

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.03-07

西藏嘉黎断裂带沿线高位链式地质灾害发育特征分析

万佳威^{1,2}, 褚宏亮³, 李 滨¹, 高 杨¹, 贺 凯⁴, 李 壮⁵, 李艺豪¹

(1. 中国地质科学院地质力学研究所新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 3. 中国地质环境监测院(自然资源部地质灾害防治技术指导中心), 北京 100081; 4. 中国地质调查局, 北京 100037; 5. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 西藏嘉黎断裂带沿线高位链式地质灾害十分发育, 多次在易贡藏布、帕隆藏布及雅鲁藏布江下游造成流域性灾害链破坏, 如易贡高位滑坡灾害链、古乡高位泥石流灾害链、尖母普曲高位崩塌灾害链、米堆冰湖溃决灾害链等。本文基于实地调研, 并结合前人资料, 总结了嘉黎断裂带沿线高位链式地质灾害的成灾模式, 认为其可划分为“高位崩滑-碎屑流-堵江-洪水灾害链”、“高位崩滑-堵江-洪水灾害链”、“高位泥石流-堵江-洪水灾害链”、“冰湖溃决灾害链”等 4 种类型。本文还从地质构造与地震、地貌与水系、冰川、气象等 4 个方面分析了高位链式地质灾害的孕灾条件, 并对其成因及发展趋势进行了探讨, 认为在当前条件下, 随着全球变暖加剧和人类工程活动增强, 嘉黎断裂带沿线高位链式地质灾害的发生将更加频繁。

关键词: 嘉黎断裂带; 高位链式地质灾害; 成灾模式; 孕灾条件; 成因

中图分类号: P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2021)03-0051-10

Characteristics, types, main causes and development of high-position geohazard chains along the Jiali fault zone, Tibet, China

WAN Jiawei^{1,2}, CHU Hongliang³, LI Bin¹, GAO Yang¹, HE Kai⁴, LI Zhuang⁵, LI Yihaol¹

(1. Key Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard, Institute of Geomechanics, CAGS, Beijing 100081, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. China Institute of Geo-Environment Monitoring (Guide Center of Prevention Technology for Geo-hazards, MNR), Beijing 100081, China; 4. China Geological Survey, Beijing 00037, China; 5. School of Geological Engineering and Surveying and Mapping, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: High-position geohazard chains are widely distributed along the Jiali fault zone, Tibet, China. They often induced severe flood disasters in the river basins of the Yigong Zangbu, Palong Zangbu, and the downstream of Yalu Zangbu, such as the famous Yigong, Guxiang, Jianmupuqu, and Midui high-position geohazard chains. Based on the field investigations and previously published data, these high-position geohazard chains are classified into 4 types: 1) high-position landslide-debris flow-dammed lake-flood, 2) high-position landslide-dammed lake-flood, 3) high-position debris flow-dammed lake-flood, 4) glacial lake outburst flood. The formation conditions of the high-position geohazard chains are analyzed from 4 aspects, that is 1) geological structures and earthquakes, 2) landscape and river system, 3) glacier, 4) meteorology. In the end, the main causes and development trends of these geohazard chains are discussed. We believe that the high-position geohazard chains would be more frequent along the Jiali fault zone, with the global warming and the enhancement of the human engineering activities.

收稿日期: 2021-05-03; 修订日期: 2021-05-10

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20211540)

第一作者: 万佳威(1991-), 男, 江西南昌人, 博士研究生, 主要从事地质灾害研究。E-mail: wjw2018@cugb.edu.cn

通讯作者: 褚宏亮(1981-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质灾害防灾减灾研究。E-mail: 52572706@qq.com

Keywords: Jiali fault zone; high-position geohazard chains; evolutional processes of the geohazard chains; formation conditions; causes

0 引言

嘉黎断裂带是藏东南地区的一组大型走滑断裂带，主要沿易贡藏布和帕隆藏布干流展布，全长超过 500 km。断裂带沿线高位地质灾害频发，并常发展演化为大型~特大型地质灾害链，影响范围广，破坏能力强。例如 2000 年发生的易贡高位滑坡，巨量的滑体转化为碎屑流后高速入江，导致易贡藏布被堵断 62 天，形成的堰塞湖蓄水达 $30 \times 10^8 \text{ m}^3$ ；人工导流后堰塞湖湖水倾泻，造成下游易贡藏布、帕隆藏布以及雅鲁藏布江下游流域水位暴涨，超过 4 000 人受灾^[1-3]。又如 1953 年发生的古乡特大高位泥石流灾害链，导致帕隆藏布被堵塞成湖，造成川藏公路和沿线大量基础设施被掩埋冲毁，140 余人死亡^[4-5]。再如 2020 年发生的金翁错冰湖溃决灾害链，造成忠玉乡大片民房、旅游景区、施工场地和农田被淹没，43.9 km 公路和 18 座桥梁被冲毁，因预警及时未造成人员伤亡^[6]。这些高位链式地质灾害危害巨大，不仅对藏东南地区的正常生产生活和社会经济发展破坏极大，对即将开展的重大工程建设也威胁严重。

