

doi: 10.12029/gc20190201

刘传正, 吕杰堂, 童立强, 陈红旗, 刘秋强, 肖锐铎, 涂杰楠. 2019. 雅鲁藏布江色东普沟崩滑-碎屑流堵江灾害初步研究[J]. 中国地质, 46(2): 219-234.

Liu Chuazheng, Lü Jietang, Tong Liqiang, Chen Hongqi, Liu Qiuqiang, Xiao Ruihua, Tu Jienan. 2019. Research on glacial/rock fall-landslide-debris flows in Sedongpu basin along Yarlung Zangbo River in Tibet[J]. Geology in China, 46(2): 219-234(in Chinese with English abstract).

雅鲁藏布江色东普沟崩滑-碎屑流堵江灾害初步研究

刘传正¹, 吕杰堂¹, 童立强², 陈红旗¹, 刘秋强¹, 肖锐铎¹, 涂杰楠²

(1. 自然资源部地质灾害技术指导中心, 北京 100081; 2. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

摘要: 2018 年 10 月 17 日 5 时许, 西藏林芝市雅鲁藏布江左岸色东普沟上游发生冰崩岩崩, 冲击下部的早期崩坡积物和冰碛物, 形成滑坡-碎屑流进入雅鲁藏布江, 堵江堰塞约 56 h 后自然漫顶泄流, 整个过程形成崩滑-碎屑流-堰塞湖-溃决洪水灾害链。采用多年气温降水数据分析、多时相卫星遥感解译冰川退缩、直升机抵近观察堰塞坝、Scheidegger 公式计算崩滑-碎屑流运动速度、Gutenberg-Richter 公式计算地震活动序列 b 值和多因素赋值统计研判未来冰崩地点规模, 得到堰塞坝体积约为 $3100 \times 10^4 \text{ m}^3$ (含以往多次崩滑堵江残留堆积), 滑坡-碎屑流运动距离超过 8 km, 平均运动速度约 20 m/s, 整个运动过程历时 6.7 min, 具有高速远程性质。色东普沟域崩滑-碎屑流是在地貌高陡、岩体破碎、气候变暖、局地降水、冰川退缩、断裂活动和地震效应(b 值在 0.7 左右)等多种因素综合作用下形成的, 今后相当长的时期内仍会多次发生。初步预测, 当局地平均气温超过 13 °C、1 h 降雨量超过 5 mm 或 24 h 降雨量超过 10 mm, 或地震 PGA 大于 0.18 g, 可能引发新的崩滑-碎屑流事件, 造成雅鲁藏布江再次壅堵。针对该区域山高谷深, 人烟稀少, 交通困难的实际, 提出了适应自然、全面避让和适当疏导的防灾减灾对策。

关键词: 滑坡-碎屑流; 堰塞湖; 气候变化; 冰川作用; 地震活动; 累积效应

中图分类号: P642.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2019)02-0219-16

Research on glacial/rock fall-landslide-debris flows in Sedongpu basin along Yarlung Zangbo River in Tibet

LIU Chuazheng¹, LÜ Jietang¹, TONG Liqiang², CHEN Hongqi¹,
LIU Qiuqiang¹, XIAO Ruihua¹, TU Jienan²

(1. Consultative Center of Geo-Hazard Mitigation, MNR, Beijing 100081, China; 2. Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources of China, Beijing 100083, China)

Abstract: A large-scale glacial/rock fall occurred in the upstream of Sedongpu basin on the left bank of the Yarlung Zangbo River in Linzhi of Tibet on October 17, 2018. The runout materials were composed of glaciers and rocks, which impacted the accumulation and moraine of the lower part, then formed a debris flow and dammed the Yarlung Zangbo River impounding a barrier lake. This study aims to identify the triggering mechanisms and propose a theoretical basis for the development of landslide hazard prevention and reduction. In this paper, the authors adopted short distance observation by helicopter, statistical analysis of climate change data, interpretation of multi-temporal satellite remote images, calculation of landslide-debris flow velocity using the

收稿日期: 2019-03-14; 改回日期: 2019-03-28

基金项目: 国家财政事业专项(1211221481001)资助。

作者简介: 刘传正, 男, 1961 年生, 博士, 研究员, 研究方向为地质灾害防治、工程地质与环境地质; E-mail: liucz@cigem.cn。

Scheidegger formula and the b value of seismic activity sequence calculated by Gutenberg–Richter formula as well as multi–factor assignment statistics to evaluate the site and scale of the future glacial falls. It was found that the debris flow was triggered under the condition of high and steep terrain, broken rock mass, climate warming, regional rainfall, glacier ablation, fracture activity and earthquake damage (b value being about 0.7). The volume of the deposition materials was estimated at $31 \times 10^6 \text{ m}^3$ (including previous residual accumulation), which were mainly composed of gravel soil, a small amount of ice and big boulder. The whole event lasted 6.7 minutes with an average movement speed of about 20 m/s. The runout distance of the landslide was more than 8 km. Two–thirds of the Yarlung Zangbo River had been blocked before the glacial/rock fall–landslide–debris flow event that occurred on October 17, 2018. The countermeasures of disaster prevention and reduction which include adaption to the nature, comprehensive avoidance and reasonable dredging are put forward in consideration of the reality of high and steep hillslope, sparse population and traffic inconvenience in this area. The Sedongpu event that occurred on October 17, 2018 was a typical cascading landslide hazard, with a process of landslide–debris flow–dammed lake–outburst flood disaster. Such events will continue to occur frequently for a long time in the future. Based on a comprehensive analysis, the authors have reached the conclusion that a new landslide–debris flow–dammed lake event will be triggered again when the average temperature exceeds 13 °C, or precipitation exceeds 5 mm/h or 10mm/d, or the earthquake PGA is greater than 0.18g.

Key words: landslide–debris flows; dammed lake; climate change; glacial action; seismic activity; accumulating effects

About the first author: LIU Chuanzheng, male, born in 1961, senior researcher, doctor, mainly engages in engineering geology and geological disaster reduction. E–mail: liucz@cigem.cn.

Fund support: Supported by Special Project of National Finance(No. 1211221481001).

1 引言

2018年10月17日5时左右,西藏林芝市米林县雅鲁藏布江左岸色东普沟发生崩滑–碎屑流,冲入雅鲁藏布江堵塞河道形成堰塞湖。自然资源部应急专家组于18日10时到达米林县派镇西藏前方指挥部,通过搜集遥感地质资料、乘车或军用直升机观察现场情况,在应急会商会议上提出了比较切合实际的抢险处置建议,指导开展了避险搬迁安置点地质灾害危险性评估、上下游地质灾害隐患排查与监测预警等工作。10月19日13:30,堰塞坝右岸自然漫顶过流,堰塞湖险情逐步解除。10月29日10:00,因冰雪融水引发高浓度泥石流再次堵塞雅鲁藏布江,专家组再赴现场,指导崩滑–堰塞湖抢险防灾处置工作。10月31日9:30,堰塞坝自然漫顶过流,坝前水位逐步恢复正常。

为了深化认识此次灾害事件的成生原因,本文从地理地貌、气候变化、地质地震、环境演化和防灾减灾等方面进行初步研究,为高效科学地应对此类事件提供参考。

2 色东普沟区域地理

2.1 区域地理

色东普沟域位于西藏林芝东部,雅鲁藏布江下

游峡谷地带,行政隶属于林芝市米林县派镇。米林县东南部与墨脱县、隆子县相连,西部与朗县相接,北部与林芝市巴宜区、工布江达县毗邻(图1)。米林县公路干线有林邛线、岗扎线、岗派线3条,林芝米林机场距米林县城12 km。米林县东西狭长,区域地势西高东低,平均海拔3700 m,山脉纵横,宽谷

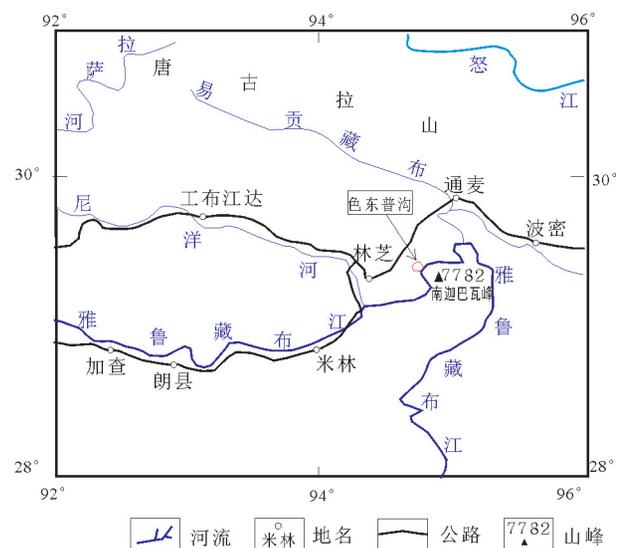


图1 色东普沟地理位置
Fig.1 Location of the Sedongpu basin

相间,东南部山高谷深。

米林县地处高原温带半湿润季风气候区,年平均气温8.2℃,年均降水量600mm,85%的雨水集中在6—9月份,无霜期为170d。印度洋与孟加拉湾暖流通过雅鲁藏布江通道涌入,形成亚热带、温带、寒带并存的特殊气候,地震、崩塌滑坡、泥石流、干旱、冰雹和病虫害等多发。

2.2 色东普沟域特征

色东普沟域位于雅鲁藏布江左岸,加拉白垒峰南坡下,沟域面积约67km²。沟域上游源区地形宽阔,支沟发育,中下游主沟道狭窄(图2)。沟道内冰川活动形成的冰碛物丰富,冰雪融水及降水提供水流充分。沟域内最高处为加拉白垒峰(7294m),最低点为色东普沟口(2746m),高差4548m。沟域上游陡峭,地形纵坡降大,冰川发育,岩土体物理风化



