

冰湖溃决洪水灾害链的系统动力学分析与断链策略研究

万书萱 李 旭
(石河子大学法学院)

摘 要：本文基于对冰湖溃决洪水 GLOF (Glacial Lake Outburst Flood) 相关文献的收集和整理，运用系统动力学 (SD) 理论及分析框架，建立 GLOF 灾害链因果反馈模型。通过对灾害链中关键变量、反馈回路及时间延迟的识别，探讨在全球气候变暖的情况下冰湖蓄水量的增长、诱发原因、社会的暴露与脆弱性之间的互动关系。在此基础上提出三种系统动力学的“断链”方式即干预风险存量积累的过程、干预触发机制以及响应的时差、干预社会暴露及脆弱性。本文倡导从单一事件应对到系统风险管理的思维转变，为冰川区灾害风险管理提供一定的指导思想和决策参考。

关键词：冰湖溃决洪水；灾害链；系统动力学；风险治理；断链策略

Systematic Dynamic Analysis and Chain-Cutting Strategies for Ice Lake Flood Disaster Chains in Shihezi City

Shuxuan Wan, Xu Li

School of Law, Shihezi University

Abstract : Based on a systematic review of GLOF literature, this study applies System Dynamics (SD) theory to construct a causal feedback model of the GLOF disaster chain. It identifies key variables, feedback loops, and time delays to examine interactions among glacial lake storage, triggers, exposure, and vulnerability under global warming. Three SD-based intervention strategies are proposed : disrupting risk accumulation, triggering mechanisms and response time lags, and reducing exposure and vulnerability. The study advocates a shift from event-based response to systemic risk management for glacial hazards.

Keywords : ice lake breach flood ; disaster chain ; system dynamics ; risk governance ; chain-breaking strategy

前言：

近年来，随着全球气候变暖不断加快，山地冰川在持续退缩，冰湖的面积也在逐步扩大，冰湖溃决洪水 (Glacial Lake Outburst Flood, GLOF) 的潜在风险越来越不容忽视。GLOF 灾害，突发性强，峰值流量大，传播速度快，而且还常常伴随着泥石流等链式灾害，给下游居民的生命财产以及基础设施带来严重威胁。本文引入系统动力学的思路，构建一个用于描述 GLOF 灾害链的因果反馈模型。以揭示在气候驱动、冰湖演化、触发机制以及社会响应这几方面之间，存在的非线性关系和时间延迟效应。提出针对性的断链策略，希望能为冰川区的灾害风险管理，提供一个更具系统性和前瞻性的理论框架与实践路径。

一、文献综述

(一) 冰川类型及影响因素

依据国际通行分类及全球编目数据，冰碛阻塞湖是由冰碛物堵塞形成，是 GLOF 研究中关注度最高、危害最显

著的类型。全球约 72% 的 GLOF 事件源于此类湖泊，广泛分布于斯堪的纳维亚半岛、北美西北部、阿尔卑斯山脉等高纬度地区^[2]。根据学者编制的高亚洲 GLOF 编目数据进行统计分析，可以看到冰碛阻塞湖 GLOF 触发主要源于冰崩，而冰面湖引发的 GLOF 主要源于强降水。^[3]

(二) 风险评估与模拟

GLOF 危险性评估多把重点放在冰碛湖，已形成囊括冰湖和冰川距离、坝体属性、触发概率等数十项指标的评估体系，在模拟的相关范畴，研究达成了从分环节模型耦合朝着全灾害链一体化模拟的跨越，r.avaflow 等开源框架能集成模拟从物质运动引发、涌浪传播、坝体溃决到下游泥石流演变的全过程，但目前模型多着重于物理过程的准确再现，社会经济系统反馈集成的效果还不够好。

(三) 风险治理与断链策略

现代 GLOF 研究注重风险 = 危险程度 × 暴露度 × 脆弱性的计算公式，减灾策略主要包括：工程措施、非工程措

施以及早期预警系统^[1]。目前研究已从单一的工程措施拓展到包含监测预警系统、社区适应规划、土地利用管控等非工程措施的综合体系^[5]。三类策略都是针对灾害链的不同节点（如减少冰湖数量，缩小预警时间差，降低下游暴露度等）进行干预，已经有明确的断裂链的思路，这种由灾害处置到风险管理的改变，急需一种能对各种措施的长期效果及其相互关系进行评价的方法。

