

引用格式:陈宁生,吴铭洋,李安辉,田树峰,余德彬. 云南镇雄“1·22”山体滑坡灾害调查[J]. 山地学报, 2024, 42(3): 422-430.

CHEN Ningsheng, WU Mingyang, LI Anhui, TIAN Shufeng, SHE Debin. Field survey of the Zhenxiong landslide on January 22, 2024 in Yunnan province, China [J]. Mountain Research, 2024, 42(3): 422-430.

## 云南镇雄“1·22”山体滑坡灾害调查

陈宁生<sup>1,2,3</sup>, 吴铭洋<sup>2,4</sup>, 李安辉<sup>2,5</sup>, 田树峰<sup>2,3</sup>, 余德彬<sup>2</sup>

(1. 长江大学 地球科学学院, 武汉 430100; 2. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610299;

3. 青海省人民政府—北京师范大学高原科学与可持续发展研究院, 西宁 810016;

4. 昆明理工大学 公共安全与应急管理学院, 昆明 650093; 5. 西藏大学 工学院, 拉萨 850013)

**摘要:** 2024年1月22日5时51分, 云南省镇雄县凉水村发生滑坡灾害, 导致凉水村合兴、和平两个村民小组共44人死亡。基于现场调查、无人机航测和遥感解译分析确定该地质灾害属中小规模滑坡, 并探讨了其成因机理。结果表明: (1) 镇雄滑坡是一次典型的“小滑大灾”灾害事件, 其规模约11.88万 $\text{m}^3$ , 导致44人死亡; (2) 滑坡发生前的坡体为一个裂缝发育的临界稳定态斜坡, 岩石节理裂隙达1.4条/m, 滑坡堆积石块中陈旧的历史风化断面占比超60%; (3) 低温冻胀作用极可能最终触发了滑坡的发生, 坡体的后端汇水、砂泥岩互层的地层和滑坡发生前的低温三个因素奠定了坡体冻胀失稳的基础。此类冬季发生的地质灾害具有极强的意外性, 需引起高度重视。本研究可为高原和高纬度地区由低温冻胀作用触发的滑坡防控提供案例和借鉴。

**关键词:** 镇雄“1·22”山体滑坡; 后端汇水; 低温; 冻胀

**中图分类号:** P642.22

**文献标志码:** A

2024年1月22日5时51分, 云南省昭通市镇雄县塘房镇凉水村的合兴、和平两个村民小组, 发生山体滑坡, 造成18户共44人死亡。2024年1月25日从云南镇雄县“1·22”山体滑坡灾害处置指挥部获悉, 专家组经实地调查, 初步分析本次滑坡成因为: 陡峻的地形地貌为滑坡发生提供了条件; 层状碎裂结构岩体是滑坡发生的主要内因及客观因素; 前期降水持续下渗, 软化岩体内软弱面, 加之滑坡发生前雨雪导致地下水富集, 达到其临界点, 进而诱发滑坡发生<sup>[1]</sup>。在上述初步结论的基础上, 仍然存在以下问题: 坡体破碎的岩体是否达到了临界稳定态? 为什么本次滑坡不在降水丰富的夏季发生, 而在寒冷的冬季发生? 冬季降水是否会导致地下水的富集?

地震和强降雨过程所导致的滑坡已经获得了广

泛的认知<sup>[2-5]</sup>, 但关于冬季低温环境下发生的崩塌、滑坡灾害, 国内外虽已有很多报道, 但其成灾机理尚不确切, 如2013年1月11日和1月28日云南镇雄滑坡灾害<sup>[6-8]</sup>、1943年2月7日青海的查纳滑坡<sup>[9]</sup>、1997年1月18日意大利北部Blanc山脉的Brenva和2008年12月24日Crammont冰川岩崩<sup>[10-12]</sup>, 以及1991年冬季意大利Molin村发生的低温引起的滑坡<sup>[13]</sup>。对于冬季发生的土质滑坡, 学界普遍认为冻融导致土体强度减弱是灾害发生的原因, 如针对陕西地区黄土<sup>[14]</sup>、伊犁地区黄土<sup>[15]</sup>、膨胀土<sup>[16]</sup>的研究, 均发现土体受冻融循环影响存在强度大幅降低的情况。对于岩质滑坡, 从岩石力学出发的研究发现, 岩石在冻胀影响后, 岩石矿物颗粒间胶结逐渐被破坏, 由此导致岩石强度变弱, 且冻胀可以在裂隙中产生大于33 MPa的冻胀力<sup>[17]</sup>, 在不同

收稿日期(Received date): 2024-04-01; 改回日期(Accepted date): 2024-06-20

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(42361144880); 国家重点研发项目(2023YFC3008301)。[National Natural Science Foundation of China (42361144880); National Key Research and Development Program of China (2023YFC3008301)]

作者简介(Biography): 陈宁生(1965-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 山地灾害形成机理与防治。[CHEN Ningsheng (1965-), male, professor, research on mountain disaster formation mechanism and prevention] E-mail: chennsh@imde.ac.cn

岩性的岩体之间,孔隙率越低、渗透性越差、强度越大的岩体,更有利于裂隙水的贮存,冻结过程中裂隙水迁移量更小,更易积聚更大的冻胀力。例如在针对大理岩、二长斑岩及砂岩的冻胀力大小及规律研究中,发现初次冻胀力的相关规律:大理岩为 7 ~ 8 MPa 最大,砂岩为 5 ~ 6 MPa 最小,二长斑岩为 6 ~ 7 MPa,介于二者中间;在初始冻胀力峰值逐次减小的速率研究中也发现了同样的规律<sup>[18]</sup>。冻胀作用很有可能成为“1·22”镇雄滑坡最终失稳致灾的原因。