图2 色东普沟域地貌(镜头方向NNW,2018-10-30)
Fig.2 Photograph of the Sedongpu basin (lens direction: NNW, taken on Oct. 30, 2018)

严重,侵蚀剥蚀作用强烈(图3)。色东普沟主沟长约7.4km,入江处沟口宽度220m,主沟道上段纵坡

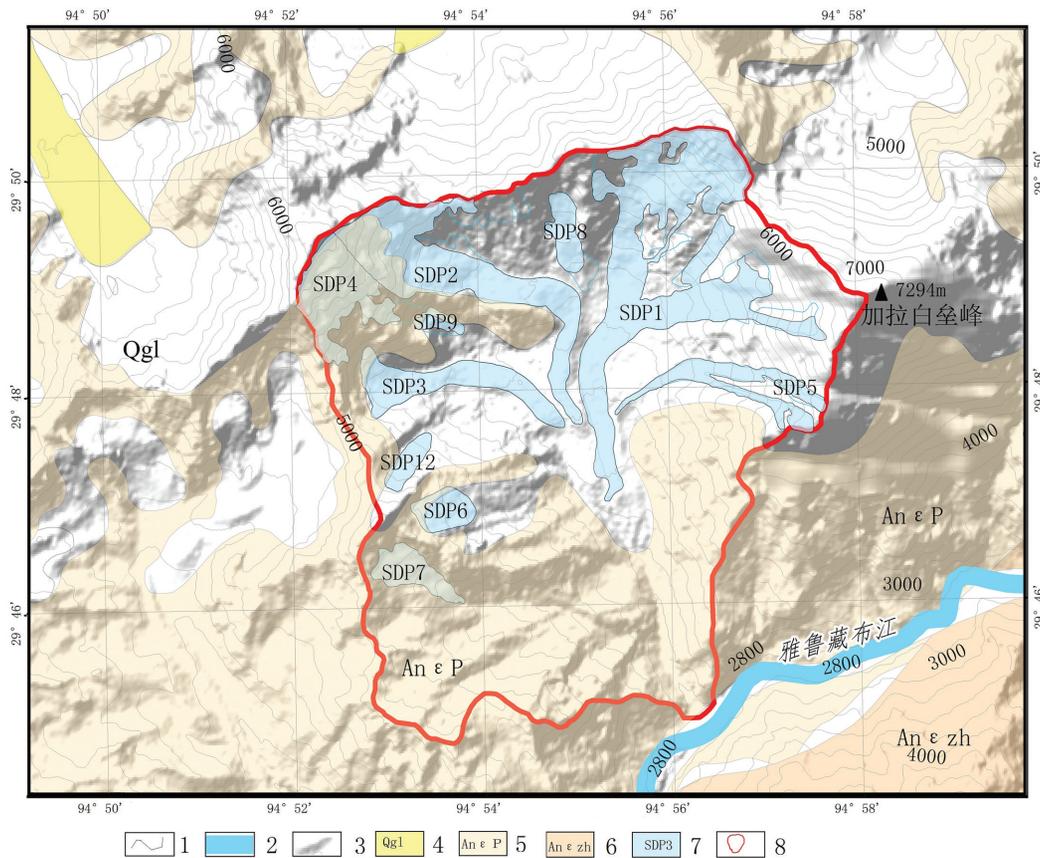


图3 色东普沟域地形地质图

1—等高线;2—河流;3—现代冰川;4—第四纪冰碛物;5—南迦巴瓦群大理岩;
6—南迦巴瓦群片麻岩;7—色东普沟冰川编号;8—色东普沟流域

Fig.3 Topography and geological condition of the Sedongpu basin

1- Isoline; 2-River; 3-Contemporary glaciers; 4-Quaternary glacial drift; 5- Namjagbarwa Group complex marble ; 6- Namjagbarwa Group complex gneiss; 7- Serial number of glaciers in the Sedongpu basin; 8- Range of the Sedongpu basin

降395‰,中下段纵坡降202‰。

3 色东普沟崩滑碎屑流-堰塞湖

3.1 2018年10月两次堵江事件

2018年10月17日5时左右,雅鲁藏布江左岸色东普沟上游海拔约6000 m部位发生冰崩岩崩,倾泻岩块冰体顺陡峻斜坡向南南西崩滑,解体后形成碎屑流顺沟转向南南东冲击,沿途解体奔流、底部铲刮与侧蚀作用,主沟道形成明显底蚀拉槽,最终冲出沟口,堵塞雅鲁藏布江,形成堰塞湖(图4)。崩滑源区与碎屑流区流通沟道总长约8 km。

卫星影像显示,色东普堰塞坝平面呈不规则锥体,中左侧高(高程2751 m),右岸低,上游延伸短而厚度大,靠下游延伸长而厚度薄。堰塞坝跨河宽310~950 m,顺河长约2.5 km,坝体最大堆积厚度约90 m,平均堆积厚度约70 m,堆积体规模约为 $3500 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。根据机载遥感三维地形测量,解算堵江堆积体顺河右岸底宽2250 m,左岸顶宽900 m,跨河720 m,厚度80 m,按三棱锥计算,得到堆积体积 $3024 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。两种方法测算的堰塞坝体积均包含以往堵江残留堆积,本文采用堵江堰塞坝体积 $3100 \times 10^4 \text{ m}^3$,推测新入江碎屑流物体积约 $1500 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

10月19日上午,堰塞湖上游迴水淹没威胁部分村镇安全,距堰塞坝6.5 km的加拉村被淹没、26 km的直白村受威胁、尾水接近相距42 km处的派镇。卫星影像对比发现,10月26日起,上次滑坡后缘破裂冰体以及冰岩堆积物沿已形成的侵蚀沟槽呈带状持续向下移动,沿途裹挟混杂冰水沉积碎屑(图5)。10月29日凌晨,冰岩碎屑流转化为冰川泥



图4 色东普崩滑-碎屑流堵塞雅鲁藏布江(镜头方向NNW, 2018.10.19)

Fig.4 The landslide-debris dam that blocked the Yarlung Zangbo River (lens direction: NNW, taken on Oct. 19, 2018)

石流,冲出沟口后覆盖上次的堰塞坝,导致雅鲁藏布江再次断流。依据前后遥感数据对比分析,新增碎屑流物体积约 $700 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

堰塞坝物质以碎石土为主,土石比约为8:2。第一次堰塞湖快要溢流时,堰塞坝顶面低洼处多处积水,松散土体含部分冰雪,利于渗透融化造成土体下沉,堰塞土体容易饱水。当地下渗流接近坝顶面后,会出现快速漫顶泄流。堰塞坝漫流决口后,溃口很快扩大,堰塞湖水位经短期缓慢回落后快速下降,20日凌晨恢复到事前水位。

3.2 10月17日崩滑-碎屑流运动特征

3.2.1 崩滑-碎屑流运动速度与运动时间

考虑色东普沟崩滑-碎屑流运动的整个过程,滑坡体在沟内能够保持整体性的情况下,运动距离从滑坡体剪出口起算,高程约4450 m,并假定该点的碎屑流铲刮运动过程中保持在最前端,其最终位置为堰塞



图5 色东普沟上游崩滑-碎屑流形成沟槽(镜头方向NWW, 2018.10.30)

Fig.5 Landslide-debris trench at Sedongpu basin upstream (lens direction: NWW, taken on Oct.30, 2018)

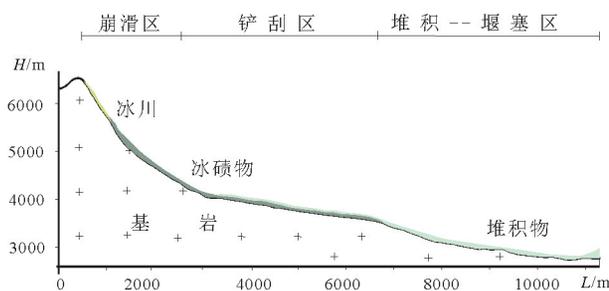


图6 色东普沟域地形地质剖面图

Fig.6 Longitudinal section of the topography and geology of the Sedongpu basin

体完全堆积的位置(图6)。运动距离 $L=8236\text{ m}$,高差 $H=1706\text{ m}$,等效摩擦系数 $f=0.2071$ 。

忽略影响小的内聚力(c)作用,采用Scheidegger(1973)公式计算崩滑-碎屑流运动速度:

$$V = \sqrt{2g(H-fL)} \quad (1)$$

式中, V —估算点滑体速度(m/s); g —重力加速度(m/s^2); H —滑坡后缘顶点至滑坡沿途估算点高差(m); L —滑坡后缘顶点至滑坡沿途估算点水平距离(m); f —等效摩擦因数,即滑坡后缘顶点至滑坡运动最远点连线斜率。

根据色东普沟崩滑碎屑流主剖面位置、运动水平距离和高差,计算确定滑坡-碎屑流从启动、运动到最终停积整个过程的速度分布。采用最大高差与最远水平距离的商作为等效摩擦系数进行速度计算显然是理想化的,结合实地调查和经验判断对计算结果按50%进行折减(图7)。

计算结果折减依据是:(1)Scheidegger公式假定了运动质点从斜坡顶端直达底端,而实际上是分阶段传递运动,即斜坡上端的崩坡积物大多停积在斜坡上中部,而斜坡中下部碎屑物才运动到河谷形成堵塞;(2)沟内冰崩、岩崩、冰碛物和土、石、冰、雪块体颗粒分选性差,存在彼此包容填充;(3)碎屑物松散但湿度大,是存在一定黏结、冻结性的颗粒集团,并非无黏结;(4)沟域地形上游开阔,下游主沟狭窄,运动断面逐步收缩,侧壁摩擦耗能逐渐加剧;(5)颗粒之间存在碰撞碎裂和摩擦耗能。