本文基于大量实地调研，并结合前人资料，全面总结了嘉黎断裂带沿线高位链式地质灾害的成灾模式，并对其孕灾条件进行了分析。文章最后对地质灾害的成因和未来发展趋势进行了初步探讨。

1 高位链式地质灾害事件

嘉黎断裂带沿线高位岩质崩滑、泥石流、冰崩、冰

湖溃决等地质灾害频繁发生，且分布密集。这些高位地质灾害发生后“势能—动能”转换剧烈，链生效应十分显著，常导致易贡藏布、帕隆藏布及雅鲁藏布江下游形成大型洪水灾害。如图 1 和表 1 所示，1950 年来，沿嘉黎断裂带主要发生 8 处地区发生大型—特大型高位链式地质灾害，它们影响范围极广，破坏能力极强，曾造成群死群伤事件，严重危害了居民的生命财产安全。

2 高位链式地质灾害成灾模式

嘉黎断裂带沿线高位链式地质灾害的成灾模式可以总结为以下四种类型：(1)高位崩滑-碎屑流-堵江-洪水灾害链；(2)高位崩滑-堵江-洪水灾害链；(3)高位泥石流-堵江-洪水灾害链；(4)冰湖溃决灾害链。

2.1 高位崩滑-碎屑流-堵江-洪水灾害链

主要发育于冰川沟谷内。大量岩体自高位崩滑后破碎解体为碎屑流，碎屑流体沿沟道发生高速、长距离运动，冲击铲刮能力强，堆积范围广泛，碎屑流堵塞江面后形成堰塞湖，堰塞湖溃决后又转化为大型洪水灾害，导致流域内广泛成灾(图 2)。

此类灾害链以易贡滑坡灾害链为代表。易贡滑坡灾害链形成于易贡藏布(易贡湖)北岸的扎木弄沟。2000 年 4 月 9 日，扎木弄沟源约 $30 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的岩体自海拔超过 5 000 m 的山顶滑落，滑体解体为碎屑流后滑动 8 km，最后抛洒堆积于沟口形成喇叭状堰塞坝；堰塞湖蓄水 57 天后蓄水量达 $30 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，经人工导流 6 月 10 日



图 1 嘉黎断裂带沿线大型~特大型高位链式地质灾害分布图

Fig. 1 Distribution of the large-scale and mega-scale geohazard chains along with the Jiali fault zone

表 1 嘉黎断裂带沿线大型~特大型高位链式地质灾害事件^[1-15]
Table 1 Catastrophic high-position geohazard chains along with the Jiali fault zone

序号	地质灾害名称	发生时间	堆积体规模/溃决库容/ (10 ⁴ m ³)	威胁对象
1	然则日阿错冰湖溃决灾害链	2013年7月	1 084 ~ 1 559	溃决洪水涌入尼都藏布, 造成238户1 160人受灾, 并发生村民失踪
2	金翁错冰湖溃决灾害链	2020年6月	700	溃决洪水涌入尼都藏布, 威胁下游忠玉乡及附近村落, 因预警及时未造成人员伤亡
3	培龙贡支高位泥石流-堵江-洪水灾害链	1983年7月、1984年7月~8月、1984年10月、1985年5月~6月	2 073	堵塞帕隆藏布, 1984年造成6名行人死亡, 1985年造成停于沟两岸的80辆大小汽车淹没
4	易贡高位崩滑-碎屑流-堵江-洪水灾害链	2000年4月	30 000	堵塞易贡藏布, 两乡三厂(场)4 000余人受灾, 雅鲁藏布江下游有5万人无家可归
5	尖母普曲高位崩滑-碎屑流-堵江-洪水灾害链	2007年9月、2010年7月、2010年9月、2018年7月	76	堵塞帕隆藏布, 2007年造成1人死亡、7人失踪、9人受伤
6	古乡高位泥石流-堵江-洪水灾害链	1953年9月, 此后每年频发	1 100	堵塞帕隆藏布, 1953年造成140多人死亡
7	冬茹弄巴高位泥石流-堵江-洪水灾害链	1961年、1963年7月、1975年6月	15.5	堵塞玉璞藏布, 威胁下游玉普乡、松宗镇10余个村庄
8	米堆冰湖溃决灾害链	1988年7月	542	溃决洪水形成泥石流堵塞帕隆藏布, 造成多个村庄损毁, 5人死亡