二、核心概念与分析框架

（一）系统动力学

系统动力学（SD）是由美国麻省理工学院杰伊·弗雷斯特（Jay Forrester）教授在 1956 年提出的一种研究方法，其基本的思想就是建立动态的模型来探讨复杂的系统的内部结构以及行为规律，是基于反馈的控制理论之上，主要是针对系统中的各个变量之间的因果联系、时滞以及非线性的相互作用等方面进行研究，更注重系统的长期变化趋势由内部反馈机制所决定。^[6]

（二）系统动力学研究流程

目前不同学者对于系统动力学分析流程有着不同方案，但该流程又较大相似。根据实际情况，本文仅引入动力学研究思维，对冰湖溃决洪水灾害开展研究。

（三）冰湖溃决洪水

冰川融水是冰川物质平衡的重要组成部分，当融水被冰川、冰碛或基岩阻挡时，可在冰川上、内、下、前边缘或形成湖泊，简称冰湖然而，冰湖也是灾害的孕育者和发源地，其溃决突然释放的大量水体，即冰湖溃决洪水具有突发性强、峰高量大、传播速度快、水温低、波及范围广且常伴生泥石流甚至引发链式灾害等特点，对下游沟谷造成大量侵蚀，可能淹没建筑物、桥梁和水电系统等沿岸基础设施，威胁居民生命财产安全^[7]。

（四）分析框架

基于对冰川类型以及诱因相关文献的阅读与汇总，本文对 GLOF 灾害链作出的总结是：气候变暖作为 GLOF 灾害链主要的驱动因子，持续加剧山地冰川消融和退缩这一长久慢过程，进而使得冰碛湖或冰湖产生并不断变大，成为灾害物质的聚集单元，当冰崩、岩崩、极端降水或者冰坝失稳等触发情形突然作用到这些不稳定的水体之上时，造成冰湖溃决，造成突发性的快速溃决洪水，洪水顺着山谷毫无阻碍向下游涌进，形成分级延展的灾害链，给下游居民和基础设施带来危害。

本文将借助系统动力学思维与流程对 GLOF 灾害进行定性分析，通过分析灾害链中的因果关系、正负反馈，针

对性提出相应断链（阻断灾害链）对策。

三、冰湖溃决灾害链 SD 理论模型构建

（一）系统边界与关键变量

在分析因果关系之前，需要确定冰湖溃决灾害系统的边界以及找出影响冰湖溃决灾害系统的重要因素。这里所涉及的系统以冰川区为主，它包含了水文循环过程和灾害形成过程，是相互渗透，相互影响的。系统内部的主要因素是内部变量，例如冰川的体积大小，融化速度的快慢等状态指标。它们通过一系列的正向反馈环相互影响，并带动系统发展不断变化。从外部来看，有些驱动因素如全球变暖导致区域气温上升、太阳辐射的变化以及极端降水等，也会进入到该系统中去，激发内部反馈的连锁反应，从而影响内部的结果。此外，在系统内有一个管理应对模块，主要包括风险感知、工程治理、应急能力等方面的内容，这样就构成了一个从自然到社会的封闭反馈回路。

（二）系统因果关系分析

因果关系由三个回路组成，包括风险累积回路（气温→消融→蓄水→坝体失稳→风险）、局地气候正反馈回路（消融→反照率降低→吸热→气温）、风险缓解回路（风险感知→管理投入→降低存量/提升准备→降低风险损失）。以上能较为全面地展示冰川发生的原因，但其中可分析的人为因素不足，因此本文对关系分析进行修正，新的因果关系分析中包含五个回路，分别是 R1、R2、R3、B1、B2。

风险累积正反馈回路 R1：（区域气温升高→（+）→冰川消融加速→（+）→冰湖蓄水量增加→（+）→湖水位上升→（-）→冰碛坝稳定性下降→（+）→溃决风险感知增加→（通过社会放大）→潜在社会经济损失预期增加）

