

Evolution Simulation of Glacial Lake Outburst Flood

Danya Rong¹, Xiushan Wu¹, Qihua Ran^{1*}, Changwei Xiao², Zhipeng Huang²

¹Department of Hydraulic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou

²Water Conservancy Electric Power Planning Survey and Design Institute in Tibet, Lhasa

Email: 21312202@zju.edu.cn, ranqihua@zju.edu.cn

Received: Sep. 17th, 2014; revised: Sep. 29th, 2014; accepted: Oct. 7th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

Abstract

The typical dangerous glacial lake—Huanghu and relevant region, located in Nianchu River Basin, Tibet, China were selected as the study area for this paper. A two-dimensional dam-break flood numerical model was used to calibrate the parameters of the model and simulate outburst flood evolution under different breach mechanisms. The result showed that the largest inundated area was 89.25 km², the arrival time of flood in Gyantse was about 33.6 h and the peak discharge in Gyantse was about 1777 m³/s. The peak flow of storm flood was 1000 m³/s. The results have important practical significance to improve the potentially dangerous glacial lakes databases of Gyantse and develop flood warning strategies scientifically.

Keywords

Glacial Lake Dam Break Routing, Two-Dimension, Numerical Simulation, Huang Hu

冰湖溃决洪水演进模拟

戎丹雅¹, 吴秀山¹, 冉启华^{1*}, 肖长伟², 黄志鹏²

¹浙江大学, 水利工程学系, 杭州

²西藏自治区水利电力规划勘测设计研究院, 拉萨

Email: 21312202@zju.edu.cn, ranqihua@zju.edu.cn

*通讯作者。

收稿日期：2014年9月17日；修回日期：2014年9月29日；录用日期：2014年10月7日

摘要

以西藏年楚河流域的典型危险性冰湖——黄湖及其下游区域为研究对象，采用二维溃坝洪水演进数值模型，进行了模型的率定和不同工况下的洪水演进模拟。设置了瞬时全部溃决和逐渐溃决2种工况，模拟结果表明：洪水发生后，预计最大淹没面积约为89.25 km²，溃决洪水到达江孜的时间约为33.6 h，江孜处的洪峰流量约为1777 m³/s，大于江孜地区暴雨洪水万年一遇洪峰流量1000 m³/s。根据预测结果做好预警工作，能一定程度上减小灾害损失。本研究的研究结果对于完善江孜地区的潜在危险冰湖数据库和科学制定洪水预警策略具有重要的现实意义。

关键词

冰湖溃决演进，二维，数值模拟，黄湖

1. 研究背景

冰湖是由冰川挖蚀成的洼地和冰碛物堵塞冰川槽谷积水而成的一类湖泊。冰湖类型分布众多，其中较为常见的有：冰川终碛湖、冰川阻塞湖、冰斗湖和冰蚀槽谷湖、泥石流阻塞湖。其中，分布规模较大、数量较多，且灾害风险较高的是冰川终碛湖[1]。

在中国，1935年~2010年，中国西藏地区先后有17个冰湖发生20次溃决，其中损失较严重的有1954年的桑旺错，受灾人口2万多人，死亡约400人，淹没农田5733 ha，毁坏农田约866.7 ha；1981年的次仁玛错，死亡200人；1988年的光谢错，损失农田11.4 ha，牲畜50多头，死亡5人，经济损失约600万元；2002年的得噶错，死亡9人，经济损失约3000万元等[2]。西藏地区的冰湖溃决洪水，具有范围广、持续时间长、危害大并经常伴随有泥石流等特点。

近些年来在全球气候变暖的大趋势下，冰湖溃决的数量会不断增加，范围也会不断扩张，每年会造成人员伤亡和大量的财产损失。开展自然和地质灾害形成条件及规律研究，可为灾害预警和防灾减灾工作提供技术支持，为保障生态安全奠定基础，建立和谐社会，实现可持续发展具有重要意义。

