

缓倾红层地区岩质崩塌基本特征及成因机理初步分析

刘文, 余天彬, 王猛, 宋班, 黄细超, 董继红, 江煜, 孙渝江

Preliminary analysis on basic characteristics and mechanism of rockfalls in layered red rocks with gentle dip angle: A case study of the Tiejiangwan rockfall in Hongya County, Sichuan Province

LIU Wen, YU Tianbin, WANG Meng, SONG Ban, HUANG Xichao, DONG Jihong, JIANG Yu, and SUN Yujiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202206027>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

肯尼亚裂谷区地裂缝特征及成因分析

Analysis of the characteristics and causes of ground fissures in Kenya rift region

谭鹏, 刘阳, 蒋富强, 温欣岚, 王飞永, 贾智杰 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 53-62

广州夏茅村岩溶地面塌陷成因机理与塌陷过程分析

Analysis on formation mechanism and process of karst collapse in Xiamao Village, Guangzhou City of Guangdong Province

郭宇, 周心经, 郑小战, 李晶晶 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 54-59

北京雁栖镇典型危岩基本特征及稳定性分析

Basic characteristics and stability evaluation of dangerous rockmasses in Yanqi Town, Beijing

夏相骅, 刘德成, 李玉倩, 高雪媛 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 28-34

三峡库区巫峡剪刀峰顺层岩质岸坡破坏模式分析

An analysis on the destruction mode of Wuxia scissors peak down the shore slope in the Three-Gorges Reservoir area

王平, 胡明军, 黄波林, 张枝华, 郑涛, 吴坤达, 毛博 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 52-61

西南红层地区地质灾害发育规律与成灾模式

Developing law and disaster modes of geohazards in red bed region of southwestern China: A case study of Yiliang County of Yunnan Province

徐伟, 冉涛, 田凯 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 127-133

三峡库区典型顺斜向岩质滑坡变形破坏特征及失稳机制分析

Deformation characteristics and failure mechanism of large-scale obliquely dip rock landslide in the Three Gorges Reservoir Region

蒋先念, 张晨阳 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 36-42



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202206027

刘文, 余天彬, 王猛, 等. 缓倾红层地区岩质崩塌基本特征及成因机理初步分析——以四川洪雅铁匠湾崩塌为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(5): 54-63.

LIU Wen, YU Tianbin, WANG Meng, et al. Preliminary analysis on basic characteristics and mechanism of rockfalls in layered red rocks with gentle dip angle: A case study of the Tiejiangwan rockfall in Hongya County, Sichuan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(5): 54-63.

缓倾红层地区岩质崩塌基本特征及成因机理初步分析 ——以四川洪雅铁匠湾崩塌为例

刘 文, 余天彬, 王 猛, 宋 班, 黄细超, 董继红, 江 煜, 孙渝江

(四川省综合地质调查研究所(稀有稀土战略资源评价与利用四川省重点实验室),
四川 成都 610081)

摘要: 红层区常发育缓倾角岩质边坡, 因其软硬相间的岩性组合, 地质灾害频发, 灾害严重。基于光学卫星遥感、无人机航空摄影测量、现场调查等空地一体化的技术手段, 以 2021 年 4 月 5 日发生的四川洪雅铁匠湾缓倾角红层岩质崩塌为研究对象, 探讨了崩塌的基本特征和成因机理, 分析了铁匠湾陡崖区崩塌灾害发展趋势, 以期对红层区类似灾害的研究提供资料支撑。结果表明: 铁匠湾崩塌可分为主崩塌区和崩塌影响区两个区域, 其中主崩塌区包括崩源区 1 处、铲刮区 1 处、堆积区 1 处、流水二次搬运堆积区 1 处, 崩塌影响区包括潜在崩源区 1 处、扰动变形区 5 处。崩塌源区具有“上硬下软”的岩石组合, 岩体发育两组近于垂直的优势结构面, 2013 年已表现出变形迹象, 在降雨、温差的持续作用下导致源区危岩体的最终失稳垮塌, 巨大的冲击力作用于危岩体下方的老崩塌堆积体和基岩, 引起崩塌-碎屑流灾害链。在光学遥感影像解译和野外调查的基础上, 认为铁匠湾崩塌存在二次崩塌的风险, 在崩塌邻区识别出类似崩塌隐患点 6 处, 建议采用无人机、机载 LiDAR 等技术手段开展铁匠湾陡崖区崩塌隐患的早期识别与持续监测。

关键词: 崩塌; 分区特征; 成因机理; 缓倾角; 红层地区

中图分类号: P642.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2023)05-0054-10

Preliminary analysis on basic characteristics and mechanism of rockfalls in layered red rocks with gentle dip angle: A case study of the Tiejiangwan rockfall in Hongya County, Sichuan Province

LIU Wen, YU Tianbin, WANG Meng, SONG Ban, HUANG Xichao, DONG Jihong, JIANG Yu, SUN Yujiang
(Sichuan Institute of Comprehensive Geological Survey(Evaluation and Utilization of Strategic Rare Metals and Rare Earth
Resource Key Laboratory of Sichuan Province), Chengdu, Sichuan 610081, China)

Abstract: Gentle dip angle rock slopes are often developed in layered red rocks, which are prone to geological disasters due to the combination of soft and hard lithology. This paper discusses the Tiejiangwan rockfall that occurred on April 5, 2021, in Hongya County of Sichuan province, China, on a layered red rocks slope with a gentle dip angle. Using an air-space-ground integrated earth observation network, including optical remote sensing, UAV aerial photogrammetry, and on-site investigation,

收稿日期: 2022-06-23; 修订日期: 2023-02-03 投稿网址: <https://www.zgdzzyfzxb.com/>

基金项目: 四川省地质灾害隐患遥感识别监测及高分遥感应用服务项目(N5100012022001470)

第一作者: 刘 文(1990-), 男, 地质工程专业, 硕士, 工程师, 主要从事遥感地质、地质灾害研究。E-mail: liuwen2009.hi@163.com

通讯作者: 余天彬(1988-), 男, 地质工程专业, 硕士, 工程师, 主要从事地质灾害遥感应用研究。E-mail: 251499051@qq.com

the study analyzes the basic characteristics and mechanism of rockfall and predicts the development trend of similar disasters in the steep cliff area of layered red rocks. The results show that the Tiejiangwan rockfall can be divided into two areas, namely the main rockfall area and the rockfall influence area. The main rockfall area comprises one rockfall source area, one shoveling area, one accumulation area, and one water secondary transportation accumulation area. The rockfall influence area includes one potential rockfall source area and five disturbance deformation areas. The rockfall source area has a combination of hard rocks at the top and soft rocks at the bottom, and the rock mass develops two groups of nearly vertical dominant structural planes. In 2013, the source area showed signs of deformation, which eventually lead to the instability of the dangerous rock mass due to the continuous effect of rainfall and temperature differences. The huge impact force caused the rockfall debris flow disaster chain, affecting the old rockfall accumulation body and bedrock under the dangerous rock mass. Optical remote sensing images and field investigation indicate the risk of secondary collapse in Tiejiangwan rockfall. Additionally, six similar potential rockfalls were identified in the adjacent area. To prevent similar disasters, it is recommended to use UAV aerial photography and airborne LiDAR for early identification and continuous monitoring of potential rockfalls in the steep cliff area of the Tiejianwan. The findings of this study provide valuable data support for the study of similar disasters in layered red rocks.