本文在镇雄滑坡现场应急调查的基础上,结合无人机航测、遥感分析和数值计算,探讨了云南镇雄“1·22”滑坡的特点与成因,以期实现对冬季滑坡发育的新认识。

## 1 研究区概况及研究方法

### 1.1 研究区概况

滑坡发生地为云南省镇雄县凉水村的合兴、和平村民小组(105°0'45"E, 27°28'50"N),位于中国云贵高原乌蒙山北缘的构造侵蚀剥蚀中-高山地貌

区。总体地势西南高、东北低。海拔为 1000 ~ 2000 m<sup>[19]</sup>,山脉多为南北走向或者西南东北走向,冷空气易进难出,西北或东北方冷空气进入后易爬升凝结,是云南受冷空气影响的门户(图 1)。区域气候属亚热带高原季风气候,年平均气温 11.3 ℃,该地区晴少雨多,冬季境内受昆明准静止锋影响阴雨连绵,夏季受西太平洋副热带高压影响故雨水充沛,是全国降水日数最多的地区之一,多年平均降水量 914.6 mm(镇雄站),月际干湿差异明显,且海拔 1000 m 以上区域易发生暴雨<sup>[20]</sup>,霜雪凌冻严重,年均降雪 23.4 d,是云南省受冰冻灾害最重的地区之一。

研究区出露地层主要为三叠系飞仙关组,岩性主要为砂泥岩互层(图 2a),砂岩为透水层,泥岩为隔水层且具有膨胀性、崩解碎裂性、强度衰减性等特点,易发生风化<sup>[21]</sup>。砂泥岩互层的裂隙岩体具有特殊的孔隙特征和含水特征,决定了水分迁移对冻胀力的补给,增大了冻胀力在岩石劣化过程中的贡献<sup>[22]</sup>。现场调查滑坡区域地形地貌显示,滑坡发生地两侧山崖陡峭,谷底平坦低洼,地貌特点形似地堑

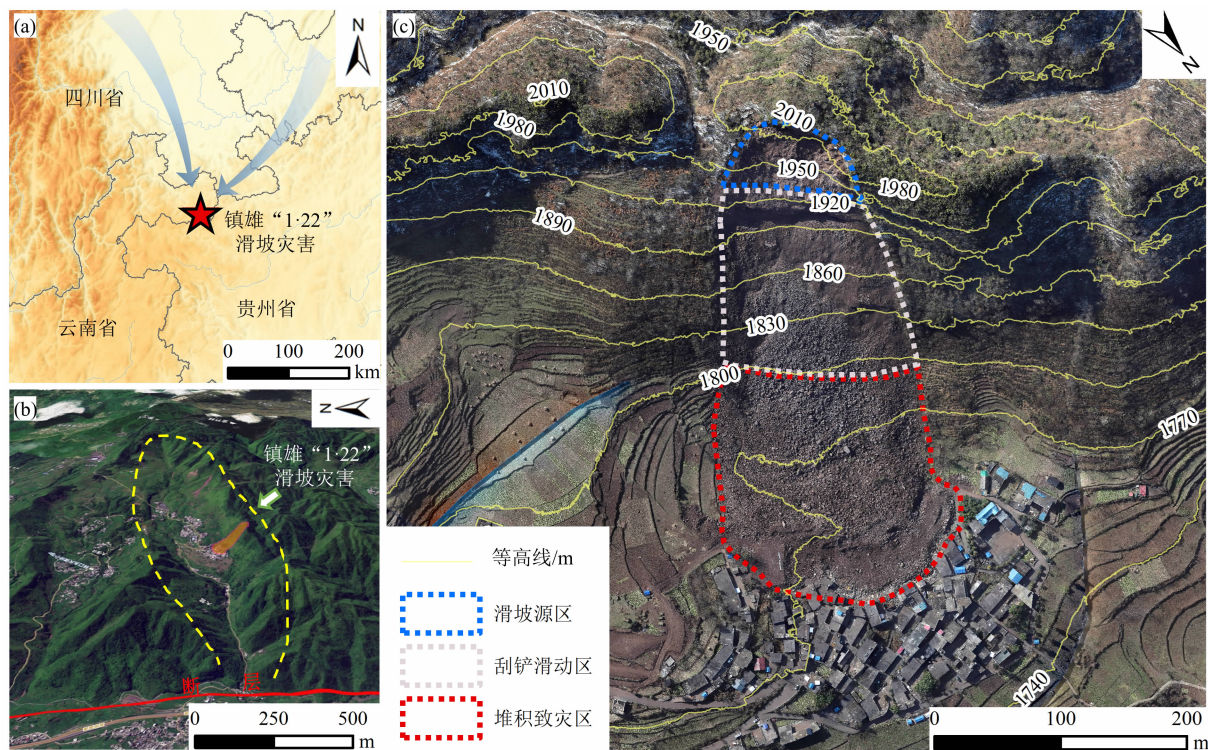


图1 研究区概况图:(a)研究区地理位置;(b)滑坡区地形地貌特征;(c)滑坡区域俯视图

Fig. 1 Overview map of study area;

(a) geographic location of the study area; (b) topography of the study area; (c) overhead view of the landslide area



