

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0145

刘晶晶, 马春, 苏鹏程. 以气温和降雨量为指标的冰湖溃决预警方法[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(6): 01-08. LIU J J, MA C, SU P C. Early warning method of glacial lake outburst floods based on temperature and rainfall[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(6): 01-08. (in Chinese)

以气温和降雨量为指标的冰湖溃决预警方法

刘晶晶^{1,2,3}, 马春^{1,3}, 苏鹏程^{1,3}

(1. 中国科学院 水利部成都山地灾害与环境研究所 & 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041;
2. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 冰湖溃决是冰川区突发的严重山地灾害之一。目前, 全球气候变暖, 冰川普遍退缩, 冰湖面积和溃决风险也随之增大。因此, 冰湖溃决预警方法的研究对冰川地区防灾减灾有着重要的实际意义。现提供了一种综合考虑气温与降雨条件影响的冰湖溃决预警方法, 选择预测日前期正积温逐日增长速度值与预测日前期 30 d 累积降雨量作为气温和降雨的代表性指标, 通过对 2010 年前发生的 21 例溃决事件统计, 结合邻近 21 个气象台站的日均温和日降雨量资料分析, 建立了冰湖溃决的预警警戒线和冰湖溃决预警系统流程。其后, 选择 2013 年 7 月 5 日的然则日阿错冰湖溃决案例对建立的冰湖溃决预警系统进行验证, 发现预警效果良好。

关键词: 气温; 降雨量; 冰湖溃决; 预警

中图分类号: P694 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Early warning method of glacial lake outburst floods based on temperature and rainfall

LIU Jingjing^{1,2,3}, MA Chun^{1,3}, SU Pengcheng^{1,3}

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process & Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China;
2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Glacial lake outburst floods (GLOFs) are serious disasters in glacial areas. At present, due to global warming, glaciers are generally diminishing; thus increasing the glacial lake area and the outburst risk. Therefore, the research on early warning methods for GLOFs is important to disaster prevention and relief in glacial areas. This paper proposes an early warning method using the temperature and rainfall as indices. We selected the daily growth rate of prior period positive cumulative temperature and the prior thirty day cumulative rainfall as the representative indices of temperature and rainfall. Based on the statistics of the 21 outburst events before 2010 and the data from the 21 nearby meteorological stations, we built an outburst early warning threshold and a flow chart of the GLOF early warning system. The system was verified by the GLOF event in the Ranzeco glacial lake on 2013-07-05.

Key words: temperature; rainfall; glacial lake outburst floods; early warning

收稿日期: 2018-05-17 修回日期: 2018-08-20 网络出版时间: 2018-08-30

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180829.1001.002.html>

基金项目: 中国科学院西部之光重点项目(Y5R2040040); 国家自然科学基金(41877261; 41571004); 中国科学院成都山地所“一三五”方向性项目(SDS-135-1701); 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室开放基金(SKHL1516)

Funds: West Light Foundation of The Chinese Academy of Sciences (Y5R2040040); National Natural Science Foundation of China (41877261; 41471011); The 135 Strategic Program of the Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS (SDS-135-1701); Open Research Fund of the State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering (SKHL1516)

作者简介: 刘晶晶(1981-), 女, 四川成都人, 副研究员, 博士, 主要从事山地灾害预警及工程防治方面研究。E-mail: liujingjing@imde.ac.cn

联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)《第五次评估报告》^[1]指出,大气中温室气体尤其是二氧化碳的浓度持续增加导致 1950 年后全球温度出现了明显上升。在全球变暖的背景下,大部分高山区的冰川面积和体积有明显减小,有些小规模冰川甚至消失,低纬度和中纬度的冰川缩减尤为明显^[2]。中国现代冰川面积 59 406 km²,冰储量约为 5 590 km³^[3]。自小冰期盛时以来,西部高山区平均升温 1.3 °C,冰川的萎缩量相当于现代冰川面积的 20%,预估 2030 年、2070 年和 2100 年的升温值分别为 0.4~1.2 °C、1.2~2.7 °C 和 2.1~4.0 °C,届时冰川面积将分别减少 12%、28% 和 45%^[3]。

冰湖是冰川运动的产物,通常由冰川挖蚀成的洼坑和冰碛物堵塞冰川槽谷积水而形成,以冰川作用或以冰川融水为主要补给源^[4,5]。冰湖受气候影响显著,随着气候变暖,冰川大规模退缩,冰湖水位上升,补给充足的大型冰湖库容量增大,而相应的小型冰湖在数量上减少^[6]。随着冰湖面积的扩张,冰湖发生溃决的频率和规模也随之增大^[7]。冰湖溃决是冰川区突发的严重山地灾害,其导致的洪水和泥石流突发性强、流量大、破坏性强、波及范围大,在沿程又会激发其他次生灾害,从而造成人员伤亡与经济损失,其灾害损失比一般的暴雨激发的洪水和泥石流要严重得多^[8,9]。根据姚晓军等的研究^[8]和笔者后期调查,发现 1935 年以来,西藏地区发生的且已有记录的冰湖溃决事件共 30 起,给冰湖下游的城市乡村、居民点、公路设施、水利电力等带来了巨大的影响,甚至波及周边国家^[10,11]。