本文对西藏典型危险性冰湖——黄湖在两种溃决模式下可能发生的溃决洪水进行演进模拟，得出不同溃决模式下洪水演进的特征；针对可能发生的最不利工况，对洪水到达时间、洪水水深和淹没面积等评估洪水风险的指标进行分析，为该区域的洪水预警提供一定参考。

2. 研究区域概况

如图1所示，西藏地区典型危险性冰湖——黄湖，它位于日喀则地区康马县涅如堆乡内桑旺错下游，地处喜马拉雅山中段北坡。位于东经90°04'19.14"，北纬28°16'11.03"，湖面高程约为5124米。南北长1139米，东西宽976米。根据卫星遥感图像以现场实测调查，黄湖后缘冰川和积雪的面积约为15.85 km²，其中有两山谷冰川补给该冰湖共同形成冰舌，冰舌的坡度约为4.5°，冰舌末端插入湖内。黄湖主要由冰川融水和大气降水补给而成，年平均气温小雨0℃，日平均气温大于等于10℃的天数不会超过50天，气候较干旱，降水量少，降水形式主要为雨加雪形式，降水量在300 mm~400 mm之间。终碛垄和右侧碛垄交汇处有一下切切口，缺口宽高约为3×7 m，水流顺着背水坡下泄，冬春两季主要以渗流形式暗流下渗，而夏秋两季因水流流量较大以明流形式流入涅如藏布，最终汇入年楚河。

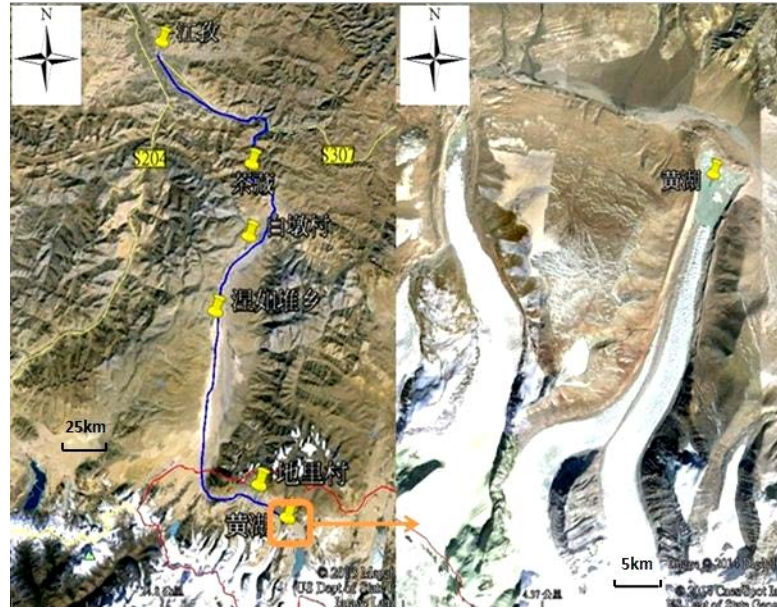


Figure 1. The geographical location map of The Yellow River and Nianchu He
图 1. 黄湖及年楚河所在地理位置示意图

本文研究区域是年楚河流域上游段，从黄湖到江孜县城的河段流域。黄湖上游约 3 km 处有另外一个较大的已溃决冰湖——桑旺错冰湖。桑旺错曾经是年楚河上游涅如藏布的源头之一，据江孜县附近的调查，最大洪峰流量达 $10,000 \text{ m}^3/\text{s}$ ，给下游造成了巨大的灾害[3]。黄湖下游分散着部分村落包括涅如堆乡，白墩村，涅如麦乡，茶藏(满拉水库入口处)，车仁乡，江孜。从 1980 年到 2005 年，黄湖母冰川——什磨冰川的面积从 30.7 km^2 减少到 29.5 km^2 ，相应的，黄湖面积由 0.7 km^2 增长到约 1.65 km^2 ，两者的变化趋势呈负相关。同时，满拉水库上游无表碛物覆盖的冰川面积减少了 7.34% (13.42 km^2)，并且，冰川补给湖泊呈快速扩张趋势，冰湖溃决洪水发生的可能性将大大增加[4]。黄湖正是属于满拉水库上游冰湖之一，它可能发生的溃决，对下游人口、经济、基础设施等有较大影响，对其进行溃决模拟具有十分重要的意义。