Keywords: rockfall; zoning characteristics; genetic mechanism; gentle dip angle; layered red rocks

0 引言

红层是指岩石颜色以红色系为主,岩性主要为砾岩、砂岩、黏土质岩等中生代-新生代的湖相、河湖交替相或是山麓洪积相等陆相碎屑岩^[1]。四川是我国西南地区红层分布极为广泛的省份之一,主要分布在盆地内部及边缘地区^[2],因其软硬相间的岩性组合,地质灾害频发、灾害严重,其中滑坡、崩塌是主要的灾害类型。在灾害发育分布规律方面,彭华等^[3]初步探讨了我国红层特点及分布规律。曹先康等^[4]将四川巴中的红层滑坡划分为浅表层土质滑坡、深厚层土质滑坡和缓倾顺层岩质滑坡等3类,研究了其分布规律和发育特征。在成灾机理与变形过程方面,马贤杰等^[5]基于滑坡的地层岩性和滑坡倾角,提出了红层地区滑坡的分类方案,总结了滑坡的发育模式。张涛等^[6]通过对川东地区典型红层缓倾岩质滑坡的调查研究,提出了该类滑坡的变形演化阶段及野外识别标志。王家柱等^[7]以马边县红层地区的黄子树滑坡为例,在工程地质调查的基础上研究了滑坡的发育特征和形成机制,并通过数值模拟还原了滑坡的运动特征。徐伟等^[8]以云南彝良县红层地区崩塌、滑坡为研究对象,总结了不同斜坡结构条件边坡的成灾模式和破坏过程。王军朝等^[9]在川东缓倾角红层地区划分出贯通型倾倒式、贯通型滑移式、非贯通型错断式、非贯通型拉裂式等4类崩塌,并对其岩性组合、斜坡结构特征、演变过程进行了系统总结。胡斌等^[10]以西南红层地区软硬互层型公路边坡为例,在边坡地质结构特征调查的基础上,研究了砂泥岩互层边坡崩塌形成机理、变形破坏模式及其稳定性。在灾害影响因素

方面,郭永春等^[11]在分析我国红层分布特征的基础上,提出红层中存在砂岩、泥岩等软硬互层的结构,在工程活动等因素的影响下,沿软弱结构面易发生滑坡。李江等^[12]、张群等^[13]以四川省南江县50个红层缓倾角土质滑坡为研究对象,深入研究了该类型滑坡的发育环境、分布规律和影像因素,在降雨条件下,浸润峰深度是影响该类滑坡失稳的主要原因。连续性降雨可导致坡体地下水位逐步升高,稳定性逐步降低^[14]。近年来,红层软岩吸水膨胀引起的工程问题越来越多,受到学者的广泛关注^[15-16]。值得一提的是,红层后期受构造影响相对较弱,地层产状平缓,常形成典型的软硬互层缓倾角岩质边坡,当雨水入渗至层理面及优势结构面后,岩体抗剪强度大幅度下降,尤其是软弱夹层遇水膨胀、脱水收缩,与非红层地区的崩塌相比,其崩塌机理具有一定的特殊性,红层区缓倾角岩质崩塌受后缘拉裂缝、软硬岩体差异性风化形成凹岩腔的控制明显,降雨入渗和临空条件是诱发崩塌的主要因素。

2021年4月5日,四川省眉山市洪雅县柳江镇赵河村13组铁匠湾发生高位崩塌地质灾害,源区红层的特点是岩层产状较为平缓,崩塌发生时危岩体大面积垮塌,最远移动至2 km外的赵河河道,损毁洪瓦路约200 m、居民房屋5处,造成3人失踪、68人生产生活受到不同程度影响。本文在室内解译、野外调查的基础上,详细划分崩塌的分区特征,初步探讨崩落体的动力学特征和危岩体的变形历史,开展崩塌的成因机理研究,分析崩塌邻区潜在崩塌隐患的发育情况和发展趋势,以期对区域上类似灾害的防范提供资料支撑。

1 地质环境条件

铁匠湾崩塌属于浅切割中山地貌,区域上该地貌主山脊近东西向展布,支脊近南北向延伸,沟深坡陡,峰峦叠嶂,瓦屋山一带多形成陡崖,植被发育,林地覆盖率 75%~90%。年降雨量约 1 435.5 mm,年平均气温约 16.6 °C,属于中亚热带湿润气候。研究区水系属于青衣江右岸支流花溪河的一部分,以小型溪沟(赵河)为主。

崩塌区及邻区出露夹关组(K_{2j})、蓬莱镇组(J_{3p})、

遂宁组(J_{2sn})、沙溪庙组(J_{2s})等中生代陆相沉积地层^[17]。其中,夹关组(K_{2j})以棕红色厚—巨厚层砂岩夹少量粉砂质泥岩为主,底部有数米厚的砾岩;蓬莱镇组(J_{3p})以棕红、砖红色中厚层—厚层泥岩、粉砂质泥岩为主;遂宁组(J_{2sn})以棕红、砖红色中厚层—厚层泥岩、粉砂质泥岩夹微量钙泥质细砂岩为主;沙溪庙组(J_{2s})上部为灰绿、紫灰色中厚层—厚层岩屑砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩、薄层页岩,下部为紫红、绿、灰色薄—中厚层粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、钙砂岩互层(图 1)。