鉴于冰湖溃决后带来的系列风险,冰湖溃决方面的研究受到越来越多研究者的关注^[12]。冰湖溃决的诱发因素包括冰崩、雪崩、冰滑坡、冰雪强烈消融、高强度持续降水等外部诱因^[13],以及冰碛坝内核冰融化、冰碛坝管涌等内部诱因^[14]。目前关于冰湖溃决方面的研究,多是利用遥感手段^[15],提取下垫面特征(包括冰湖特征、其后冰川特征、终碛堤特征等),进行冰湖溃决的风险评估^[16,17]。尽管研究者们很早就认识到气候变化的水热组合对于冰湖溃决和泥石流活动起着控制作用^[18],例如研究者发现 1988 年光谢错冰湖溃决就是因为前期的持续高温和冰川融水的潜蚀作用^[19]。并且前期研究中,也发现西藏冰湖溃决事件都发生于日均温>0 °C 的日子,且海拔越高的冰湖发生溃决的时间越晚^[20,21]。但由于缺乏长期连续的气候资料,使得目前的研究只能单纯的讨论某次事件下的气候背景,而没法弄

清气候变化对冰湖溃决的作用机制,也没法依据气候条件对冰湖溃决事件进行前期预警。

冰湖溃决的影响因素包括冰川积累面积和厚度、冰湖大小及储水量、湖堤结构与稳定性等,这些影响因素都与气温、降雨有着密切关系,所以本文认为气温和降雨是触发冰湖溃决的影响因素。与气候波动事件相比,冰湖溃决的发生虽然是一种低概率事件,但基于冰湖溃决发生的自然特征规律可以确定,对于既定的某一危险冰湖,虽然不一定存在所谓某一确定的能够触发冰湖溃决的气温指标值与降雨指标值,但一定存在一个与冰湖溃决发生高度相关的以某一或某些气温与降雨指标为变量的冰湖溃决危险临界线。超过该临界线,冰湖溃决发生的概率高,低于该临界线,溃决发生的概率低,由此可以解决冰湖溃决预测预警的技术问题。基于此,本文将 5 万多组气温与降雨长期观测数据及历次冰湖溃决事件进行关联性分析,试图从众多涉及气温与降雨的气象指标中筛选出具有代表性的指标,确定其与冰湖溃决事件之间存在的符合规律的函数关系,为冰湖溃决的预警工作提供基础。

1 数据来源与遴选方法

1.1 研究区与过去冰湖溃决事件

通过对文献资料的整理和野外考察搜集,这里统计了 1930 后发生于我国西藏地区的冰湖溃决事件共 30 起,详见表 1。

1.2 气温和降雨量数据来源

本文中涉及到的气温和降雨数据来自于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),包括中国地面气候资料年值数据集、中国地面气候资料日值数据集和中国地面国际交换站气候资料日值数据集(V3.0)(更新时间截止到 2015 年 5 月)。

西藏的气象台站密度较内陆低,全区共有 71 个县,但目前只设立了 39 个气象观测站点,且气象台站建立时间晚,缺测数据序列长。本方法所需要日均温与日降雨量观测数据,本应当选择冰湖所在区域的气象台站提供的数据。但在实际工作中,冰湖位于高寒高海拔区域,这些区域由于硬件条件限制,均无配套的自身区域气象台站,无法提供冰湖所在地的长期日均温观测数据与日降雨量数据。

本次分析中气象数据网数据提供至 2015 年 5 月,所以无名湖的冰湖溃决事件未纳入此次分析。并且由于局部气象台站数据序列不全和冰湖溃决发生时间记录不清的原因,塔阿错、穷比吓玛错、鲁惹错、桑旺错、章藏布、次仁玛错、给曲冰湖的溃决事件也

