

引用格式:徐文君,马超,吕立群,杜翠. 西藏热玛沟流域冰川型泥石流流历史的树木年代学重建[J]. 山地学报, 2025, 43(1): 122-131.

XU Wenjun, MA chao, LYU Liqun, DU Cui. Dendrochronological interpretation of glacial debris flow history in the Rema gully, Xizang, China [J]. Mountain Research, 2025, 43(1): 122-131.

# 西藏热玛沟流域冰川型泥石流流历史的树木年代学重建

徐文君<sup>1</sup>, 马超<sup>1\*</sup>, 吕立群<sup>1</sup>, 杜翠<sup>2</sup>

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 成都信息工程大学 软件工程学院, 成都 610225)

**摘要:** 树木年代学方法因其强连续性和高分辨率特性, 广泛应用于泥石流灾害历史重建。然而, 传统树木年代学方法在对特定区域树种及其生境特征进行参数化处理时存在不足, 基于生长释放/抑制机制的年轮分析方法在不同区域的适用性受到限制。喜马拉雅山脉中段地区是冰川泥石流多发区。该区域尚未开展基于树木年代学方法的泥石流重建灾害历史研究。本文以喜马拉雅山脉中段吉隆藏布江流域热玛沟为研究对象, 通过解剖学分析 47 棵树平均树龄( $82 \text{ a} \pm 24 \text{ a}$ )的创伤特征(树脂道密度 $\geq 12 \text{ 个/cm}^2$ ), 结合重建泥石流暴发时间的精确度( $R=0.8$ )动态优化生长扰动阈值; 分析树木年轮因泥石流干扰产生的伤疤、愈伤组织及生长释放/抑制等特征, 结合区域树木生长特征, 优化了树木年轮生长释放/抑制的阈值和  $W_d$  指数(加权响应指数)的计算方法, 重建研究区的泥石流灾害历史; 结合遥感影像解译数据, 验证其适用性。结果表明: (1) 热玛沟流域树木年轮弱生长释放/抑制阈值修正为 25% (原标准 40%), 强生长释放/抑制阈值修正为 54% (原标准 60%), 事件识别准确率提升至 87.6% ( $p < 0.01$ )。通过 1988—2022 年的遥感影像解译, 成功识别出 10 场泥石流事件(1991 年、1995 年、1999 年、2002 年、2006 年、2010 年、2014 年、2015 年、2016 年、2017 年), 其时空分布特征与实地调查匹配度达 91.4%。这证明了新的生长释放/抑制阈值和  $W_d$  指数计算方法在精准定灾方面的有效性。(2) 首次重建出 1943 年和 1968 年两次历史强泥石流事件, 将热玛沟流域灾害序列回溯期扩展至 75 a。(3) 传统阈值标准会造成约 40% 的泥石流事件漏判, 改进后的双阈值体系显著提升灾害识别精度(Kappa 系数 0.82), 这为冰川活跃区的泥石流灾害研究提供了新的视角和方法论支持。本研究建立的树木年代学新方法为冰川活跃区泥石流灾害的精准识别提供了新的技术手段, 对完善喜马拉雅地区灾害数据库具有重要参考价值。

**关键词:** 树木年代学; 冰川型泥石流; 生长释放/抑制; 灾害重建; 热玛沟

**中图分类号:** P642; X43

**文献标志码:** A

泥石流携带块石、泥沙等固体撞击树茎、淤埋树干, 干扰树木生长, 在树木形态上表现为伤疤和愈伤组织<sup>[1]</sup>, 树干内部则发生连续多年异常的年轮宽度增减<sup>[2]</sup>(即生长释放/生长抑制), 甚至出现年轮偏心生长等特征<sup>[3]</sup>。利用受干扰树木的年轮宽度变化或结构变异等信息, 确定地质灾害发生的时间、频率、强度等, 被称为树木年代学方法。相较于光释光

法、<sup>14</sup>C 测年法、火山灰测年法和地衣测年法<sup>[4]</sup>等重建手段, 树木年代学方法因其出色的连续性和高分辨率特性, 在灾害重建领域得到广泛应用。

国外利用树木年代学开展灾害重建研究, 成功重建了瑞士阿尔卑斯山脉等地区泥石流频率、活动范围和空间模式<sup>[5-7]</sup>。国内方面, 树木年代学方法在灾害重建领域的应用同样广泛, 已经覆盖了多个

收稿日期(Received date): 2024-11-14; 改回日期(Accepted date): 2025-01-27

基金项目(Foundation item): 第二次青藏高原综合科学考察(2019QZKK0902)。[The Second Comprehensive Scientific Investigation on the Qinghai-Tibet Plateau (2019QZKK0902)]

作者简介(Biography): 徐文君(1999-), 女, 青海西宁人, 硕士研究生, 主要研究方向: 山地灾害历史重建。[XU Wenjun (1999-), female, born in Xining, Qinghai Province, M. Sc. candidate, research on reconstruction of mountain disaster history] E-mail: zw1361743992@bjfu.edu.cn

\* 通讯作者(Corresponding author): 马超(1986-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 山地灾害成灾动力学。[MA Chao (1986-), male, Ph. D., professor, research on the dynamics of mountain disaster occurrence] E-mail: sanguoxumei@163.com

流域,例如川西高原磨西河流域<sup>[8]</sup>、北京市密云区龙潭沟流域<sup>[9]</sup>与小西天流域<sup>[10]</sup>、青海祁连山地区<sup>[11]</sup>。

然而,树木年代学方法在特定区域的树木及其生境参数化方面仍显不足,基于生长释放/抑制机制的年轮分析在区域的适用性上仍存在局限。Kogelnig-Mayer<sup>[12]</sup>等提出以60%作为生长释放/抑制的阈值,并利用加权响应指数 $W_d$ 对生长干扰进行分级权重赋值,以剔除气候、人为等干扰因素。然而,这一阈值和指数在应用于喜马拉雅山脉东南部地区的典型冰川型泥石流灾害历史重建时,却得出了不同的结果:在天摩沟流域,泥石流灾害历史得到了成功重建,树轮生长对泥石流的响应存在1~3 a的滞后效应<sup>[13]</sup>;而在迫龙沟流域,树龄普遍较小(树龄<50 a),树木受到泥石流干扰后难以恢复,导致该阈值无法准确重建其灾害历史<sup>[14]</sup>。针对常用生长扰动阈值无法精确判别特定地区泥石流暴发时间这一问题,有学者<sup>[15]</sup>尝试去除了生长释放因子,将生长抑制的阈值降低至25%~40%,通过重构 $W_d$ 指数来重建灾害历史。