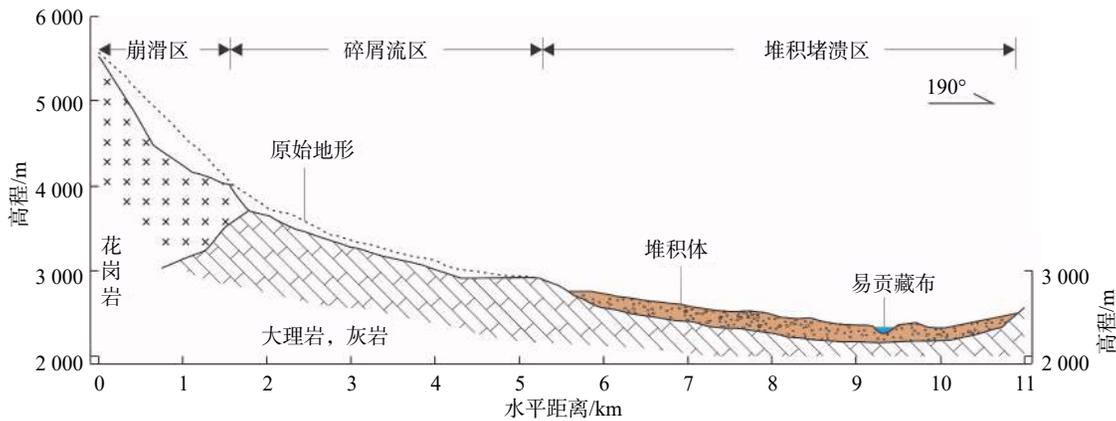


图 2 高位崩滑-碎屑流-堵江-洪水灾害链剖面示意图

Fig. 2 Sketch of the geohazard chain of high-position rockslide, debris flow, dammed lake and flood

堰塞湖湖水倾泻; 灾害链造成易贡乡和八盖乡 4 000 余

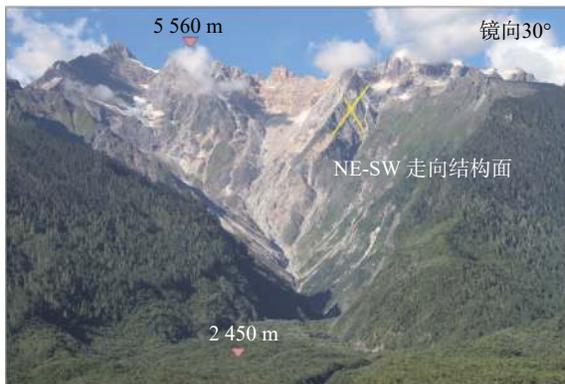


图 3 易贡滑坡形成区照片 (摄于 2019 年 8 月)

Fig. 3 A general view of the Yigong landslide.

人受灾, 易贡茶厂近 $1.33 \times 10^6 \text{ m}^2$ 茶园受淹, 堰塞湖泄洪后下游水位急速上涨, 因组织得力才无中国公民伤亡^[1-3]。本次调查发现, 易贡滑坡灾害链物源区结构面密集发育 (图 3), 且有岩体存在松动变形, 在地震、强降雨等外力作用下破碎岩体易再次失稳滑动; 而扎木弄沟沟口现仍保留大面积扇形堆积体 (图 4), 严重挤压易贡藏布江面, 堵溃风险高。

2.2 高位崩滑-堵江-洪水灾害链

指大量或巨量岩体自高位崩滑后直接入江引发堵溃灾害链, 主要形成于河谷两岸的陡坡处 (图 5)。由于崩滑体运移路程较短, 岩体破碎程度较低, 堆积体成分以巨砾为主, 导致堰塞坝难以被完全冲开。然乌湖口约在 1800 年发生此类灾害链, 当时帕隆藏布右岸的巨量



图 4 易贡滑坡堆积体航拍照片 (摄于 2020 年 10 月)

Fig. 4 Deposits of the Yigong landslide. Photo was taken on Oct. 2020



图 6 然乌湖口堆积体照片 (摄于 2019 年 8 月)

Fig. 6 Deposits of the Ranwuhu landslide.

Photo was taken on Aug. 2019

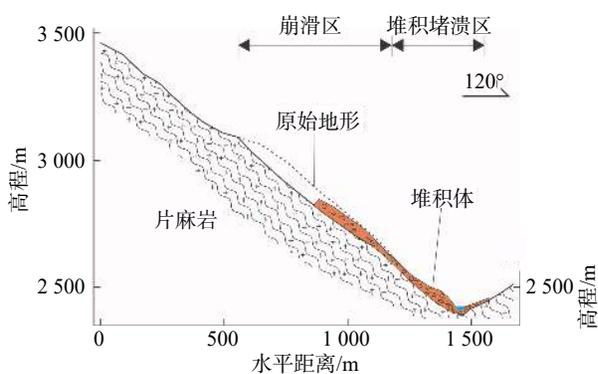


图 5 高位崩滑-堵江-洪水灾害链剖面示意图

Fig. 5 Sketch of the geohazard chain of high-position rockslide, dammed lake and flood

岩体崩落入江, 直接导致了然乌湖的形成。2019 年仍可见许多大块石堆积于然乌湖湖口(图 6)。

1967 年 8 月 29 日, 拉月曲(帕隆藏布支流)左岸曾发生此类灾害链。当时千万方岩体自海拔 2 400 m 处高位滑落, 垂直落差约 200 m。滑体堆积于坡脚, 部分物质冲至对岸。堆积体在拉月曲形成高 70~90 m 的堰塞坝, 回水淹没公路近 3 km, 导致了拉月湖的形成^[14]。

位于易贡藏布上游的笨多也存在发生此类灾害链的可能。笨多属高陡斜坡, 受嘉黎断裂带作用岩体结构破碎, 变形显著, 稳定性较差, 在地震、强降雨等作用下容易失稳成灾。