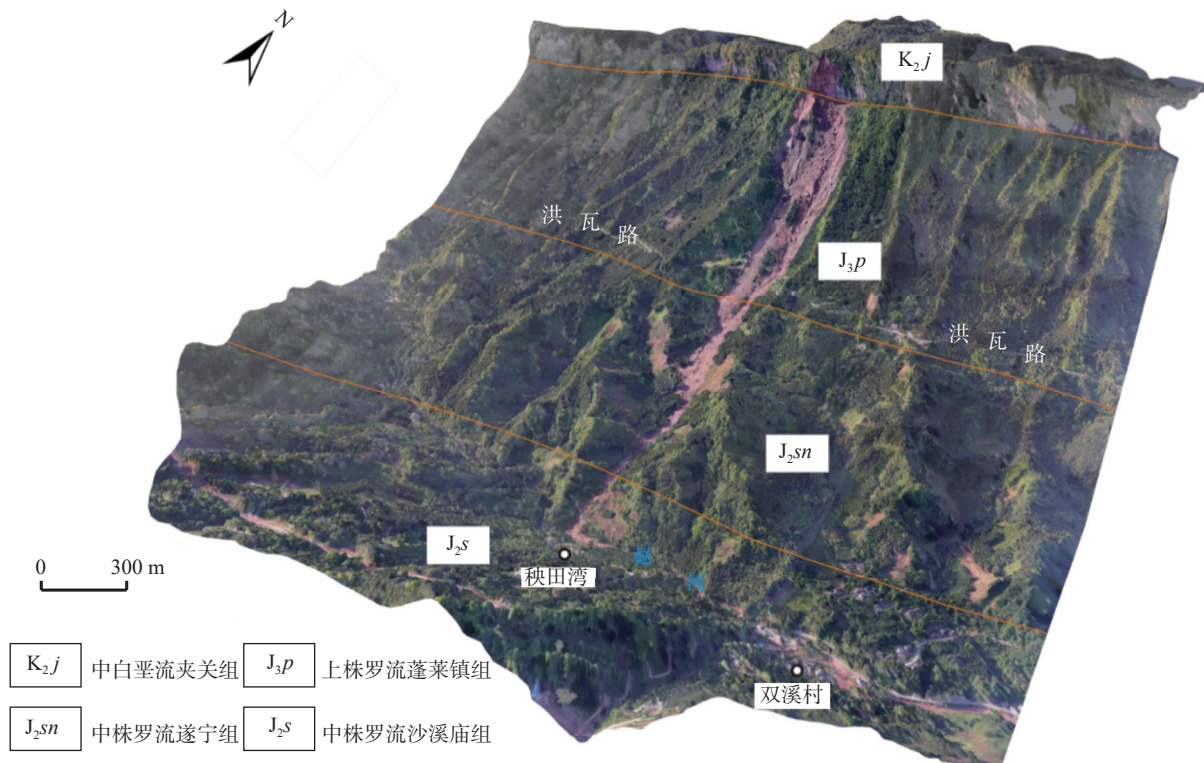


图 1 铁匠湾崩塌区域地质简图

Fig. 1 Regional geological map of the Tiejingwan rockfall

崩塌区整体为单斜构造,以崩源区为中心,5 km 范围内未见断层发育,断层对崩塌源区无直接影响。研究区及邻区近年来发生的地震活动有 2013 年 4 月 20 日雅安芦山地震,震中距离崩源区约 71 km,崩塌发生前无可能影响坡体稳定性的相关地震报道,研究区区域构造背景相对稳定。

2 数据来源及研究方法

本研究收集的数据主要包括 1:20 万区域地质调查资料,崩塌前的多期亚米级光学遥感影像、数字高程模型(DEM)数据,崩塌后的无人机影像(正射、倾斜摄影),崩塌前后的降雨资料等。收集的数据基于不同的存储平台,数据格式、坐标系统多样化,本次采用 2000

国家大地坐标系、高斯-克吕格投影为匹配基准,进行相应的格式转化、坐标系投影变换,最终将区域地质、地质灾害数据统一到同一平台,建立研究数据库。本次首先通过对区域地质调查资料、多期光学遥感影像的分析,查明铁匠湾崩塌的地质环境条件、崩源区变形历史,其次在获取无人机影像(崩塌后)的基础上探讨崩塌分区特征和崩落体动力特性,最后开展崩塌成因及邻区崩塌灾害隐患的发展趋势分析。

3 铁匠湾崩塌特征

3.1 崩塌分区特征

崩塌发生后,根据无人机光学影像,结合现场调查,铁匠湾崩塌光学影像色调整体呈暗紫红色,纹理较

粗糙;崩源区可见砖红色带状图斑,走向近东西向,与周边墨绿色植被形成对比,为崩塌危岩体,岩层产状近于水平,可见明显的近期崩落面;崩塌堆积区呈带状沿斜坡分布,色调呈紫红色,纹理较粗糙,堆积区下部有雅赵公路和分散农户。崩塌纵长约1 810 m,顶宽约181 m,主崩方向178°,平面面积约 $21.64 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。崩塌海拔高程介于1 610(崩源区)~871 m(堆积区前缘),垂直高差约739 m。根据变形和运动特征,可以分为主崩塌区和崩塌影响区两大部分:主崩塌区分为崩源区1处、铲刮区1处、堆积区1处、流水二次搬运堆积区1处;崩塌影响区为崩塌发生时,受牵引作用的影响,局部发育拉裂缝,在崩源区后缘和铲刮堆积区两侧形成欠稳定块体,包括潜在崩源区1处、扰动变形区5处(表1、图2)。

表1 铁匠湾崩塌光学遥感精细解译统计表
Table 1 Statistical table of optical remote sensing interpretation in Tiejingwan rockfall

名称	编号	面积/m ²	厚度/m	估算体积/(10 ⁴ m ³)
潜在崩源区	I	2 311	110	25.42
崩源区	II	9 578	110	105.36
铲刮区	III	30 573	15	45.86
堆积区	IV	146 296	10	146.30
流水二次搬运堆积区	V	8 852	3	2.66
扰动变形区	A	4 836	15	7.25
	B	2 874	10	2.87
	C	9 190	5	4.60
	D	3 104	5	1.55
	E	2 004	5	1.00

3.1.1 主崩塌区

(1)崩源区(II)

崩塌源区位于铁匠湾斜坡上部的陡崖处,斜坡整体坡度约86°,顶部高程约1 610~1 600 m,下部剪出口高程约1 500 m。崩源区岩层产状近于水平,产状 $1^\circ \angle 5^\circ$,为岩层面缓倾坡内的岩质坡,崩落岩体平均长度约181 m,宽度约65 m,平均厚度(高度)约110 m,崩塌体积约 $105.36 \times 10^4 \text{ m}^3$,见图2(a)~(c)。崩塌物质主要为夹关组棕红色砂岩、砾岩,岩体发育两组近于垂直的节理,产状分别为 $9^\circ \angle 80^\circ$ 、 $97^\circ \angle 73^\circ$ 。

(2)铲刮区(III)

铲刮区主要分布在高程1 500~1 310 m,斜坡整体坡度约42°,当上部砂岩、砾岩岩体突然失稳向下崩落,以巨大的动能和势能作用于下部斜坡表面,被铲刮的物质包括残坡积物、老崩塌堆积及其下部基岩,铲刮作用使得下部基岩出露,坡体后退约15 m。铲刮区平均长

度约287 m,宽度约238 m,平均铲刮厚度约15 m,铲刮体积约 $45.86 \times 10^4 \text{ m}^3$,见图2(a)、(d)。

(3)堆积区(IV)

崩塌堆积区斜坡坡度相对较缓,堆积区顶部向下至洪瓦路区间段斜坡整体坡度约21°,洪瓦路向下至赵河区间段整体坡度约13°,具有上陡下缓的坡度特征。斜坡体表层以松散的残坡积层为主,下部基岩以易风化的泥岩、页岩为主,在洪瓦路两侧分布有分散农户,当途经铲刮区的崩落体继续高速向下运动,各崩落块体间相互碰撞解体,巨大的动能使得堆积区后部坡表的残坡积及上部植被、建筑物、公路等被高速铲刮和推挤,并将残坡积物推挤到堆积区中前部,根据洪瓦路铲刮错动出露的剖面推测被铲刮残坡积平均厚度约5 m。堆积区顶部向下至洪瓦路区间段位于堆积区中后部,分布有大量岩石碎块,成份主要为砂岩、砾岩,块径最大者可达20 m,以5~8 m居多,向下块径呈逐渐减小的趋势;洪瓦路向下至赵河区间段位于堆积区中前部,斜坡坡度进一步变缓,堆积物粒度亦相对较小,堆积体厚度逐渐加大。堆积区平均长度约1 500 m,宽度约130 m,呈倒梯形,平均堆积厚度约10 m,堆积体积约 $146.30 \times 10^4 \text{ m}^3$,见图2(a)、(e)。