表 1 西藏历史冰湖溃决事件

Tab. 1 Glacial lake outburst events in Tibet

序号	名称	所在地区	溃决时间	地理位置	海拔高度/m	溃决原因
1	塔阿错	聂拉木县	1935年8月28日	86.13°E, 28.29°N	5 245	冰滑坡、管涌
2	穷比吓玛错	亚东县	1940年7月10日	88.92°E, 27.85°N	4 660	冰崩
3	鲁惹错	洛扎县	1950年代	90.59°E, 28.27°N	5 420	--
4	桑旺错	康马县	1954年7月16日	90.1°E, 28.24°N	5 150	冰崩
5	章藏布	聂拉木县	1964年	85.86°E, 28.18°N	5 448	管涌
6	次仁玛错	聂拉木县	1964年	86.06°E, 28.07°N	4 660	冰崩、管涌
7	隆达错	吉隆县	1964年8月25日	85.35°E, 28.62°N	5 460	冰崩、冰滑坡
8	吉莱错	定结县	1964年9月21日	87.81°E, 27.96°N	5 271	冰滑坡
9	达门拉咳错	工布江达县	1964年9月26日	93.04°E, 29.87°N	5 210	冰崩、冰滑坡
10	阿亚错(1)	定日县	1968年8月15日	86.49°E, 28.35°N	5 560	冰滑坡
11	阿亚错(2)	定日县	1969年8月17日			
12	阿亚错(3)	定日县	1970年8月17日			
13	坡戈错	索县	1972年7月23日	94.73°E, 31.73°N	4 332	冰崩、冰滑坡
14	坡戈冰川湖	丁青县	1974年7月6日	94.76°E, 31.86°N	4 328	冰崩
15	扎日错	洛扎县	1981年6月24日	90.61°E, 28.3°N	5 420	冰崩、冰滑坡
16	次仁玛错	聂拉木县	1981年7月11日	86.06°E, 28.07°N	4 660	冰崩、冰滑坡、管涌
17	印达普错	定结县	1982年8月27日	87.91°E, 27.95°N	5 175	管涌
18	光谢错	波密县	1988年7月15日	96.5°E, 29.46°N	3 816	冰崩、冰滑坡、管涌
19	夏嘎湖	乃东县	1995年5月26日	91.94°E, 28.8°N	5 212	冰崩、冰滑坡
20	扎那错	吉隆县	1995年6月7日	85.37°E, 28.66°N	4 745	冰滑坡
21	龙纠错	康马县	2000年8月6日	89.69°E, 28.24°N	4 698	--
22	嘉龙错(1)	聂拉木县	2002年5月23日	85.85°E, 28.21°N	4 410	冰川融水与降水增多
23	嘉龙错(2)	聂拉木县	2002年6月29日			
24	得嘎错	洛扎县	2002年9月18日	90.67°E, 28.33°N	5 316	冰崩
25	浪措	错那县	2007年8月10日	91.81°E, 27.83°N	4 300	强降水
26	折麦错	错那县	2009年7月3日	92.34°E, 28.01°N	5 300	冰川融水增加
27	错嘎	边坝县	2009年7月29日	94°E, 30.83°N	4 781	冰川融水增加
28	给曲冰湖	定结县	2010年	87.99°E, 27.95°N	5 510	强降水或上游冰湖
29	然则日阿错	嘉黎县	2013年7月5日	93.53°E, 30.47°N	5 000	冰滑坡
30	无名湖	边坝县	2015年7月3日	94.25°E, 30.74°N	5 039	冰滑坡

注: 表中的部分数据来自于文献[8]

未纳入本次分析。如下, 仅对其余 22 例冰湖溃决事件进行分析。经过 39 个站点的对比和分析, 选择邻近台站($d < 200$ km)作为冰湖溃决气温和降雨数据来源, 具体冰湖选择的气象站点见表 2。

1.3 气温和降雨量数据修正

由于冰湖与气象台站之间存在距离和海拔的差异, 所以来自于气象台站的数据不能直接体现冰湖当地的气候条件。在进行分析之前, 需对各气象台站的数据进行修正。

1.3.1 个别缺测数据处理

个别测站会出现个别日数据缺测的情况, 这里采用趋势预测法对其进行补差。若个别测站长时间

缺测, 则选用其他测站数据修正替代或者直接弃用该站点数据。例如阿亚错冰湖事件的分析中, 发现 1970 年定日气象站数据整年缺测, 则只能弃用定日测站数据, 仅采用聂拉木和日喀则测站数据。

1.3.2 数据距离修正

气象台站通常都距冰湖一定距离, 所以来自于气象台站的气温和降雨量数据都需进行距离修正。这里主要选择距离反比权重法(IDW)对数据进行距离修正。距离反比权重法(IDW)是一种中间插值方法, 利用插值点和样点间的距离为权重, 进行加权平均^[22], 公式如下:

$$X_b = \left(\sum_{i=1}^n \frac{X_i}{D_i^p} \right) / \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{D_i^p} \right) \quad (1)$$

表 2 各冰湖气象数据来源站点

Tab. 2 Meteorological data source stations

湖名	气象数据来源站点	湖名	气象数据来源站点
隆达错	日喀则、定日、帕里	吉莱错	帕里、日喀则、定日、江孜
达门拉咳错	嘉黎、林芝、泽当、江孜	阿亚错	聂拉木、日喀则、定日
坡戈错	索县、嘉黎、丁青	坡戈冰川湖	索县、嘉黎、丁青
扎日错	错那、江孜、隆子	次仁玛错	聂拉木、定日、拉孜
印达普错	聂拉木、定日、拉孜	光谢错	波密、林芝、察隅、左贡
夏嘎湖	错那、江孜、泽当	扎那错	聂拉木、定日、拉孜
龙纠错	帕里、江孜、浪卡子	嘉龙错	聂拉木、定日、拉孜
得嘎错	浪卡子、错那、江孜、泽当	浪措	错那、隆子、加查
折麦错	隆子、错那、加查、琼结	错嘎	嘉黎、林芝、比如、索县、洛隆、丁青
然则日阿错	嘉黎、林芝、比如		

式中: X_b 为目标冰湖的气象要素值; D_i 为插值气象站点与冰湖的水平距离; X_i 为插值气象站点的气象要素值; n 为插值的样点数目; p 为用于计算距离权重的幂指数, 本研究中选择 $p = 2$ 。

1.3.3 数据海拔修正

冰湖海拔高度大多都高于所在区域气象站的海拔, 在以气温作为指标时, 必须考虑海拔高度的差异对气温的影响^[23]。由于目前降雨量的海拔修正, 无明确的认可方法, 故仅对气温数据进行海拔修正, 这里引入青藏高原地区的气温垂直递减率, 对数据进行修正。依据青藏高原及其周边地区的气温垂直递减率等值线分布图^[24], 对中国地面气候资料的温度进行修正, 温度修正公式如下:

$$T_H = T_0 - k \cdot \Delta H \quad (2)$$

式中: T_H 为修正后冰湖所在海拔的温度值; T_0 表示气象站实际测得温度值(°C); k 为不同冰湖地区的气温垂直递减率(m^{-1}), k 的赋值见表 3^[24]; $\Delta H = H_{\text{冰湖}} - H_{\text{台站}}$, 为冰湖与气象站海拔高度差(m)。

