

The Water Level Forecast Research of a Typical Glacier Lake in the Qinghai-Tibet Plateau Based on Distributed Hydrological Model

Feng Wang¹, Honglei Tang¹, Qihua Ran¹, Changwei Xiao², Zhipeng Huang²

¹Department of Hydraulic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou

²Tibet Autonomous Region Planning Survey and Design Institute of Water Conservancy and Electric Power, Lhasa

Email: wfn01@163.com

Received: Sep. 15th, 2014; revised: Sep. 22nd, 2014; accepted: Sep. 29th, 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 glacial lakes in the Qinghai-Tibet Plateau are important water resources for the local residents. However, there is a great potential of safety hazard. Affected by the climate change in recent years, more and more glacier lakes turn into dangerous situations. And for the moraine lake, which is the most likely to burst, the majority of disasters are caused by overtopping. Therefore, the monitoring and the analysis of moraine lake water level have great significance. Physical based distributed hydrological model InHM which has added the glacial ablation part was first used in mountain glacial basin. The typical dangerous glacial lake—Huanghu located in the end of Glacier Shimo, Qinghai-Tibet Plateau was selected as the study area for this paper and its glacier runoff and lake level change process were simulated. The simulation data were derived from DEM of 30 m accuracy and hydro-meteorological data of 2010-2013 including temperature, rainfall and the variation of lake level. The simulation results were estimated using 2013 lake hydrograph and the Nash efficiency coefficient is 0.85. Results show that the InHM can obtain good simulation results in data lacking Himalayan glaciers and can be helpful in the moraine dam failure prevention.

Keywords

Glacial Lake, Glacial Runoff, Water Level Forecast, Numerical Simulation

作者简介: 王丰(1990-), 男, 陕西, 博士生, 主要从事水文水资源工作。

基于分布式水文模型的青藏高原典型冰湖水位预报研究

王 丰¹, 唐鸿磊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: wfn01@163.com

收稿日期: 2014年9月15日; 修回日期: 2014年9月22日; 录用日期: 2014年9月29日

摘 要

青藏高原的冰湖既是当地重要的水资源, 同时也存在着重大的安全隐患。近年来受气候变化的影响, 越来越多的冰湖进入了溃决危险状态。对于其中最易发生溃决的冰碛湖, 漫顶型溃决占了灾害的大多数。因此, 对冰碛湖的湖水位进行监测与分析有重大的意义。本文在基于物理机制的分布式水文模型InHM模型中加入冰川消融模块, 首次将其应用于高山冰川流域, 以什磨冰川末端的青藏高原典型危险冰湖黄湖为研究对象, 模拟了其流域的冰川径流及湖水位变化过程。模拟的数据来源于30 m精度的DEM数据和2010~2013年的水文气象数据, 包括气温、降水和水位变化。模型的模拟结果通过与观测得到的2013年湖面水位曲线进行评估, 模拟结果纳什效率系数为0.85。结果显示InHM模型能在观测数据相对缺乏的喜马拉雅冰川取得较好的模拟结果, 同时可以为下游的冰碛湖的溃坝预防提供帮助。

关键词

冰湖, 冰川径流, 水位预报, 数值模拟

1. 引言

冰川水资源是我国青藏高原地区重要的水资源, 其中的山地冰川是重要的径流补给和生产生活优质水源, 而喜马拉雅山脉的冰川占了山地冰川的很大比例。但是, 冰川给当地带来水资源的同时, 也在一定条件下会形成冰湖, 威胁下游人民的生命财产安全。

近年来, 由于全球范围内加速的气候变化, 愈来愈多当地的冰湖进入了危险状态。在我国, 1935年~2010年, 我国西藏地区先后有17个冰湖发生20次溃决, 几乎每次都造成了严重损失[1]。在形成灾害的冰湖中, 危害较大的冰湖为冰碛湖。冰碛湖是冰川在末端消融后退时, 挟带的砾石在地面堆积成四周高、中间低的洼地, 或堵塞部分河床、积水形成的湖泊, 冰碛湖多形成于小冰期各冰退阶段。冰碛湖灾害的形成与其破坏类型有着密切的联系, 发生冰湖溃决灾害的冰湖破坏类型主要为冰川融化导致的漫顶型溃决和落冰涌浪型溃决, 约占我国喜马拉雅山地区发生的十几次冰碛湖溃决灾害事件80%以上[2]。因此, 对冰碛湖的湖水位进行监测与分析有重要的安全意义。