(4)流水二次搬运堆积区(V)

崩塌堆积区前部堵塞赵河河道,成分以泥沙为主,夹少量碎石块,在赵河流水二次搬运作用下,沿河道继续向下游运动,最远运动至双溪村,运动距离约580 m,按平均厚度3 m估算,流水二次搬运堆积体积约 $2.66 \times 10^4 \text{ m}^3$,见图2(a)。

3.1.2 崩塌影响区

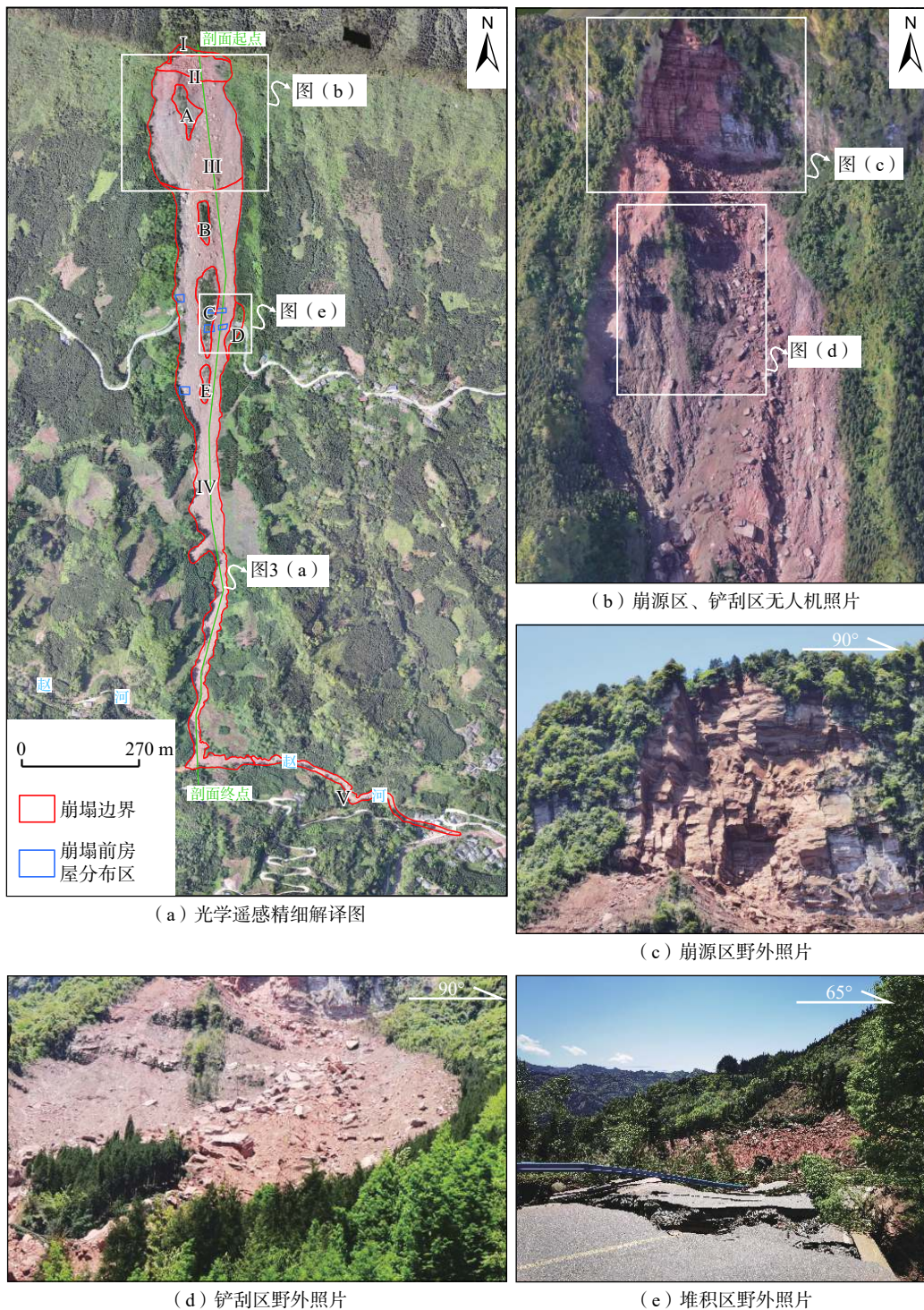
崩塌影响区为崩塌发生时,受牵引作用的影响,局部发育拉裂缝,在崩源区后缘和铲刮堆积区两侧形成欠稳定块体,分为潜在崩源区和扰动变形区两种类型。

(1)潜在崩源区(I)

崩塌发生后,在崩源区后部形成环状危岩带,根据无人机光学影像,主崩区正后方发育有一系列走向约90°的拉裂缝,影像上呈凹槽状,岩性为夹关组棕红色砂岩、砾岩,潜在崩源区紧邻已崩落的崩源区,推测岩体仍发育两组近于垂直的节理。环状危岩带长度约180 m,宽度约15 m,平均厚度(高度)参照已崩落的崩源区厚度约110 m,崩塌体积约 $25.42 \times 10^4 \text{ m}^3$,见图2(a)。

(2)扰动变形区(A—E)

铁匠湾崩塌主崩方向约178°,受南北走向近于平行排列的山脊等微地貌影响,崩落体运动方向大致与南北向微地貌走向一致,沿沟谷向下高速运动的崩落体铲



(a) 光学遥感精细解译图

(b) 崩源区、铲刮区无人机照片

(c) 崩源区野外照片

(d) 铲刮区野外照片

(e) 堆积区野外照片

图 2 铁匠湾崩塌分区特征及野外照片

Fig. 2 Subarea features and field photos of the Tiejingwan rockfall

刮、推挤沟道两侧岩土体,对岩土体造成扰动变形破坏,局部形成拉裂缝。扰动变形区沿原有山脊呈断续透镜状排列,铲刮区发育扰动变形区(A),变形区长度约 148 m,宽度约 64 m,根据邻区铲刮出露的剖面推测厚度约 15 m,推测体积约 $7.25 \times 10^4 \text{ m}^3$;堆积区发育扰动变

形区 4 处,变形区(B)长度约 120 m,宽度约 33 m,根据邻区铲刮出露的剖面推测厚度约 10 m,推测体积约 $2.87 \times 10^4 \text{ m}^3$;变形区(C)长度约 240 m,宽度约 45 m,根据邻区铲刮出露的剖面推测厚度约 5 m,推测体积约 $4.60 \times 10^4 \text{ m}^3$;变形区(D)长度约 122 m,宽度约 30 m,根