色东普沟后缘陡峭,崩滑-碎屑流启动后,在巨大的势能作用下运动速度急速增大,在地形转折处,

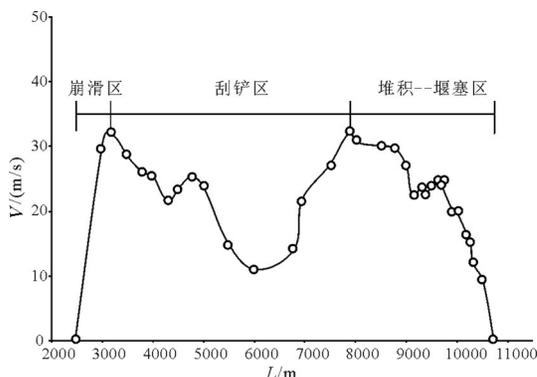


图7 色东普沟崩滑-碎屑流运动路径速度分布
Fig.7 The velocity distribution of the Sedongpu fall-landslide-debris

速度达到 32.3 m/s (运动距离 657 m)。地形坡度变缓后,运动速度出现降低,最小速度降到 10.9 m/s (运动距离 4994 m)。地形变陡后,运动速度再度加大,运动距离 5500 m 处,速度达 30.8 m/s 。地势再度变缓后,运动速度再次降低,直至冲入雅鲁藏布江停积,部分抵达对岸。崩滑-碎屑流从启动到最终停积整个过程的运动时间约 402 s ,即 6.7 min 。根据微震分析、实地调研和经验判断,这个结果比较符合实际。

按照国际地科联滑坡工作组(1995)的建议,色东普沟崩滑-碎屑流属于高速运动。

3.2.2 崩滑-碎屑流运动远程问题

国际上,崩塌滑坡体重心位置垂直位移(H)与水平位移(L)的比值(等效摩擦系数)小于 0.6 (相当于 $\tan 32^\circ$)即认为是远程的(Evans et al., 2001)。实际应用上,滑坡体重心位置并不容易确定。

刘传正(2017)统计分析,我国崩塌滑坡-碎屑流区域的前后缘高差(H)与前后缘水平距离(L)的比值 $i=H/L \leq 0.4$ 或 $L/H \geq 2.5$ 即认为是远程的。本次崩滑-碎屑流运动全程的 H/L 为 0.2726 ,色东普沟崩滑-碎屑流属于远程运动。

3.3 2018年10月堰塞湖淹没泄洪危害

3.3.1 堰塞湖危害情况

经事前事后调查,色东普崩滑-碎屑流堵江堰塞湖淹没浸泡岸坡引起崩塌,下游崩塌涌浪掀翻达林桥面(图8,图9)。急剧泄洪阶段,水流拖拽树冠牵动斜坡体破坏(图10)。另外,堰塞坝下游泄洪冲刷侵蚀斜坡脚等,增加未来崩塌滑坡危险性。

3.3.2 淹没或泄洪威胁民居情况

据地方政府排查,雅鲁藏布江堰塞湖淹没区段两岸约 5 km 范围内淹没区涉及11个村庄,387户,1318人。堰塞坝下游墨脱县沿江两岸受泄洪影响或村庄原址淹没共涉及7个乡镇,22个村,969户,4440人。其中,加热萨乡住户涉及加热萨村、更帮村、达昂村、墨脱镇亚东村和墨脱老村村址。色东普崩滑-碎屑流-堰塞湖对当地交通、物流、水电工程建设和旅游产业等的正常运营与发展造成严重影响。

3.4 历史堵江情况

据调查访问和历史卫星影像解译,雅鲁藏布江则隆弄冰川、色东普冰川活动引发的崩塌滑坡碎屑流堵江事件已多次发生。



图8 堰塞湖淹没斜坡脚引发崩塌(镜头方向SE,2018.10.18)
Fig.8 Collapse that occurred because dammed lake submerged the slope toe (lens direction: SE, taken on Oct. 18, 2018)



图9 崩塌激起涌浪造成桥面向上游翻覆(镜头方向NNE, 2018.11.15)
Fig.9 Bridge deck damaged by surges (lens direction: NNE, taken on Nov. 15, 2018)

1950年,墨脱Ms 8.6级大地震引发则隆弄冰川跃动,冲入雅鲁藏布江。

1968年,则隆弄冰川活动引发两次直白沟冰崩泥石流事件,堵江后造成水位壅高。

1984年以前发生过大规模堵江事件,后从左侧自然漫顶过流。

1984—2013年,处于相对稳定状态,未发生大规模堵江事件。



图10 堰塞湖急剧泄流引起岸坡冲刷破坏(镜头方向NNW, 2018.11.15)
Fig.10 Bank erosion triggered by rapid discharge of dammed lake (lens direction: NNW, taken on Nov. 15, 2018)

2014年,色东普冰崩造成大规模堵江事件,堰塞坝不断累积,后从左侧自然漫顶过流。

2014—2016年,色东普沟碎屑流活动较少,未出现大规模堵江情况。卫星影像显示,色东普沟口一直存在历史堵江残留体,两侧过流,左侧为主,中间形成江心滩(图11)。

2017年10月22日,色东普沟口再次出现堵江,崩滑冲击过程曾引起强烈地面震动,水位上涨约30 m后,坝体自然溃决。

2017年10月27日—11月3日,色东普沟再次发生滑坡碎屑流事件,但未全面堵江。

2017年12月21日,色东普沟发生碎屑流,堵塞雅鲁藏布江形成堰塞湖,堵江约72 h。

2018年1月,下游德兴水文站观测到水流量骤降骤升过程,显示有新的堵江事件发生。

2018年7月上旬,色东普沟发生碎屑流,形成轻微堵江。

2018年10月17日、29日,色东普先后两次崩滑—碎屑流堵江,形成堰塞湖(图12)。10月17日堵江发生前,雅江色东普段三分之二的河道处于堰塞状态。

总之,色东普沟域历史上多次发生冰崩—岩崩—滑坡—碎屑流/泥石流—堵江事件,不断堆积挤占雅鲁藏布江河道。

4 区域地质环境

4.1 地形地貌

雅鲁藏布江两岸多为高山峡谷,色东普沟域地处加拉白垒峰(海拔7294 m)与南迦巴瓦峰(海拔



图11 2016年9月10日色东普堵江状况卫星影像
Fig. 11 Remote sensing image of Sedongpu before being dammed (September 10, 2016)

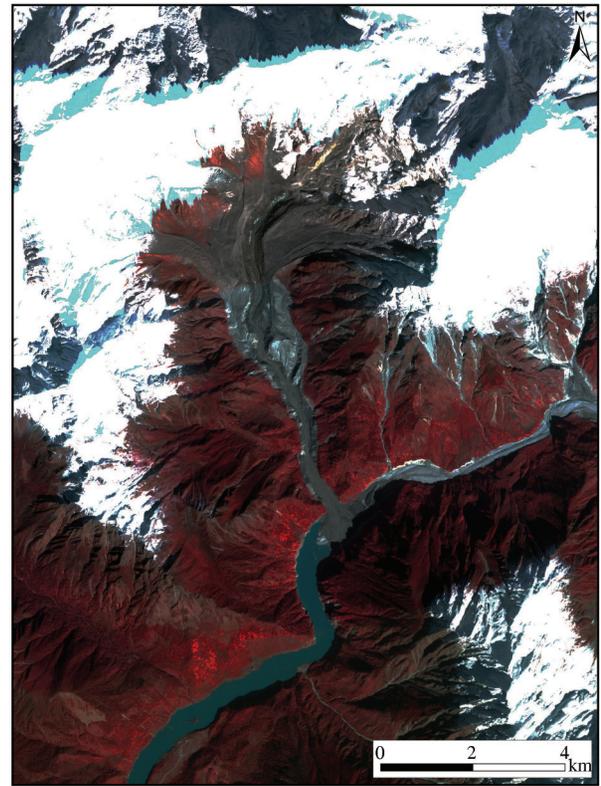


图12 2018年10月30日色东普堵江状况卫星影像
Fig.12 Remote sensing image of Sedongpu after being dammed (October 30, 2018)

7782 m)隔江对峙的咽喉。杨逸畴(1991)认为,雅江大拐弯是适应北东和北西向活动断裂构造发育的,区域隆升速度平均2.47 mm/a,河流处于侵蚀强烈的幼年期发育阶段。

李吉均等(1979)测算,雅鲁藏布江河源—里孜的上游段(268 km)平均坡降为4.5‰,里孜—派镇的中游段(1293 km)平均坡降为1.2‰,派镇—墨脱的下游段(212 km)平均坡降高达10.3‰(图13)。大拐弯一带河床海拔高度急剧变化,从米林县的2950 m急降到到扎曲(Tsachu)的1575 m,再到墨脱县海拔不足千米,显示了藏东地区快速隆升主导的河谷深切作用。

张沛全等(2008)提出,雅江派镇—墨脱段多处出现冰碛堆积平台及多级阶地,派镇达林村可划分出4级阶地,海拔高度在2880~3150 m,每级阶地高度5~50 m(图14)。

雅鲁藏布江大峡谷强烈溯源侵蚀一方面起因于构造活动控制的差异抬升,另一方面是冰川大规模活动造成崩滑—碎屑流堵江堆积抬高河道,严重消减了向上游的溯源侵蚀距离,造成该河段短距离