2.3 高位泥石流-堵江-洪水灾害链

主要发育于沟床比降较大、水动力条件较强的冰川谷内。部分冰川谷中上部堆积大量崩坡积物、冰水沉积物、冰碛物等第四系松散固体, 在冰雪融水、强降雨等因素作用下容易饱水形成黏性泥石流。泥石流流体沿沟谷快速流动, 冲出沟口后入江中形成堵江-洪水灾害链(图 7)。

此类灾害链以古乡泥石流灾害链最为典型。古乡沟沟源为冰蚀围谷, 四周山峰海拔均在 5 000 m 以上, 流域面积 25.2 km², 主沟长 8.7 km, 沟床平均纵比降 374‰。受嘉黎断裂带作用, 古乡沟岩体结构破碎, 崩滑灾害频发, 导致沟内松散固体物质储量巨大。古乡沟是高频泥石流沟。1953 年 9 月 29 日, 由于强降雨作用, 古乡沟暴发该点历史上最大规模的高位泥石流-堵江-洪水灾害链, 导致川藏公路和大量农田、房舍被冲毁,

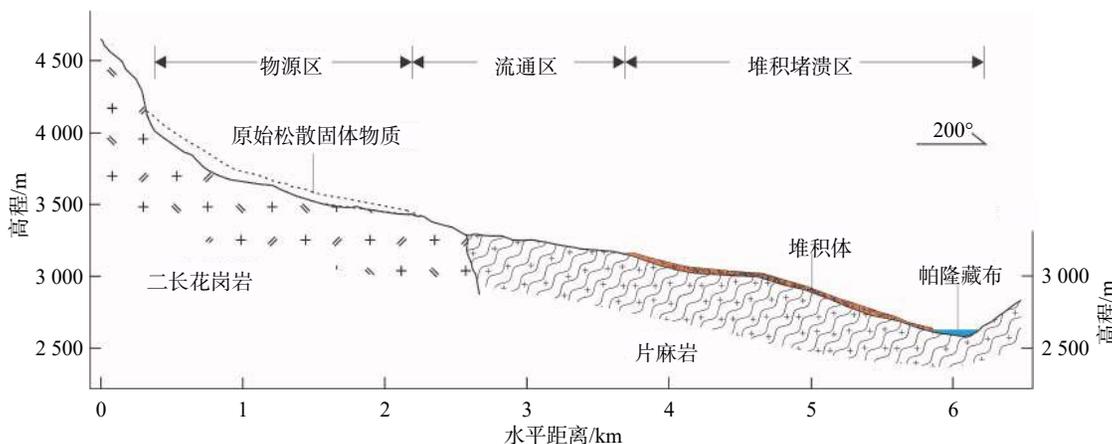


图 7 高位泥石流-堵江-洪水灾害链剖面示意图

Fig. 7 Sketch of the geohazard chain of high-position debris flow, dammed lake and flood

140余人死亡;此后,古乡沟几乎每年都暴发泥石流灾害链,最频繁时一年发生85次之多^[4-5]。调查发现,古乡沟中上游的松散固体物质储量仍然巨大,已逐渐漫过谷坊,灾害链成灾风险较高(图8)。



图8 古乡泥石流沟中上游航拍照片(摄于2020年10月)
Fig. 8 Oblique aerial view of the upstream of the Guxiang gully

2.4 冰湖溃决灾害链

冰湖溃决常由冰崩体、岩崩体入湖所激发(图9)。

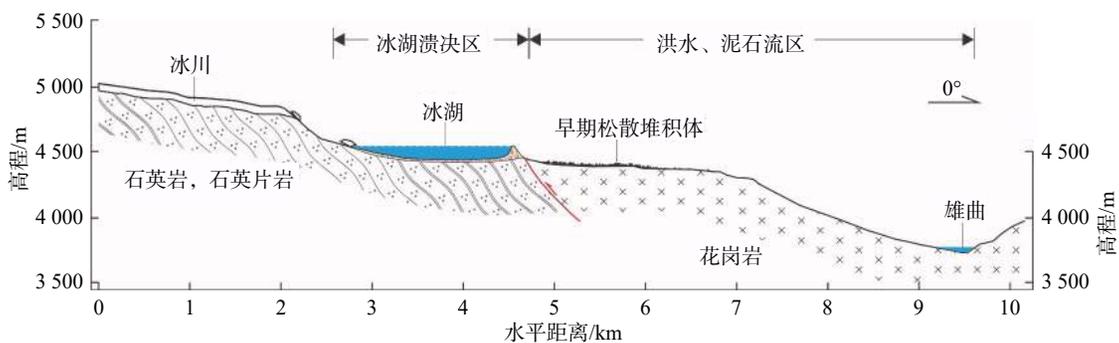


图9 冰湖溃决灾害链剖面示意图
Fig. 9 Sketch of the glacier lake outburst flood

3 高位链式地质灾害孕灾条件分析

3.1 地质构造与地震

3.1.1 区域构造背景

嘉黎断裂带位于青藏高原东南部、拉萨地块东部,该地区持续的构造隆升为高位链式地质灾害的形成创造了空间基础。约在65~63Ma B.P.,印度板块开始自中部向东西两侧穿时性碰撞欧亚板块,新特提斯洋关闭后,残留洋壳以蛇绿岩的形式构造侵位形成雅鲁藏布江缝合带,缝合带及两侧岩石圈发生强烈变形变质,青藏高原持续至今的大规模造山运动即由此开始^[17-18]。发生碰撞后,印度板块持续向北俯冲,这不仅导致青藏高原地壳快速缩短增厚,还导致了大量物质侧向挤出和大