3. 溃坝洪水演进模型

3.1. 模型原理

采用二维洪水演进数值模型[5]来模拟冰湖溃决洪水的演进过程，水深平均积分浅水方程为

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} + \frac{\partial G(U)}{\partial y} = S \quad (1)$$

其中： t 为时间， U 、 $F(U)$ 、 $G(U)$ 和 S 分别代表变量、沿 x 和 y 方向的通量和源项。

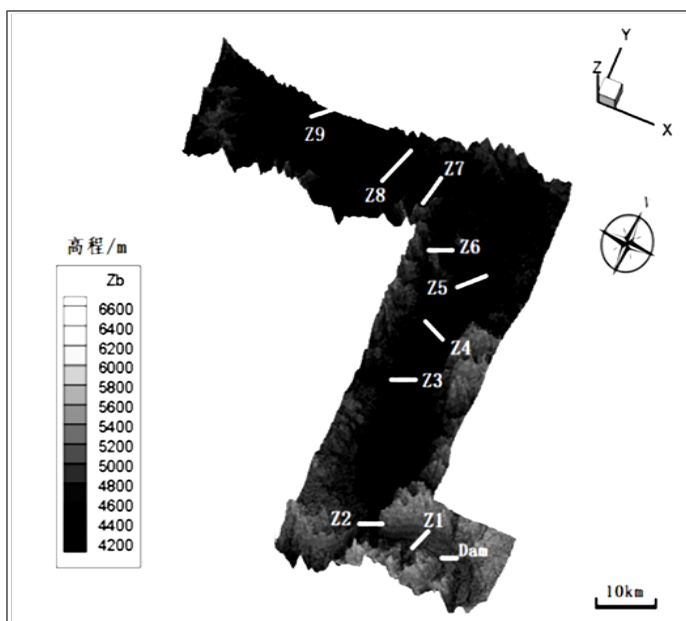
$$U = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 \\ huv \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 \end{bmatrix}, \quad S = \begin{bmatrix} -gh \frac{\partial(h+z_b)}{\partial x} - g \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \\ -gh \frac{\partial(h+z_b)}{\partial y} - g \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中： u 和 v 分别是洪水沿 x 和 y 方向的流速， h 为洪水水深， z_b 为底床高程， g 为重力加速度， n 为 Manning 系数。

在溃坝洪水计算中, 给定冰湖计算区域的水位, 由于冰湖实际地形及坝体(即出口堆积体)的位置已经确定, 冰湖库容便可根据其地形和水位来确定, 即根据冰湖库区每个网格的底床高程和水位数据, 计算各网格的水深, 然后再乘以网格的面积, 得到该计算网格的水体积, 再对冰湖库区所有计算网格求和便得到冰湖的库容。下游边界可给定水位或流量, 也可采用开边界或闭边界, 根据实际情况决定。对于溃决洪水在干河床上的演进计算, 采用的方法是定义一个很小的不影响计算精度的最小判别水深 h_{\min} , 并定义干节点上的速度为 0。在计算过程中, 计算域干湿点的判断即可根据水深来判断, 如果某网格中心的水深 $h_{ij} < h_{\min}$, 则该处即为干节点, 在该网格处的流速为 0。本文采用的数值模型使用两步显式求解控制方程——首先求解连续性方程, 然后求解动量方程。如果通过连续性方程计算得到水深等于零, 那么可以直接令该网格的流速等于零。当计算域有较多的干节点时, 采用该方法可以提高计算效率, 大大缩短计算时间[6]。