气候变暖局部正反馈通道 R2：（冰川消融加速→（+）→冰川面积减小（反照率降低）→（+）→区域吸收更多太阳辐射→（+）→区域气温进一步升高）

工程治理负反馈回路 B1：（溃决风险感知增加→（+）→工程治理投入增加→（+）→人工引流能力增强→（-）→冰湖蓄水量减少→（-）→溃决风险降低）

预警与适应负反馈回路 B2：（溃决风险感知增加→（+）→监测预警投入与社区适应措施增强→（+）→预警响应效率提高 & 社会脆弱性降低→（-）→潜在生命损失减少）

灾害链放大回路 R3：（溃决发生→（+）→基础设施损毁→（+）→救援通道受阻→（-）→应急响应效率下降→（+）→次生灾害风险与损失扩大）

四、基于模型结构的应对策略

（一）干预风险存量积累回路，主动降低冰湖蓄水量

冰湖溃决灾害链的根源是“冰湖蓄水量”这一核心风险存量长期积累的结果,最直接的断链手段是在触发事件发生之前,主动让该存量有所减少,这一策略的要点是直接控制冰湖蓄水量,具体的工程办法有开挖引流隧道、设置虹吸排水装置等,用来增大人工引流的速率,进而以可控且主动的方式使湖水水位下降。从系统动力学的方面来看,直接增强模型当中的负反馈回路,在灾害能量积累阶段就加以干预,从根本上使灾害势能降低,就成本与效益而言,大型引流工程常常投资巨大、技术门槛高,且有环境方面的影响,其实施的时机、规模还有长期维护成本都得审慎评估,此策适用于风险极高、社会经济价值很大的关键区域。

(二) 干预触发与响应延迟回路, 缩短预警与行动时间

冰湖溃决的突发性使从触发事件到灾难性后果之间有了一系列重要的时间间隔,这种应对措施就是针对这些时间差,其主要目的就是要缩短从触发到溃决以及从预警到人们做出反应的时间差,建立并完善一体化监测预警体系,在冰湖附近设置地震、水位、视频传感器,建设包含数据传送、风险评估、自动报警等在内的信息化平台,加强下游社区的应急演练及应急预案的准备工作,使发布的预警信息能迅速转变为有效的防范措施,进而加快预警反应速度,同时加强另一个主要的负反馈环(B2),而切断灾害加剧的环(R3),防止系统进入溃决→基础设施遭到破坏→救援工作受阻→损失增加的困境。

(三) 干预社会暴露与脆弱性回路, 降低潜在损失存量

即使上述两个措施得以很好的贯彻落实,也无法杜绝发生极端溃决事件的可能性。所以第三种方法主要是针对减轻灾害的社会影响,以减少下游危险地带的人口数量和资产的规模,增强社会抗灾能力。因此即使是发生大洪水,危害力也是有限的,主要的非工程措施有:严格控制危险地带土地的使用性质,禁止或者迁移高风险地区内的新建项目和常住人口。促进社区生计多样化,减少对高风险资源的依赖,强化大桥、公路、电站等重点生命线工程设施,直接对下游潜在生命的损失结果起作用,最大限度地降低灾害可能带来的后果严重性。通过降低受灾对象的暴露度和脆弱性,降低灾害的损失程度。

结语:

本文从冰湖溃决洪水(GLOF)灾害链出发,运用系统

动力学的方法建立了相应的模型,从自然过程以及人类社会的应对机制出发探讨系统内各因素之间的关系。通过分析出由五个回路构成的因果关系,识别出“冰湖蓄水量”“预警响应效率”“社会脆弱性”等重要因素,针对这些因素制定三个方面的断链对策:一是采用人工排洪等方式降低冰湖蓄水量。二是加强监测预警及社区的应急能力建设,降低响应时间。三是在规划和建设中减少下游地区的暴露度以及脆弱性。本文初步建立了GLOF灾害链的系统动力学分析框架,但是并没有进行实际方程式计算,在今后可以用vensim进行定量研究,让模型更加完善。

参考文献:

- [1]段红玉,姚晓军,孙美平,等.冰湖溃决洪水(GLOF)文献分析与研究进展[J/OL].冰川冻土,1-19[2025-12-16].<https://link.cnki.net/urlid/62.1072.P.20250827.1757.004>.
- [2]Lützow N, Veh G, Korup O. A global database of historic glacier lake outburst floods[J]. Earth System Science Data, 2023, 15 (7): 2983-3000.
- [3]Shrestha F, Steiner J F, Shrestha R, et al. A comprehensive and version-controlled database of glacial lake outburst floods in High Mountain Asia[J]. Earth System Science Data, 2023, 15 (9): 3941-3961.
- [4]Mergili M, Schratz K, Ostermann A, et al. Physically-based modelling of granular flows with open source GIS[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2012, 12 (1): 187-200.
- [5]Emmer A, Allen S K, Carey M, et al. Progress and challenges in glacial lake outburst flood research (2017—2021): a research community perspective[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2022, 22 (9): 3041-3061.
- [6]周海舟.基于系统动力学的新能源汽车动力电池回收策略研究[D].河南农业大学,2025.
- [7]Miles E S. Glacial and geomorphic effects of a supraglacial lake drainage and outburst event, Everest region, Nepal Hima laya[J]. The Cryosphere, 2018, 12 (12): 3891-3905.