表 3 各个测站的温度垂直递减率 k

Tab. 3 Temperature lapse rate k of the stations

站点	k (3月-5月)	k (6月-9月)	站点	k (3月-5月)	k (6月-9月)
比如	0.00606	0.00605	拉孜	0.00584	0.00530
波密	0.00588	0.00590	林芝	0.00577	0.00576
察隅	0.00580	0.00570	隆子	0.00556	0.00537
错那	0.00572	0.00522	洛隆	0.00610	0.00605
丁青	0.00620	0.00625	聂拉木	0.00597	0.00525
定日	0.00582	0.00524	帕里	0.00560	0.00518
加查	0.00563	0.00550	琼结	0.00565	0.00540
嘉黎	0.00590	0.00588	日喀则	0.00571	0.00532
江孜	0.00560	0.00527	索县	0.00613	0.00618
浪卡子	0.00559	0.00530	泽当	0.00565	0.00543
拉萨	0.00565	0.00550	左贡	0.00598	0.00595

1.3.4 五日滑动平均

对气温数据进行了前期处理后, 为了消除不稳定的波动, 显示出温度变化的平稳性, 充分利用热量资源, 减小气温突变误差, 进一步采用五日滑动平均, 遴选出第 1 日均温 ≥ 0 °C 的日期。

$$T_1^* = (T_{-4} + T_{-3} + \dots + T_1) / 5, \dots, T_i^* = (T_{i-4} + T_{i-3} + \dots + T_i) / 5 \quad (3)$$

式中: T_1 是通过五日滑动平均法求算出的稳定通过界限温度 0 °C 的起始日; i 是起始日到溃决日的天数。

1.4 气温和降雨量代表性指标

1.4.1 气温的代表性指标—正积温逐日增长速度值(T_V)

在前期研究中, 发现冰湖发生溃决的当日, 其日均温都 ≥ 0 °C, 即冰湖溃决都发生在消融日, 这与冰湖溃决的触发机制有关^[20]。所以, 认为日均温 ≥ 0 °C 的时期, 对于冰湖溃决的发生是有效时期。考虑到积温的总量和升温的过程, 对于冰湖溃决触发都有积极的作用。因此提出了采用正积温逐日增长速度值 T_V 作为气温核心预警指标, 其计算方法如下。

(1) 获取日均温数据序列 $\{T_n\}$, 以 $\{T_n\}$ 为基础, 筛选确定第 1 个日均温 ≥ 0 °C 的日期 D_1 , 统计序列 $\{T_n\}$ 中自日期 D_1 至预测日的天数 i 。

(2) 依式 $T_{DC} = \sum_{i=1}^n T_i$ 计算预测日前期正积温累计值 T_{DC} , 式中, T_i 为日均温值(°C); i 为 D_1 至预测日的天数(d)。

(3) 采用幂函数曲线 $T_{DC} = A i^\beta$ 拟合, 得到正积温累积过程曲线方程(即正积温逐日增长的过程曲线方程), 并求得过程曲线方程导数 $T'_{DC} = (A i^\beta)' = A \beta i^{\beta-1}$, 其中常数部分 $A \beta$ 即为预测日前期正积温逐日增长速度值 T_V , 即 $A \beta = T_V$ 。

1.4.2 降雨量的代表性指标—前期 30 d 累积降雨量 (R_{DC})

对于前期降雨量指标的选取,分别对时间窗口为 10 d、20 d、30 d、40 d、50 d、60 d、70 d、80 d 与 90 d 的前期降雨量指标进行关联性分析,确定前期 30 d 累积降雨量与冰湖溃决事件间具有更良好的影响关系,由此最终选取其作为降雨核心预警指标,其计算方法如下。

(1) 获取日降雨数据序列 $\{R_n\}$ 、日均温数据序列 $\{T_n\}$; 以 $\{T_n\}$ 为基础,筛选确定第 1 个日均温 ≥ 0 °C 的日期 d , 日期 d 是前期 30 d 累积降雨量计算起始日,则以日期 d 前第 30 d 为前期 30 d 降雨量计算起始日 d_{-30} , 统计自 d_{-30} 至预测日的前期 30 日降雨量天数 n 。

(2) 以 $\{R_n\}$ 为基础,依式 $R_{DC} = \sum_{n=1}^{30} R_n$ 计算自日期 d_{-30} 起至预测日的前期 30 d 累积降雨量 R_{DC} 。式中, R_n 为日降雨量值(mm)。

2 以气温和降雨量为指标的冰湖溃决预警方法

2.1 基于气温和降雨量的预警警戒线的建立

通过对 2010 年前发生的 21 例溃决事件(然则日阿错冰湖溃决事件作为验证事件),涉及 17 个冰湖约 5 万组日均温数据和降水量数据进行分析,统计 21 例溃决事件的前期正积温逐日增长速度值 (T_V) 和前期 30 d 累积降雨量 (R_{DC}), 见表 4。