3.2. 模型建立

我们所要研究区域的数据来源于 ASTGTM2 数据, 空间分辨率为 30 m。先把计算区域设定为从桑旺错到江孜这段的年楚河河段, 并通过 ArcGIS 中对 DEM 数据进行合并、裁切、坐标转换等前处理工作, 得出的流域 DEM 地形数据图如图 2 所示。由于河道长约 120 km, 计算区域范围较大, 采用 $60\text{ m} \times 60\text{ m}$ 的方形计算网格, 这样可以大大缩短计算时间, 对精度影响不大。从这段河道来看, 上游区域(Dam-Z2 之间)长约 18.0 km, 山高坡陡, 河道狭窄, 并和多条冰川末端相接, 且在 Z2 处有一个大角度的转弯, 河道比降约为 2.26%; 中游区域(Z2~Z6 之间)长约 55.5 km, 此段地形逐渐开阔, 河道坡度变缓, 河道比降约为 0.88%; 近下游区域(Z6~Z7 之间)长约 19.5 km, 宽度骤减, 进入满拉水库, 河道蜿蜒崎岖, 河道比降约为 0.59%; 下游区域(Z7~Z9 之间)长约 27.0 km, 地势平坦, 有大量居民居住, 直至江孜县城, 比降约为 0.68%。



(图中 Dam 表示黄湖坝体, Z1~Z9 分别表示下列附近地点: Z1: 地里村; Z2: 牧场聚集点; Z3: 涅如堆乡; Z4: 白墩村; Z5: 涅如麦乡; Z6: 茶藏; Z7: 恰旺村; Z8: 车仁乡; Z9: 江孜)

Figure 2. Three-dimensional topographic map of Nianchu He basin
图 2. 年楚河流域 3D 地形图

根据文献查阅的结果, 黄湖湖面积约为 1.70 km^2 (2009 年) [2], 根据经验公式[7]: $V = 0.0493A^{0.9304}$, 计算得到其库容约为 $8 \times 10^7 \text{ m}^3$, 模拟采用此库容为溃决初始库容。下游边界取开边界, 上游及两侧为闭边界, 由实际地形变化决定洪水演进计算结果。

3.3. 模型参数率定

Manning 系数是洪水演进数值计算中比较重要的参数, 根据已有资料, 该模型对不同 Manning 系数的敏感性为: 随着 Manning 系数的增大, 流速略有减小, 且在同一时刻淹没面积略有减小, 最大变化幅度约为 8.5% [6], 可见模型对 Manning 系数还是比较敏感的。

先查询文献资料[2], 粗略估计黄湖下游河道的平均 Manning 系数 0.035, 并以此作为初始参数进行率定。在模型中设置桑旺错水面高程 5170 m, 溃口上端宽度约为 300 m, 湖水水位下降约 40 m, 使得初始库容和溃决后库容之差约为 $2.5 \times 10^8 \text{ m}^3$, 符合历史调查结果。

经过模拟计算, Manning 系数取 0.035 时, 江孜县城河段的模拟洪峰流量约为 $9100 \text{ m}^3/\text{s}$, 离目标 $10,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 还有一段差距, 通过几次微调, 确定下来最终的率定结果是平均 Manning 系数取 0.030。

4. 溃决洪水模拟计算

4.1. 工况设置

本文共设置了两个模拟工况, 分别是工况 1——瞬时全部溃决和工况 2——逐渐溃决。其中瞬时全部溃决指黄湖西北角出口处堆积体瞬时全部溃决; 而逐渐溃决在模型中设置为该堆积体在 20 min 内从中间往两边逐渐溃决。各个工况的冰湖溃决水位均为 5160 m, 以保证库容为 $8 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。

4.2. 各个断面的流量过程

模型模拟出来的几个主要断面洪峰流量如表 1 所示, 可以明显看出: 在溃口断面和近溃口断面, 洪峰流量受溃决模式影响较大, 下游河道洪峰流量在不同工况下相差不大。在茶藏(满拉水库入口), 洪峰流量约为 $5200 \text{ m}^3/\text{s}$, 在江孜县城, 洪峰流量约为 $1770 \text{ m}^3/\text{s}$ 。根据文献资料[8], 江孜水文站历年平均径流量为 $32.95 \text{ m}^3/\text{s}$, 暴雨洪水万年一遇洪峰也不足 $1000 \text{ m}^3/\text{s}$, 可见如果冰湖发生溃决, 可能导致的洪水将会对下游, 特别是江孜县城造成严重损害。因此, 根据预报结果, 在相应地区及时做好人员和财产疏散, 能尽可能地减小灾害损失。