的急剧下切。

4.2 气候变化

4.2.1 气温变化

1961年以来,青藏高原年气温平均上升0.32℃/10a,尤其表现在秋冬两季。1981年以来升温0.60℃/10a。气候变化造成普遍性冰川退缩、湖泊面积扩张、冻土深度变浅、植被增加和极端事件(强降水、干旱日数、冰湖溃决)增多。雅鲁藏布江流域1960—2009年年平均气温具有显著的上升趋势,升温趋势随海拔升高而增大。

米林县汛期平均气温与1—10月平均气温均为线性增长趋势,汛期增速为0.35℃/10a,1—10月平均气温增速为0.39℃/10a,与西藏整体的区域性变暖趋势是一致的(图15)。2017年以来,米林县平均气温为11℃,较常年均值偏高1.1℃;汛期平均气温为15.2℃(建站以来最高)。

4.2.2 降水量变化

1961年以来,青藏高原降水呈增加趋势,平均

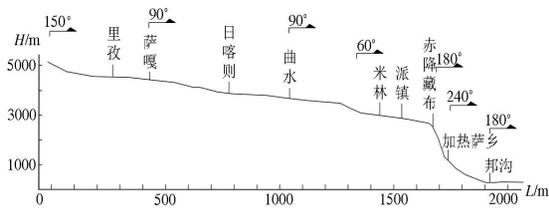


图13 雅鲁藏布江纵剖面(据李吉均等,1979)

Fig.13 The vertical section of Yalung Zangbo River (after Li Jijun et al.1979)



图14 达林村古堰塞坝侵蚀剖面及涌浪掀翻桥面(镜头方向NNE,2018.11.15)

Fig.14 Photography showing soil erosion profile, the bridge destroyed by surges at Dalin Village (lens direction: NNE, taken on Nov. 15, 2018)

增加 7.25 mm/10a。1981 年以来降水增加 13.91 mm/10a, 但 1991 年以来降水量增幅减小到 3.98 mm/10a。雅鲁藏布江 1960—2009 年间流域降水变化趋势不显著。

2017 年米林县降水偏多, 比 2016 年多近 30%。2018 年 1—10 月, 米林县降水总量 503.7 mm, 汛期降水量为 403.9 mm。2018 年与历年同期相比, 1—10 月降水量偏少 27%, 汛期降水量偏少 26%。总体上, 米林县历年汛期降水量和 1—10 月降水量均呈微弱减少趋势(图 16)。

色东普沟域 2018 年 10 月 26 日—10 月 29 日发生强降水。色东普周围 3 个气象站显示, 2018 年 10 月 17 日冰崩—碎屑流之前的 2—4 日出现过集中降水。GF-4 号遥感影像显示, 2018 年 10 月 30 日前可能出现过大范围集中降水(图 17)。

4.3 地层岩性

区域地层主要由元古宇南迦巴瓦群构成, 岩性主要为片岩、片麻岩、变粒岩、混合岩等, 多呈互层

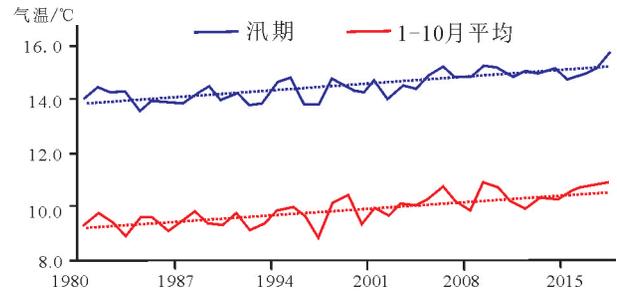


图15 1980—2018年米林县平均气温变化趋势

Fig.15 Average temperature variation in Milin County from 1980 to 2018

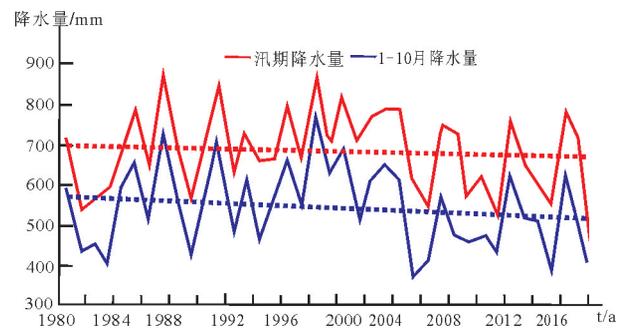


图16 1980—2018年米林县降水量变化趋势

Fig.16 Precipitation variation in Milin County from 1980 to 2018

状, 是易崩易滑地层, 在冰川侵蚀和冻融风化作用下极易破碎(黄文星等, 2013)。色东普沟分水岭地带常年冰雪覆盖, 多条分支冰川活动造成沟谷深切, 谷坡陡峻, 冰碛物丰富(图 18)。

加拉村以上河段高程 2950~3150 m 之间多处分布古堰塞湖相沉积, 具有明显的沉积层理。在垂向剖面上, 粉质黏土层具有多层结构, 总体上沿河床纵向分布的连续性差异较大, 厚度不一。

4.4 区域构造活动

雅鲁藏布江大拐弯地处印度板块与欧亚板块碰撞形成的“东喜马拉雅构造结”, 是挤压、旋转走滑和隆升的强烈地壳活动区(图 19)。

区内主要发育北东向的墨脱断裂、米林断裂、里龙断裂和北西向的嘉黎断裂、察隅断裂、阿帕隆断裂、雅鲁藏布江断裂等。断裂相互切割贯通导致山体表面碎裂化。米林断裂沿雅鲁藏布江北东向分布, 左行运动且北西盘上升。色东普沟域位于断层上盘, 地震作用下断层上盘作用效应显著。大陆动力学研究显

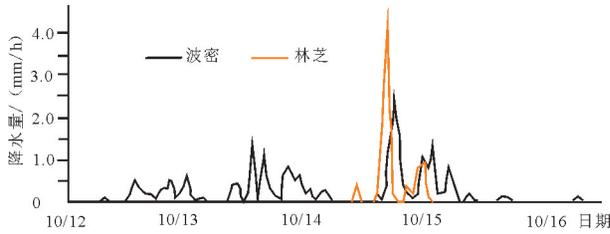


图17 色东普沟域2018年10月12—18日降水量
Fig. 17 Precipitation in Sedongpu basin from October 12 to 18, 2018

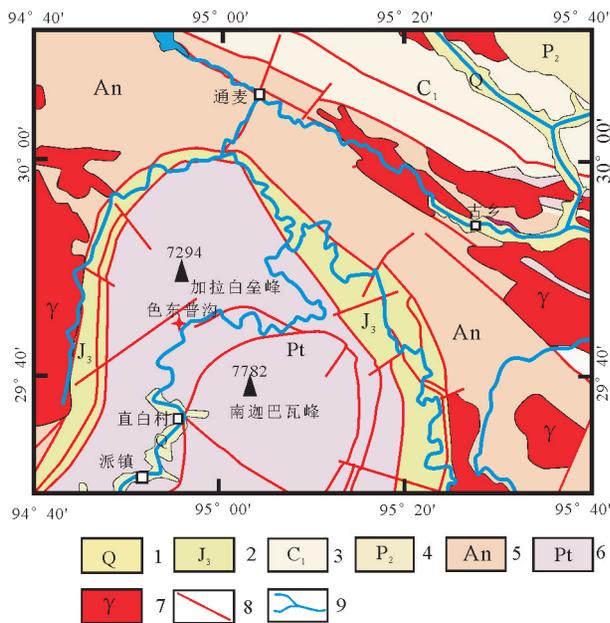


图18 色东普沟区域地质简图(据黄文星等,2013简化)
1—第四纪堆积物;2—晚侏罗纪混杂岩;3—早石炭纪板岩、千枚岩;
4—中二叠纪灰岩、砂质板岩;5—前震旦纪变粒岩、片麻岩;
6—元古纪大理岩、片麻岩;7—中新纪花岗岩;8—断层;9—河流
Fig.18 Simplified geological map of the Sedongpu basin (after

Huang Wenxing et al., 2013, simplified)
1-Quaternary sediments; 2-Late Jurassic mélange; 3-Upper karboniferous period slate and phyllite; 4-Middle Permian limestone and sandy slate; 5-Presinian period granulite and gneiss; 6- Proterozoic marble and gneiss; 7- Miocene granite; 8-Faults; 9-River

示,喜马拉雅和藏南的挤压构造应力顺时针绕过喜马拉雅东构造结向青藏高原东南部转换(许志琴等,2016)。晚更新世以来,围绕东喜马拉雅构造结弧形旋扭构造及其相邻区域的川青地块运动趋势也为GPS测量结果所证实(张岳桥等,2016)。

4.5 地震活动

林芝地区1900—1970年之间的地震数据缺失

多,1970年建成地震台网后数据相对全面系统。区域地震活动时间、空间和强度具有一定规律性。

(1) M_s 5级以上地震主要集中于中部,西部的工布江达、东部的察隅与波密邻接区域相对较少(图19)。

(2) 1900年以来记录 M_s 5级以上地震109次,其中,5~6级地震90次,6~7级地震16次,7~8级地震2次,8级以上地震1次。中强地震活动具有一定的阶段性。1930—1970年期间是主要活跃期,1980年以来进入另一活跃期(图20)。以5年时间间隔统计,地震频次高峰出现在1955、1980—1995和2010年以来3个时段,目前处于地震活跃期(图21)。

(3) 1970年以来中小地震活动频繁,共发生 M_s 3级以上地震282次,其中,3~4级地震156次,4~5级地震100次,5~6级地震24次,6级以上地震2次。最大地震为2017年11月18日发生的林芝 M_s 6.9级地震。