据邻区铲刮出露的剖面推测厚度约 5 m, 推测体积约 $1.55 \times 10^4 \text{ m}^3$; 变形区(E)长度约 100 m, 宽度约 17 m, 根据邻区铲刮出露的剖面推测厚度约 5 m, 推测体积约 $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3$, 见图 2(a)。

3.2 崩落体动力特征分析

铁匠湾崩塌垂直高差 $H=739 \text{ m}$, 水平距离 $L=1\ 853 \text{ m}$, 崩落体的等价摩擦系数(崩塌碎屑流运动特性参数) $\mu=H/L=0.398\ 8$, 远小于国际公认的岩质材料摩擦系数经验值 0.6, 说明铁匠湾崩塌主崩落体失稳后发生了远程运动, 为高速远程崩塌碎屑流灾害。为探讨崩塌

发生后所形成碎屑流的动力学特征, 采用谢得格尔法对崩落体沿途运动速度进行估算^[18], 计算公式为: $v=\sqrt{2g(H-\mu L)}$, 其中, v 为崩落体速度, 单位 m/s ; g 为重力加速度, 取 9.8 m/s^2 ; H 为崩落体自崩塌壁后缘顶点运动至计算点的垂直高差, 单位 m ; L 为崩落体自崩塌壁后缘顶点运动至计算点的水平距离, 单位 m ; μ 为崩落体的等价摩擦系数, 取 $\mu=H/L=0.398\ 8$ 计算。由此可计算出崩塌-碎屑流从失稳、高速运动到停止各阶段的运动速度(图 3), 大致在堆积区后缘, 崩塌-碎屑流达最大运动速度约 60 m/s 。

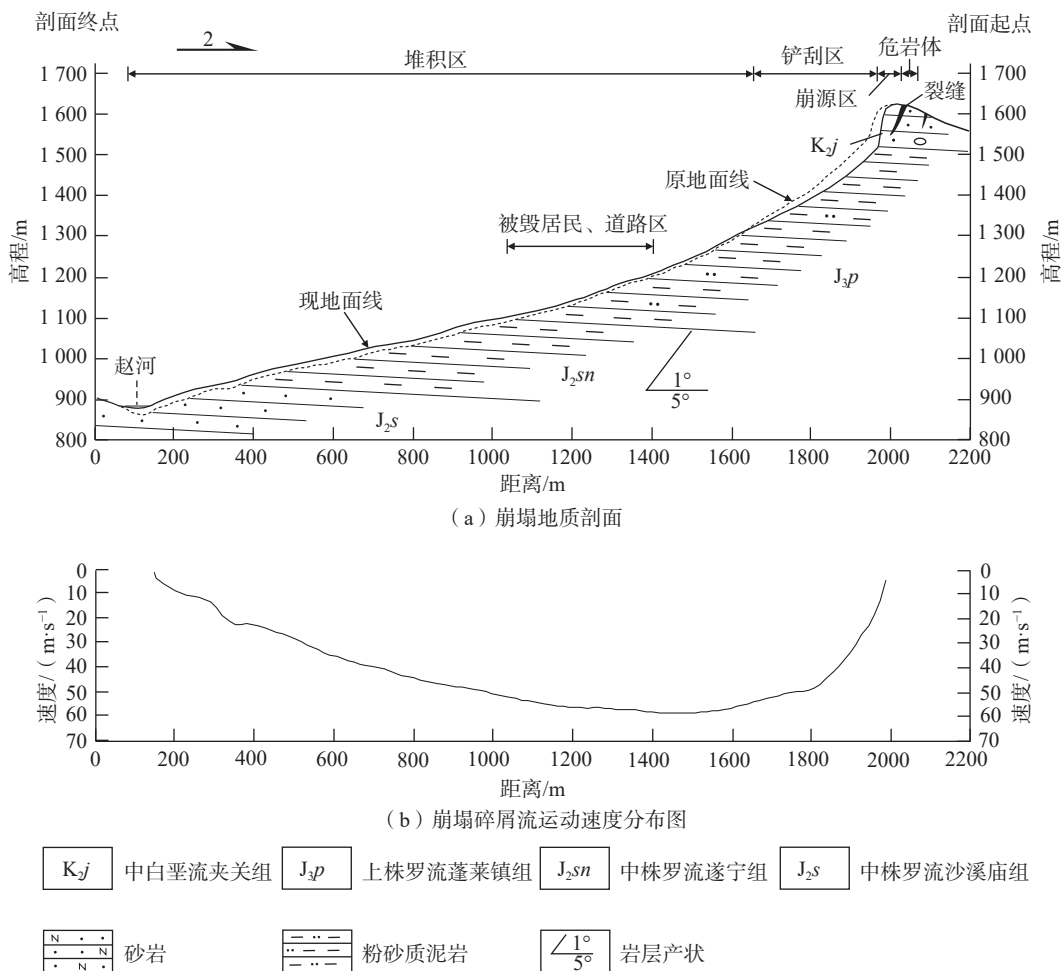


图 3 剖面图和速度分布图

Fig. 3 Geological cross-section diagram of the rockfall and velocity distribution of the debris flow movement

3.3 崩源区危岩体变形历史与形成机理

根据 2013—2021 年光学遥感数据(图 4), 对崩源区危岩体宏观变形情况进行动态分析, 2013 年 4 月 17 日 WorldView-2 光学影像显示, 崩源区右侧已开始出现小规模崩落现象, 在危岩带下部斜坡形成长约

161 m, 宽约 16 m 的带状堆积体, 植被基本崩落体铲刮和覆盖, 崩落岩块块径最大者约 10 m, 运动最远处距崩落区约 230 m; 到 2018 年 11 月—2019 年 2 月, WorldView-2 光学影像显示危岩体未出现大面积的失稳崩落迹象, 但危岩体下部斜坡溜滑迹象的数量和规模呈逐渐增加

的趋势,溜滑作用可在危岩体下部形成岩腔,为危岩体的失稳准备了条件;直至 2021 年 4 月 5 日,危岩体大面积失稳,引发了铁匠湾崩塌-碎屑流高位远程灾害。2013—2021 年变形历史表明,铁匠湾崩塌变形特征可大致分为“坡面局部崩落—整体失稳崩塌—撞击铲刮坡面—碎屑流”四个发展阶段,崩塌形成机理上属于拉裂式崩塌,具有如下特征:在岩性方面,崩源区为砂岩、砾岩夹泥岩的软硬互层结构,岩性差异大;在岩体结构方面,崩源区发育两组近于垂直的风化裂隙和重力拉张