溃决发生后,大量洪水沿原溢流路径倾泻,易冲刷裹挟沟道内松散固体物质,因此又常转化为泥石流灾害链。如1988年7月14日晚11时米堆冰川发生冰崩,次日位于冰舌前端的光谢错即发生大规模溃决,最大洪峰1270 m³/s,溃决水量540 m³,洪水演变为泥石流后对村庄和公路造成严重破坏,造成川藏公路断道一年之久^[15-16]。

2020年6月25日,金翁错发生了一起典型的冰湖溃决灾害链是由于气温升高后大量冰体或岩体崩落入湖引发(图10)。金翁错位于易贡藏布上游尼都藏布右岸的冰川谷内,汇水面积17.46 km²,湖面面积0.49 km²,湖面海拔4447 m,谷口江面海拔3806 m。6月25日,金翁错冰湖溃决灾害链发生。溃决发生后的次日,溃决洪峰抵达下游忠玉乡,库容近700×10⁴ m³,大片民房、旅游景区、施工场地和农田因此被淹没,43.9 km公路和18座桥梁也被冲毁^[6]。本次调查发现,金翁错溃决后冰蚀洼地内残留大量松散固体物质,其在长期冰雪融水冲刷携带作用下将逐渐堆积堵塞溃口,因此须关注其动态变化,防止堰塞湖形成。

型走滑断裂带的形成^[19]。青藏高原不同块体的隆升历史差异较大,研究区约在20 Ma B.P.就已大体隆升至现有高度,此后起经历了多个幕次的脉动隆升,3Ma以来隆升速率较快^[20-22]。

3.1.2 嘉黎断裂带特征

大型活动断裂带对高位地质灾害的形成具有控制作用。嘉黎断裂带为横贯青藏高原的“喀喇昆仑-嘉黎断裂带”的东段,总体走向NW-SE,途径嘉黎、波密、察隅等地,主要沿易贡藏布、帕隆藏布干流河谷展布,延伸长度超过500 km,宽度数公里至十余公里不等。其是因印度板块与欧亚板块碰撞而成,中新世开始活动,沿断裂带在嘉黎县西侧的凯蒙、查给和波密县附近零



图 10 金翁错不同时间卫星影像 (中国科学院空天信息创新研究院提供)

Fig. 10 Satellite images of the Jinwengcuo glacier lake, obtained from the AIRI, CAS

星出露蛇绿混杂岩^[23-24]。嘉黎断裂带南部为东喜马拉雅构造结,其为板块碰撞的前缘,构造变形作用强、隆升剥蚀速率快,塑造形成了切割超过 5 000 m 的高山峡谷。嘉黎断裂带在东喜马拉雅构造结以东分为了南北两条分支,过察隅后分别与三江地区的走滑断裂相接。

嘉黎断裂带以右旋走滑运动为主,但在局部表现出左旋走滑、正断倾滑等特征,不同位置的活动历史和

运动方式存在一定差异,具有明显的构造活动分段性^[23,25-27]。嘉黎断裂带第四纪以来持续活动,但活动性存在较大争议。ARMIJO 等^[24]通过测量断层错距,计算出嘉黎断裂带的第四纪平均滑动速率达 10~20 mm/a。任金卫等^[23]通过地层层序和冰期年代对比,认为嘉黎断裂带第四纪早期平均活动速率仅为 4 mm/a,除个别与张性盆地相邻的部位外,全新世活动性总体不强。而 WANG 等^[28]通过放射性碳测年,发现嘉黎断裂带在全新世(距今 2000—3000 年)曾强烈活动,导致古乡地区形成地震地表破裂。

3.1.3 地震

频发的地震会造成谷坡岩土体松动,也会直接触发高位链式地质灾害的形成。研究区位于板块碰撞的前缘,壳层挤压剧烈,地震频发。根据美国地质调查局资料,研究区及邻区(北至嘉黎、西至朗县、东南至察隅)1945—2020 年发生 4.5 级以上地震 280 次,其中 6.0 级以上地震 15 次,最大的为 1950 年察隅 8.6 级大地震,其次为 1947 年朗县 7.3 级大地震,地震 M-T 图见图 11。嘉黎断裂带沿线 1945 年来发生 4.5 级以上地震 126 次,主要集中于易贡乡附近。中国地震台网资料显示,2012 年 1 月—2021 年 4 月,嘉黎断裂带沿线发生 3.0 级以上地震 52 次,有 51 次位于易贡乡附近。