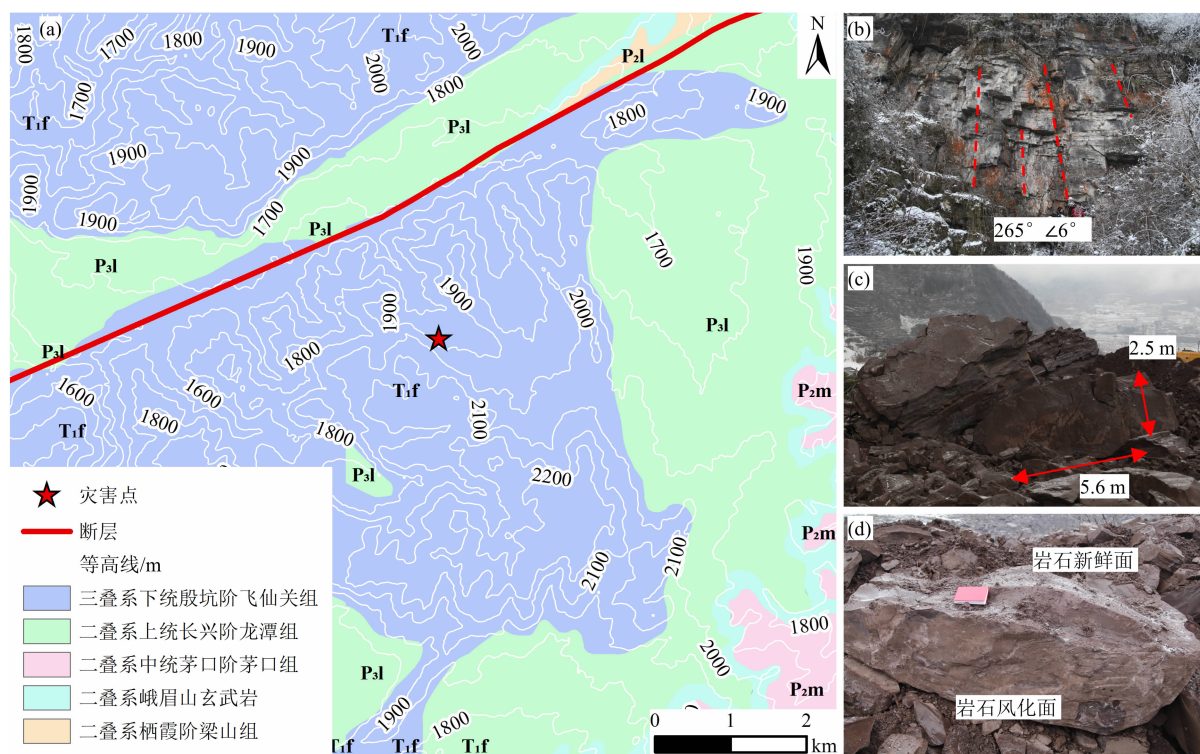


图2 研究区地质图及岩体裂隙特征:

(a) 研究区域地质图;(b) 出露地层的节理及产状;(c) 堆积区最大块石尺寸;(d) 堆积区块石新破坏的断面与风化面

Fig. 2 Geological map of the study area and rock fracture characteristics: (a) geological map of the study area;

(b) stratigraphic jointing and production; (c) maximum size of rocks in the accumulation area;

(d) newly damaged cross-sections and weathering cross-sections of rocks in the accumulation area

或断陷盆地,前人研究中称其为“靴状地形”<sup>[8]</sup>,受灾房屋位于该地貌边缘陡峭的斜坡坡脚上。

## 1.2 研究方法

本研究在现场调查的基础上确定滑坡发育的特点,基于无人机航测和实地测量确定滑坡体积与堆积面积。通过堆积岩块的新鲜面和风化面分析确定岩石节理发育和风化松动特征;通过附近出露岩体的产状和节理特征的测量,进一步确定滑坡源区的岩体特征。基于近年的区域降水过程和岩性分析滑坡赋水的特征,以及岩石冻胀力学和滑坡发生前的气温变化,结合岩体组构,分析冻胀引发滑坡的可能性及其机制。

## 2 结果

### 2.1 镇雄“1·22”滑坡是一次典型的“小滑大灾”

镇雄“1·22”滑坡体积仅约  $11.88 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,却导致了44人死亡。此次灾害源于坡顶陡崖区发生滑坡,滑坡体横宽约100 m,高约60 m,平均厚度约

6 m。滑坡体滑至中部斜坡区后发生崩解,强大的冲击力刮铲中下部凹槽区域表层崩积物形成滑坡碎屑流,混杂着大量石块的滑坡碎屑流冲击掩埋下方房屋,滑坡源区与居民区高差约249 m,坡脚为缓坡平台,居民区分布于坡脚平台区(图3)。镇雄“1·22”滑坡堆积区宽约165 m、长约180 m,与ALOS(Advanced Land Observing Satellite)的原始地表高程数据(精度为12.5 m)比对后,确定平均堆积厚度约为8 m,堆积体位于陡峭山崖与山脚平缓的崩积平台之间,将其体积近似为长宽高相等的几何体进行计算,得到滑坡堆积体总量为  $11.88 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。根据《滑坡防治工程勘察规范》(GB/T 32864-2016)<sup>[23]</sup>,镇雄“1·22”山体滑坡体积处于  $10^3 \times 10^4 \text{ m}^3 \sim 100^3 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,在中型滑坡中规模偏小,但却造成了重大人员伤亡,属于典型的“小滑大灾”灾害案例。