喜马拉雅山脉中段地区冰川广布,构造运动剧烈,强震频发,季节性冻融作用和气候变暖导致冰缘地带暴露大量的冰碛物,在综合多因素孕灾背景下,这些冰碛物及岩石碎屑被冰川型泥石流携带,对沿途树木造成严重损伤。目前,该区域缺乏基于树木年代学方法的泥石流重建灾害历史研究。本文以喜马拉雅山脉中段一条典型的冰川型泥石流沟——热

玛沟为研究对象,基于树木生长对泥石流干扰的响应,确定生长释放/抑制阈值修正值和 $W_d$ 指数,重建热玛沟流域近百年来的泥石流灾害历史;利用Landsat卫星图像进行研究区泥石流的遥感解译,验证修订的生长释放/抑制阈值和新计算方法的适用性。本研究旨在为理解该区域冰川型泥石流灾害的变化趋势、预测未来灾害发生提供数据支持,并为区域的防灾减灾工作提供数据支撑。

## 1 研究区概况

热玛沟位于喜马拉雅山脉中段吉隆藏布江流域,年均温低至9℃,年降水量超过600 mm,降水主要集中于6—9月,占全年降水量的75%以上,呈现雨热同期的特征。研究区内以冰川型泥石流为主要地质灾害类型。研究表明<sup>[16]</sup>,1988—2015年,吉隆藏布江流域内的467个冰川面积减少了16.45%,其中气温升高被认为是冰川面积缩减的主要驱动因素,气温升高伴随冰川融水量的增加,导致区域内地质环境日趋脆弱,诱发并加剧了泥石流等地质灾害的发生。2015年4月25日,尼泊尔廓尔喀地区发生了7.8级地震,致使喜马拉雅山脉前缘地带受到严重破坏,引发了喜马拉雅山脉中段多处沟道的山体滑坡及泥石流等灾害<sup>[17]</sup>。热玛沟流域面积约11.09 km<sup>2</sup>,包含两条主要支沟,长度分别为4.14 km<sup>2</sup>和3.86 km<sup>2</sup>,平均纵比降为238.1‰,两条支沟在下游汇入吉隆藏布江流域的一级支流(如卡曲)(图1)。

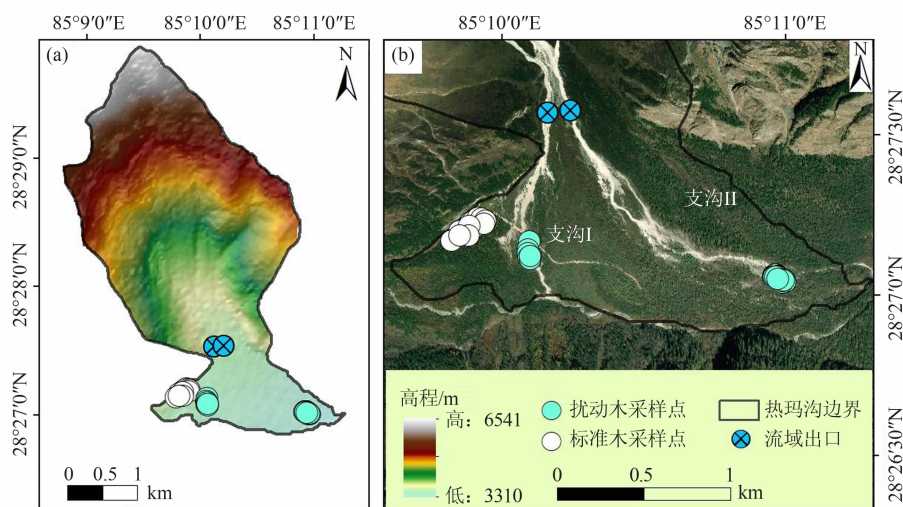


图1 研究区概况:(a)热玛沟流域全貌;(b)树木年轮采样点

Fig. 1 Overview of the study area; (a) overview of the Rema gully; (b) tree-ring sampling site

流域下伏岩层以片岩、片麻岩和变粒岩为主。研究区内地形高差变化悬殊,地势陡峭,最高海拔达 6541 m,最低海拔为 3310 m,呈现典型的垂直地带性植被分布格局,海拔 3600 m 以上区域以灌丛植被和高山草甸为主,海拔 3600 m 以下主要分布针叶林。树木年轮样本采集区域内主要分布喜马拉雅冷杉(*Abies spectabilis*)和喜马拉雅柏木(*Cupressus cashmeriana*)两个树种,泥石流沟道边缘以喜马拉雅柏木为主。目前,尚无历史文献或资料记载热玛沟流域内泥石流灾害历史,因此本文通过解译 Landsat 遥感影像识别该流域泥石流的实际暴发时间。

2 树轮采集与分析

2.1 遥感解译泥石流发生时间及淹没范围

为重现研究区域内的泥石流灾害的历史演变过程,本文选取空间分辨率为 30 m 的 Landsat 卫星数据,时间范围覆盖 1988—2022 年。为减少云层遮挡、高差起伏及影像阴影对泥石流淹没区识别精度的干扰,优先选取冬季云量较少的影像数据(表 1)。

在开展遥感解译之前,对所有影像进行辐射标定和大气校正<sup>[18]</sup>。鉴于卫星拍摄高度较高及研究区地形高差显著,影像中存在阴影区域,自动分类过程中易产生“椒盐”效应,进而增大识别误差<sup>[19]</sup>。因此,本文采用目视解译法,结合泥石流沟道的空间分布特征,比对不同时期影像中沟道的形态变化,识别泥石流事件发生后沟道拓宽现象,确保泥石流淹没范围得到准确判别。根据影像的波段特性,采用特定波段组合以生成彩色合成图像,其中 Landsat 5 选择波段 4、3、2, Landsat 8 选择波段 5、4、3 进行合成。植被覆盖部分表现为红色,非植被覆盖部分表现为白色。目视解译法对沟道变化和复杂地貌特征敏感,能有效弥补自动分类法对泥石流识别的局限,提升识别精度,增强灾害历史重建的科学性与可靠性。