喜马拉雅山地区海拔高气温低地形复杂, 再加上缺少较好的后勤补给工作, 导致实地野外观测面临很大困难, 实测水文气象资料较少[3]。同时, 由于冰湖的变化较为缓慢研究需要多年的数据来率定和验证。

对于此种研究区域, 径流在很大程度上受冰川融水影响。目前大多数研究在计算冰川融水时主要利用基于气温的物质平衡法和度日因子法, 冰川物质平衡线法侧重于较长时间尺度的物质平衡研究, 度日因子法则主要应用于消融季节, 多数模型不考虑冰川流域的水量平衡[4]。由于本次研究时间尺度不大且主要关心消融期下游湖水位的变化, 故选择度日因子法估算冰川消融。

目前, 针对冰川径流的模拟模型主要有考虑流域物理概念的概念性水文模型和基于物理的分布式水文模型。国外尤其北欧国家在这方面的应用较早, 瑞典开发的 HBV 模型属于代表性的概念性水文模型, 在冰川地区有着广泛应用[5]。此外, Uhlmann 等使用 RS3.0 概念性水文模型模拟了瑞士 Findelen 地区目前和未来多年的冰川径流[6]; Tahir 等使用 SRM 模型模拟了巴基斯坦一处融雪径流[7]; Koboltschnig 等用 PREVAH 模型模拟了澳洲高山区流域[8]。对于基于物理概念的分布式水文模型, 直到 90 年代后期随着技术的发展才开始逐步应用。TOPMODEL 和 MIKE SHE 是其中应用比较广泛的模型。此外, Konz 等使用分布式模型 TAC 模拟了喜马拉雅山南坡一处冰川径流, 在较少可得参数的情况下取得了较好的精度[9]; Verbunt 等应用基于物理原理的分布式模型模拟了瑞士一处冰川前 20 年的径流并计算了其冰川变化[10]。国内有董增川等尝试使用基于 DEM 分布式冰雪融水—雨水混合水文模型[11]; 刘伟刚等在 HYCYMODEL 水文模型中加入冰川消融子模块, 模拟了绒布冰川流域径流过程[3]。基于物理概念的分布式水文模型, 由于其能更科学地揭示水文过程的机理, 因此受到越来越多的关注。但是此种模型由于自然机理认识水平的制约以及参数的限制等原因, 距离实际推广应用还需要更长时间的研究[12]。

本项研究旨在青藏高原选择典型冰湖, 通过野外调查和资料检索, 将分布式水文模型 InHM 应用其中来模拟黄湖上游冰川融水, 进而得出黄湖湖水位的变化, 对冰湖水位进行模拟与预报。研究成果可广泛应用于西藏其他类似地区冰湖灾害防御, 建立预防和监测机制, 提高预警能力, 解决人民群众的生存安全问题, 保护和改善生态环境。

2. 研究区域概况

如图 1 所示, 黄湖, 地处喜马拉雅山中段北坡, 西藏康马县上游。其水源补给主要来自上游什磨冰川补给, 另一小部分来自降水。年平均气温小于 0°C , 年降水量在 300 mm~400 mm 之间, 降水形式主要为雨加雪形式。湖水位根据遥感影像为 5152 m, 面积约 1.67 km^2 , 库容为 5022 万方。黄湖上游什磨冰川的冰舌末端插入湖内, 宽 550 m~600 m。黄湖出水口位于湖的北面, 湖水主要是通过渗漏的方式流出, 汛期 2013 年 7 月流量为 17.5 立方米每秒, 枯水期 2012 年 12 月流量为 0.527 立方米每秒。图中黄湖上游 1.4 公里处有另一个冰湖——桑旺错。根据历史资料, 桑旺错曾于 1954 年 7 月 16 日晚发生溃决。当天, 由于气温升高, 当晚大量的冰雪坍塌于湖中, 湖水暴涨, 近 3 亿立方米的洪水直接冲向河道, 造成了年楚河流域特大灾害, 死亡近 700 人[13]。