中小规模滑坡造成严重灾害,很大一部分原因是其时空意外性<sup>[24]</sup>。在传统观念里,冬季滑坡、泥石流等灾害受限于水文条件,发生的可能性和规模



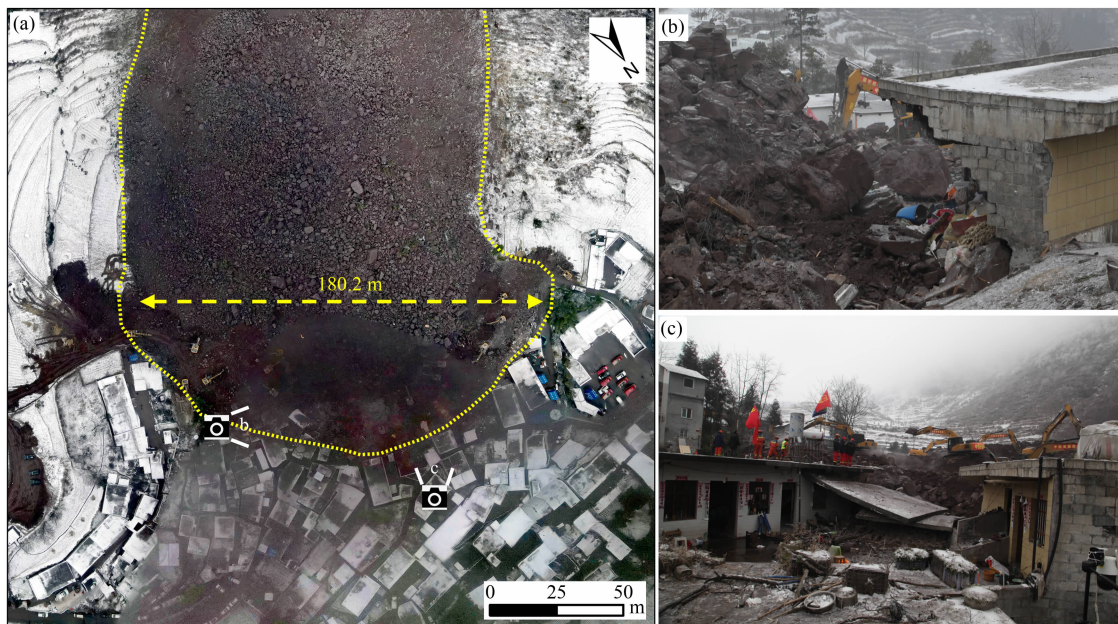


图3 滑坡灾害现场调查照片:

(a)堆积区俯视图;(b)上部为大粒径块石、下部为土层的堆积物特征;(c)损毁的房屋

Fig.3 Landslide disaster field investigation photos: (a) overhead view of the accumulation area; (b) characteristics of the accumulation with boulders in the upper part and soil in the lower part; (c) damaged houses

相对较低,人们的防范意识也随之下降。然而本次滑坡却在当地特殊的气候、地形地质条件以及人类活动等多因素的耦合作用下发生在冬季并造成重大损失。

## 2.2 滑坡发生前的坡体为一个裂缝发育的临界稳定态斜坡

镇雄“1·22”滑坡发生前斜坡坡顶变形迹象、斜坡表面的裂缝以及岩体的节理裂隙均表明其已处于临界稳定态。临界稳定态斜坡是指斜坡处于稳定和不稳定之间的临界状态,在工程上可认为是抗滑力持续下降到接近下滑力时坡体所处的状态。临界稳定态斜坡的形成是地质地貌演化的结果,是非强地震、非强降雨诱发滑坡的基础条件。根据现场调查及实地考察,滑坡发生前山坡上已存在与山体走向一致的地表裂缝(图4c)。此外,现场测量其周边岩体,发现在周边出露的5.6 m宽的岩体上发育有8条裂隙,节理密度高达1.4条/m(图4a),遥感影像显示2021年滑坡顶部有变形迹象,且周边区域近年来新增多处滑坡疤痕(图5)。

## 2.3 低温冻胀作用可能最终触发滑坡的发生

坡体的后端汇水条件和砂泥岩互层的地层条件奠定了冻胀所需的地质地貌基础条件。斜坡后端发

育的汇水条件和砂泥岩互层的结构分别为滑坡的发生提供了水源条件和水分迁移通道。依据薄膜迁移理论、毛细理论和分凝冰理论等冻胀领域理论,岩体中的水分迁移通道有利于冻胀力的持续增加和冻胀现象的发生。滑坡体后方有一汇水面积为 $0.33 \text{ km}^2$

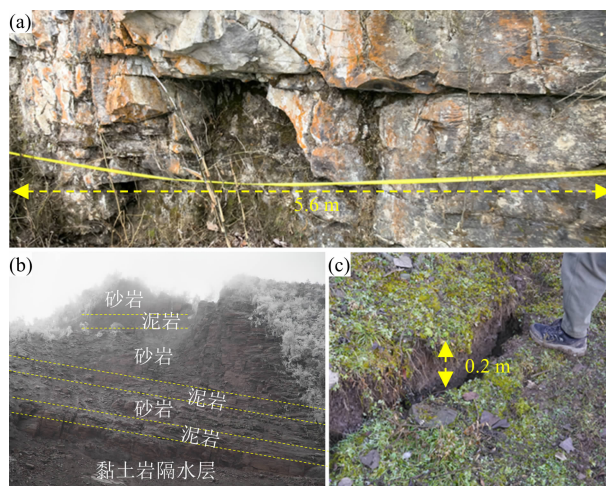


图4 岩体节理及山体裂缝图:

(a)周边5.6 m宽的岩体上发育有8条裂隙;

(b)砂岩与泥岩互层的地层;(c)山体表面发育的裂缝

Fig.4 Rock joints and mountain cracks;

(a) eight fissures developed on a 5.6 m wide rock around the perimeter; (b) interbedding stratum of the stone-mudstone;