裂隙,继承了地质历史时期的构造节理;在微地貌与受力状态方面,随着岩体差异性风化,砂岩、砾岩区较泥岩区抗风化能力强,形成突出的悬崖,在野外较易识别上凸下凹的陡崖地貌,应力状态上部受拉、下部受压,上部岩体在拉应力、水压力、冻胀作用、根劈作用下,近于垂直的构造裂隙不断向下扩展,在裂隙末端形成应力集中区,并逐渐与邻区裂隙贯通形成裂缝带,一旦拉应力超过岩石抗拉强度,上部岩石发生失稳,表现为向坡外的拉裂倾倒变形。

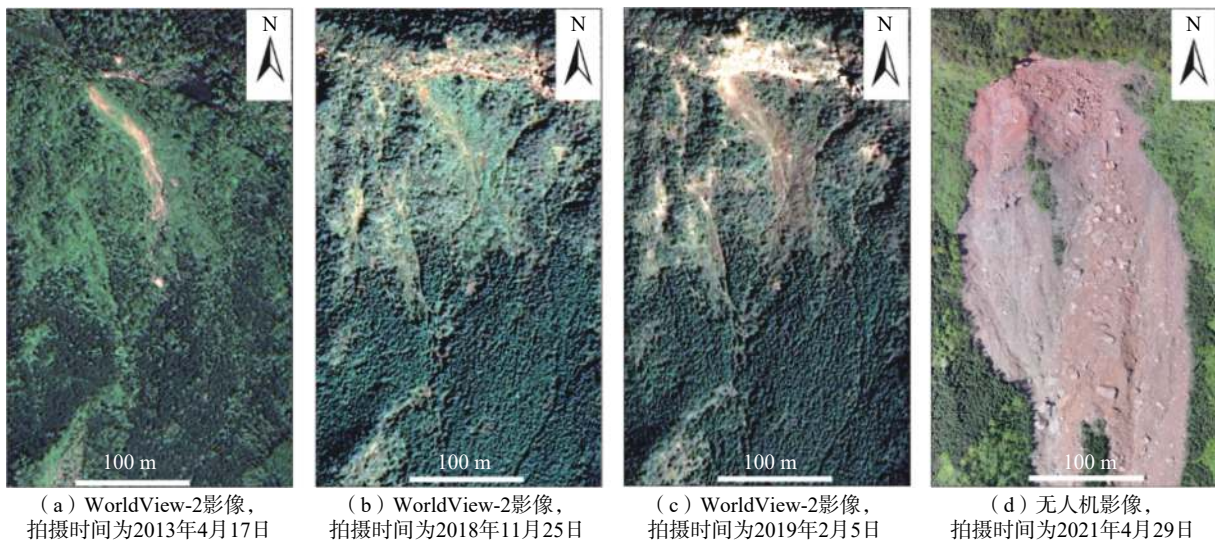


图 4 铁匠湾崩塌源区多期遥感影像对比图

Fig. 4 Multi-period remote sensing images comparison of the source area of the Tiejingwan rockfall

4 成因及趋势分析

4.1 崩源区岩体结构条件

铁匠湾崩塌崩源区危岩体位于夹关组底部,岩性为棕红色砂岩、砾岩,岩层产状 $1^\circ \angle 5^\circ$,危岩体下部为蓬莱镇组棕红、砖红色泥岩,形成“上硬下软”的岩石组合,因差异性风化等因素,泥岩易于风化而形成岩腔,风化较慢的砂岩在上部形成陡崖或凸出的剖面形态,陡崖高度约 110 m。从应力状态来看,该类型剖面往往上部受拉形成拉张裂隙,下部处于挤压状态,同时受地质时期区域构造运动的影响,砂岩发育两组近于直立的节理,产状分别为: $9^\circ \angle 80^\circ (J_1)$, $97^\circ \angle 73^\circ (J_2)$,节理与岩层面共同将砂岩切割成巨大块体,其中 J_1 节理与斜坡走向大体一致,且为陡倾节理,为岩体的失稳创造了条件。

4.2 气候条件

崩塌发生前一周内洪雅县柳江镇赵河村进入昼夜

温差大、持续降雨的过程,本次收集了距离崩塌较近的峨眉山雨量站的气象数据,3月31日研究区开始降雨,一直持续到崩塌发生后,由于崩塌位于斜坡后缘,崩源区砂砾岩裂缝发育,下部泥岩为隔水层,有利于雨水的汇聚,逐渐降低了岩体的抗剪切强度,增加了斜坡岩土体的静水压力,增大了斜坡的不稳定性,加上4月3日以来,昼夜温差逐渐增大,在崩塌发生当天昼夜温差达 12.6°C ,在水压、冻胀等作用下裂隙、节理在山体内部不断扩展、贯通,直至拉应力超过岩石的抗剪强度,危岩体失稳引发崩塌地质灾害(图 5)。

4.3 铁匠湾陡崖区崩塌发展趋势

根据铁匠湾崩塌的变形历史,坡面岩体局部崩落在崩塌发生前的数年内可观察到其变形特征,铁匠湾陡崖区地处高位,隐蔽性强、难以接近,遥感技术是进行该类崩塌早期识别与持续监测不可或缺的手段之一。铁匠湾崩塌源区所在铁匠湾陡崖走向约 96° ,陡崖沿走向延伸约 9.6 km,铁匠湾崩塌以西约 2.4 km,以东约