(4) 地震类型主要为主震-余震型,主震发生突然,后续余震频繁。1932年8月14日的林芝米瑞 M_s 7.3级地震、1947年7月29日朗县东南 M_s 7.7级地震和1950年8月15日的墨脱 M_s 8.6级地震3次大震后都有数十次4级以上余震发生。

根据 Gutenberg-Richter(1942)公式:

$$\lg N = a - Ms \quad (2)$$

N —某级别以上地震频数; M_s —地震震级; a , b —待定参数。

统计分析1900年以来 M_s 5级以上地震震级-频数关系,得到 $a=5.4424$, $b=0.6914$, 相关系数 $R^2 = 0.989$ (图22)。统计分析1970年以来 M_s 3级以上地震震级-频数关系,得到 $a=4.77654$, $b=0.7133$, 相关系数 $R^2 = 0.9456$ (图23)。

林芝地区 M_s 3级以上和 M_s 5级以上地震 b 值比较接近,均在0.7左右。 b 值较高反映了该地区强震-余震型的特点,强烈的中强震活动背景和区域应力集中状态,也反映了该区域内动力控制区域地貌演化、外动力作用活跃的特点(傅征祥等,2008)。另外, b 值反映了区域地震活动序列的差异性,同时具有分数维或分形几何意义。

4.6 冰川活动

色东普沟上游发育12条分支冰川,冰裂隙发育,冰川下端消融强烈。根据多期卫星遥感数据分析,1970年色东普沟上游冰川尚为一整体,1984年

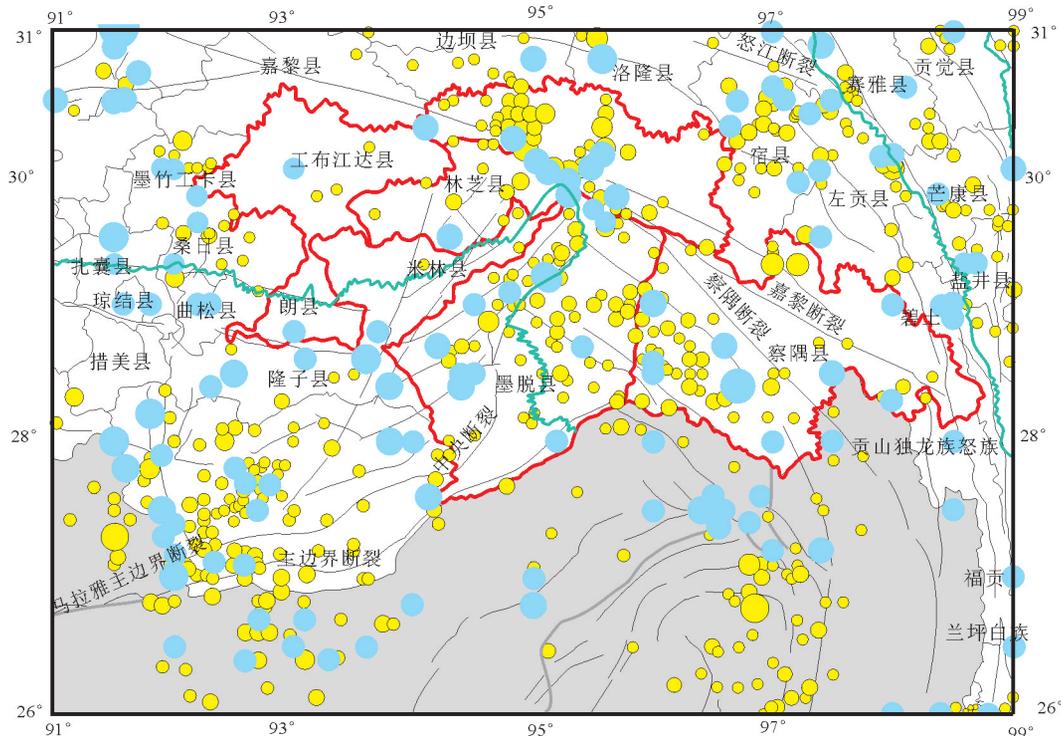


图19 林芝地区及邻域地震分布

红线区为林芝地区范围;黑色圆点为 $M_s \geq 5$ 级以上地震;黄色圆点为1970年以来 $M_s 3 \sim 5$ 级地震

Fig.19 Seismic distribution in Linzhi and adjacent areas

Red lines represent administrative boundary of Linzhi; black dots, $M_s \geq 5$; yellow dots, $5 > M_s \geq 3$ since 1970

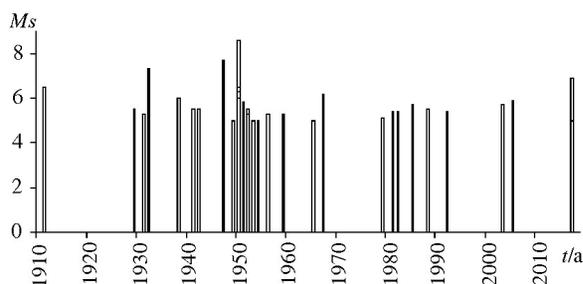
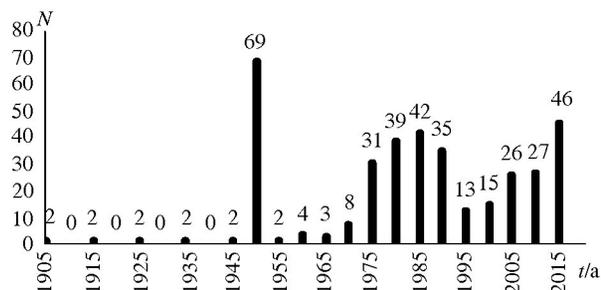
图20 林芝地区1900—2018年间 $M_s \geq 5$ 级以上地震分布Fig.20 Earthquakes $M_s \geq 5$ in Linzhi from 1900 to 2018

图21 林芝地区5年间距的地震次数统计

Fig.21 Earthquake frequency with an interval of 5 years in Linzhi

后冰川整体退化趋势明显,冰融线急剧上升,原来连成一片的冰川变得支离破碎。1977年与2018年卫星影像对比分析,色东普沟域冰川退缩面积达 15.67 km^2 ,退缩率为45.46%(童立强等,2018)。

ALOS-2雷达数据表明,2017年6—11月,色东普主冰川形变明显增大,2017年12月21日至2018年1月22日期间运动约170 m。

林芝 $M_s 6.9$ 级地震后数月内(2017年11月—2018年3月),色东普沟主冰川形变进一步加剧,中

部形变明显高于其他区域,说明地震作用滞后效应明显。2018年10月17日,色东普沟域9号冰川发生断裂,估算冰川断裂体积约 $2000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。部分冰川崩落对下方的冰碛物和崩滑堆积造成强烈冲击,成为大规模滑坡—碎屑流启动的初始动力。

4.7 沿江地质灾害

色东普沟以上至米林县派镇45 km范围内,查明20处地质灾害隐患点,包括泥石流10处、滑坡6

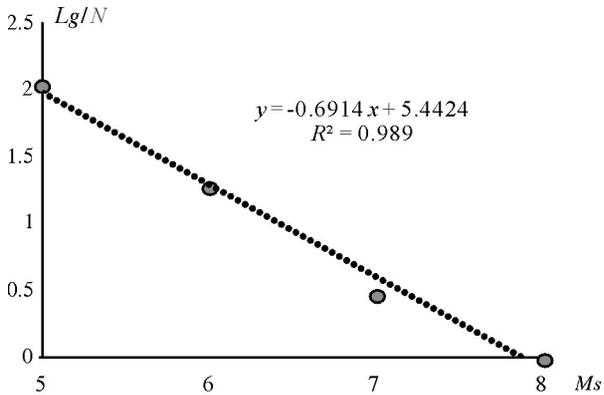


图22 林芝1900年以来 M_s 5级以上地震震级-频数关系
Fig.22 Relationship of earthquake magnitude and frequency in Nyingchi, $M_s \geq 5$ since 1900

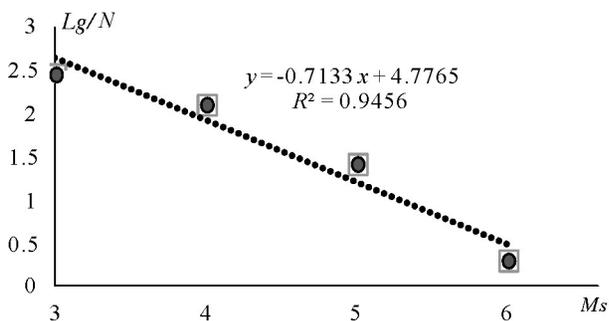


图23 林芝1970年以来 M_s 3级以上地震震级-频数关系
Fig.23 Relationship of earthquake magnitude and frequency in Nyingchi, $M_s \geq 3$ since 1970

处、崩塌4处,危害较大的主要有加拉村南侧泥石流、直白村泥石流、格嘎村南侧坡面泥石流、格嘎大桥泥石流和格嘎村东侧滑坡等。色东普沟以下到墨脱100 km范围内查明25处地质灾害隐患点,包括崩塌7处、滑坡9处、泥石流9处。

5 第四纪地质环境演变

5.1 区域现代冰川作用

图24显示,加拉白垒峰下的色东普冰川和南迦巴瓦峰下的则隆弄冰川是影响雅鲁藏布江河谷发育演化及堵江堰塞的两条最主要冰川。派镇至墨脱江段多处出现跌水-激流-涌浪,证明历史上该江段发生过多期不同程度的壅堵。

