其中,受灾人口8.75万人,占区内总人口的38.42%;受灾耕地面积223.99 km²,占区内总耕地面积的38.95%;受影响GDP为20.61亿元,占总GDP的39.01%。发生与1960年典型洪水过程同样大小的洪水时,胖头泡蓄滞洪区的损失情况较轻。

Table 3. Flood inundation loss in Pangtoupao under typical flood process in 1998

表 3. 1998年典型洪水过程下胖头泡蓄滞洪区洪灾淹没损失情况表

区内乡镇名称	受灾总面积/km ²	受灾人口/×10 ⁴	受灾耕地面积/km ²
民意乡	85.05	0.94	33.93
古恰乡	1.18	0.02	0.49
超等蒙古乡	52.10	0.38	10.54
茂兴镇	71.98	0.68	23.92
新站镇	178.78	2.70	78.46
头台镇	37.45	0.31	10.36
大兴乡	27.39	0.19	5.94
浩德乡	66.10	0.35	6.91
古龙镇	97.41	0.78	30.49
太阳升镇	7.29	0.26	1.96
义顺蒙古乡	132.07	0.66	18.84
腰新乡	4.60	0.03	1.54
双榆树乡	34.67	1.32	0.01

Table 4. Economic losses of Pangtoupao flood storage and detention area in 1998**表 4.** 胖头泡蓄滞洪区在 1998 年典型洪水下的社会经济损失情况表

典型洪水过程	受灾人口/万人	受灾耕地面积/km ²	受影响 GDP/×10 ⁸
1956 年	8.84	226.30	20.82
1960 年	8.17	209.18	19.24
1969 年	8.75	223.99	20.61
1998 年	8.61	223.39	20.58

蓄滞洪区东北部的义顺蒙古乡、西部新站镇、西南部的民意乡、中部的浩德乡是大洪水的主要淹没区域，水深大部分分布在 4.0 m 以上，已经严重威胁到人的生命安全。其中，浩德乡的受灾面积占蓄滞洪区内浩德乡总面积的 52.50%，新站镇的受灾面积占蓄滞洪区内新站镇总面积的 44.25%，义顺蒙古乡的受灾面积占蓄滞洪区内义顺蒙古乡总面积的 49.58%，民意乡的受灾面积占蓄滞洪区内民意乡的总面积的 49.66%。在进行蓄滞洪区管理和规划时，应积极采取移民建镇、鼓励这 4 个乡镇的人口外迁、控制危险区的人口增长、加强防汛通信预警系统建设、积极开展洪水保险等系列措施。

5. 结语

1) 本文构建了基于 HEC-RAS 模型 2D 模块的胖头泡蓄滞洪区洪水模拟模型，并且根据模拟结果进行了洪水灾害损失评估。研究成果可为当地的防洪预警发布、规避风险、人员转移等管理工作提供参考。修改参数后，该洪水模拟模型也可应用于其他流域的蓄滞洪区。

2) 四场典型洪水过程下，胖头泡蓄滞洪区的淹没面积分别为 792.68 km², 740.29 km², 800.87 km², 796.01 km²。当发生与 1969 年典型洪水过程同样大小的洪水时，胖头泡蓄滞洪区的损失情况最为严重，即受灾人口 8.75 万人，受影响 GDP 为 20.61 亿元，受灾耕地面积 223.99 km²。义顺蒙古乡、民意乡、新站镇、浩德乡为受灾较严重的乡镇，水深大部分分布在 4.0 m 以上。

本次模拟采用的是水平精度为 90 m 的 DEM 数据，没有考虑地表建筑物及铁路等对洪水模拟的影响，导致模拟结果存在一定误差。今后进一步研究的时候，可以考虑对 DEM 进行修正，以使其可以反映阻水建筑物等对洪水流动的影响。

基金项目

该研究是在国家重点研发计划课题(2016YFC0402203)、国家自然科学基金青年项目(51708086)、中央高校基本科研业务费(DUT18RC(3)072)的资助下完成的。

参考文献

- [1] 王晓磊, 韩会玲, 李洪晶. 宁晋泊和大陆泽蓄滞洪区洪水淹没历时及洪水风险分析[J]. 水电能源科学, 2013, 31(8): 59-62. WANG Xiaolei, HAN Huiling and LI Hongjing. Flood risk and duration analysis of Ningjinbo and Daluze flood storage detention district. Water Resources and Power, 2013, 31(8): 59-62. (in Chinese)
- [2] 艾小榆, 刘霞, 徐辉荣, 等. 基于 MIKE FLOOD 模型的湛江蓄滞洪区调度运用方案研究[J]. 水利水电技术, 2017, 48(12): 125-131. AI Xiaoyu, LIU Xia, XU Huirong, et al. MIKE FLOOD model-based study on operation scheme of Pajiang River flood storage and detention area. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(12): 125-131. (in Chinese)
- [3] 刘南江, 费伟. 2018 年全国自然灾害基本情况分析[J]. 中国减灾, 2019(5): 14-17. LIU Nanjiang, FEI Wei. Analysis on the basic situation of natural disasters in 2018. Disaster Reduction in China, 2019(5): 14-17. (in Chinese)
- [4] 段扬, 廖卫红, 杨倩, 等. 基于 EFDC 模型的蓄滞洪区洪水演进数值模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(5): 160-165.