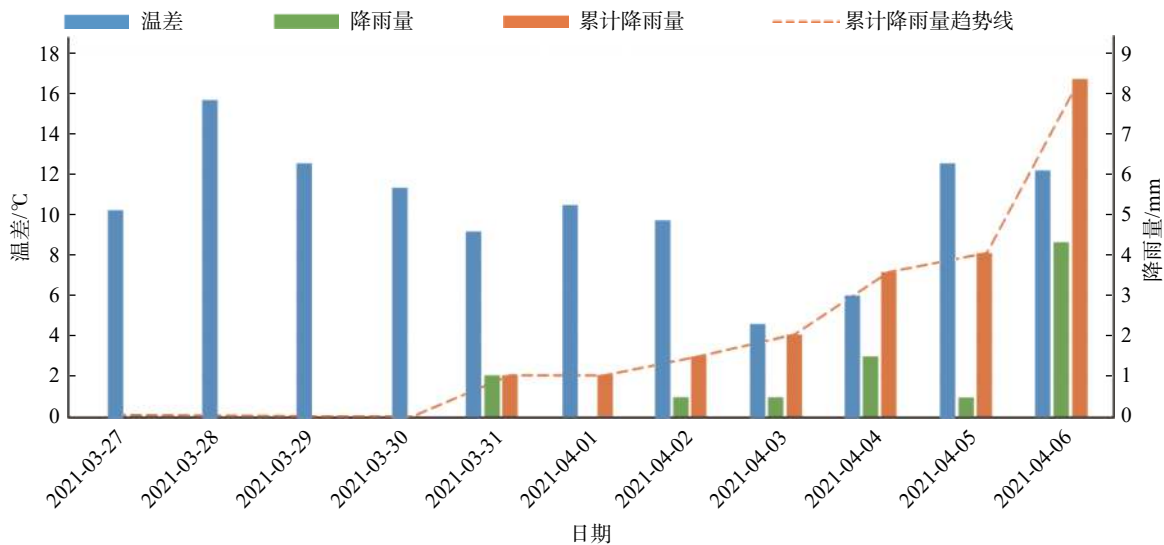


图5 崩塌前降雨过程和温差变化柱状图

Fig. 5 Histogram of rainfall process and temperature variation before rockfall

7.2 km, 陡崖所在区域具有极其相似的孕灾地质环境条件,为潜在崩塌危岩带。陡崖区后缘至坡脚的相对高差由东至西呈逐渐递减的趋势,东侧相对高差约 200 m,西侧相对高差约 100 m。陡崖区受地层控制作用明显,分布范围与夹关组棕红色厚—巨厚层状砂岩夹粉砂质泥岩的位置大体一致,地层变形迹象弱,层理产状近于水平,砂岩与粉砂质泥岩接触部位常形成阶梯状的地形,上部砂岩往往临空。受地质历史时期区域构造作用的影响,陡崖区普遍发育与铁匠湾崩塌源区产状大体一致的两组近于直立的优势结构面,切割水平层理将岩体分成菱形块体,见图 6(a)—(c)。陡崖区基岩裸露,植被整体覆盖少,东侧植被较西侧多,以低矮灌木为主,陡崖区后缘为山脊,地势相对平坦,植被茂密,以高大乔木为主,植被根系往往沿近于直立的优势结构面生长,利于地表水下渗,促进了冻胀作用、根劈作用等外动力地质作用的发生,陡崖区坡脚处为地形由陡变缓的过渡部位,同时也是夹关组砂岩与蓬莱镇组泥岩的地质界线,界线以下斜坡坡度约 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$,残坡积层厚度大,植被茂密,以高大乔木为主。

本次基于光学遥感技术和野外调查,在铁匠湾陡崖区识别出潜在的崩塌隐患点 6 处,见图 6(e)—(j),其中铁匠湾崩塌以西 2 处(编号:QB-1、QB-2),以东 4 处(编号:QB-3、QB-4、QB-5、QB-6),新识别出的 6 处崩塌隐患点目前处于坡面局部崩落变形阶段,通过 WorldView-2 光学影像均可识别出小规模的崩落现象,其中 QB-1、QB-4 崩落迹象最明显,以上 6 处崩塌隐患点在强降雨等诱发因素下,危岩体很可能失稳引发崩塌-碎屑流地

质灾害。同时,铁匠湾崩塌发生后,受牵引作用的影响,崩塌壁后缘局部发育拉裂缝,形成有新的危岩体,存在二次崩塌的风险。建议采用无人机、机载 LiDAR 等技术手段开展铁匠湾陡崖区崩塌隐患早期识别与持续监测。

5 结论

(1)铁匠湾崩塌可分为主崩塌区和崩塌影响区 2 个区域。其中,主崩塌区包括崩源区 1 处、铲刮区 1 处、堆积区 1 处、流水二次搬运堆积区 1 处;崩塌影响区包括潜在崩源区 1 处、扰动变形区 5 处。崩塌源区在 2013 年已表现出变形迹象,其变形特征可大致分为坡面局部崩落—整体失稳崩塌—撞击铲刮坡面—碎屑流四个发展阶段,碎屑流最大运动速度约 60 m/s。

(2)崩塌源区具有“上硬下软”的岩石组合,受内外动力共同作用,内动力地质作用导致岩体发育两组近于垂直的优势结构面;外动力作用主要为降雨和温差,雨水沿近于垂直的裂隙入渗,产生静水压力,加之温度变化引起的冻胀作用,对崩塌的稳定性产生了一定影响,从而导致源区危岩体垮塌,巨大的冲击力作用于危岩体下方的老崩塌堆积体和基岩,引起崩塌-碎屑流灾害链。

(3)铁匠湾陡崖区地处高位、隐蔽性强、难以接近,基于光学遥感技术和野外调查,在铁匠湾陡崖区识别出潜在崩塌隐患点 6 处,同时铁匠湾崩塌存在二次崩塌的风险,在强降雨等诱发因素下,危岩体很可能失稳引发类似的崩塌-碎屑流地质灾害。

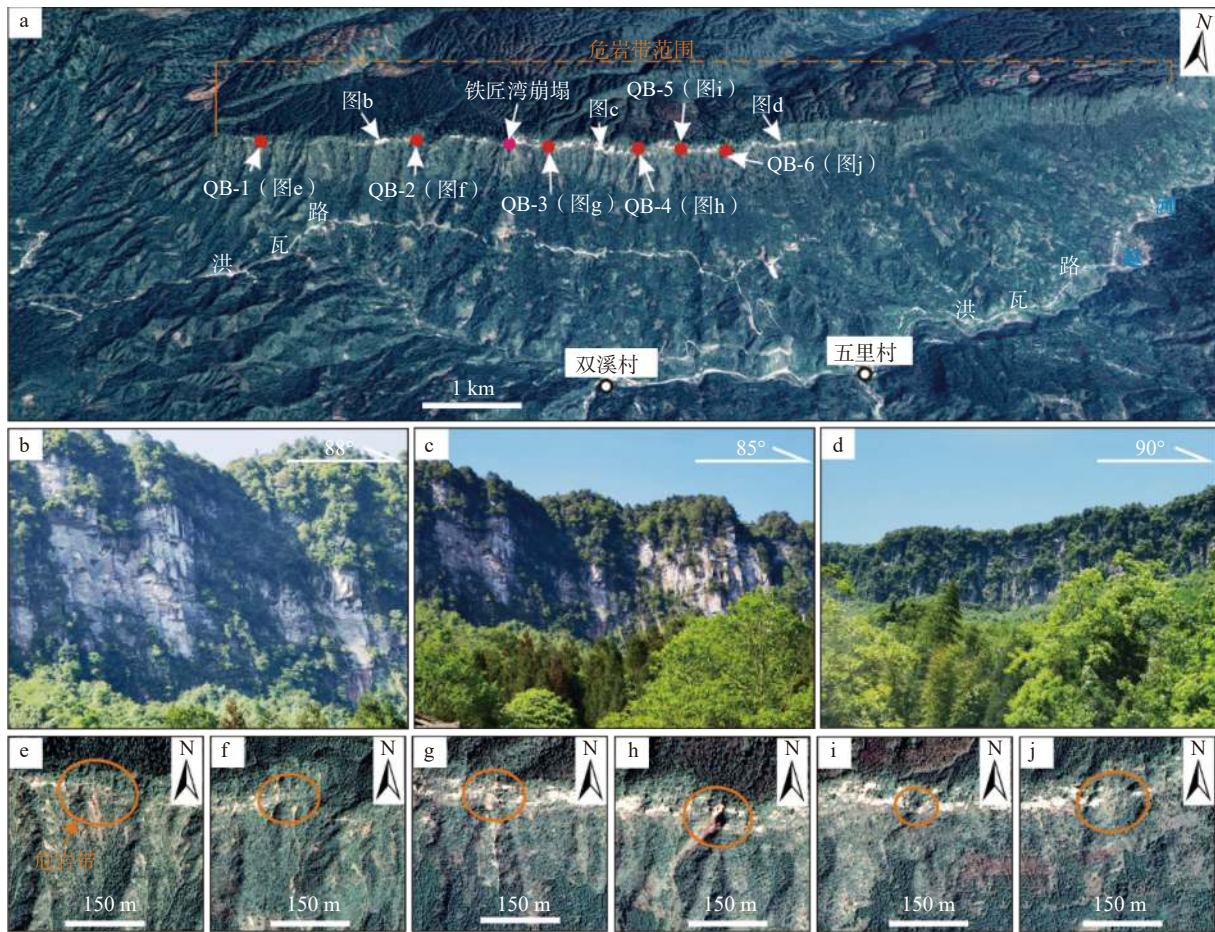


图 6 铁匠湾陡崖区及潜在崩塌隐患分布图

Fig. 6 Distribution map of the steep cliff area and potential rockfalls in the Tiejingwan area