溃口及近溃口断面洪水流量过程曲线如图 3 所示, 此段河道为研究区域的上游, 水流流速较快, 流量较大且下降迅速, 处于河道拐角的牧场聚集点断面, 壅水和回流较多, 流量过程曲线呈锯齿状逐渐上升或锯齿状逐渐下降。距溃口断面 1 km 处断面的洪峰流量大小趋势基本与溃口一致, 直到地里村断面和牧场聚集点断面, 洪峰流量的差异才逐渐缩小。对于其他代表性断面洪水流量过程, 此段河道为研究区域中下游, 水流流速相对减缓, 淹没面积开始扩散; 到茶藏进入满拉水库束窄段, 水流速度又开始加快, 壅水及回流再次增多, 流量过程曲线呈锯齿状变化; 从恰旺村到江孜, 水流重新回归宽阔河道。总体来看, 两个工况的断面洪水流量变化趋势一致。

4.3. 淹没面积、洪水水深随时间变化过程

工况 1 和工况 2 各时段的淹没面积如图 4 所示。工况 1 和工况 2 总体上趋势一致, 基本不受溃决模式的影响。

两工况的淹没面积都随时间增加而增加, 在 600 min (10 h)前增加得比较快, 因为洪水在上游山区和中游相对狭窄的区域流动, 流速较快。而在 600 min 后增加的速度就相对慢一些, 直到 2000 min(近江孜)

Table 1. The simulation results of the peak flow in different scenarios (m³/s)
表 1. 不同工况各断面洪峰流量模拟结果(m³/s)

工况	溃口断面	距溃口 1 km 处	涅如堆乡	白墩村	茶藏	江孜
1	617,206	308848.0	8953.6	7386.3	5220.0	1771.2
2	220,396	147882.2	8983.7	7348.5	5183.2	1769.6

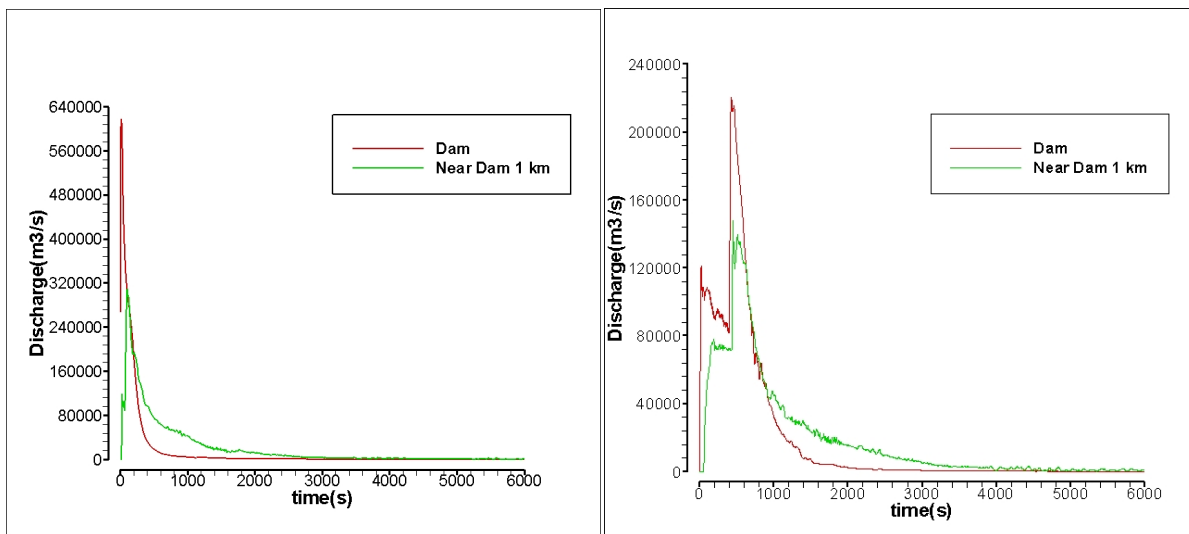


Figure 3. The flood flow process curve of Dam and Near Dam 1 km sections in scenario 1 and scenario 2