2.2 年轮样品取样及处理

2023 年 7 月在热玛沟流域开展扰动木样品采集工作,采样位置位于泥石流流动路径及其周边区域(图 1),样本采集过程中严格遵循伤疤木、淤埋木、弯曲木和根系暴露木的采样原则<sup>[1]</sup>。在树高胸径处( $D=1.3\text{ m}$ ),使用生长锥(最大长度 40 cm,内

表 1 遥感数据信息

Tab. 1 Information of remote sensing data

编号	遥感数据	日期	传感器	云量/%	编号	遥感数据	日期	传感器	云量/%
1	Landsat5	1988-12-15	TM	3	18	Landsat5	2005-11-12	TM	4
2	Landsat5	1989-12-18	TM	5	19	Landsat5	2006-12-17	TM	6
3	Landsat5	1990-04-25	TM	3	20	Landsat5	2007-10-01	TM	1
4	Landsat5	1991-03-11	TM	6	21	Landsat5	2008-11-20	TM	4
5	Landsat5	1991-11-30	TM	6	22	Landsat5	2009-12-09	TM	7
6	Landsat5	1992-12-26	TM	2	23	Landsat5	2010-12-28	TM	3
7	Landsat5	1993-12-13	TM	7	24	Landsat5	2011-10-28	TM	2
8	Landsat5	1994-12-16	TM	5	25	Landsat8	2013-12-04	OLI	2
9	Landsat5	1995-12-19	TM	3	26	Landsat8	2014-12-07	OLI	4
10	Landsat5	1996-12-05	TM	8	27	Landsat8	2015-12-26	OLI	7
11	Landsat5	1997-11-06	TM	4	28	Landsat8	2016-12-28	OLI	3
12	Landsat5	1998-11-25	TM	6	29	Landsat8	2017-12-31	OLI	6
13	Landsat5	1999-12-30	TM	4	30	Landsat8	2018-12-02	OLI	2
14	Landsat5	2000-12-16	TM	7	31	Landsat8	2019-11-19	OLI	5
15	Landsat5	2001-02-02	TM	5	32	Landsat8	2020-12-07	OLI	1
16	Landsat5	2003-12-25	TM	2	33	Landsat8	2021-12-10	OLI	2
17	Landsat5	2004-12-11	TM	2	34	Landsat8	2022-12-13	OLI	1

径 5.15 mm)垂直于树干取样,每棵树采集 1 或 2 个树芯,同一棵树的两个树芯采集方向分别与泥石流流动方向相同及相反。对于伤疤木,在伤疤位置取样;对于倾斜木,选择其受力最显著的方向取样,以最大程度获取泥石流对树木的干扰信号<sup>[1]</sup>。采样树种为柏木,共获得 47 棵扰动木的 51 个树轮样品。另外,采集流域内远离泥石流沟道、自然直立生长、周围无倒伏木和石块干扰、根系完整扎入土壤,且与扰动木地处同一海拔梯度的 20 棵树木作为参考木,作为扰动木树轮宽度的参照(图 1)。

将采集后的样品标记并封装保存后带回实验室,根据标准树木年代学程序,将年轮样品晾干、固定至特定凹槽,使用 200、400、600、800 目砂纸依次打磨年轮样品,直至年轮早晚材界限在显微镜下清晰可见,使用 LinTab6.0(精度 0.001 mm)年轮宽度分析仪测定年轮宽度。利用 ARSTAN 程序,以 99% 为置信区间,剔除个别相关性较低的年轮序列,使用 COFECHA 软件检测交叉定年质量<sup>[20]</sup>。将扰动木的年轮宽度与参考树木的平均树轮宽度进行比对,绘制树木生长扰动年代分布图。

### 2.3 泥石流的定灾标准

块石撞击树干所造成的伤疤通常被认为是判断泥石流暴发时间最可靠的指标,其次是树木产生的愈伤组织<sup>[1]</sup>。年轮宽度的异常变化反映了泥石流对其造成的干扰,年轮宽度的突然增加(生长释放)通常由周围树木倒伏减少竞争,或基部营养沉积引起<sup>[21]</sup>。相反,年轮宽度突然减少(生长抑制)通常因泥石流掩埋和重力作用引发水分和养分吸收减少所致<sup>[22-23]</sup>。为了量化树木年轮宽度的异常变化,Shroder<sup>[24]</sup>引入树木年轮宽度的年际变化率  $I_i$ ,将其作为生长释放/抑制的评判指标。计算公式如下:

$$I_i = \frac{r_i - r_{i-1}}{r_{i-1}} \quad (1)$$

式中,  $r_i$  为第  $i$  年的年轮宽度;  $r_{i-1}$  为第  $i-1$  年的年轮宽度。树轮宽度突然增加或减小 60% 被认为是生长释放/抑制<sup>[12]</sup>。

树轮宽度的变化幅度受到树木生长位置、极端气候、人类活动和动物破坏等因素的影响,为剔除这些因素的干扰,Kogelnig-Mayer<sup>[12]</sup>等提出了一种加权响应指数( $W_u$ ),通过对生长扰动分级赋权,量化树木对地质灾害的响应程度。 $W_u$  值越高,表明泥石流对树木生长产生的扰动越明显。计算

公式如下:

$$W_u = [(\sum_{i=1}^n T_i \times 7) + (\sum_{i=1}^n T_s \times 5) + (\sum_{i=1}^n T_m \times 3) + (\sum_{i=1}^n T_w)] \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (2)$$

式中,  $T_i$  为每年伤疤及愈伤组织的树木总数;  $T_s$  为每年具有强生长扰动的树木总数;  $T_m$  为每年具有中生长扰动的树木总数;  $T_w$  为每年具有弱生长扰动的树木总数;  $R_i$  为在  $t$  年具有生长扰动的树木总数;  $A_i$  为在  $t$  年获取样本的树木数量。损伤和愈伤组织、强生长扰动、中生长扰动、弱生长扰动分别乘以因子 7、5、3、1。本文将伤疤和愈伤组织作为生长扰动的类型与强度,纳入  $W_u$  指数计算公式中。考虑样本数量随着树龄的增加而逐渐减少,为了确保重建事件的可靠性,本文规定重建年份的样本数量不低于 10 个<sup>[25]</sup>。