基于上述的统计结果,对比溃决事件和无溃决事件的前期正积温逐日增长速度值 (T_V) 和前期 30 d 累积降雨量 (R_{DC}), 描点绘制图 1, 设定预警警戒线。图 1 表明我国境内记录的 17 个冰湖的 21 例溃决事件中,有 16 例溃决事件位于警戒线 $T_V = -0.0193R_{DC} + 3.0018$ 之上。这说明使用本发明提供的预警方法可以实现对危险冰碛湖发生的 76.2% 的溃决事件预警,其预警效率很高。但由于冰碛湖是复杂多因素耦合的现象,所以在气候波动剧烈的情况下,本方法仍存在约 20% 左右的漏报率。

2.2 冰湖溃决预警系统流程

依据前述分析的过程和建立的冰湖溃决预警线,建立了冰湖溃决预警系统的流程图(图 2)。本方法所需要的日均温与日降雨量观测数据,应当选择冰湖所在区域的气象台站提供的长期数据。但在实际工作中,冰湖位于高寒高海拔区域(例如我国青藏高原的冰湖海拔均超过 3 800 m) 这些区域由于硬

表 4 17 个冰湖的前期正积温逐日增长速度值和前期 30 d 降雨量逐日增长速度值

Tab. 4 Daily growth rates of prior period positive cumulative temperature and prior thirty day rainfall of the 17 glacial lakes

冰碛湖	溃决发生时期		溃决未发生时期	
	T_V	R_{DC}	T_V	R_{DC}
隆达错	3.22	137.51	2.46	134.57
吉莱错	3.70	61.97	2.16	42.80
达门拉咳错	3.37	117.21	1.47	41.77
阿亚错(1)	1.22	91.83	0.06	78.04
阿亚错(2)	2.25	91.83	1.22	78.04
阿亚错(3)	1.15	107.78	2.25	76.97
坡戈错	0.65	72.78	0.56	81.67
坡戈冰川湖	2.17	136.12	2.18	88.28
扎日错	2.50	26.17	3.37	64.55
次仁玛错	0.71	67.41	0.84	135.57
印达普错	2.75	39.98	0.41	67.54
光谢错	1.41	98.42	1.36	96.44
夏嘎湖	1.06	16.90	2.13	13.32
扎那错	1.45	16.14	2.72	23.60
龙纠错	1.61	87.49	3.56	104.34
嘉龙错(1)	3.01	52.72	1.32	50.42
嘉龙错(2)	3.03	51.08	1.10	85.11
得嘎错	1.42	104.20	0.89	98.20
浪措	0.40	140.32	1.22	115.86
折麦错	2.04	28.52	0.48	88.29
错嘎	0.91	108.45	1.69	143.57

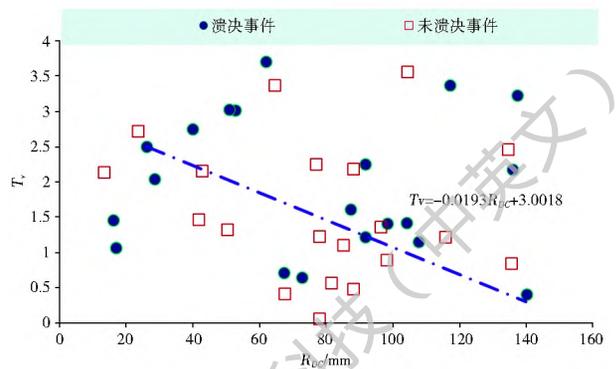


图 1 溃决事件和未溃决事件参数比较

Fig. 1 Comparison of (T_V , R_{DC}) between outburst and non outburst events

件条件限制,几乎均无配套的自身区域气象台站,无法提供冰湖所在地点的长期日均温观测数据与日降雨量数据。因此,依照气象学常规方法,本方法中需要日均温与日降雨量观测数据通常从邻近气象台站获取。邻近气象台站的选取原则与方法适用相关的气象学原则与常规方法,获得的气象数据经常规气象学数据修正方法修正后(通常是海拔高差修正、

水平距离修正等)适用于本发明方法。通常情况下,选择两个及以上邻近气象站作为数据来源。为保证预警结果的有效性和后期的数据筛选的可能性,控制中心调用的气象站长期温度与降雨观测数据应当具备足够的规模,即需要获取足够时间长度的日均温数据和日降雨量数据形成日均温数据序列和日降雨量数据序列。需至少包括 120 个观测日的日均温数据与 120 个观测日的日降雨量数据,才能保证后期分析处理的可靠性,且数据序列越长,其可靠度越高。