(c) cracks developed on the surface of the hill



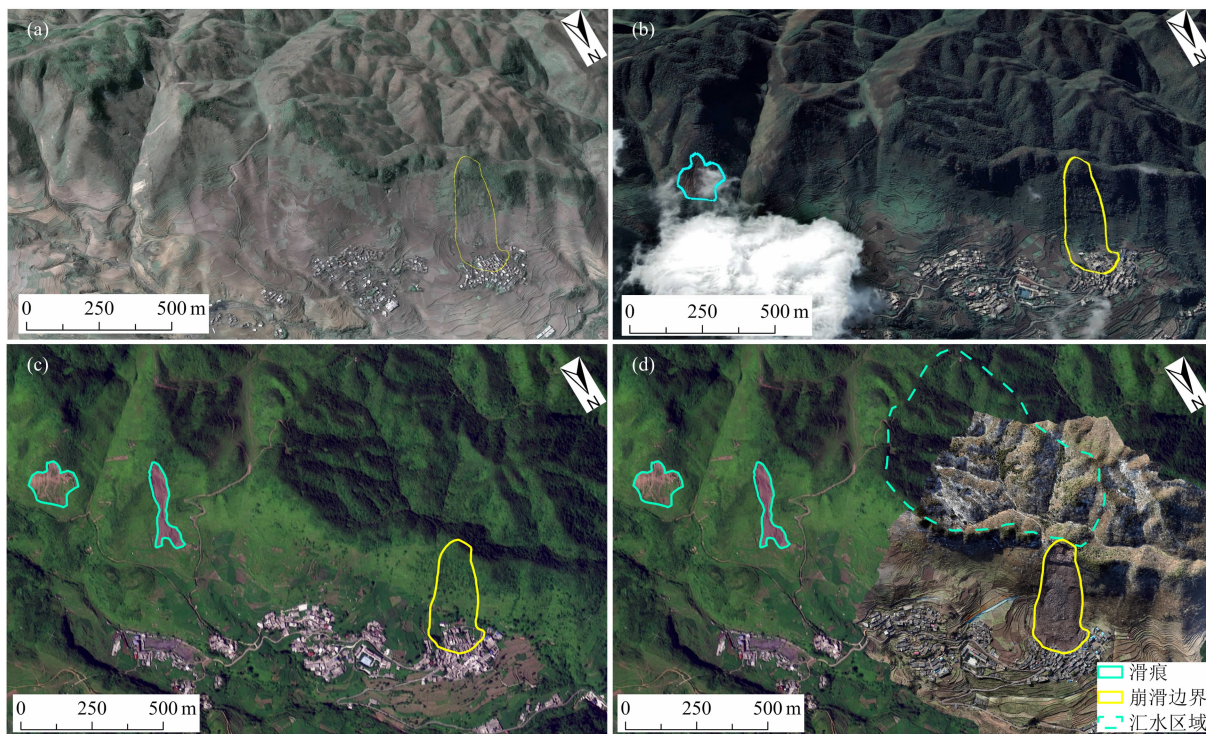


图5 滑坡发生前后研究区影像:(a)2009年2月;(b)2021年11月;(c)2023年6月;(d)2024年1月

Fig. 5 Remote sensing images of the study area before and after the landslide:

(a) February 2009; (b) November 2021; (c) June 2023; (d) January 2024

的冲沟(图6),根据现有数据计算冲沟夏季的最大流量可达 $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ ,在冲沟有一地形上的汇水点,海拔高程 $1966.0 \text{ m}$ ,径流入渗可以抵达滑坡的中上部(图7)。调查显示滑坡的残留基岩有2个相对富水的区域,其下部发育黏土岩隔水层(图4b)。砂泥岩互层的结构有利于水分的迁移,导致水分在风化严重的岩石裂隙中富集,为冻胀发生提供了水分供给,从而增加了冻胀力在岩石劣化过程中的贡献。

滑坡发生前的低温为冻胀的发生提供了温度条件(图8)。镇雄“1.22”滑坡发生在2024年1月22日早上5点51分,根据镇雄县气象站(海拔 $1644 \text{ m}$ )数据,镇雄滑坡发生前无极端的降水降雪,但经历了迅速的降温过程。1月22日最低气温降至 $0^\circ\text{C}$ 以下,特别是在滑坡发生的5点,温度降低到 $-1.9^\circ\text{C}$ 。考虑到滑坡形成区顶部的高程约 $2004 \text{ m}$ ,根据气温垂直递减率推算滑坡滑源地表温度应在 $-4^\circ\text{C}$ 以下。根据地热梯度的一般规律<sup>[25]</sup>,滑面的温度应在 $-4^\circ\text{C}$ 左右,而冻结砂岩发生冻结破裂的临界温度为 $-3 \sim -6^\circ\text{C}$ <sup>[26]</sup>。

综上,本文推断水分迁移作用下的低温冻胀是触发滑坡的关键因素。

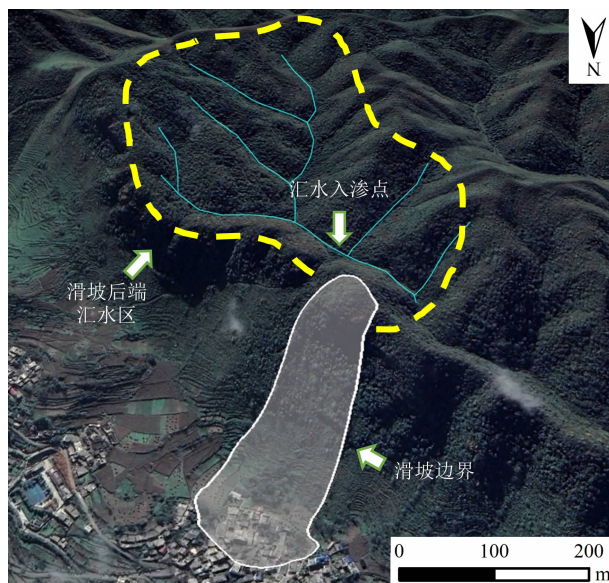


图6 滑坡后端汇水区地貌图

Fig. 6 Geomorphologic map of the ponding/infiltrating at slope shoulder at the back end of the landslide