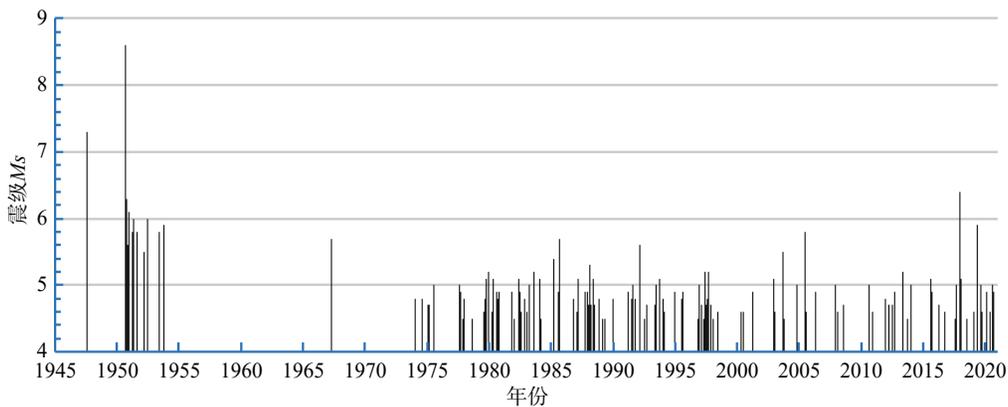


图 11 研究区及邻区地震 Ms-T 图 (Ms ≥ 4.5, 1945—2020)

Fig. 11 Ms-T diagram of earthquakes (Ms ≥ 4.5) in the study area and adjacent areas, 1945—2020

3.2 地貌与水系

嘉黎断裂带以北为念青唐古拉山脉的东支,以南发育岗日嘎布山脉,沿线主要属高山、极高山峡谷地貌,山峰海拔普遍超过 4 000 m,谷地海拔 2000~4 000 m,相对高差普遍在 1 000 m 以上。地势上总体两头高、中间低,最低点位于断裂带中部的通麦镇附近。谷地内发育易贡藏布和帕隆藏布两条水系,二者在空间上与构造线高度重合,展示河流沿断裂溯源侵蚀的结果。易贡藏

布由西北流向东南,流经嘉黎—忠玉—八盖—易贡等地,干流全长 295 km,落差 3 070 m,过通麦后向南汇入帕隆藏布;而帕隆藏布主要由东南向西北径流,流经然乌—玉普—松宗—波密—古乡等地,干流全长 266 km,落差 3 360 m。易贡藏布和帕隆藏布的纵比降大、侵蚀能力强,在构造抬升和河流快速下切的共同作用下 V 型窄谷十分发育,不稳定岩土体时常高悬,这为高位链式地质灾害的发生和发展提供了便利条件。

3.3 冰川

易贡藏布-帕隆藏布流域发育着中国规模最大的海洋性冰川群,总面积达4 638.42 km²,共有冰川1 861条,其中包括恰青冰川(西藏最长冰川)、来古冰川(帕隆藏布源头)和米堆冰川(中国最美六大冰川之一)等大型冰川,是亚洲最大的冰川中心之一^[7]。该冰川群温度高,补给量大,消融迅速,冰川作用强烈,进退变化频繁。古乡冰期和白玉冰期时期,帕隆藏布上游的冰川规模十分庞大,约为现代冰川的6~10倍和4~7倍,终碛堤也十分宏伟,形如巨大的城墙拱卫于冰川谷口;白玉冰期以后,该地区冰川规模逐渐减少,受全球性气温变化影响发生多次阶段式冰进冰退^[29]。

近年来,易贡藏布-帕隆藏布流域总体处于强烈退缩状态,冰量亏损和面积萎缩均占青藏高原及周边地区之最^[30]。数据表明,1970—2011年念青唐古拉山东段大型冰川面积减少45.73%,末端海拔平均上升276 m,长度平均减少26%^[16];1980—2015年岗日嘎布冰川面积减少24.91%,末端海拔平均上升111 m,长度平均减少36%^[31]。冰川消融退缩后,冰碛湖库容将增加,冰川表面破碎化也将加剧。这导致冰川趋于不稳定,灾变风险日益凸显。

3.4 气象

3.4.1 气温

由于岭谷高差悬殊,研究区存在气候垂直分带,临近地区因海拔高度不同气温可能差别很大。但在全球变暖背景下,研究区近年来气温上升显著。根据中国气象局资料(图12),那曲、林芝、波密、察隅等4地1980—2020年气温均趋于升高,平均气温增速约为0.236~0.642℃/(10a),其中那曲气温增速最大、察隅气温增速最小。此外,四地的平均最低气温增速为0.257~0.848℃/(10a),平均最高气温增速0.227~0.558℃/(10a),前者普遍高于后者,表明暖冬夜逐渐增多,这十分不利于积雪成冰作用,很大程度促使了易贡藏布-帕隆藏布流域的冰川消融和退缩^[32-34]。

3.4.2 降水量

研究区位于西南季风进入青藏高原的重要水汽通道之上,降水充足,主要集中在每年的4—9月。根据中国气象局资料(图13),那曲、林芝、波密、察隅等4个气象站1980—2020年在降水量变化上存在差异。其中那曲年降水量趋于增加,增速15.68 mm/(10a);林芝、波密、察隅年降水量趋于减少,减速分别为-4.50 mm/(10a)、-20.82 mm/(10a)、-23.08 mm/(10a)。波密和察隅的年降水量减少显著,这对冰川物质积累十分不利。此外,