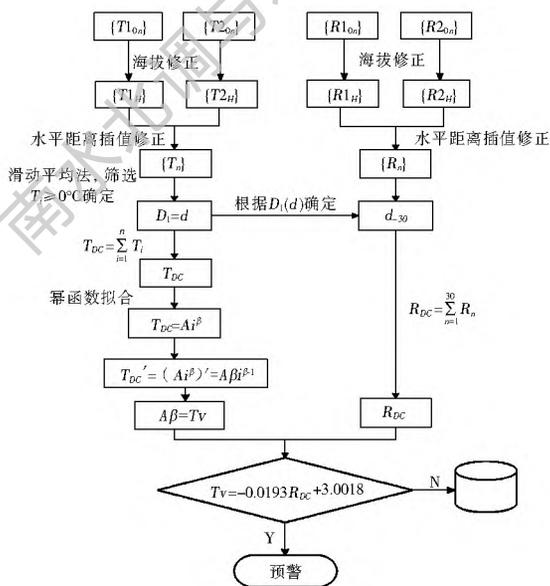


图 2 冰湖溃决预警系统流程

Fig. 2 Flow chart of GLOFs warning system

依据图 2 所示流程,可以对任一冰湖的溃决可能进行预警。如下,选择了 2013 年发生的然则日阿错冰湖溃决事件,参照冰湖溃决预警系统流程,进行事件验证分析。

3 然则日阿错案例验证

冰湖然则日阿错(30°28′07″N, 93°31′55″E)位于西藏自治区嘉黎县忠玉乡,于 2013 年 7 月 5 日发生溃决,此次溃决造成忠玉乡 238 户 1 160 人不同程度的受灾,其中 49 户房屋被彻底冲毁,部分人员和牲畜失踪,农田遭到破坏,通往嘉黎县唯一的 1 座水泥桥被冲毁,损失估计达 2.7 亿元^[25]。

根据然则日阿错冰湖的地理位置,选择的数据主要来自于嘉黎、林芝、比如气象站,参照冰湖溃决预警系统流程对数据进行修正后纳入分析,其中涉及到自 2013 年 1 月 1 日至 7 月 5 日的 186 个气象观测日,经正积温分析首先确定折麦错冰湖自 5 月 16 日起存在溃决风险,将风险范围缩小至 51 d,其后计算求得 2013 年 5 月 16 日至 2013 年 7 月 5 日期间的正积温逐日增长速度值(T_V)和前期 30 d 累积降雨量(R_{DC}),见表 5。

表 5 2013 年 5 月 16 日至 2013 年 7 月 5 日正积温逐日增长速度值(T_V)与前期 30 d 累积降雨量(R_{DC})

Tab. 5 T_V and R_{DC} between 2013 05 16 and 2013 07 05

数据序号	月日	正积温			前期 30 d 降雨量/mm
		A	β	T_V	R_{DC}
1	5 16				
2	5 17	2.149	0.379	0.814471	42.21233
3	5 18	2.2305	0.1798	0.401044	50.81802
4	5 19	2.2205	0.1931	0.428779	52.65236
5	5 20	2.1458	0.2672	0.573358	53.21417
6	5 21	1.9833	0.4053	0.803831	53.17339
7	5 22	1.8545	0.5062	0.938748	53.16829
8	5 23	1.7025	0.62	1.05555	56.94888
9	5 24	1.6112	0.6865	1.106089	53.63555
10	5 25	1.5149	0.755	1.14375	56.95633
11	5 26	1.4091	0.83	1.169553	56.96143
12	5 27	1.291	0.9152	1.181523	56.96143
13	5 28	1.17	1.0061	1.177137	54.47714
14	5 29	1.0745	1.081	1.161535	50.99477
15	5 30	0.9976	1.1436	1.140855	52.87983
16	5 31	0.9339	1.197	1.117878	58.46274
17	6 1	0.883	1.2408	1.095626	59.35553
18	6 2	0.8397	1.2788	1.073808	78.18645
19	6 3	0.8057	1.3091	1.054742	73.06457
20	6 4	0.7801	1.3322	1.039249	73.95087
21	6 5	0.7571	1.3529	1.024281	84.47504
22	6 6	0.7366	1.3715	1.010247	84.68239
23	6 7	0.7181	1.3884	0.99701	90.03126
24	6 8	0.7024	1.4027	0.985256	90.47315
25	6 9	0.6895	1.4145	0.975298	102.7853
26	6 10	0.6795	1.4235	0.967268	101.4442
27	6 11	0.6708	1.4314	0.960183	101.1387
28	6 12	0.6623	1.439	0.95305	100.9419
29	6 13	0.6535	1.4469	0.945549	100.4791
30	6 14	0.6441	1.4554	0.937423	96.13921
31	6 15	0.6342	1.4641	0.928532	95.87672
32	6 16	0.6243	1.4731	0.919656	94.84335
33	6 17	0.6147	1.4817	0.910801	86.0767
34	6 18	0.6052	1.4902	0.901869	80.20629
35	6 19	0.5965	1.498	0.893557	79.62409
36	6 20	0.5884	1.5053	0.885719	84.29784
37	6 21	0.5812	1.5118	0.878658	84.93993
38	6 22	0.5746	1.5178	0.872128	94.6098
39	6 23	0.569	1.5228	0.866473	99.39189
40	6 24	0.5644	1.527	0.861839	104.5064
41	6 25	0.5605	1.5305	0.857845	123.9543
42	6 26	0.5571	1.5335	0.854313	132.5165
43	6 27	0.5541	1.5362	0.851208	138.6814
44	6 28	0.5514	1.5386	0.848384	140.1514
45	6 29	0.5489	1.5408	0.845745	141.0862
46	6 30	0.5465	1.5429	0.843195	144.2831
47	7 1	0.5443	1.5448	0.840835	143.7131
48	7 2	0.5422	1.5467	0.838621	124.3984
49	7 3	0.5402	1.5484	0.836446	132.8909
50	7 4	0.5383	1.5501	0.834419	133.47
51	7 5	0.5365	1.5516	0.832433	126.031