黄湖出口处有 4 道侧碛垄和 2 道终碛垄, 内侧终碛高出湖面约 20 m, 终碛主要由大块石、块石、碎石和砂组成。资料显示, 该地区介于海洋性冰川与大陆性冰川的过渡地带, 易发生冰崩或冰滑坡。崩塌物涌入湖中可引起十多米搞得涌浪, 极易使终碛最脆弱的部分产生溃决。

从 1990 年开始, 黄湖库容开始迅速增长。根据 Landsat 遥感资料, 黄湖上游的什磨冰川从 1976 至 2010 年面积减少了 2.7%, 同时, 黄湖面积由 0.82 km^2 增长到约 1.67 km^2 。冰湖的增长呈加速趋势, 其溃决的危险性愈来愈大。对黄湖的水位进行模拟和预报, 对预防其溃决危险有着重要意义。

3. 研究方法

3.1. InHM 模型介绍

基于物理概念的分布式水文响应模型 InHM 在 1999 年由 Vander-Kwaak 开发, 随后经过 Stanford 大

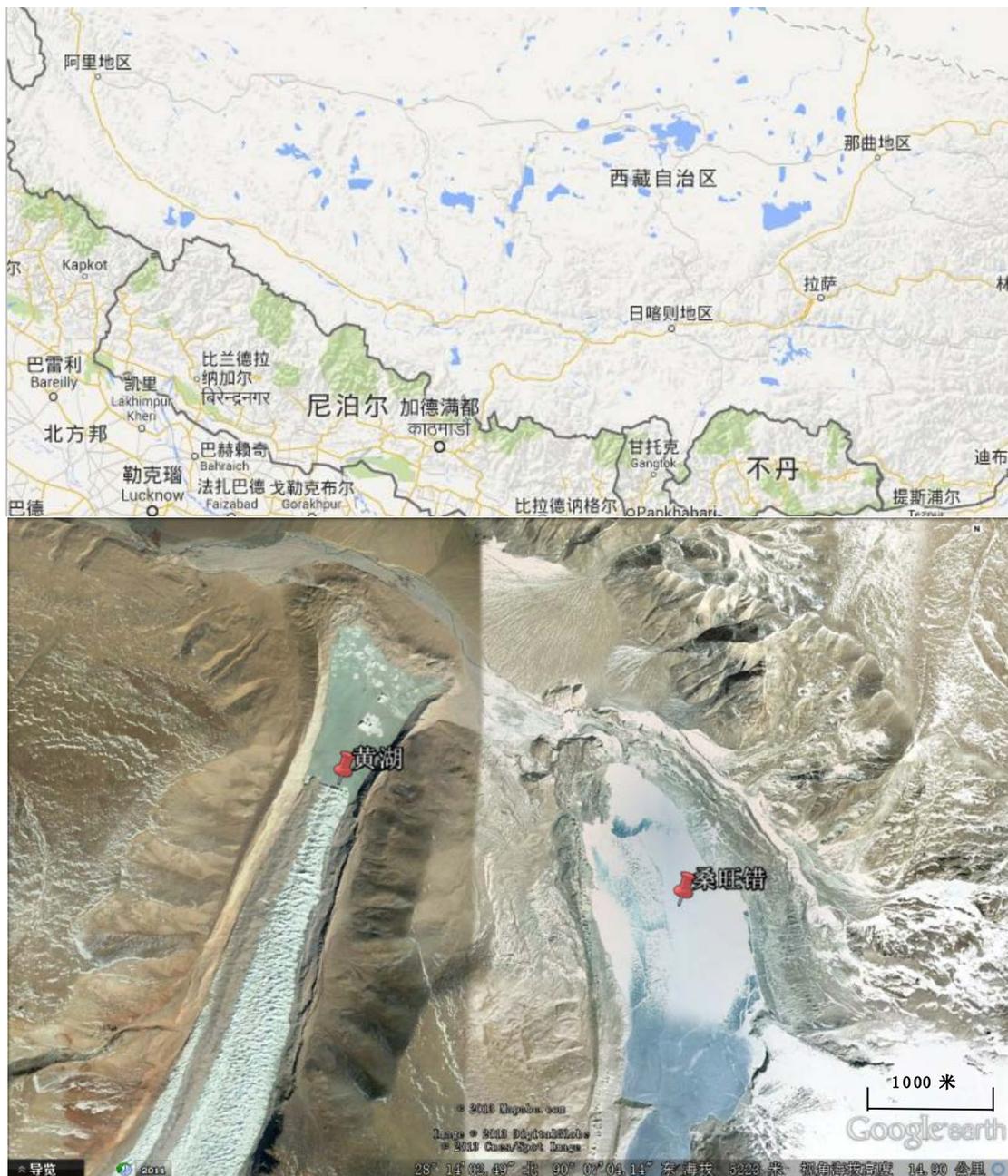


Figure 1. The location of Huanghu Lake (left) and Sangwang Lake (right)
图 1. 黄湖及桑旺湖所在位置示意图(左为黄湖右为桑旺湖)

学的水文研究所不断改进和完善，目前能够模拟地下水在饱和区和非饱和区以及大孔隙中的三维流动，地表径流在坡面及河道的二维流动。与其他传统水文模型相比，InHM 最大的优势是用基本水力学方程及物理定律来描述自然过程。因此，InHM 对水文过程的模拟有效避免了人为简化引入的误差和不确定性，而且具有明确的物理意义[14]，适于理论分析工作。表 1 列出了学界有代表性的基于物理的分布式水文模型，从中可以看到，从模拟的维度或是模拟的技术手段来看，InHM 都有其独特的优势。以欧洲开发的 MIKESHE 模型为例，MIKESHE 中地下非饱和区为一维模拟，饱和区为二维模拟，而 InHM 则全部为三维；MIKESHE 中地表渠道为一维模拟，而 InHM 为二维；MIKESHE 中各部分为序列耦合(即地表部分先