注: a 为陡崖区 WorldView-2 光学卫星影像; b—d 为陡崖区野外照片; e—j 为潜在崩塌隐患 WorldView-2 光学卫星影像。

参考文献(References):

[1] 徐瑞春,周建军.红层与大坝[M].2版.武汉:中国地质大学出版社,2010. [XU Ruichun, ZHOU Jianjun. Red beds and dams [M]. 2nd ed. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2010. (in Chinese with English abstract)]

[2] 黄绍槟,程强,胡厚田.四川红层分布及工程环境特征研究[J].公路,2005,50(5):81-85. [HUANG Shaobin, CHENG Qiang, HU Houtian. A study on distribution of Sichuan red beds and engineering environment characteristics [J]. Highway, 2005, 50(5): 81-85. (in Chinese with English abstract)]

[3] 彭华,吴志才.关于红层特点及分布规律的初步探讨[J].中山大学学报(自然科学版),2003,42(5):109-113. [PENG Hua, WU Zhicai. A preliminary study on the characteristics and the distribution of red beds [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2003, 42(5): 109-113. (in Chinese with English abstract)]

[4] 曹先康,温智,陈海兰.四川巴中市红层地区滑坡发育特征与防范措施[J].中国地质灾害与防治学报,2019, 30(6): 20-24. [CAO Xiankang, WEN Zhi, CHEN Hailan. Landslide development characteristics and preventive measures in the area with red beds in Bazhong City, Sichuan Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(6): 20-24. (in Chinese with English abstract)]

[5] 马贤杰,张玉芳,侯李杰,等.红层地区滑坡的分类及形成机制[J].铁道建筑,2021,51(2):75-78. [MA Xianjie, ZHANG Yufang, HOU Lijie, et al. Study on classification and formation mechanism of landslide in red bed area [J]. Railway Engineering, 2021, 51(2): 75-78. (in Chinese with English abstract)]

[6] 张涛,谢忠胜,石胜伟,等.川东红层缓倾岩质滑坡的演化过程及其识别标志探讨[J].工程地质学报,2017,25(2):496-503. [ZHANG Tao, XIE Zhongsheng, SHI Shengwei, et al. Discussion on evolution process of flat rock landslide and its identification in red strata at eastern Sichuan [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(2): 496-503. (in Chinese with English abstract)]

[7] 王家柱,葛华,高延超,等.川南红层区黄子树滑坡形成

- 过程与运动特征 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(2): 9-17. [WANG Jiazhu, GE Hua, GAO Yanchao, et al. Mechanism and kinematic characteristics of Huangzishu Landslide in the red mudstone of southern Sichuan [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(2): 9-17. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 徐伟, 冉涛, 田凯. 西南红层地区地质灾害发育规律与成灾模式——以云南彝良县为例 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(6): 127-133. [XU Wei, RAN Tao, TIAN Kai. Developing law and disaster modes of geohazards in red bed region of southwestern China: A case study of Yiliang County of Yunnan Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(6): 127-133. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 王军朝, 孙金辉. 川东红层缓倾角岩质崩塌特征与稳定性分析 [J]. *地质力学学报*, 2019, 25(6): 1091-1098. [WANG Junchao, SUN Jinhui. Characteristics and stability analysis of rock collapse of low-angled red-bed slope in east Sichuan [J]. *Journal of Geomechanics*, 2019, 25(6): 1091-1098. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 胡斌, 黄润秋. 软硬岩互层边坡崩塌机理及治理对策研究 [J]. *工程地质学报*, 2009, 17(2): 200-205. [HU Bin, HUANG Runqiu. Collapse mechanism and treatment measures of slopes with interbeddings of soft and hard rocks [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2009, 17(2): 200-205. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 郭永春, 谢强, 文江泉. 我国红层分布特征及主要工程地质问题 [J]. *水文地质工程地质*, 2007, 34(6): 67-71. [GUO Yongchun, XIE Qiang, WEN Jiangquan. Red beds distribution and engineering geological problem in China [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2007, 34(6): 67-71. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 李江, 许强, 胡泽铭, 等. 红层缓倾角土质滑坡发育环境、分布规律及影响因素研究 [J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(12): 88-93. [LI Jiang, XU Qiang, HU Zeming, et al. Study on development environment, distribution characteristics and factors of soil landslides on low-angled rock formation of red bed [J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(12): 88-93. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 张群, 许强, 易靖松, 等. 南江红层地区缓倾角浅层土质滑坡降雨入渗深度与成因机理研究 [J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(8): 1447-1455. [ZHANG Qun, XU Qiang, YI Jingsong, et al. Rainfall infiltration depth and formation mechanism of slow-inclination soil landslides in Nanjiang [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(8): 1447-1455. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 廖勇, 乐建, 胡力, 等. 基于Fredlund & Xing模型的渗流分析在川东红层梯田滑坡中的应用 [J]. *水文地质工程地质*, 2023, 50(3): 104-114. [LIAO Yong, LE Jian, HU Li, et al. Application of seepage analyses based on Fredlund & Xing model in red beds terrace landslides in eastern Sichuan [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(3): 104-114. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 郭永春, 赵峰先, 闫圣龙, 等. 红层泥岩三轴膨胀力的试验研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(3): 87-93. [GUO Yongchun, ZHAO Fengxian, YAN Shenglong, et al. An experimental study of the triaxial expansion force of red-bed mudstone [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(3): 87-93. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 杨成忠, 杨鹏, 王威, 等. 红层泥质砂岩隧道进口段注浆加固及效果评价 [J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(3): 98-105. [YANG Chengzhong, YANG Peng, WANG Wei, et al. Grouting reinforcement and effect evaluation of the inlet section of a red-layer shaly sandstone tunnel [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(3): 98-105. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 四川省地质局第二区域地质测量队. 峨眉幅 1:20万区域地质测量报 [R]. 1971. [The second regional geological survey team of Sichuan Geological Bureau. Emei 1:200000 regional geological survey report [R]. 1971. (in Chinese)]
- [18] SCHEIDEGGER A E. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides [J]. *Rock Mechanics*, 1973, 5(4): 231-236.