将表5中所列的正积温逐日增长速度值(T_V)和前期30 d累积降雨量(R_{DC}),与前期设定的溃决警戒线 $T_V = -0.0193R_{DC} + 3.0018$ 对比绘制图3。从图3中,可以看到在初筛后纳入分析的51 d中,通过预警线的设置,将风险日集中到了11个报警日。最终结果显示冰湖在11个报警日之一(2013年7月5日)发生了溃决。

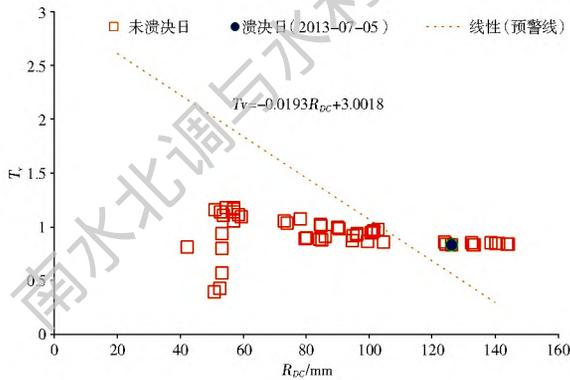


图3 然则日阿错冰湖2013年逐日 T_V 、 R_{DC} 与警戒线关系判别

Fig. 3 T_V and R_{DC} for the Ranzeaco glacial lake in 2013 vs. the warning line

4 结论

本文提供了一种综合考虑气温与降雨条件影响的冰湖溃决预警方法,选择预测日前期正积温逐日增长速度值与预测日前期30 d累积降雨量作为气温和降雨的代表性指标,通过对2010年前发生的21例溃决事件统计,结合邻近21个气象站的日均温和日降雨量资料分析,建立冰湖溃决的预警警戒线 $T_V = -0.0193R_{DC} + 3.0018$ 和冰湖溃决预警系统流程。其后,选择2013年7月5日的然则日阿错冰湖溃决案例对建立的冰湖溃决预警系统进行验证,在186个预测日中划定出11个风险日,其中1日发生溃决,其预警效果良好。

参考文献(References):

[1] 秦大河, Thomas Stocker. IPCC第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 1-6. (QIN D H, STOCKER T. Highlights of the IPCC Working Group I Fifth Assessment Report[J]. Advances in Climate Change Research, 2014, 10(1): 1-6. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1673-1719.2014.01.001.

[2] 崔鹏, 陈容, 向灵芝, 等. 气候变暖背景下青藏高原山地灾害及其风险分析[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(2): 103-109. (CUI P, CHEN R, XIANG L, et al. Risk analysis of mountain hazards in Tibetan plateau under global warming[J]. Advances in Climate Change Research, 2014, 10(2): 103-109. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1673-1719.2014.02.004.

[3] 施雅风, 刘时银. 中国冰川对21世纪全球变暖响应的预估[J]. 科学通报, 2000(4): 434-438. (SHI Y F, LIU S Y. China glaciers prediction of global warming response in the 21st century [J]. Science Bulletin, 2000(4): 434-438. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0023-074X.2000.04.021.

[4] BOLCH T, BU CHROIT H NERM F, PETERS J, et al. Identification of glacier motion and potentially dangerous glacial lakes in the Mt. Everest region/ Nepal using spaceborne imagery[J]. Natural Hazards & Earth System Sciences, 2008, 8(6): 1329-1340. DOI: 10.5194/nhess-8-1329-2008.

[5] IVES J D, SHRESTHA R B, MOOL P K. Formation of glacial lakes in the Hindu Kush Himalayas and GLOF risk assessment [C]. International center for integrated mountain development, Kathmandu, 2010: 2-11.

[6] 张瑞江. 青藏高原冰川演变与地质灾害[J]. 国土资源遥感, 2010, 22(增刊): 54-58. (ZHANG R J. The relationship between the evolution of glaciers and the geological hazards in Qinghai Tibet Plateau [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2010, 22(S1): 54-58. (in Chinese)) DOI: 10.6046/gtzyyg.2010.s1.13.

[7] 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 J J, CHENG Z L, LI Y, et al. Characteristics of glaciers lake breaks Tibet [J]. Calamity Science, 2008, 23(1): 55-60. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2008.01.013.

[8] 姚晓军, 刘时银, 孙美平, 等. 20世纪以来西藏冰湖溃决灾害事件梳理[J]. 自然资源学报, 2014(8): 1377-1390. (YAO X J, LIU S Y, SUN M P, et al. Study on the glacial lake outburst flood events in Tibet since the 20th century [J]. Journal of Natural Resources, 2014(8): 1377-1390. (in Chinese)) DOI: 10.11849/zrzyxb.2014.08.010.

[9] RUDOY A N. Glacier-dammed lakes and geological work of glacial super floods in the Late Pleistocene, Southern Siberia, Altai Mountains [J]. Quaternary International, 2002, 87(1): 119-140. DOI: 10.1016/S1040-6182(01)00066-0.

[10] 刘晶晶, 唐川, 程尊兰, 等. 气温对西藏冰湖溃决事件的影响[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2011, 41(4): 1121-1129. (LIU J J, TANG C, CHENG Z L, et al. Impact of temperature on glacier lake outbursts in Tibet [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2011, 41(4): 1121-1129. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1671-5888.2011.04.023.