则隆弄冰川位于雅鲁藏布江大峡谷入口右岸,南迦巴瓦峰西北坡,直白村后山,上游邻近格嘎村,是一条大型海洋性冰川。则隆弄冰川在1950年8月15

日、1968年9月2日和1984年4月13日先后3次大规模跃动,前两次冰川泥石流堵江形成短暂的堰塞湖,摧毁了直白村(张文敬,1985;张沛全等,2008)。

李吉均(1979)提出,海洋性冰川能够实现冰雪增加与消融平衡。西藏东南部年降水达2500 mm,是西部大陆冰川的5~10倍,气温变化引起的消融速度是西部大陆冰川的3~10倍。降水导致冰川消融,融水会在冰舌下形成伏流、冰下河或涌泉。冰川融水的暖渗浸与重压重结晶成冰作用使冰温接近熔点,冷储少,冰川运动速度快。藏东冰川每年运动达300~400 m,是西部大陆冰川的3~4倍。

屈永平等(2015)发现,林芝地区冰碛物有效粒径启动时的降水强度与温度变化呈反比例关系。当温度升高时,冰川活动的临界降水强度则会减小。当降水强度增大时,冰碛物启动的温度会降低。冀琴(2018)分析大气降水随山体海拔分布的特征后发现,5200~5600 m可能是喜马拉雅山“第二大降水带”。

5.2 第四纪冰川活动

雅鲁藏布江大峡谷入口段的则隆弄冰川是该河段河谷演化的关键因素,现今的地貌格局是有着地质历史渊源的。第四纪时期,则隆弄冰川曾发生4次较大的冰川跃动形成堰塞湖事件,并遗留了湖相沉积物。

雅鲁藏布江格嘎-加拉江段,广泛分布则隆弄冰川在末次冰期活动期间堆积的巨厚冰碛层,地表可见厚度一般大于250 m,最大可达600 m以上,在现代河床以下厚度大于200 m,反映了多次基岩深切又被崩滑堆积物填满的历史。巨厚的冰碛物被雅鲁藏布江切割改造后在两岸形成不同高程的冰碛台地。则隆弄冰川形成的冰碛平台的海拔高度分别为3800 m、3500~3600 m、3200 m和2950 m(王毅等,2015)。

雅鲁藏布大峡谷区域冰川变化可分为距今25~10 ka的末次冰期、距今3.5~10 ka的新冰期和距今0.4~0.2 ka的小冰期(张振栓,1988)。新冰期时温度比现今低了0.5~1.6 °C,但对冰川活动作用有限,大规模冰川发育主要起因于固态降水量增加。

朗县至米林派镇河段两岸广泛分布的湖相沉积层中存在大量变形现象,被认为主要与重力作用有关,个别变形与地震作用有关(王毅等,2015)。

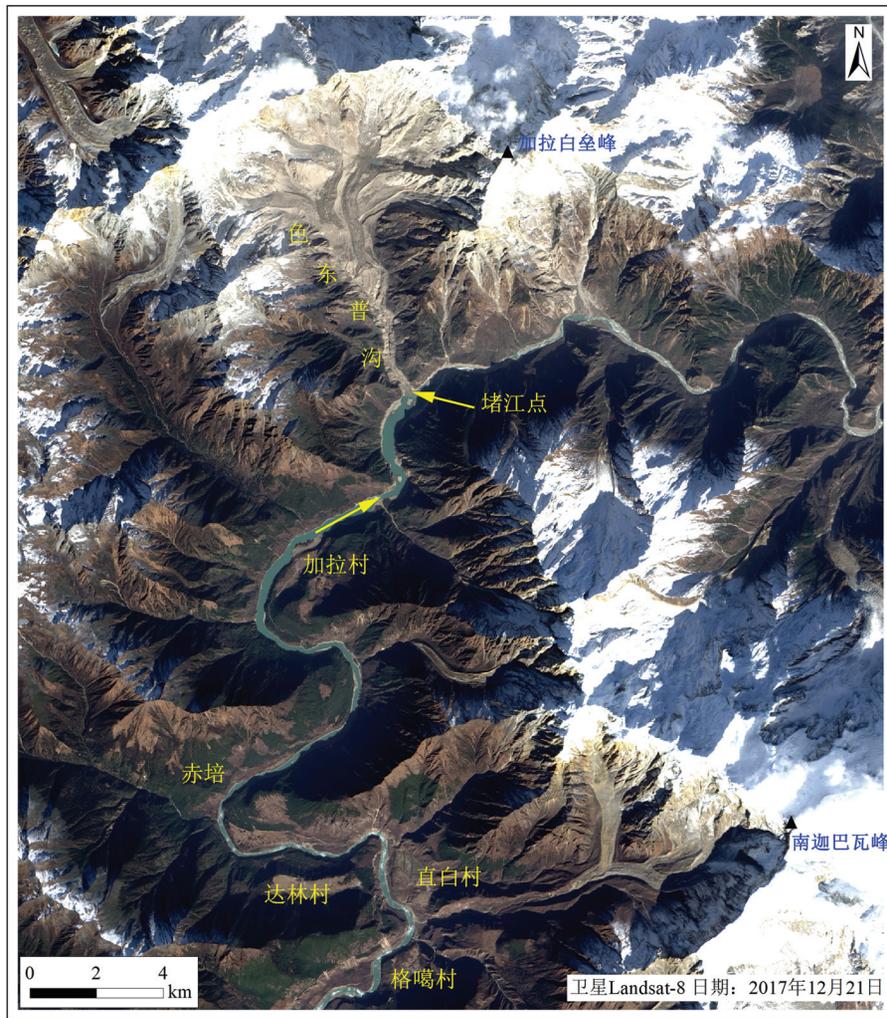


图24 色东普沟沟域与雅鲁藏布江上下游—地貌景观

Fig.24 Aerial photograph showing the location and topography in the study area

李翠平等(2015)认为,玉松—加拉河段在末次冰期以来至少出现3期古堰塞湖事件,主要是则隆弄冰川多次冰崩堵江形成的,Ai-Be法定年分别为7~9 ka,20~30 ka和>40 ka。

则隆弄冰川活动多次堵江,新近堆积物的¹⁴C测年显示第2次、第3次和第4次堵江堰塞分别发生在9760~11300 a B.P.,(1220±40) a B.P. ~ (1660±40) a B.P.和(287±93) a B.P. ~ (394±83) a B.P.(刘宇平等,2006)。堵江堰塞坝溃决后,释放突发性洪水对下游的雅鲁藏布大峡谷河段及区域环境产生巨大影响。

显然,雅鲁藏布江大拐弯地段自晚更新世以来新构造活动与冰川作用就是强烈的。可以预见,该地区也会成为支撑“人类世”地球表层系统变化研

究的典型地区(杨宗喜,2017)。

6 崩滑—碎屑流成因分析

6.1 气候变化

数十年来,崩滑—碎屑流多发生在月均温度高、日均温度变化大的时间段。色东普沟域位于阳坡,昼夜温差大,冰雪融水增加,冰川破裂退缩,物理风化加剧,坡面水动力作用强烈,冻融作用为冰碛物长期饱水液化、蠕动、流动提供条件,形成高含水的滑坡—碎屑流或冻融泥石流。

色东普沟近年来降水量增加,冰川裂隙渗流增加冰川底部静水压力,降低了底部摩擦力,导致冰川易发生垮塌。冰崩冲击使冰碛物底部渗流滑动作用更易于发生。

6.2 冰川活动

色东普冰川活动是沟谷发育塑造的主要因素。冰川融水渗流在冰碛物底部形成伏流,渗流突然释放会形成潜在冲击水流。冰川融水能够形成湿性的松散堆积物补给源,冰川释放内部积存的融水导致冰川跃动和冻融垮塌(Shangguan et al., 2017)。

6.3 地质构造与地震活动

区域构造活动强烈,新构造抬升显著,剥蚀作用增强,控制了河流方向,河谷纵坡降急剧转折,形成地势高耸、峡谷深切、沟源刃脊、冰斗等陡峻临空的冰蚀地貌,加剧沟谷底部及两侧的冲刷掏蚀。片麻岩等构造破碎严重,抗侵蚀冲击能力差。地震活动频繁,地震作用损伤破裂及滞后效应加剧冰川和山体破坏。

6.4 堵江累积效应

沟源区多次崩滑堆积贮存丰富的冰碛物,新的崩塌容易冲击激发冰碛物解体,碎屑流冲击铲刮沿途早期崩滑堆积物,形成多发的“零存整取”或“即存即取”效应。在一次冰崩碎屑流发生后,后期的冰雪融水直接暴露,会形成小规模冰川泥石流。崩滑碎屑流或泥石流冲入雅鲁藏布江河道形成堰塞坝,自然漫流拉槽只疏通了部分河道,多次碎屑流的冲入形成“累积效应”,会使堰塞堵江日趋严重或频繁。

6.5 灾害链模式

雅鲁藏布江堰塞湖形成后,会淹没上游,浸泡淘蚀岸坡造成坍塌。堰塞湖泄流时,上游快速水位消落引起岸坡失稳,高位山洪泥石流会危害下游沿江桥梁、村落和工程设施。

总之,色东普沟域冰崩岩崩-滑坡-碎屑流/泥石流-堵江堰塞湖是构造抬升、断裂活动、地震作用、岩体破碎、气温变化、降雨降雪、冰川活动和侵蚀剥蚀等多种因素综合作用的结果,整个过程是一个崩塌-滑坡-碎屑流-堵江-溃决洪水灾害链。

7 未来趋势预测

由于缺乏精细化资料,色东普沟冰崩-滑坡-碎屑流未来趋势主要依据气温变化、降水和地震作用进行初步研判。

7.1 冰崩碎屑流的引发条件

7.1.1 气候变化

(1) 温度变化

色东普沟崩滑-碎屑流的启动与区域气温变化

关系密切。胡桂胜等(2011)统计分析,林芝地区可能引起冰川泥石流暴发的温差变化区间为4.3 ~ 10.7 °C。李鸿连等(1994)研究认为,海洋性冰川急剧消融引发泥石流的日平均气温下限为5 °C,大陆性冰川为9 °C。