## 3 结果与讨论

### 3.1 基于遥感影像识别的泥石流事件

受限于遥感影像的空间分辨率及观测高度,遥感解译对规模较大、明显拓宽沟道及地貌变化显著的泥石流活动识别效果较好,而较小规模或未显著改变沟道形态的泥石流活动可能无法被准确捕捉。在热玛沟流域,通过目视解译多期遥感影像,共识别出自 1988 年以来的 10 场泥石流事件,其中,20 世纪末的泥石流事件主要集中在支沟 I,分别发生于 1991 年、1995 年和 1999 年,新增泥石流淹没面积从 0.0504 km<sup>2</sup> 扩大至 0.088 km<sup>2</sup>,并在 1999 年达到 0.11 km<sup>2</sup>(图 2)。自 21 世纪以来,泥石流活动呈现向支沟 II 拓宽的趋势,流动路径逐渐向流域出口方向推进:2001—2002 年热玛沟流域发生泥石流事件沿支沟 II 发展,新增泥石流淹没面积 0.043 km<sup>2</sup>(图 2);2006 年和 2010 年两次泥石流同时沿支沟 I 和支沟 II 流动,规模分别达到 0.14 km<sup>2</sup> 和 0.28 km<sup>2</sup>,成为近 34 年来研究区内规模最大的泥石流事件(图 2)。此外,2015 年泥石流发生在流域上游区域,新增淹没面积 0.073 km<sup>2</sup>,2016 年和 2017 年,热玛沟连续两年发生泥石流事件,均沿支沟 I 扩宽,新增泥石流淹没面积分别为 0.0013 km<sup>2</sup> 和 0.0045 km<sup>2</sup>(图 2)。

### 3.2 不同生长释放/抑制对比及分析

Kogelnig-Mayer<sup>[12]</sup>等提出的生长释放/抑制阈

值为计算  $W_{ii}$  指数提供了重要参考(表2、方法1),有效提升了基于该指数开展泥石流灾害历史重建时的定年精度<sup>[13]</sup>。同时,瓢打曲流域的年轮生长扰动阈值<sup>[15]</sup>的提出,降低了现有  $W_{ii}$  指数计算过程中,传统生长释放/抑制阈值在特定情况下可能存在的误差(表2、方法2)。为确定最适合热玛沟流域泥石流灾害历史重建的树木年轮生长释放/抑制阈值,进一步提高确定泥石流灾害定年方法的精确度,本文采用了上述两种阈值标准对热玛沟的泥石流灾害历史进行了重建。具体而言,分别将方法1和方法2分别代入公式(2)计算  $W_{ii}$  指数,并对比分析两者的定年效果及准确性。

热玛沟流域采集的树木中最古老的样本可追溯至1700年。考虑到样本深度在1883年达到10个,为保证定年的可靠性,本文将泥石流灾害历史重建的时间范围限定在1883—2022年。采用方法1计算  $W_{ii}$  指数,结果显示: $W_{ii}$  的最高值为0.49,出现在2015年和2016年,最低值为0.02,分别对应1995年和2010年(图3)。若将  $W_{ii}$  的最高值作为泥石流暴发时间的定灾标准,泥石流事件数量将明显减少;若以最低值作为定灾标准,泥石流灾害发生频率将明显增加。上述两种阈值均无法有效实现对泥石流暴发时间的准确判定,造成约40%的泥石流事件受到漏判,证明方法1的生长释放/抑制阈值不适用于

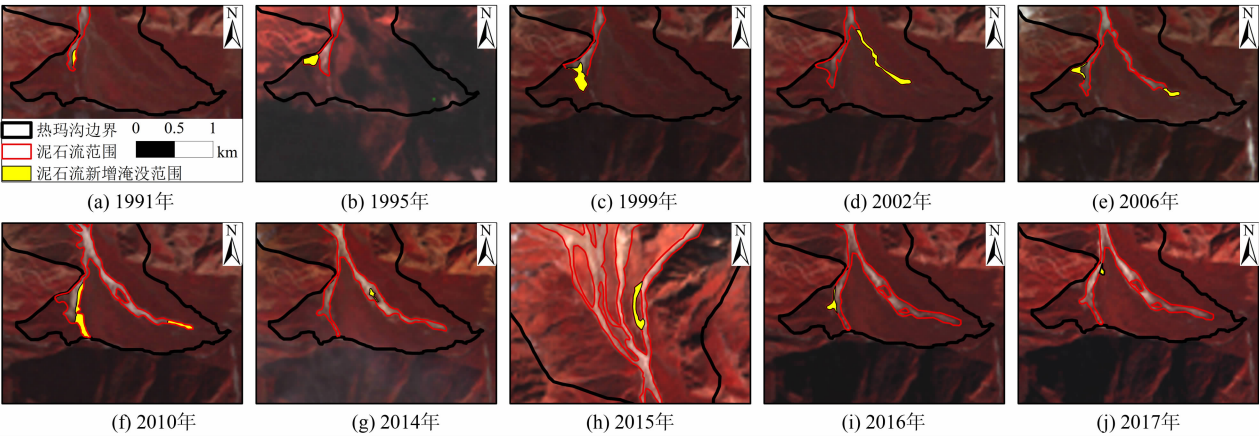


图2 基于遥感解译的热玛沟流域泥石流淹没范围

Fig.2 Debris flow inundated area in the Rema gully based on remote sensing interpretation

表2 生长扰动强度的分类标准

Tab.2 New classification of growth disturbances

方法编号	生长扰动 类型	强生长扰动		中生长扰动		弱生长扰动	
		年轮变化/%	持续时间/a	年轮变化/%	持续时间/a	年轮变化/%	持续时间/a
方法1	生长释放	≥60	≥5	≥60	2~5	40~60	≥2
	生长抑制	≥60	≥5	≥60	2~5	40~60	≥2
方法2	生长抑制	≥60	≥5	≥60	2~5	25~40	≤2