[11] 吕儒仁. 西藏泥石流与环境[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1999: 106-136. (LYU R R. Debris flow and environment in Tibet [M]. Chengdu: Chengdu Science and Technology University Press, 1999: 106-136. (in Chinese))

[12] 姚治君, 段瑞, 董晓辉, 等. 青藏高原冰湖研究进展及趋势[J]. 地理科学进展, 2010, 29(1): 10-14. (YAO Z J, DUAN R, DONG X H, et al. The progress and trends of Glacial Lakes research on Qinghai Tibet Plateau [J]. Progress in Geography, 2010, 29(1): 10-14. (in Chinese)) DOI: 10.11820/dlkxjz.2010.01.002.

[13] CLAGUE J J, EVANS S G. A review of catastrophic drainage

- of moraine dammed lakes in British Columbia[J]. Quaternary Science Reviews, 2000, 19(17-18): 1763-1783. DOI: 10.1016/S0277-3791(00)00090-1.
- [14] 刘晶晶,程尊兰,李泳,等.西藏终碛湖溃决形式研究[J].地质学前沿,2009,16(4):372-380.(LIU J J,CHENG Z L,LI Y, et al. A study of the outburst form of the End Moraine Lake in Tibet[J]. Geoscience Frontiers, 2009, 16(4): 372-380. (in Chinese) DOI: 10.3321/j.issn:1005-2321.2009.04.037.
- [15] 王欣,刘时银,姚晓军,等.我国喜马拉雅山区冰湖遥感调查与编目[J].地理学报,2010,65(1):29-36.(WANG X,LIU S Y,YAO Z J, et al. Glacier lake investigation and inventory in the Chinese Himalayas Based on the remote sensing data[J]. Journal of Geographical Sciences, 2010, 65(1): 29-36. (in Chinese) DOI: 10.11821/xb201001004.
- [16] 王世金,秦大河,任贾文.冰湖溃决灾害风险研究进展及其展望[J].水科学进展,2012,23(5):735-742.(WANG S J,QIN D H,REN J W. Progress and prospect in risk assessment of hazards from glacier lake outbursts[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(5): 735-742. (in Chinese) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2012.05.024.
- [17] 汪宙峰,张廷山,王成武.西藏喜马拉雅山地区冰湖溃决的预测模型及其应用研究[J].冰川冻土,2016,38(2):388-394.(WANG Z F,ZHANG T S,WANG C W. Prediction model and its application for glacial lake outburst in the Himalayas area, Tibet[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(2): 388-394. (in Chinese) DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2016.0042.
- [18] 吕儒仁,李德基.西藏波密冬茹弄巴的冰雪融水泥石流[J].冰川冻土,1989,11(2):148-160.(LV R R,LI D J. Ice snow-melt water debris flows in the Dongru Longba(Gully) Bomi County, Xizang(Tibet)[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1989, 11(2): 148-160. (in Chinese))
- [19] 李德基,游勇.西藏波密米堆冰湖溃决浅议[J].山地研究,1992,10(4):219-224.(LI D J,YOU Y. Bursting of the Midui Moraine Lake in Bomi, Xizang[J]. Mountain Research, 1992, 10(4): 219-224. (in Chinese))
- [20] LIU J J, CHENG Z L, LI Y. The 1988 glacial lake outburst flood in Guangxieco Lake, Tibet, China[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2014, 14(11): 3065-3075. DOI: 10.5194/nhess-14-3065-2014.
- [21] LIU J J, CHENG Z L, SU P C. The relationship between air temperature fluctuation and Glacial Lake Outburst Floods in Tibet, China[J]. Quaternary International, 2014, 321(2): 78-87. DOI: 10.1016/j.quaint.2013.11.023.
- [22] PRICE D T, MCKENNEY D W, NALDER I A, et al. A comparison of two statistical methods for spatial interpolation of Canadian monthly mean climate data[J]. Agricultural and Forest meteorology, 2000, 101(2): 81-94. DOI: 10.1016/S0168-1923(99)00169-0.
- [23] ROBESON S M, JANIS M J. Comparison of temporal and unresolved spatial variability in multiyear time averages of air temperature[J]. Climate Research, 1998, 10(1): 15-26. DOI: 10.3354/cr010015.
- [24] 李巧媛,谢自楚.高原区气温垂直递减率的分布及其特点分析——以青藏高原及其周边地区为例[J].石河子大学学报(自然科学版),2006,24(6):719-723.(LI Q Y,XIE Z C. Analysis on the characteristics of the vertical lapse rates of temperature Taking Tibetan Plateau and its adjacent area as an example[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2006, 24(6): 719-723. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1007-7383.2006.06.016.
- [25] 孙美平,刘时银,姚晓军,等.2013年西藏嘉黎县“7.5”冰湖溃决洪水成因及潜在危害[J].冰川冻土,2014,36(1):158-165.(SUN M P,LIU S Y,YAO X J, et al. The cause and potential hazard of glacial lake outburst flood occurred on July 5,2013 in Jiali County, Tibet[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(1): 158-165. (in Chinese) DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2014.0020.

郑重声明

《南水北调与水利科技》自创刊以来,从未委托任何中介机构、网站及个人征稿,请广大读者、作者提高警惕,不要通过他人投稿,更不要向他人或不明机构缴纳任何费用。

《南水北调与水利科技》编辑部