色东普沟域崩滑灾害事件的启动温度远高于海洋性冰川活动的日平均气温下限,也证明其是崩滑冲击下的碎屑流活动,不是一般的冰融泥石流。当林芝地区汛期平均气温超过15 °C,米林县派镇汛期平均气温超过13 °C时,色东普沟域发生崩滑-碎屑流并堵江的可能性大。

(2) 降雨影响

降雨会导致冰川融水量和地下径流量增加。胡桂胜等(2011)提出,林芝地区10 min降雨量为0.2 ~ 2 mm、1 h降雨量为0.8 ~ 6.3 mm或24 h降雨量为3 ~ 19.4 mm时就可能暴发泥石流,但降雨临界范围较宽,下限显得过低。屈永平等(2015)认为,无降雨时冰川泥石流的启动温差为1.35 °C,融雪的降雨强度为0.01 ~ 0.015 mm/h。

综合考虑色东普沟域冰碛物贮存、冰川崩塌规模及碎屑物运动等因素,10 min降雨量超过3 mm、1 h降雨量超过5 mm或24 h降雨量超过10 mm时,色东普沟域可能发生崩滑-碎屑流。

7.1.2 地震作用

地震活动及其在陡峻地形上部的放大效应会引发沟源区冰崩岩崩,破坏冰碛物的完整性,且具有滞后效应。1950年墨脱地震和2017年林芝地震后,均发生过多冰崩-碎屑流事件。

初步统计,色东普沟域受到地震烈度接近VIII度影响或地震PGA高于0.18 g时,引发冰崩碎屑流事件的可能性很大。

7.2 崩塌-碎屑流规模预测

7.2.1 评估依据

基于冰川形态特征,综合考虑坡向、坡度、面积、冰川裂隙和高程差等要素,设置了基本的评分标准、要素权重和评分标准,采用专家评分法对色东普等3个沟域的冰川的危险性进行了概略性估算,研判评估了色东普、则隆弄和朗加堡3个沟域的冰崩危险性,具体评估依据见表1。

7.2.2 评估结果

图25显示了评估预测结果。

表1 冰川各要素评估依据
Table 1 Evaluating basis of glacier elements

要素	评分标准	权重	评分原则
坡向	120~240°之间为1分(北向为0°),其余方向为0.5分	0.25	坡向对冰川运动速度和岩石风化有较大影响,南向坡的太阳照射时间长,冰川运动和消融速度快,岩石风化严重。
坡度	大于35°为1分,小于35°为0.5分	0.15	坡度较陡,冰川下滑力增大,更易发生垮塌。
面积	大于1 km ² 为1分,小于1 km ² 为0.5分	0.25	面积较大,则冰川发生垮塌可能性增大,造成危害更为严重。
裂隙	大于10条为1分,小于10条为0.5分	0.10	裂隙条数较多,则冰川不稳定性增加,破坏可能性增大。
坡降	大于0.6为1分,小于0.6为0.5分	0.10	坡降较大,则冰川下滑可能性增大,不稳定增加。
高程差	高程差大于1200 m为1分,小于1200 m为0.5分	0.10	高程差较大,则表明冰川覆盖海拔范围较大,更不稳定。
最低高程	高程小于4400 m为1分,大于4400 m为0.5分	0.05	最低高程较低,则温度较高,冰川不稳定性增大。

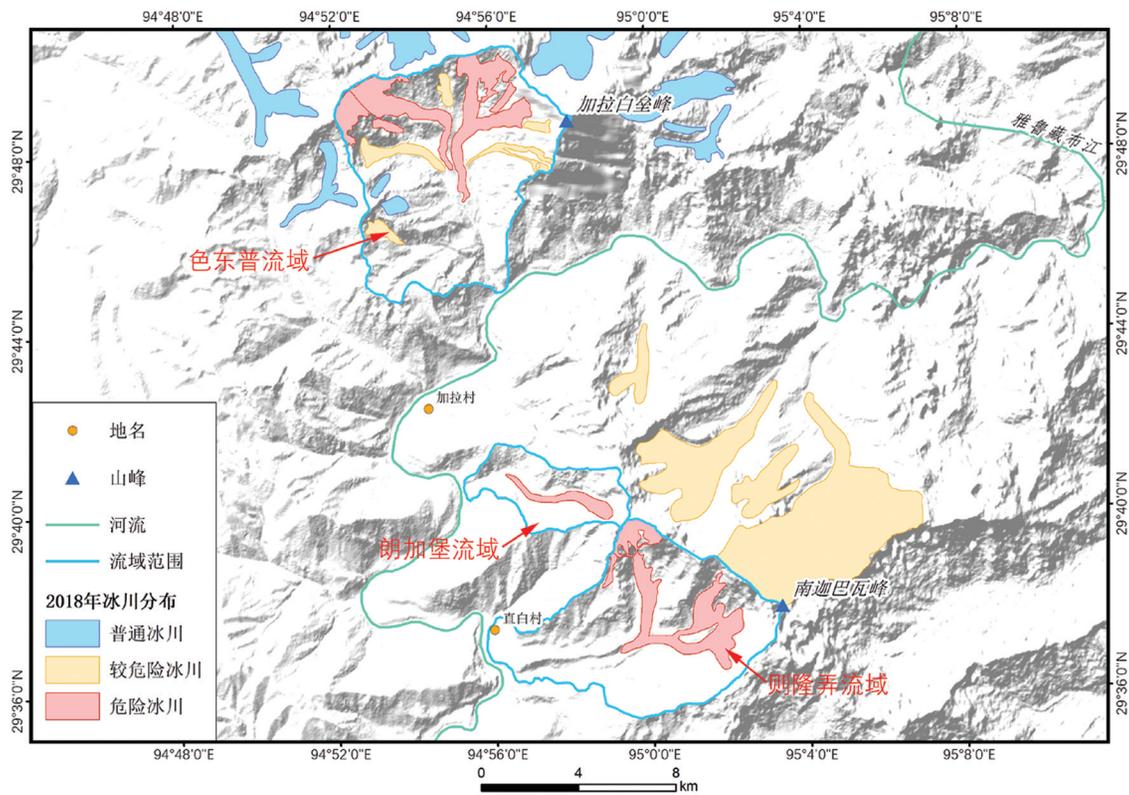


图25 色东普区域危险冰川分布图
Fig.25 Distribution of dangerous glaciers in the study area

(1)色东普沟域主要有12条支沟冰川,其中,5、6、7、9、10号支沟冰川的崩塌危险系数超过0.8,规模在 $500 \times 10^4 \sim 1800 \times 10^4 \text{ m}^3$;1、4、8、11、12号支沟冰川的崩塌危险系数在0.5~0.8,规模在 $500 \times 10^4 \sim 2000 \times 10^4 \text{ m}^3$;2、3号支沟冰川的崩塌危险系数低于0.5,规模分别为 $500 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $700 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。色东普沟域崩滑-碎屑流主要冲击堵塞雅鲁藏布江。

(2)则隆弄冰川的1、2号支沟冰川崩塌危险较大,估算规模分别为 $400 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $3500 \times 10^4 \text{ m}^3$;3、4号支沟冰川崩塌危险性一般,估算体积分别为 $500 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $1700 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。则隆弄冰川崩滑-碎屑流主要威胁沟口的直白村和大峡谷游客中心。

(3)朗加堡沟域内发育1条冰川,冰川厚度小,估算规模 $600 \times 10^4 \text{ m}^3$,危险系数0.8。朗加堡沟域崩

滑-碎屑流具有威胁雅鲁藏布江的可能性。

8 结论与对策建议

8.1 基本结论

(1)色东普沟域冰川冻融引发冰崩-岩崩-冰碛物滑坡-碎屑流-堵江-堰塞湖-溃决洪水灾害链,是特殊的地形地貌、地质结构、气候环境(气温、降雨、降雪)、冰川运动和地震构造活动等综合作用下形成的。

(2)在相当长的时期内,色东普沟域崩滑-碎屑流-堵江事件仍会保持频发多发态势。米林县派镇汛期平均气温超过13℃、派镇区域10 min降雨量超过3 mm、1 h降雨量超过5 mm、24 h降雨量超过10 mm或地震PGA高于0.18 g或烈度达到VIII度时,很可能引发崩滑-碎屑流事件。

(3)崩滑-碎屑流的组成物质以碎石土为主,含少量冰雪,容易渗透变形。当堰塞坝前水位升高至坝顶面后,一般会漫顶冲刷,自然泄洪,快速恢复到事前水位。

8.2 防治对策

(1)雅鲁藏布江流域自然资源能源开发利用要充分考虑色东普沟域崩滑-碎屑流频发多发态势。

(2)对色东普沟域崩滑-碎屑流的基本应对策略是监测预警,全面避让,局部整治。

(3)适当疏浚清理河道,减轻雅鲁藏布江色东普段多次堵江堰塞的“累积效应”。

(4)建立完善当地政府、工程企业、居民、旅游业与科学技术防灾减灾决策支撑的协同工作机制(平台)。

8.3 防治建议

(1)开展雅鲁藏布江及类似地区崩塌滑坡-碎屑流/泥石流堵江灾害链风险调查评价工作。

(2)基于天空地一体化技术装备实施综合监测,冰川、气象、水文、地质和地震数据共享,开展重点区段崩塌滑坡-碎屑流/泥石流堵江灾害链监测预警工作,为防灾减灾提供依据。

(3)开展大江大河崩塌滑坡-碎屑流堵江类型及成因规律研究。

(4)开展大江大河崩塌滑坡-碎屑流堵江防治工程可行性研究。

(5)开展崩塌滑坡-碎屑流堵江堰塞湖应急处

置方法分类研究,为制定不同类型堵江堰塞坝的应对方案提供依据。

致谢:陈亮、徐永强、褚宏亮参加了现场应急工作,石菊松参加了讨论,西藏驻军提供了直升机抵近观察,西藏各级地方政府提供气象资料及后勤保障,中国地震台网中心张永仙研究员提供了林芝地区地震数据,广州红鹏直升机遥感科技有限公司提供了三维地形测量资料,成都理工大学提供了部分冰川遥感信息,特此说明并致谢!