近年来四地的降水量年际变化不稳定,常经历跳跃式波动和大起大落,个别年份降水量异常偏多。特别是林芝和察隅,在年降水量减少的条件下年最大日降水量仍然趋于增大,表明该地区的极端降水事件正在增多,这为高位链式地质灾害的形成发展提供了有利条件。

4 高位链式地质灾害成因及发展趋势探讨

4.1 成因

在内动力方面。(1)嘉黎断裂带沿线频繁的地震活促使断裂两盘岩体完整性降低和质量劣化,一些中强震~强震还直接造成了大规模的冰川断裂和岩土体破坏。如1950年8月15日发生发的察隅8.6级大地震,就造成通麦—古乡一带崩滑灾害成片发生,地表开裂随处可见。(2)嘉黎断裂带规模庞大,对易贡藏布和帕隆藏布干流河谷的形成演化具有控制作用。随着西藏地区大规模地表抬升,易贡藏布、帕隆藏布下切也十分迅速,这导致流域范围内普遍山高、坡陡、谷深,十分便于高位链式地质灾害的孕育和发生。(3)此外,嘉黎断裂带内大型结构面密集发育,谷坡岩体完整性和力学性质较低,稳定性较差,在外动力作用触发下容易失稳破坏。如易贡滑坡灾害链,就受嘉黎断裂带和易贡-鲁朗断裂的复合控制,扎木弄沟岩体因此被结构面切割成倾向坡外的楔形块体,稳定性低,最终于2000年4月9日失稳成灾。又如成灾风险较高的笨多,斜坡岩体在嘉黎断裂带作用下已十分破碎,变形十分显著,如遇极端条件极易成灾。

在外动力方面。(1)近40年来,嘉黎断裂带沿线气温普遍显著上升,但多地降水量却发生递减,在如此气候背景下,易贡藏布-帕隆藏布流域的冰川物质平衡逐渐被打破,冰川因此不断萎缩后退,状态趋于不稳定,易发生冰崩、岩崩及其链生地质灾害。如1988年7月14日发生的米堆冰湖溃决灾害链和2020年6月25日发生的金翁错溃决灾害链,就是由于冰体、岩体崩落入湖所触发。(2)另外,研究区年降水量经历多次跳跃式波动,个别年份降水异常偏多,这对危岩体稳定性产生不利影响。如波密县2010年年降水量达到1 080.6 mm,远超2009年的536.2 mm,尖母普曲响应剧烈,于2010年7月25—31日和9月5—8日多次爆发高位崩滑灾害链。(3)在强降雨和强烈冰雪融水的共同作用下,冰川谷内易形成强大的地表径流,从而为泥石流的发生提供强大的水动力条件。如1953年,古乡地区夏秋两季持续高温多雨,冰雪消融强烈,导致地表径流不断增大,渗流冲刷能力不断增强,最终该点形成有史以来规模最大的高位泥石流灾害链。