- DUAN Yang, LIAO Weihong, YANG Qian, et al. Numerical simulation of flood routing in flood detention basin based on EFDC model. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2014, 12(5): 160-165. (in Chinese)
- [5] 郭凤清, 曾辉, 丛沛桐, 等. 潜江蓄滞洪区洪灾风险分析及避难转移安置研究[J]. *灾害学*, 2013, 28(3): 85-90.
GUO Fengqing, ZENG Hui, CONG Peitong, et al. Risk analysis and research on evacuation to relocate of flood detention Area in Pajiang River. *Journal of Catastrophology*, 2013, 28(3): 85-90. (in Chinese)
- [6] 李长跃. 多源洪水耦合模型及其在防洪保护区洪水风险分析中的应用[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2016.
LI Changyue. Application of multi-source flood coupling model in flood analysis of flood control protected zone. Tianjin: Tianjin University, 2016. (in Chinese)
- [7] 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 a flood diversion zone. *Advances in Water Science*, 2017, 28(6): 858-867. (in Chinese)
- [8] 李春红, 徐青, 周元斌, 等. 基于 TVD 隐格式的二维水动力学模型在蓄滞洪区洪水淹没模拟中的应用研究[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(3): 65-71.
LI Chunhong, XU Qing, ZHOU Yuanbin, et al. Study on application of two-dimensional hydrodynamic model in flood submerging simulation of flood storage and detention areas based on implicit TVD scheme. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2019, 40(3): 65-71. (in Chinese)
- [9] 喻海军. 城市洪涝数值模拟技术研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2015.
YU Haijun. Research on numerical simulation technology of urban floods. Guangzhou: South China University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [10] 陈元芳, 詹道江, 徐向阳. 工程水文学[M]. 第 4 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
CHEN Yuanfang, ZHAN Daojiang and XU Xiangyang. *Engineering hydrology*. 4th Edition. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2013. (in Chinese)
- [11] 樊乔铭, 丁志斌. EFDC 模型在港湾水环境中的应用及进展[J]. *人民珠江*, 2016, 37(2): 92-96.
FAN Qiaoming, DING Zhibin. The application and advance of environmental fluid dynamics code (EFDC) in harbor and bay water environment. *Pearl River*, 2016, 37(2): 92-96. (in Chinese)
- [12] 宁聪, 傅志敏, 王志刚. HEC-RAS 模型在二维溃坝洪水研究中的应用[J]. *水利水运工程学报*, 2019, 12(2): 86-92.
NING Cong, FU Zhimin and WANG Zhigang. Application of HEC-RAS for the research of 2D dam-break flood. *Hydro-Science and Engineering*, 2019, 12(2): 86-92. (in Chinese)
- [13] 王光朋, 查小春, 黄春长, 等. HEC-RAS 模型在汉江上游洪水演进和流量重建中的应用[J]. *西北农林科技大学学报*, 2017, 45(12): 129-137.
WANG Guangpeng, ZHA Xiaochun, HUANG Chunchang, et al. Application of HEC-RAS model in flood routing and discharge reconstruction of the upper reaches of Hanjing River. *Journal of Northwest A&F University*, 2017, 45(12): 129-137. (in Chinese)
- [14] 洪文彬, 臧永顺, 蒋攀, 等. 胖头泡月亮泡蓄滞洪区运用方式探析[J]. *东北水利水电*, 2013, 31(4): 52-53.
HONG Wenbin, ZANG Yongshun, JIANG Pan, et al. Analysis on the application of Pangtoupao and Yueliangpao flood storage and detention area. *Northeast Water Resources and Hydropower*, 2013, 31(4): 52-53. (in Chinese)
- [15] ALEXANDER BETSHOLTZ, B. N. O., ACKERMANN, K. Potentials and limitations of 1D, 2D and coupled. Lund: Lund University, 2017.
- [16] 王静. 基于 EFDC 的胖头泡蓄滞洪区洪水演进模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2017.
WANG Jing. Study of simulation of flood routing in Pangtoupao flood detention basin based on EFDC. Dalian: Dalian University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [17] 孙玉贤. 河南省滞洪区洪灾损失率的计算[J]. *河南水利与南水北调*, 2018, 47(10): 54-55.
SUN Yuxian. Calculation of flood loss rate in flood detention areas in Henan Province. *Henan Water Conservancy and South-to-North Water Diversion*, 2018, 47(10): 54-55. (in Chinese)