References

- Evans S G, Hungr O, Clague J J. 2001. Dynamics of the 1984 rock avalanche and associated distal debris flow on Mount Cayley, British Columbia, Canada: Implications for landslide hazard assessment on dissected volcanoes[J]. *Engineering Geology*, 61 (1): 29-51.
- Fu Zhengxiang, Lü Xiaojian, Shao Huicheng, Ding Xiang. 2008. Analysis on statistical characteristics of b values of aftershocks series in China continent and its Subregions[J]. *Earthquakes*, 28 (3):1-7(in Chinese with English abstract).
- Gutenberg B, Richter C F. 1942. Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration[J]. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 32:163-191.
- Hu Guisheng, Chen Ningsheng, Deng Mingfeng, Wang Yuanhuan. 2011. Classification and initiation conditions of debris flows in Linzhi area, Tibet[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 31 (2): 193-198(in Chinese with English abstract).
- Huang Wenxing, Wang Guocan, Wang An, Cao Shuzhao, Caokai. 2013. The morphology of the Yalung Zangbo river in the great canyon region and its implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 32(1):130-140(in Chinese with English abstract).
- International union of geological sciences working group on landslide. 1995. A suggested method for describing the rate of movement of a landslide[J]. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 52: 75-78.
- Ji Qin. 2018. Glacier Variations in Responses to Climate Change in the Himalayas During 1990-2015[D]. Lanzhou: Lanzhou University (in Chinese with English abstract).
- Li Cuiping, Wang Ping, Qian Da, Tang Maoyun. 2015. Ages of the recent two episodes of glacially dammed lakes along the upstream of the Yarlung Zangbo gorge[J]. *Seismology and Geology*, 37(4): 1136-1146(in Chinese with English abstract).
- Li Honglian, Zhao Shangxue, Li Aidi. 1994. Climate environments made in debris-flows[C]//*Proceedings of 4th Academic Workshop on Debris-Flows of China*. Lanzhou: Gansu Culture Press, 1-9(in Chinese).
- Li JiJun, Wen Shixuan, Zhang Qingsong, Wang Fubao, Zheng Benxing, Li Bingyuan. 1979. Research on the ages, ranges and patterns[J]. *Scientia Sinica Terrae(D)*, 9(6):608-616 (in Chinese)

- with English abstract).
- Liu Chuanzheng. 2017. Research on high speed and long-distance of the avalanches or landslide-debris streams[J]. Geological Review, 63(6):1563-1575(in Chinese with English abstract).
- Liu Yuping, Montgomery D R, Hallet B, Tang Wenqing, Zhang Jianlong, Zhang Xuanyang. 2006. Quaternary glacier blocking events at the entrance of Yarlungzangbo great canyon, southeast Tibet[J]. Quaternary Sciences, 26(1): 52- 62 (in Chinese with English abstract).
- Qu Yongping, ang Chuan, Liu Yang, Chang Ming, Tang Desheng. 2015. Investigation and analysis of glacier debris flow in Nyingchi area, TIBET[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 34(Supp.) :4013- 4022 (in Chinese with English abstract).
- Scheidegger A E. 1973. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides[J]. Rock Mech. Rock Eng., 5:11-40.
- Shangguan D, Ding Y, Liu S, Xie Z, T. Pieczonka, Xu J, B. Moldobekov. 2017. Quick release of internal water storage in a glacier leads to underestimation of the hazard potential of glacial lake outburst floods from Lake Merzbacher in Central Tian Shan Mountains[J]. Geophysical Research Letters, 44(19): 9786-9795.
- Tong Liqiang, Tu Jienan, Pei Lixin, Guo Zhaocheng, Zheng Xiongwei, Fan Jinghui. 2018. Preliminary discussion of the frequently debris flow events in Sedongpu Basin at Gyalaperi peak, YarlungZangbo River[J]. Journal of Engineering Geology, 26(6):1552- 1561 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yi, Zhang Yunda. 2015. Impact analysis of Gega glacier debris flow blocking of river at entrance of Brahmaputra Bend[J]. Sichuan Water Power, 34(4):81-84+140(in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Hou Zengqian, Zhang Zeming, Zeng Lingsen, Li Haibing, Zhang Jianxin, Li Zhonghai, Ma Xuxuan. 2016. The progress in the study of continental dynamics of the Tibetan Plateau[J]. Geology in China, 43(1): 1-42(in Chinese with English abstract).
- Yang Yichou. 1991. Geomorphological development and its influence on the environment in Mt. Namjagbarwa region[J]. Scientia geographica Sinica, 11(2): 165- 171 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zongxi. 2017. Anthropocene dawn, Chinese geologists should be active[J]. Geology in China, 44(2): 411-412(in Chinese).
- Zhang Peiquan, LiuXiaohan, Kong Ping. 2008. Evidence for glacial movement since last glacial period in the Great Canyon, Yarlung Zangbo, SE Tibet and its tectono— environmental implications[J]. Chinese Journal of Geology, 43(3): 588- 602 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wenjing. 1985. Some features of the surge glacie in the M t. Namjagbarwa[J]. Mountain Research, 3(4):234- 238 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, Li Hailong. Late Cenozoic tectonic events in east Tibetan Plateau and extrusion-related orogenic system[J]. Geology in China, (6): 1829-1852(in Chinese with English abstract).
- Zhang zhenshan. 1988. Fluctuation of glaciers on the northwest slope of Mt. Namjagbarwa since the last glaciations[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 10(2):181- 188 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 傅征祥, 吕晓健, 邵辉成, 丁香. 2008. 中国大陆及其分区余震序列 b 值的统计特征分析[J]. 地震, 28(3):1-7.
- 胡桂胜, 陈宁生, 邓明枫, 王元欢. 2011. 西藏林芝地区泥石流类型及形成条件分析[J]. 水土保持通报, 31(2):193-198.
- 黄文星, 王国灿, 王岸, 曹树钊, 曹凯. 2013. 雅鲁藏布江大拐弯地区河流形态特征及其意义[J]. 地质通报, 32(1):130-140.
- 冀琴. 2018. 1990—2015 年喜马拉雅山冰川变化及其对气候波动的响应[D]. 兰州: 兰州大学.
- 李翠平, 王萍, 钱达, 唐茂云. 2015. 雅鲁藏布江大峡谷入口河段最近两期古堰塞湖事件的年龄[J]. 地震地质, 37(4): 1136-1146.
- 李鸿连, 赵尚学, 李爱弟. 1994. 泥石流发育的气候环境[C]//第四届全国泥石流学术会议论文集. 兰州: 甘肃文化出版社. 1-9.
- 李吉均, 文世宣, 张青松, 王富葆, 郑本兴, 李炳元. 1979. 青藏高原隆起的时代, 幅度和形式的探讨[J]. 中国科学(D辑), 9(6):608-616.
- 刘传正. 2017. 论崩塌滑坡-碎屑流高速远程问题[J]. 地质论评, 63(6):1563-1575.
- 刘宇平, Montgomery D R, Hallet B, 唐文清, 张建龙, 张选阳. 2006. 西藏东南雅鲁藏布大峡谷入口处第四纪多次冰川阻江事件[J]. 第四纪研究, 26(1): 52-62.
- 屈永平, 唐川, 刘洋, 常鸣, 唐德胜. 2015. 西藏林芝地区冰川降雨型泥石流调查分析[J]. 岩石力学与工程学报, 34(增2):4013-4022.
- 童立强, 涂杰楠, 裴丽鑫, 郭兆成, 郑雄伟, 范景辉. 2018. 雅鲁藏布江加拉白垒峰色东普流域频繁发生碎屑流事件初步探讨[J]. 工程地质学报, 26(6):1552-1561.
- 王毅, 张运达. 2015. 雅鲁藏布江大拐弯入口格嘎冰川泥石流堵江影响分析[J]. 四川水力发电, 34(4): 81-84, 140.
- 许志琴, 杨经绥, 侯增谦, 张泽明, 曾令森, 李海兵, 张建新, 李忠海, 马绪宣. 2016. 青藏高原大陆动力学研究若干进展[J]. 中国地质, 43(1): 1-42.
- 杨逸畴. 1991. 南迦巴瓦峰地区地貌的形成及其对自然环境的影响[J]. 地理科学, 11(2): 165-171.
- 杨宗喜. 2017. 人类世呼之欲出, 中国地质学家应当有所作为[J]. 中国地质, 44(2): 411-412.
- 张沛全, 刘小汉, 孔屏. 2008. 雅鲁藏布江大拐弯地区末次冰期以来的冰川活动证据及其构造-环境意义[J]. 地质科学, 43(3): 588-602.
- 张文敬. 1985. 南迦巴瓦峰跃动冰川的某些特征[J]. 山地研究, 3(4): 234-238.
- 张岳桥, 李海龙. 2016. 青藏高原东部晚新生代重大构造事件与挤出造山构造体系[J]. 中国地质, 43(6): 1829-1852.
- 张振拴. 1988. 南迦巴瓦峰西北坡末次冰期以来的冰川变化[J]. 冰川冻土. 10(2):181-188.