### 3 结论

本研究详细介绍了发生于2024年1月22日5时51分的云南省镇雄县凉水村“1·22”滑坡灾害

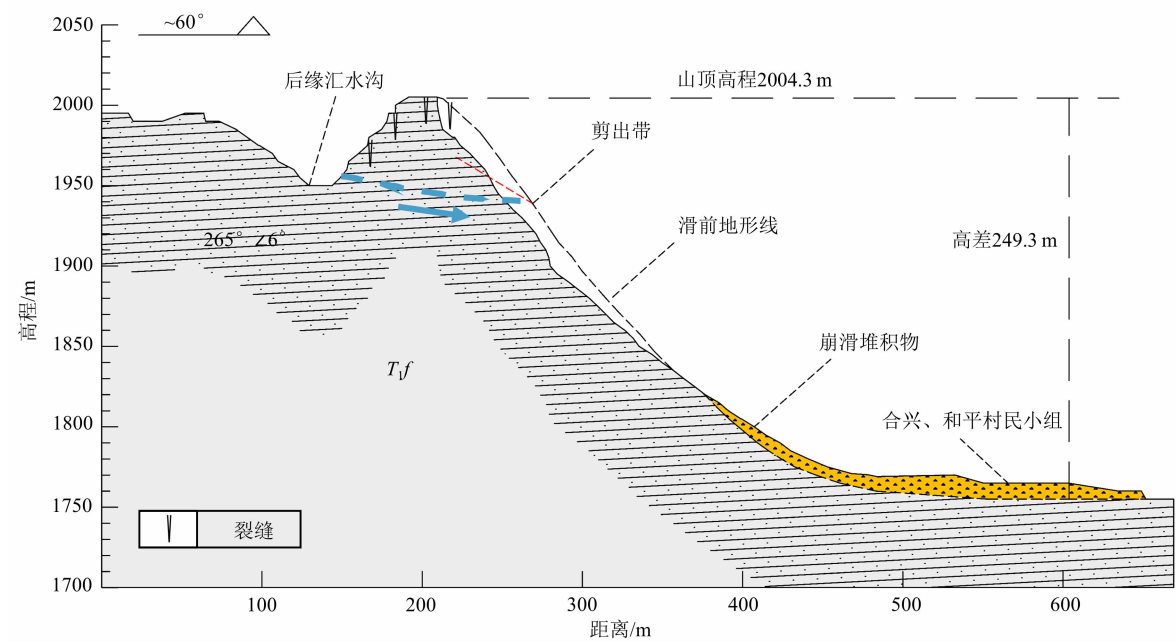


图7 滑坡纵剖面及后端汇水示意图

Fig.7 Longitudinal section of the landslide and schematic diagram of the ponding/infiltrating at slope shoulder at the back end of the landslide

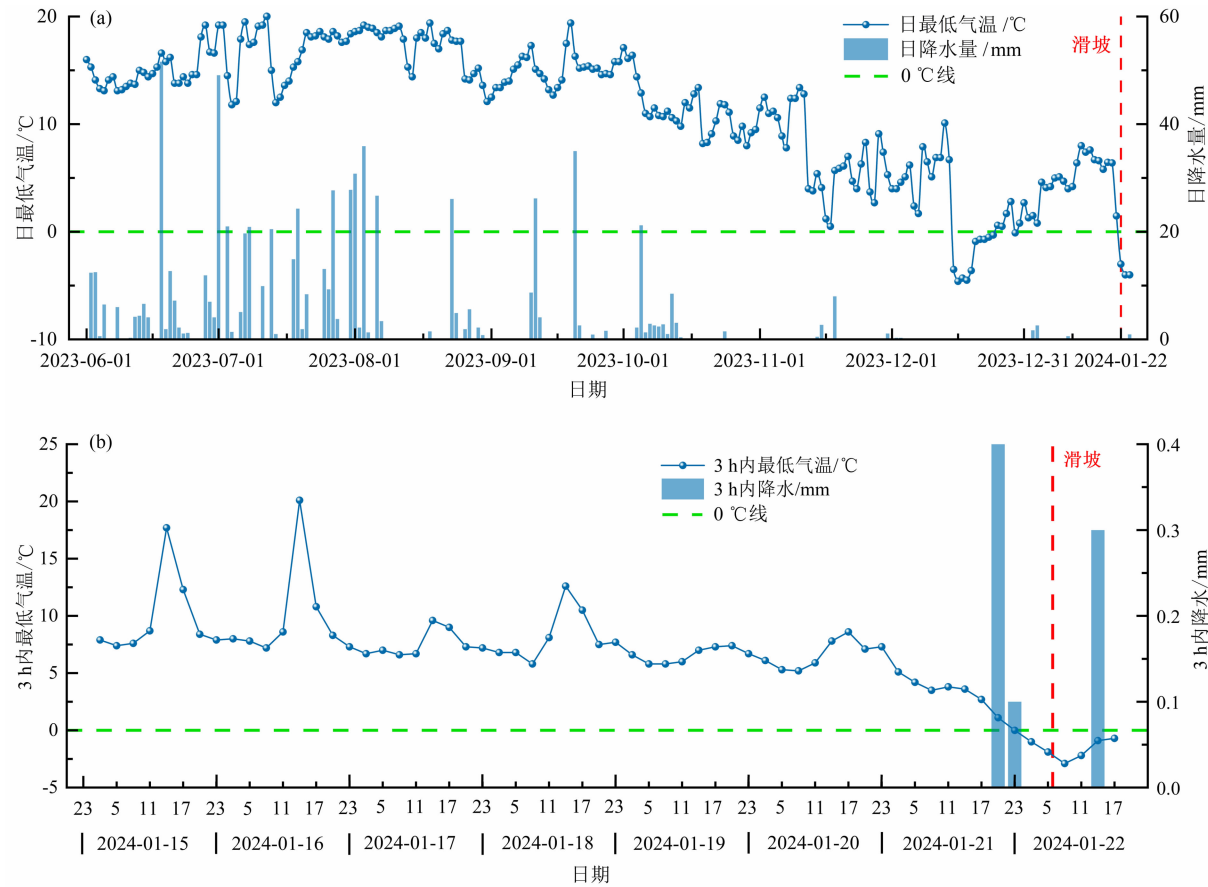


图8 滑坡发生前的气温降水曲线：

(a)2023 年 6 月 1 日至 2024 年 1 月 22 日气温降水变化；(b)滑坡发生前 2024 年 1 月 15 日至 2024 年 1 月 22 日气温降水变化