图 3. 工况 1 和工况 2 溃口及距溃口 1 km 处断面洪水流量过程曲线

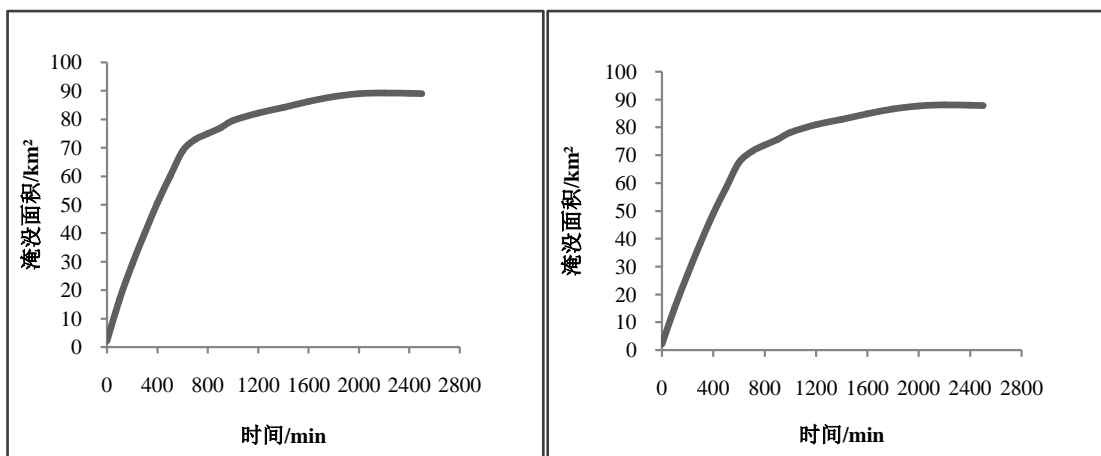


Figure 4. The change map of the flood submerged area in scenario 1 and scenario 2

图 4. 工况 1 和工况 2 洪水淹没面积变化图

淹没面积逐渐稳定下来，加之中上游的一些地区积水慢慢消退，导致淹没面积稍许减少。工况 1 的最大淹没面积为 89.25 km²，出现在 2200 min；工况 2 的最大淹没面积为 88.05 km²，出现在 2200 min。

平均水深则都呈递减趋势，因为总溃决水量一定，所以平均水深会随着淹没面积的增加而减小。

溃坝发生后，洪水迅速向下游发展，最大水深在发生溃坝的 200 min 内迅速减小，随着洪水的演进，当洪水流动到中游平摊开阔区域后，由于水流向四周展开，最大水深减小的速度明显变慢。到 800 min 左右，洪水再次进入峡谷束窄区，最大水深开始逐渐增加并出现一定反复，直到 2000 min 左右进入江孜

附近的低洼开阔区域后再次下降。

4.4. 洪水各指标的空间分布

4.4.1. 洪水到达时间的空间分布

两个工况的洪水到达时间空间分布如图 5 所示。

从图中可以看出,对于工况 1,溃坝约 7.53 min 后洪水到达最近的村落——地里村;溃坝约 43.30 min 洪水到达河道第一个大拐弯处——牧场聚集点;溃坝约 5.27 h 后洪水到达第一个人口较多的乡镇——涅如堆乡;溃坝约 13.23 h 后洪水到达茶藏,也就是满卡水库的入口;最终洪水到达江孜的时间约在溃坝 33.67 h 后。对于工况 2,溃坝约 9.83 min 后洪水到达最近的村落——地里村;溃坝约 46.67 min 洪水到达河道第一个大拐弯处——牧场聚集点;溃坝约 5.34 h 后洪水到达第一个人口较多的乡镇——涅如堆乡;溃坝约 13.30 h 后洪水到达茶藏,也就是满卡水库的入口;最终洪水到达江孜的时间约在溃坝 33.68 h 后。可见瞬时溃决(工况 1)的洪水到达时间均快于逐渐溃决(工况 2)。