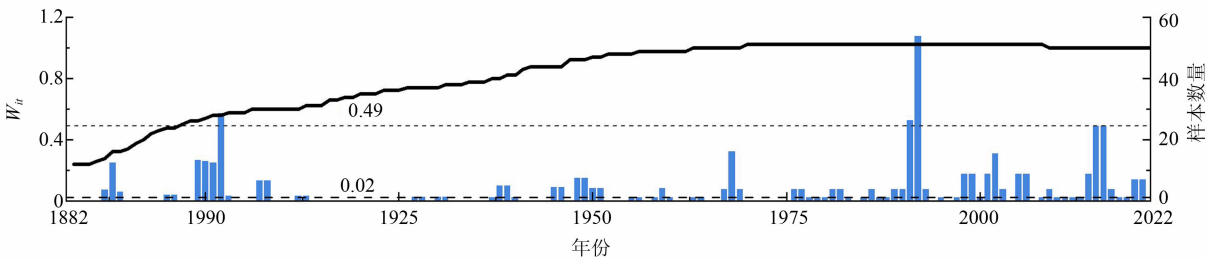


图3 基于方法1计算的  $W_{ii}$  值

Fig.3  $W_{ii}$  value calculated based on Method 1



热玛沟流域泥石流灾害历史的重建。

进一步分析方法 1 的树木生长扰动分类结果,该方法未识别出强生长扰动和中生长扰动,绝大多数扰动事件被归类为弱生长扰动,该生长扰动类型数量约占所有生长扰动的 84.3% (图 4)。这表明方法 1 所设定的生长释放/抑制阈值对于热玛沟流域的扰动木而言过高,导致在利用方法 1 的阈值计算  $W_{it}$  值时,灾害历史的重建结果出现偏差。利用方法 2 计算得到的  $W_{it}$  值最高为 0.44, 出现在 1924 年,远低于方法 2 的  $W_{it}$  值 (图 5), 基于方法 2 的  $W_{it}$  阈值判断热玛沟流域泥石流暴发时间时,无法有效识别出泥石流事件 (图 5)。这表明方法 2 在此区域的适用性有限,未能提供可靠的泥石流事件识别依据。

已有研究<sup>[26]</sup>表明,树龄是影响树木对泥石流干

扰响应敏感性和强度的关键因素。幼龄树 (树龄 < 50 a) 对泥石流的干扰更敏感,其树皮较薄、根系尚不稳固,受泥石流撞击后更易受到损坏,后期存活率和愈合能力普遍较低,生长抑制特征明显,方法 2 排除了生长释放指标<sup>[15]</sup>。而热玛沟流域扰动木的平均树龄达到 124 a, 远高于方法 2 适用的树龄范围。与幼龄树相比,老龄树因树皮较厚、根系稳固,对泥石流扰动的敏感性降低,其生长扰动多表现为弱生长抑制 (图 6), 从而导致  $W_{it}$  值整体偏低。因此,方法 2 在热玛沟流域泥石流重建中存在局限性。

### 3.3 新的生长释放/抑制阈值的制定

热玛沟流域平均海拔超过 3600 m, 冰川活动频繁,流域内分布的树木以老龄树为主,其年轮生长释放不存在明显的滞后效应。针对这一特征,本文通

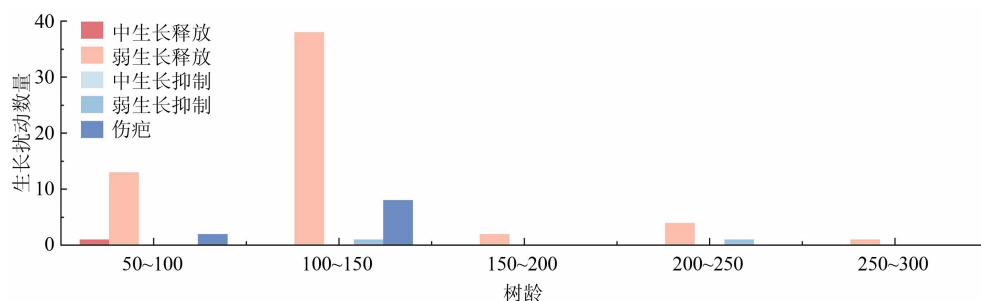


图 4 基于方法 1 识别的生长扰动年龄分布

Fig. 4 Age distribution of growth disturbance identified based on Method 1

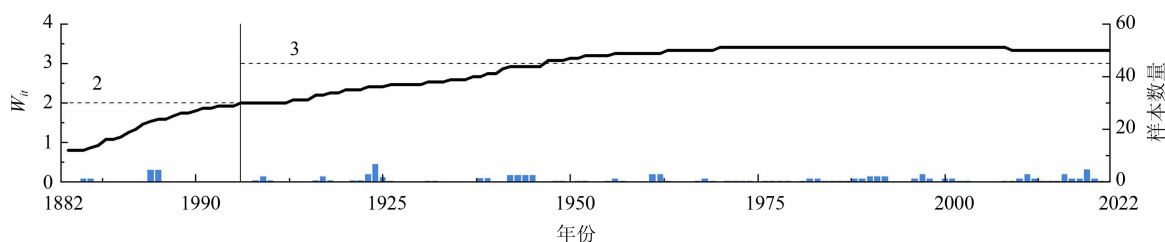


图 5 基于方法 2 计算的  $W_{it}$  值

Fig. 5  $W_{it}$  value distribution calculated based on Method 2

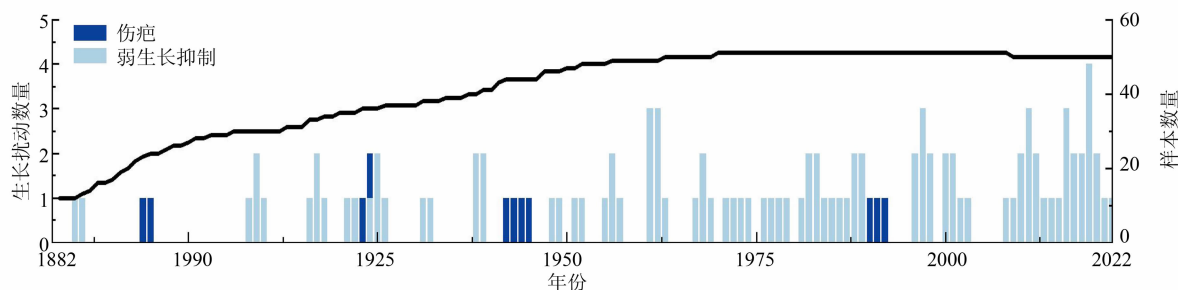


图 6 基于方法 2 判定的生长扰动类型分布

Fig. 6 Growth disturbance type distribution based on Method 2

过解剖学分析研究区内扰动木的创伤特征(树脂道密度 $\geq 12$ 个/ $\text{cm}^2$ ),结合重建泥石流暴发时间的精确度( $R=0.8$ )对方法 1 中的生长扰动阈值进行优化调整:将强生长释放/抑制阈值降低至 54%,而弱生长释放/抑制阈值降低至 25%(表 3)。