Fig.8 Temperature and precipitation curves prior to the landslide occurrence；

(a) change in temperature and precipitation from June 1, 2023 to January 22, 2024；

(b) change in temperature and precipitation from January 15, 2024 to January 22, 2024 prior to the landslide occurrence



的特征,并对此类冬季发生的滑坡进行了成因探讨,得到以下几方面结论。

(1)“1·22”镇雄滑坡属中小型滑坡,却导致44人死亡,是典型的“小滑大灾”事件。此类意外性冬季滑坡需要引起高度重视,其内在机理还需要进一步深入研究。

(2)研究区岩体节理发育,结构破碎,滑坡源区风化严重,滑坡发生前是一个裂隙发育的临界稳定态斜坡。

(3)低温冻胀作用为滑坡的触发因素,坡体后端的大面积汇水条件、砂泥岩互层的地质条件和滑坡发生前的低温条件奠定了坡体冻胀失稳的基础。

## 参考文献 (References)

- [1] 刘传正. 云南镇雄县凉水村崩塌灾难及预防应对思考[J]. 中国减灾, 2024(3): 12 - 13. [LIU Chuazheng. The collapse disaster of Liangshui village in Zhenxiong county of Yunnan province and thoughts on prevention and response [J]. Disaster Reduction in China, 2024(3): 12 - 13]
- [2] CHEN Ningsheng, TIAN Shufeng, WANG Fawu, et al. Multi-wing butterfly effects on catastrophic rockslides [J]. Geoscience Frontiers, 2023, 14(6): 101627. DOI: 10.1016/j.gsf.2023.101627
- [3] EMBERSON R, KIRSCHBAUM D, STANLEY T. Global connections between El Nino and landslide impacts [J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 2262. DOI: 10.1038/s41467-021-22398-4
- [4] KARGEL J S, LEONARD G J, SHUGAR D H, et al. Geomorphic and geologic controls of geohazards induced by Nepal's 2015 Gorkha earthquake [J]. Science, 2016, 351(6269): aac8353. DOI: 10.1126/science.aac8353
- [5] PICIULLO L, CALVELLO M, CEPEDA J M. Territorial early warning systems for rainfall-induced landslides [J]. Earth-Science Reviews, 2018, 179: 228 - 247. DOI: 10.1016/j.earscirev.2018.02.013
- [6] 徐永强, 殷志强, 张楠, 等. 云南镇雄中屯镇头屯村大型滑坡成因分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(4): 6 - 11 + 24. [XU Yongqiang, YIN Zhiqiang, ZHANG Nan, et al. Analysis of the cause of Toutun large scale landslide in Zhenxiong county, Yunnan province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(4): 6 - 11 + 24] DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2015.04.02
- [7] 姚鑫, 余凯, 张永双, 等. “1·11”镇雄灾难性滑坡滑动机制——高孔隙度土流态化启动与滑动液化[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5): 1047 - 1054. [YAO Xin, YU Kai, ZHANG Yongshuang, et al. Mechanisms of catastrophic landslide on January 11, 2013, in Zhenxiong county: Fluidization initiation and movement liquefaction of high porosity soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(5): 1047 - 1054] DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.05.020
- [8] 殷跃平, 刘传正, 陈红旗, 等. 2013年1月11日云南镇雄赵家沟特大滑坡灾害研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(1): 6 - 15. [YIN Yueping, LIU Chuazheng, CHEN Hongqi, et al. Investigation on catastrophic landslide of January 11, 2013 at Zhaojiagou, Zhenxiong county, Yunnan province [J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(1): 6 - 15] DOI: 10.3969/j.issn.1004-9665.2013.01.002
- [9] 黄润秋. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433 - 454. [HUANG Runqiu. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 433 - 454] DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2007.03.001
- [10] BARLA G, DUTTO F, MORTARA G. Brenva glacier rock avalanche of January 18 1997 on the Mount Blanc range, northwest Italy [J]. Landslide News, 2000, 13: 2 - 5.
- [11] DELINE P, ALBERTO W, BROCCOLATO M, et al. The December 2008 Crammont rock avalanche, Mont Blanc massif area, Italy [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2011, 11(12): 3307 - 3318. DOI: 10.5194/nhess-11-3307-2011
- [12] PARANUNZIO R, LAIO F, CHIARLE M, et al. Climate anomalies associated with the occurrence of rockfalls at high-elevation in the Italian Alps [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2016, 16(9): 2085 - 2106. DOI: 10.5194/nhess-16-2085-2016
- [13] GOVI M, PASUTO A, SILVANO S, et al. An example of a low-temperature-triggered landslide [J]. Engineering Geology, 1993, 36(1): 53 - 65. DOI: 10.1016/0013-7952(93)90018-8
- [14] LI Zuyong, YANG Gengshe, LIU Hui. The influence of regional freeze - thaw cycles on loess landslides: Analysis of strength deterioration of loess with changes in pore structure [J]. Water, 2020, 12(11): 3047. DOI: 10.3390/w12113047
- [15] GUO Zekun, ZHANG Zizhao, MU Yanxiao, et al. Effect of freeze-thaw on mechanical properties of loess with different moisture content in Yili, Xinjiang [J]. Sustainability, 2022, 14(18): 11357. DOI: 10.3390/su141811357
- [16] TANG Liang, CONG Shengyi, GENG Lin, et al. The effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of expansive soils [J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 145: 197 - 207. DOI: 10.1016/j.coldregions.2017.10.004
- [17] 乔国文, 王运生, 储飞, 等. 冻融风化边坡岩体破坏机理研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(3): 469 - 476. [QIAO Guowen, WANG Yunsheng, CHU Fei, et al. Failure mechanism of slope rock mass due to freeze-thaw weathering [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(3): 469 - 476] DOI: 10.