求解, 然后再求解地下部分), 而 InHM 为一阶耦合(即各部分同时求解, 避免了可能引入的数值问题); MIKESHE 只模拟单次降雨过程, 而 InHM 既可以模拟单次降雨过程, 也能连续模拟长时段多次降雨。

目前, InHM 已经被成功应用于小流域尺度的水文响应分析, 流域累计生态效应评估, 地表地下水文交互响应, 建坝拆坝对水文响应的影响等领域[18]-[26]。基于以上, 在本次研究中应用 InHM 模型对黄湖上游的冰川径流进行模拟, 得到湖水位的变化情况。

为了更好将 InHM 模型应用于冰川流域, 在模型中加入了度日因子模块。度日因子法是基于气温与冰雪消融的线性关系建立的一种统计方法。对于度日因子法, 因其只需要温度数据, 并且差值方便, 用于数据稀少的喜马拉雅山区较为合适。一般形式为[27]:

$$\sum_1^n M = DDF \sum_1^n T^+ \Delta t \tag{1}$$

式中: DDF 为度日因子, T^+ 为 Δt 时段内平均的正的温度, M 为冰雪的融化量。

本次研究的应用方法为每隔 100 米高程划分一个降水区域, 根据气温梯度和降水随海拔变化规律把气象站的气温降水插值, 计算此高度上的降水量和冰川消融量之和作为本高度区域的水量输入。

3.2. 模型输入数据

InHM 模型的输入数据为时间序列的气象数据(日均温, 日降水量); 研究区域的地形数据; 地表类型(覆盖性质, 土壤类型, 冰川)以及相关参数数据。

本次研究中, 模型率定时所用的日气温和日降水数据从国家气象局资料网站获取, 依靠附近江孜气象站的数据进行差值, 数据为 2010~2012 年的日平均温和日降水。2012~2013 期间, 我们在黄湖出口处设置了自动气象站, 获得了一系列实测数据, 用来进行模型的验证。气温驱动冰川消融, 为了使单站的气温数据更好得被模型使用, 需要把实测气温数据插值。差值方法利用温度梯度及降水梯度每隔 100 m 差值一次, 具体数值见表 2。在计算降水时考虑降雨产流的最低温度为 0.5°C[3]。