通过调整后的生长扰动指标体系,共识别出 51 个扰动木树芯的生长扰动,数量达到 443 个(1883—2022 年),记录到伤疤和愈伤组织共 10 个(图 6)。在识别的生长扰动中,生长释放的数量比生长抑制多 9.5%,尤其在弱生长扰动这一类别中,生长释放数量比生长抑制多 12%,这表明生长释放是热玛沟流域扰动木对泥石流干扰的重要响应特征。基于调整后的生长释放/抑制阈值,本文将  $W_{it} \geq 10$  作为判定热玛沟流域泥石流事件发生的标准。基于新的生长释放/抑制阈值及  $W_{it}$  计算方法,成功重建出泥石流灾害暴发年份为 1991 年、1999 年、2002 年、2010 年、2014 年、2015 年、2016 年、2017 年。此外,还重建出了 1943 年、1968 年两次泥石流事件(图 7)。

树龄的增加通常伴随树木对泥石流干扰响应的减弱<sup>[14]</sup>。热玛沟流域扰动木的平均年龄超过 120 a,原生长释放/抑制的阈值对于该流域树木而言偏高,导致部分实际生长扰动未被识别,从而影响泥石流灾害历史重建的精度。阈值下调后,生长扰动的识别率显著提升。此外,不同树龄区间的扰动

木对泥石流的响应存在差异。在树木的树龄普遍较小的流域,树木年轮受到泥石流干扰后首先表现为生长抑制,生长释放则存在滞后效应,通常在泥石流发生后的 1~2 a 内出现<sup>[15]</sup>。而热玛沟流域内扰动木树龄多为 100~150 a,生长释放现象普遍,其数量远高于生长抑制,尤其在泥石流发生年份表现突出(图 8)。这一现象表明生长释放是泥石流扰动的重要指示信号。将其纳入定灾指标,提升了灾害重建的准确性与合理性。除此之外,  $W_{it}$  指数与生长扰动数量均随树龄的增加呈上升趋势(图 8)。一方面,这与样本数量密切相关。样本量越大,其包含的泥石流信息越丰富;另一方面,识别出的扰动木数量(特别是伤疤、愈伤组织及中强生长扰动的数量)越多,指示泥石流的规模和强度趋于增大及增强。

### 3.4 泥石流事件年验证

本研究基于调整后的生长释放/抑制阈值,重新计算并利用  $W_{it}$  值,重建出热玛沟流域泥石流灾害暴发年份为 1991 年、1999 年、2002 年、2010 年、2014 年、2015 年、2016 年、2017 年。与实际泥石流暴发时间(1991 年、1995 年、1999 年、2002 年、2010 年、2014 年、2015 年、2016 年、2017 年)吻合度高,其时空分布特征与实地调查匹配度达 91.4%,证明改进后的双阈值体系显著提升了灾害的识别精度(Kappa 系数为 0.82)。1995 年和 2006 年泥石流淹

表 3 生长扰动强度的新分类阈值

Tab. 3 New classification of growth disturbances (GDs)

生长扰动 类型	强生长扰动		中生长扰动		弱生长扰动	
	年轮变化/%	持续时间/a	年轮变化/%	持续时间/a	年轮变化/%	持续时间/a
生长释放	$\geq 54$	$\geq 5$	$\geq 54$	2 ~ 5	25 ~ 54	$\geq 2$
生长抑制	$\geq 54$	$\geq 5$	$\geq 54$	2 ~ 5	25 ~ 54	$\geq 2$

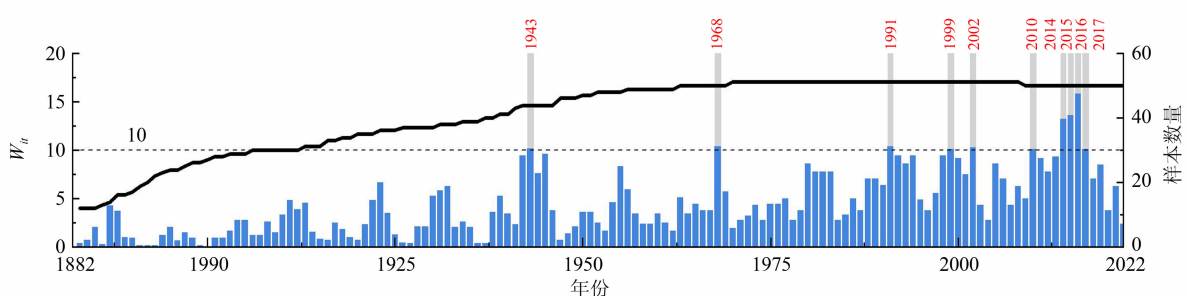


图 7 基于新的  $W_{it}$  计算方法的泥石流暴发时间重建

Fig. 7 Reconstruction of debris flow occurrence by index  $W_{it}$

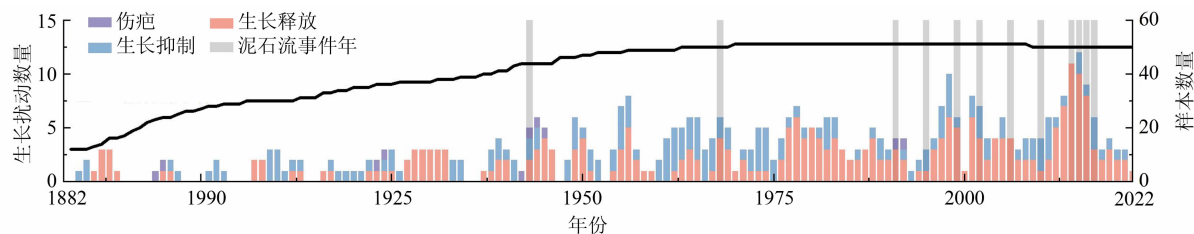


图8 基于新的生长扰动阈值判定的生长扰动数量

Fig. 8 Numbers of growth disturbances based on the new growth disturbance threshold

没区域未波及扰动木的采样位置,因此扰动木未记录这两年泥石流事件的发生。上述结果表明,调整后的树轮生长释放/抑制阈值适用于热玛沟流域冰川型泥石流灾害历史重建。此外,受限于热玛沟流域特殊的地貌及较高的海拔,流域内样本采集存在一定的困难,加之周边区域冰湖分布较多,泥石流类型与研究区存在差异,因此未来将通过进一步的区域调查,结合冰湖溃决和泥石流活动的监测数据,开展更为全面的验证分析,为区域泥石流灾害的历史重建与风险评估提供更坚实的支撑。