- 13544/j.cnki.jeg.2015.03.014
- [18] 刘昊, 王宇, 王华建, 等. 冻融循环作用下岩石含冰裂隙冻胀力演化试验研究[J]. 工程地质学报, 2022, **30**(4): 1122 – 1131. [LIU Hao, WANG Yu, WANG Huajian, et al. Experimental study on frost heaving pressure evolution of rock ice cracks under freezing-thawing cycles [J]. Journal of Engineering Geology, 2022, **30**(4): 1122 – 1131] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2020 – 204
- [19] 郑杨, 陈茂, 杨东, 等. 云南镇雄地质灾害频发原因及预警预报分析[J]. 工业安全与环保, 2021, **47**(10): 35 – 38. [ZHENG Yang, CHEN Mao, YANG Dong, et al. Analysis on the causes and early warning and forecasting of frequent geological disasters in Zhenxiong, Yunnan province [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2021, **47**(10): 35 – 38] DOI: 10.3969/j.issn.1001 – 425X.2021.10.009
- [20] 云南省镇雄县志编纂委员会. 镇雄县志[M]. 云南: 镇雄县印刷厂, 1987: 99 – 101. [Records Compilation Committee of Zhenxiong County, Yunnan Province. Records of Zhenxiong county [M]. Yunnan: Zhenxiong County Printing House, 1987: 99 – 101]
- [21] 赵春宏, 刘振波. 云南泥质岩工程特性及边坡防护措施[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, **17**(2): 166 – 167. [ZHAO Chunhong, LIU Zhenbo. Engineering characteristics and slope protection measures of argillaceous rock in Yunnan province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazards and Control, 2006, **17**(2): 166 – 167] DOI: 10.3969/j.issn.1003 – 8035.2006.02.038
- [22] 朱杰兵, 祝永锁, 汪斌, 等. 岩石冻胀力分析理论与模型综述[J/OL]. 人民长江, 2023: 1 – 7. [ZHU Jiebing, ZHU Yongsuo, WANG Bin, et al. Review on theory and model of rock frost heaving force analysis [J/OL]. Yangtze River, 2023: 1 – 7]
- [23] GB/T 32864 – 2016. 滑坡防治工程勘查规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [GB/T 32864 – 2016. Code for geological investigation of landslide prevention [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016]
- [24] TIAN Shufeng, LI Yujia, HU Guisheng, et al. Preliminary analysis on the formation mechanism of the unexpected catastrophic Qijiaba landslide in a tectonically non-active hilly area of China [J]. Landslides, 2023, **20**(2): 409 – 420. DOI: 10.1007/s10346 – 022 – 01990 – 9
- [25] XU Huiyuan, LIU Quanyou, JIN Zhijun, et al. Organic compounds in geological hydrothermal systems: A critical review of molecular transformation and distribution [J]. Earth-Science Reviews, 2024 (252): 104757. DOI: 10.1016/j.earscirev.2024.104757
- [26] HALLET, B. Why do freezing rocks break? [J]. Science, 2006, **314**(5802): 1092 – 1093. DOI: 10.1126/science.1135200

## Field Survey of the Zhenxiong Landslide on January 22, 2024 in Yunnan Province, China

CHEN Ningsheng<sup>1,2,3</sup>, WU Mingyang<sup>2,4</sup>, LI Anhui<sup>2,5</sup>, TIAN Shufeng<sup>2,3</sup>, SHE Debin<sup>2</sup>

(1. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 2. Institute of Mountain

Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, 610299, China; 3. Institute of Plateau Science and

Sustainable Development Research, Qinghai Provincial People's Government – Beijing Normal University, Xining, 810016, China

4. College of Public Safety and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

5. College of Engineering, Tibet University, Lhasa 850013, China)

**Abstract:** At 5:51 a. m. on January 22, 2024, a catastrophic landslide struck Liangshui village, Tangfang town, Zhenxiong county, Zhaotong city, Yunnan province, China, resulting in 44 casualties at two Sub-Village at Hexing and Heping. A emergency team was organized to examine the genesis of the landslide using on-site investigation, UAVs aerial photography and remote sensing interpretation.

(1) The Zhenxiong landslide was categorized as a small-scale geo-catastrophe, with sliding mass volume about 118 800 m<sup>3</sup>, but badly led to 44 deaths.

(2) Prior to the occurrence, the original slope body developed a density of joint fractures up to 1.4/m, and weathering cross-sections were found in up to 60% of stacked rocky screes, suggesting before the slope failure there



had been a critical stable state.

(3) It is quite evident that the action of low-temperature frost heaving on unstable slope ultimately triggered the landslide. Three factors, the ponding/infiltrating at the rear edge of the slope shoulder, the interbedding stratum of stone-mudstone and the persistent low-temperatures ahead of the sliding laid the foundation for the catastrophe.

The occurrence of such a small-scale landslide but severe consequence occurring in winter is highly unexpected, and it needs to be given high scientific concern.

**Key words:** the Zhenxiong “1 · 22” Landslide; ponding/infiltrating at slope shoulder; low-temperature; frost heaving

(责任编辑 朱颖彦 李嵘)