4.4.2. 洪水最大水深的空间分布

两个工况的洪水最大水深空间分布,对于不同工况的洪水最大水深相差不大。最大水深在上游河段较大,在近溃口处,最大水深高达 47.5 m,在受灾最严重的地里村附近,最大水深达到了 20 m;到中游平摊段,最大水深一般在 5 m 以下;从下游新的束窄段开始,最大水深有所增加,一般在 5 m~10 m 之间。最大水深在河道弯道处比非弯道处要明显深一些,这主要是由于弯道处的壅水和回流导致的。基本上两者工况最大水深变化趋势一致。比较不同工况的最大水深分布图,可以看出溃决模式对洪水最大水深影响主要表现在近溃口河段,其他河段影响较小。

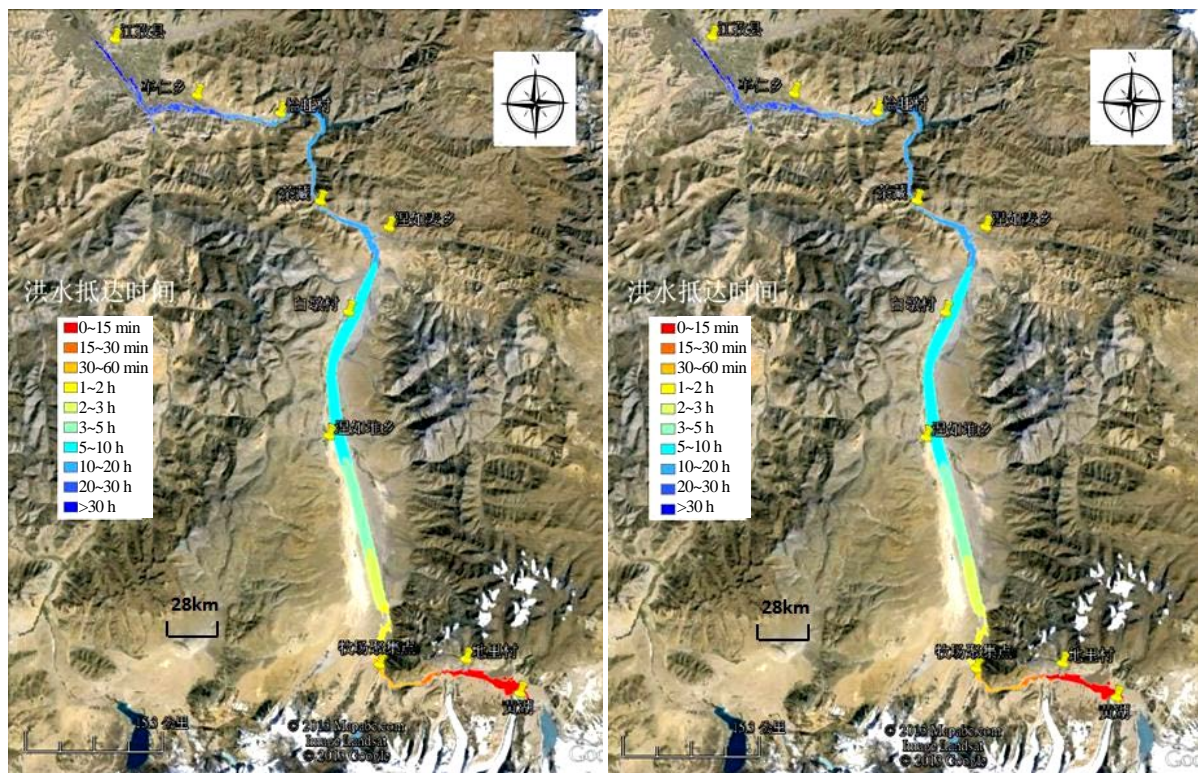


Figure 5. The spatial distribution map of flood arrival time in scenario 1 and scenario 2