此外, 为了验证模型的模拟结果, 选用了黄湖 2013 年秋季的水文数据。

本次研究地形数据采用的是 ASTER 的 DEM 数据, 精度 30 m, 经过 GIS 统计模型网格中冰川所占的比例及冰川区的平均的地形信息。具体的研究区域如图 2 所示, 计算的网格已经在上面显示, 精度为 100~500 米。

Table 1. Model comparison

表 1. 模型比较

| 模型名称缩写 | 地下水 | 地表水 | 过程表示 | 时间尺度 |
|---------------|------------------------|----------|-------------|-------|
| TOPMODEL [15] | 1D, U/S, E | 1D, E | H, D, SS, G | EV, C |
| MIKE SHE [16] | 1D, U, N/R; 2D, S, N/G | 1D, N | H, D, G | EV |
| InHM [17] | 3D, U/S, N/R | 2D, N/DW | H, D, SS, G | EV, C |

H (超渗产流); E(经验公式); C (连续模拟); EV (单次降雨); N (数值求解); DW (扩散波); D (蓄满产流); U (非饱和); S (饱和); R (Richards 方程); SS (地下暴雨径流); G (地下水)。

Table 2. The gradient of temperature and precipitation

表 2. 降水及温度梯度

| | 梯度大小 | 应用范围 |
|------|--------------|---------------|
| 降水梯度 | 0.15/100 m | 5200 m~6500 m |
| 温度梯度 | -0.65 °C/100 | 5200 m~6500 m |

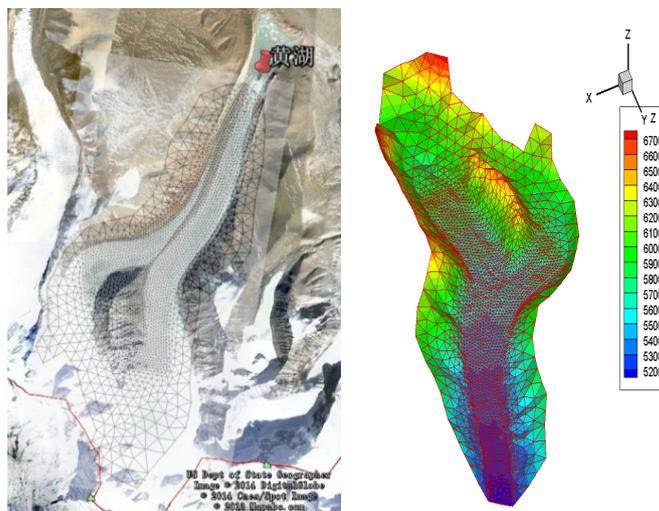


Figure 2. The computational grid of Huanghu Lake
图 2. 黄湖计算网格

模型率定和验证使用了相对误差 (Re) 和纳什效率系数[28] (N) 这两个参数，具体公式如下：

$$N = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (2)$$

$$Re = \frac{P - O}{O} \quad (3)$$

其中 P 代表模拟值， O 代表观测值， n 表示数据的数量。

4. 模拟结果

4.1. 模型率定

InHM 模型包含了很多可调参数，虽然一部分参数可以文献或者观测进行确定，但是一部分参数需要根据流域实际情况进行调整，包括 1) 地形表面的曼宁系数 n ，控制产流的速度及过程；2) 度日因子 DDF。

模型率定时采用 2010~2012 年资料相对稀少的水位与流量数据，计算工况选择 2010/01 至 2012/12，主要实测数据如下表 3。

模拟值部分首先由模型计算出黄湖上游冰川的出流量，然后减去实测的冰湖出流并根据冰湖的库容曲线算出模拟的湖水位增长。率定的 DDF 为 $14.5^\circ\text{C}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ，曼宁系数 n 为 0.1，率定结果如表 4，由于率定的时间尺度较大，所以误差尚在可接受范围内。