## 4 结论

本文基于树木年代学方法,通过采集树芯样品,结合树木年轮对泥石流干扰产生伤疤及愈伤组织、生长释放/抑制特征,计算  $W_u$  指数,重建研究区泥石流灾害历史。结果表明:

(1) 利用遥感影像解译,识别出热玛沟流域自1988年来的10场泥石流事件,分别为1991年、1995年、1999年、2002年、2006年、2010年、2014年、2015年、2016年、2017年。

(2) 对比分析表明,常用的生长释放/抑制阈值不适用于喜马拉雅山脉中段热玛沟流域的泥石流灾害历史重建,反映出不同区域树木对泥石流干扰的响应存在差异。该结果强调了定灾指标阈值设定需充分考虑区域的特性及树木生长状况。

(3) 将强、弱生长释放/抑制阈值分别降低至54%和25%,并据此重新计算  $W_u$  指数,成功重建了热玛沟流域1883年以来大型冰川型泥石流历史,重建结果与遥感影像解译结果高度一致。另外重建出了1943年、1968年两场大型泥石流事件,热玛沟流域的灾害序列回溯期扩展至75 a,达到了精确定灾的目的。

本文基于遥感影像解译,识别出自1998年以来热玛沟流域的10场大型泥石流事件,通过修正现有生长释放/抑制阈值,成功重建了1883—2022年热玛沟流域的大型冰川型泥石流历史。重建结果经遥感影像验证,具有较高的准确性和可靠性。

## 参考文献 (References)

- [1] STOFFEL M, BOLLSCHWEILER M. What tree rings can tell about earth-surface processes: Teaching the principles of dendrogeomorphology [J]. *Geography Compass*, 2009, **3** (3): 1013–1037. DOI: 10.1111/j.1749–8198.2009.00223.x
- [2] STRUNK H. Dating of geomorphological processes using dendrogeomorphological methods [J]. *Catena*, 1997, **31** (2): 137–151. DOI: 10.1016/S0341–8162(97)00031–3
- [3] 丁苗, 白世彪, 王建, 等. 利用树木年轮重建滑坡复活时间的方法[J]. *山地学报*, 2016, **34** (5): 545–554. [DING Miao, BAI Shibiao, WANG Jian, et al. Basic procedures of using tree rings to reconstruct the time of landslide reactivation [J]. *Mountain Research*, 2016, **34** (5): 545–554] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.000161
- [4] 赖忠平, 杨安娜, 丛禄, 等. 山地灾害沉积物的测年综述[J]. *地学前缘*, 2021, **28** (2): 1–18. [LAI Zhongping, YANG Anna, CONG Lu, et al. A review on the dating techniques for mountain hazards-induced sediments [J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, **28** (2): 1–18] DOI: 10.13745/j.esf.sf.2020.9.7
- [5] STOFFEL M. Magnitude-frequency relationships of debris flows—a case study based on field surveys and tree-ring records [J]. *Geomorphology*, 2010, **116** (2): 67–76. DOI: 10.13745/j.esf.sf.2020.9.7
- [6] BOLLSCHWEILER M, STOFFEL M. Changes and trends in debris-flow frequency since AD 1850: Results from the Swiss Alps [J]. *The Holocene*, 2010, **20** (6): 907–916. DOI: 10.1177/0959683610365942
- [7] BOLLSCHWEILER M, STOFFEL M, EHMISH M, et al. Reconstructing spatio-temporal patterns of debris-flow activity using dendrogeomorphological methods [J]. *Geomorphology*, 2007, **87** (4): 337–351. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.10.002
- [8] 铁永波, MALIK I, OWCZAREK P. 树木年代学在高寒山区泥石