图 5. 工况 1 和工况 2 洪水到达时间的空间分布图

5. 结论

本文主要就是应用二维洪水演进数值模型对西藏年楚河流域的危险性冰湖——黄湖进行两种溃决模式下的洪水演进模拟，得到了如下结论：

1) 在研究区域，溃决洪水上游山区流速快，水深大，历经时间短，中游开阔区域流速缓慢，水深较浅，历时相对较长，到下游进入新的束窄区，流速和水深再次加快。

2) 在溃口断面和近溃口断面，洪峰流量受溃决模式影响较大，下游河道洪峰流量在不同工况下相差不大。在茶藏(满拉水库入口)，洪峰流量约为 $5200 \text{ m}^3/\text{s}$ ，在江孜县城，洪峰流量约为 $1770 \text{ m}^3/\text{s}$ 。如果冰湖发生溃决，可能导致的洪水将会对下游，特别是江孜县城造成严重损害。

3) 洪水淹没面积都随时间增加而增加，但增长速率随时间增加而减小。在 600 min 前增加得比较快，在 600 min 后增加的速度就相对慢一些，直到 2000 min 淹没面积逐渐稳定下来。工况 1 和工况 2 最大淹没面积分别为 89.25 km^2 、 88.05 km^2 。

4) 洪水平均水深随时间呈递减趋势；溃坝发生后，洪水迅速向下游发展，洪水最大水深在发生溃坝的 20 min 内迅速减小，随着洪水的演进，当洪水流动到中游平摊开阔区域后，水流向四周展开，最大水深减小的速度减缓。到 800 min~900 min (约 15 h) 后，洪水再次进入峡谷束窄区，最大水深开始逐渐增加并出现一定反复，直到 2000 min 进入江孜附近的低洼开阔区域后再次下降。

5) 洪水最大水深在上游河段较大，在近溃口处，最大水深高达 47.5 m，在受灾最严重的地里村附近，最大水深达到了 20 m；到中游平摊段，最大水深一般在 5 m 以下；从下游新的束窄段开始，最大水深有所增加，一般在 5 m~10 m 之间。

基金项目

水利部公益性项目(201201041-02)。

参考文献 (References)

- [1] 徐道明, 冯清华 (1989) 西藏喜马拉雅山区危险冰湖及其溃决特征. *地理学报*, **3**, 343-352.
- [2] 舒有锋 (2011) 西藏喜马拉雅山地区冰碛湖溃决危险性评价及其演进数值模拟. 硕士学位论文, 吉林大学, 长春.
- [3] 王铁锋, 刘志荣, 夏传清, 等 (2003) 西藏年楚河冰川湖考察. *冰川冻土*, **S2**, 344-348.
- [4] 李治国, 姚檀栋, 叶庆华, 等 (2010) 西藏年楚河满拉水库上游冰川变化及其影响. *冰川冻土*, **4**, 650-658.
- [5] Wu, W., He, Z. and Wang, S.S.Y. (2009) A depth-averaged 2-D model of non-cohesive dam/levee breach processes. *Proceedings of World Environmental and Water Resources Congress, Kansas City*, ASCE Publications, 1-10.
- [6] 贺治国, 吴钢锋, 王振宇, 等 (2010) 台风暴雨影响区域的溃坝洪水演进数值计算. *浙江大学学报*, **8**, 1589-1596.
- [7] Yao, X.J., Liu, S.Y., Sun, M.P., et al. (2012) Volume calculation and analysis of the changes in moraine-dammed lakes in the north Himalaya: A case study of Longbasaba lake. *Journal of Glaciology*, **210**, 753-760.
- [8] 董晓辉 (2008) 冰川终碛湖溃决洪水模拟及影响分析. 博士论文, 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京.