4.2. 模型验证

2013 年黄湖出流量和湖面高程变化数据比较详细，以此来验证模型参数，工况选择 2013/9/24 至 2013/12/9，输入数据中降雨气温如图 3。

2013/9/24 至 2013/12/9 此时间段期间，当地水文单位对黄湖水位曲线及出口流量等进行了测量，由此得到实测值。模型模拟的输出结果为黄湖的入流量。将其减去黄湖出口流量并结合黄湖的水深-库容曲线，得到模拟的湖水位变化。模型验证具体结果如图 4。

Table 3. The variation of lake capacity and water level during 2010-2012
表 3. 2010~2012 湖库容、水位变化

| 年份 | 2010 | 2012 |
|--------------------------|------|--------|
| 湖面积(km ²) | 1.67 | 1.72 |
| 湖库容(104 m ³) | 4800 | 5022 |
| 湖水位(m) | 5118 | 5119.5 |

Table 4. Calibration results
表 4. 率定结果

| 年份 | 模拟值(m) | 实测值(m) | 相对误差 |
|-----------|--------|--------|-------|
| 2010-2012 | 1.73 | 1.50 | 15.3% |

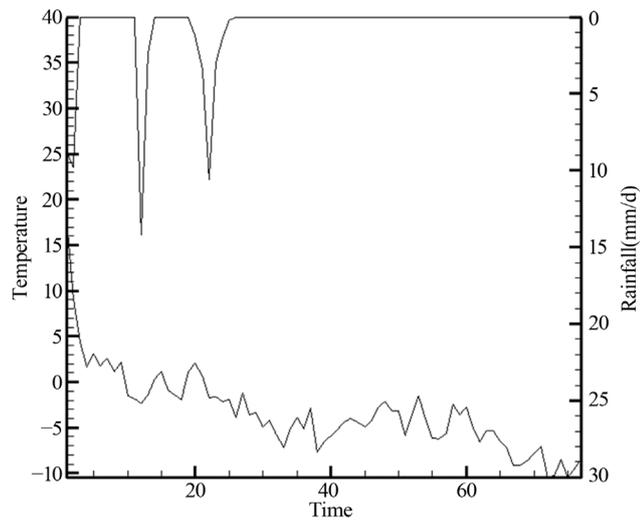


Figure 3. Input data of model validation
图 3. 模型验证输入参数

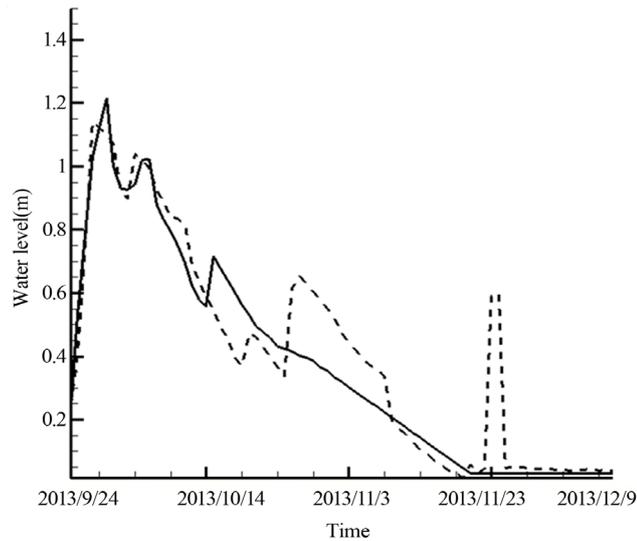


Figure 4. Validation results (solid line—simulation, dotted line—observation)
图 4. 模型验证结果(实线为模拟, 虚线为实测)

模拟结果纳什效率系数为 0.85, 在数据较难获得的喜马拉雅山地区, 模型的计算结果是相对可信的。从结果可以看出除了中后半部分有些波动, 模型对黄湖水位的预报结果误差较小, 11 月 23 日的波动预计是由于偶然的落冰引起, 故而产生了突然的湖面水位升高。在其他情况下, 模型对湖面水位的预测与实际接近。