- 流历史事件重建中的应用——以磨西河流域倒灶沟为例[J]. 山地学报, 2014, **32**(2): 226 – 232. [TIE Yongbo, MALIK I, OWCZAREK P. Dendrochronological dating of debris flow historical events in high mountain area [J]. Mountain Research, 2014, **32**(2): 226 – 232] DOI: 10.3969/j.issn.1008 – 2786.2014.02.013
- [9] 吴佳亮, 马超, 王锐, 等. 基于树木地貌法重建山洪泥石流历史事件——以北京密云区龙潭沟流域为例[J]. 自然灾害学报, 2021, **30**(1): 183 – 190. [WU Jialiang, MA Chao, WANG Rui, et al. Reconstruction of torrent and debris flow events based on dendrogeomorphology: A case study of Longtangou basin in Miyun District, Beijing [J]. Journal of Natural Disasters, 2021, **30**(1): 183 – 190] DOI: 10.13577/j.jnd.2021.0119
- [10] 王志兰, 马超, 吴佳亮, 等. 基于树木年轮重建密云小西天流域泥石流事件[J]. 自然灾害学报, 2022, **31**(5): 183 – 192. [WANG Zhilan, MA Chao, WU Jialiang, et al. Debris flow event in Xiaoxitian watershed of Miyun based on tree ring reconstruction [J]. Journal of Natural Disasters, 2022, **31**(5): 183 – 192] DOI: 10.13577/j.jnd.2022.0521
- [11] QIE Jiazhi, ZHANG Yong, TRAPPMANN D, et al. Long-term reconstruction of flash floods in the Qilian Mountains, China, based on dendrogeomorphic methods [J]. Journal of Mountain Science, 2022, **19**(11): 3163 – 3177. DOI: 10.1007/s11629 – 022 – 7577 – 1
- [12] KOGELNIG-MAYER B, STOFFEL M, SCHNEUWLY-BOLLSCHWEILER M, et al. Possibilities and limitations of dendrogeomorphic time-series reconstructions on sites influenced by debris flows and frequent snow avalanche activity [J]. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2011, **43**(4): 649 – 658. DOI: 10.1657/1938 – 4246 – 43.4.649
- [13] 孟哲, 吕立群, 余国安, 等. 基于树木年代学的冰川型泥石流灾害历史重建方法——以西藏天摩沟为例[J]. 科学技术与工程, 2022, **22**(32): 14124 – 14136. [MENG Zhe, LYU Liqun, YU Guoan, et al. Reconstruction of glacial debris flow disaster based on dendrochronology: A case study on Tianmo Gully, Tibet [J]. Science Technology and Engineering, 2022, **22**(32): 14124 – 14136] DOI: 10.3969/j.issn.1671 – 1815.2022.32.007
- [14] 吕立群, 王兆印, 孟哲. 基于树木年代学的迫龙沟泥石流灾害历史重建[J]. 地球科学, 2024, **49**(1): 335 – 346. [LYU Liqun, WANG Zhaoyin, MENG Zhe. Reconstruction of debris flow disasters in Polong gully based on dendrochronology [J]. Earth Science, 2024, **49**(1): 335 – 346] DOI: 10.3799/dqkx.2022.142
- [15] 皋子琪, 吕立群, 周冠宇, 等. 基于 Wit 指数的冰川型泥石流的年轮定灾方法[J]. 地球科学, 2025, **50**(2): 752 – 762. [GAO Ziqi, LYU Liqun, ZHOU Guanyu, et al. New reconstruction of glacier debris flows based on tree ring response [J]. Earth Science, 2025, **50**(2): 752 – 762] DOI: 10.3799/dqkx.2024.011
- [16] JIANG Sheng, NIE Yong, LIU Qiao, et al. Glacier change, supraglacial debris expansion and glacial lake evolution in the Gyirong River Basin, Central Himalayas, between 1988 and 2015 [J]. Remote Sensing, 2018, **10**(7): 986 – 998. DOI: 10.3390/rs10070986
- [17] COLLINS B D, JIBSON R W. Assessment of existing and potential landslide hazards resulting from the April 25, 2015 Gorkha, Nepal earthquake sequence [J]. Geological Survey Open-File Report, 2015, **8**(12): 34 – 49. DOI: 10.3133/ofr20151142
- [18] BURNS P, NOLIN A. Using atmospherically-corrected Landsat imagery to measure glacier area change in the Cordillera Blanca, Peru from 1987 to 2010 [J]. Remote Sensing Environment, 2014, **140**(1): 165 – 178. DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.026
- [19] BLASCHKE T, HAY G J. Object-oriented image analysis and scale-space: Theory and methods for modeling and evaluating multiscale landscape structure [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2001, **34**(4): 22 – 29. DOI: publication/216266277
- [20] GRISSINO-MAYER H D. Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program COFECHA [J]. Tree-Ring Research, 2001, **57**(2): 205 – 221. DOI: 10150/251654
- [21] FRIEDMAN J M, VINCENT K R, SHAFROTH P B, et al. Dating floodplain sediments using tree-ring response to burial [J]. Earth Surface Process and Landforms, 2005, **30**(9): 1077 – 1091. DOI: 10.1002/esp.1263
- [22] STOFFEL M, BOLLSCHWEILER M, HASSLER G R. Differentiating past events on a cone influenced by debris flow and snow avalanche activity: A dendrogeomorphological approach [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2006, **31**(11): 1424 – 1437. DOI: 10.1002/esp.1363
- [23] STOFFEL M, BOLLSCHWEILER M. Tree-ring analysis in natural hazards research—an overview [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2008, **8**(2): 187 – 202. DOI: 10.5194/nhess – 8 – 187 – 2008
- [24] SHRODER J F. Dendrogeomorphological analysis of mass movement on Table Cliffs Plateau, Utah [J]. Quaternary Research, 1978, **9**(2): 168 – 185. DOI: 10.1016/0033 – 5894(78)90065 – 0
- [25] ZHANG Yong, STOFFEL M, LIANG E Y, et al. Centennial-scale process activity in a complex landslide body in the Qilian Mountains, northeast Tibetan Plateau, China [J]. Catena, 2019, **179**(12): 29 – 38. DOI: j.catena.2019.03.036
- [26] SILHAN K, PANEK T, HRADECKY J, et al. Tree-age control on reconstructed debris-flow frequencies: Examples from a regional dendrogeomorphic reconstruction in the Crimean Mountains [J]. Earth Surface Process and Landforms, 2015, **40**(1): 243 – 251. DOI: 10.1002/esp.3623

## Dendrochronological Interpretation of Glacial Debris Flow History in the Rema Gully, Xizang, China

XU Wenjun<sup>1</sup>, MA Chao<sup>1\*</sup>, LYU Liqun<sup>1</sup>, DU Cui<sup>2</sup>

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2 School of Software Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** Dendrochronology, with its exceptional time-continuity and high-resolution characteristics, has been widely applied in reconstructing geo-disaster histories. However, dendrochronology method has insufficiency in parameterizing the characteristics of trees and their habitats in a specific area, which limits the applicability of region-specific tree-ring analysis based on growth release/suppression mechanisms. The mid-Himalayas, a glaciated debris flow-prone area, it lacked of studies on debris flow reconstruction using dendrochronology.

In this paper, it took the Rema Gully in the Gyirong Tsangpo River basin of the mid-Himalayas as the study area. Through anatomical analysis of trauma features (resin duct density  $\geq 12$  per  $\text{cm}^2$ ) in 47 trees (mean age  $82 \pm 24$  years) and dynamic optimization of growth disturbance thresholds using the precision of reconstructed debris flow occurrence times ( $R = 0.8$ ), it developed an enhanced methodology for determining growth release/suppression thresholds and calculating the Disaster Disturbance Index ( $W_{ii}$ ). This approach integrated tree scars, callus tissues, and growth responses induced by debris flow disturbances with regional tree growth patterns to reconstruct the Gully's debris flow history, validated through remote sensing interpretation.

(1) The optimized thresholds significantly improved event identification accuracy to 87.6% ( $p < 0.01$ ), with weak growth release/suppression threshold adjusted to 25% (original 40%) and strong threshold to 54% (original 60%). Remote sensing validation (1988 – 2022) confirmed 10 debris flow events (1991, 1995, 1999, 2002, 2006, 2010, 2014, 2015, 2016, 2017) showing 91.4% spatiotemporal consistency with field surveys, demonstrating the method's effectiveness.

(2) Two previously undocumented major historical events in 1943 and 1968 were reconstructed, extending the disaster chronology to 75 years.

(3) Traditional thresholds underestimated approximately 40% of events, while the improved dual-threshold (weak/strong) system achieved significantly higher identification accuracy (Kappa coefficient = 0.82), providing novel methodological insights for glacial debris flow research.

The developed dendrochronological approach offers a robust technical framework for precise identification of debris flows in glacierized regions, contributing substantially to improving disaster databases in the Himalayas.

**Key words:** dendrochronology; glacial debris flow; growth release/suppression; geo-disaster reconstruction; the Rema gully

(责任编辑 朱颖彦 钟雨倩)