5. 结论

本次研究首次将基于物理机制的分布式水文模型 InHM 应用于冰川径流的模拟。模拟结果表明 InHM 模型可以应用于冰川流域的冰湖水位预报, 能在资料较少的高寒地带取得较好的精度。将其应用于西藏地区可对冰碛湖的溃决预警提供帮助。

对降雨和气温进行空间差值并应用度日因子法计算消融的方法能在简单易行的同时取得较好的可信度。

模型误差主要来自于: 1) 研究期间水文数据稀缺; 2) 由于率定困难, 度日因子采用统一的值。

为了预防黄湖的溃坝危险, 首先应是加强监测, 特别是夏季、初秋气温变化异常时期可适当增加检测次数, 做好预防工作; 其次, 在溃决之前人为加深溢流口或新开排水渠道, 大大降低湖水水位, 即使冰崩、冰滑坡涌进冰湖内, 较小的库容也无法造成洪水和泥石流灾害。

未来可以将太阳辐射因子等参数加入模型, 同时考虑冰川径流的特征, 可适当加入冬季基流的修正因子进一步改良模型。

基金项目

水利部公益性项目(201201041-02)。

参考文献 (References)

- [1] 舒有锋. 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[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
SHU Youfeng. Hazard assessment of moraine-dammed lake outbursts in the Himalayas, Tibet and the propagating numerical simulation. Changchun: Jilin University, 2011. (in Chinese)
- [2] 刘晶晶, 程尊兰, 李泳等. 西藏冰湖溃决主要特征[J]. 灾害学, 2008, 23(1): 55-60.
LIU Jingjing, CHENG Zunlan, LI Yong, et al. Characteristics of glacier-lake breaks in Tibet. Journal of Catastrophology, 2008, 23(1): 55-60. (in Chinese)
- [3] 刘伟刚, 任贾文, 刘景时等. 喜马拉雅山珠峰绒布冰川流域径流模拟[J]. 冰川冻土, 2012, 34(6): 1449-1459.
LIU Weigang, REN Jiawen, LIU Jingshi, et al. Runoff simulation of the Rongbuk watershed around the Mt. Qomolangma, central Himalaya, using HYCYMODEL. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(6): 1449-1459. (in Chinese)
- [4] 陈仁升, 刘时银, 康尔泗等. 冰川流域径流估算方法探索——以科其喀尔巴西冰川为例[J]. 地球科学进展, 2008, 23(9): 942-951.
CHEN Rensheng, LIU Shiyin, KANG Ersi, et al. Daily glacier runoff estimation methods—A case study of Koxkar Glacier. Advances in Earth Science, 2008, 23(9): 942-951. (in Chinese)
- [5] BERGSTRÖM, S. (1976) Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrköping.
- [6] UHLMANN, B., JORDAN, F. and BENISTON, M. Modelling runoff in a Swiss glacierized catchment—Part I: Methodology and application in the Findelen basin under a long-lasting stable climate. International Journal of Climatology, 2013, 33(5): 1293-1300.
- [7] TAHIR, A. A., CHEVALLIER, P., ARNAUD, Y., et al. Modeling snowmelt-runoff under climate scenarios in the Hunza River basin, Karakoram Range, Northern Pakistan. Journal of Hydrology, 2011, 409(1-2): 104-117.
- [8] KOBOLTSCHNIG, G. R., SCHONER, W., ZAPPA, M., et al. Runoff modelling of the glacierized Alpine Upper Salzachbasin (Austria): Multi-criteria result validation. Hydrological Processes, 2008, 22(19): 3950-3964.
- [9] KONZ, M., UHLENBROOK, S., BRAUN, L., et al. Implementation of a process-based catchment model in a poorly

- gauged, highly glacierized Himalayan headwater. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2007, 11(4): 1323-1339.
- [10] VERBUNT, M., GURTZ, J., JASPER, K., et al. The hydrological role of snow and glaciers in alpine river basins and their distributed modeling. *Journal of Hydrology*, 2003, 282(1-4): 36-55.
- [11] 卿文武, 陈仁升, 刘时银. 冰川水文模型研究进展[J]. 水科学进展, 2008, 19(6): 893-902.
QING Wenwu, CHEN Rensheng and LIU Shiyin. Progress in study of hydrological model. *Advances in Water Science*, 2008, 19(6): 893-902. (in Chinese)
- [12] 张小咏, 刘耕年, 鞠远江, 傅海荣. 冰川径流模型研究进展[J]. 水土保持研究, 2005, 12(4): 58-62.
ZHANG Xiaoyong, LIU Gengnian, JU Yuanjiang and FU Hairong. A review of the hydrological model in the glacierized drainage basin. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12(4): 58-62. (in Chinese)
- [13] 李传富, 苏治华, 张玉初. 青藏高原冰湖的保护与开发[J]. 中国水土保持, 2007, (11): 15-16.
LI Chuanfu, SU Zhihua and ZHANG Yuchu. The protection and development of glacier-lake in Tibet. *Soil and Water Conservation in China*, 2007, (11): 15-16. (in Chinese)
- [14] RAN, Q. H., LOAGUE, K. and VANDERKWAACK, J. E. Hydrologic-response-driven sediment transport at a regional scale, process-based simulation. *Hydrological Processes*, 2012, 26(2): 159-167.
- [15] BEVEN, K.J., KIRKBY, M.J. A physically-based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Journal*, 1979, 24(1): 43-69.
- [16] DHI. MIKE SHE flow modules manual. Hørsholm: Danish Hydraulic Institute, 2003.
- [17] HEPPNER, C. S., RAN, Q., VANDERKWAACK, J. E. and LOAGUE, K. Adding sediment transport to the Integrated Hydrology Model (InHM): Development and testing. *Advances in Water Resources*, 2006, 29(6): 930-943.
- [18] LOAGUE, K., VANDERKWAACK, J. E. Simulating hydrological response for the R-5 catchment: Comparison of two models and the impact of the roads. *Hydrological Processes*, 2002, 16(5): 1015-1032.
- [19] VANDERKWAACK, J. E., LOAGUE, K. Hydrologic-response simulations for the R-5 catchment with a comprehensive physics-based model. *Water Resources Research*, 2001, 37(4): 999-1013.
- [20] LOAGUE, K., HEPPNER, C. S., ABRAMS, R. H., CARR, A. E., VANDERKWAACK, J. E. and EBEL, B. A. Further testing of the Integrated Hydrology Model (InHM): Event-based simulations for a small rangeland catchment located near Chickasha, Oklahoma. *Hydrological Processes*, 2005, 19(7): 1373-1398.
- [21] EBEL, B. A., LOAGUE, K. Rapid simulated hydrologic response within the variably saturated near surface. *Hydrological Processes*, 2008, 22(3): 464-471.
- [22] EBEL, B. A., LOAGUE, K., MONTGOMERY, D. R. and DIETRICH, W. E. Physics-based continuous simulation of long-term near-surface hydrologic response for the Coos Bay experimental catchment. *Water Resources Research*, 2008, 44(7): W07417.
- [23] MIRUS, B. B., LOAGUE, K., VANDERKWAACK, J. E., KAMPF, S. K. and BURGESS, S. J. A hypothetical reality of Tarrawarra-like hydrologic response. *Hydrological Processes*, 2009, 23(7): 1093-1103.
- [24] RAN, Q. Regional scale landscape evolution: Physics-based simulation of hydrologically-driven surface erosion. Stanford: Stanford University Geological and Environmental Science, 2006.
- [25] EBEL, B. A., MIRUS, B. B., HEPPNER, C. S., et al. First-order exchange coefficient coupling for simulating surface water-groundwater interactions: Parameter sensitivity and consistency with a physics-based approach. *Hydrological Processes*, 2009, 23(13): 1949-1959.
- [26] HEPPNER, C. S., LOAGUE, K. A dam problem: Simulated upstream impacts for a Searsville-like watershed. *Ecology*, 2008, 1(4): 408-424.
- [27] HOCK, R. Temperature index melt modelling in mountain areas. *Journal of Hydrology*, 2003, 282(1-4): 104-115.
- [28] NASH, J. E., SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models, part I: A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, 10(3): 282-290.