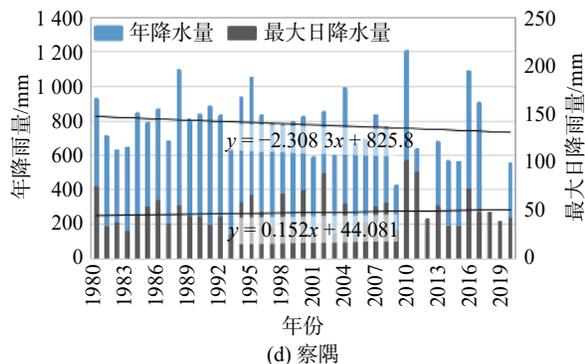
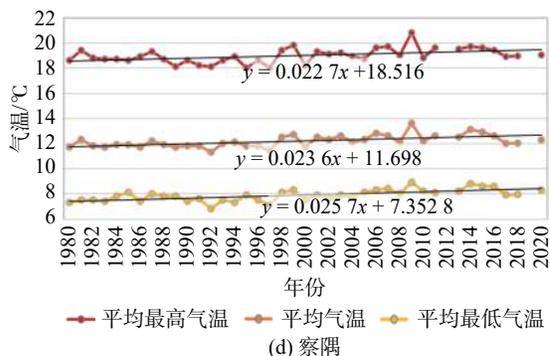
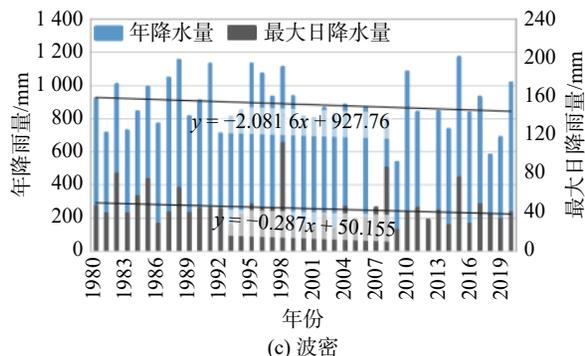
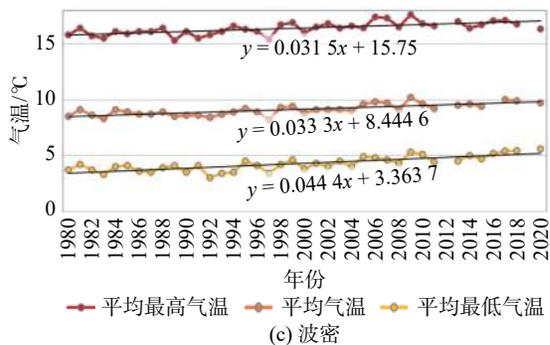
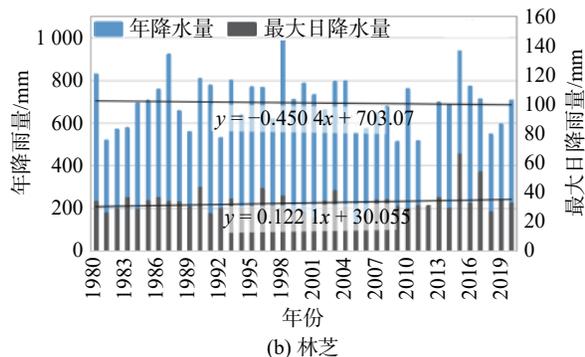
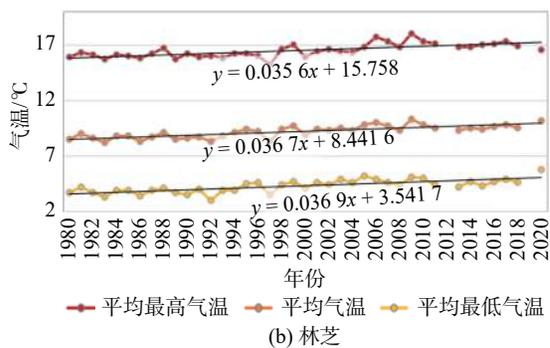
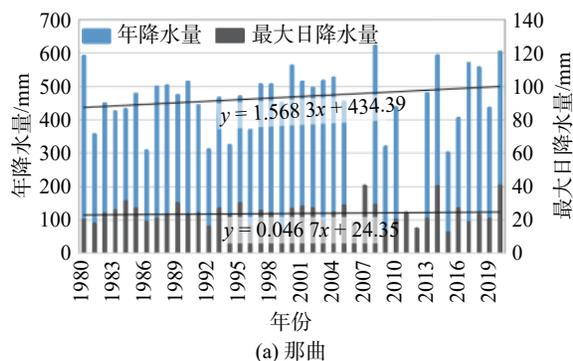
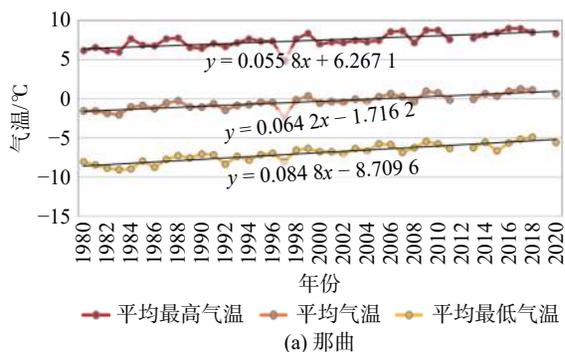


图 12 那曲、林芝、波密、察隅等气象站气温年变化

Fig. 12 Annual average temperatures in Naqu, Linzhi, Bomi, Chayu

图 13 那曲、林芝、波密、察隅等气象站降水量年变化

Fig. 13 Annual precipitations in Naqu, Linzhi, Bomi, Chayu

4.2 发展趋势

在全球变暖的背景下,研究区气象条件已发生深刻变化,这导致易贡藏布、帕隆藏布流域冰川持续减薄退缩,冰川状态趋于失常,原本构造破碎的岩体也因此更易失稳。随着国家十四五的推进,藏东南地区一项项重大工程将陆续实施,人类工程活动对环境的扰动也将不

断增大,这对岩体、冰体、冰湖的稳定性均将产生重要影响。总体而言,在现有构造和地貌条件的基础上,由于全球变暖的驱动和人类工程活动的影响,嘉黎断裂带沿线的灾变风险将日益增加,各类高位链式地质灾害的形成或将更加频繁。

5 结论

(1)嘉黎断裂带沿线高位链式地质灾害频繁发生,规模庞大,常在易贡藏布、帕隆藏布及雅鲁藏布江下游引发大型洪水灾害,影响范围广,破坏能力强。其成灾模式主要有“高位崩滑-碎屑流-堵江-洪水灾害链”、“高位崩滑-堵江-洪水灾害链”、“高位泥石流-堵江-洪水灾害链”、“冰湖溃决灾害链”等4种类型。

(2)地质构造与地震、地貌与水系、冰川、气象等4个方面因素组成了嘉黎断裂带高位链式地质灾害的孕灾条件。这些因素在灾害链的形成发展中发挥了着直接或间接作用。

(3)嘉黎断裂带沿线高位链式地质灾害是内外动力耦合作用的结果。在现有的构造和地貌条件基础上,随着全球变暖加剧和人类工程活动的增多,嘉黎断裂带高位链式地质灾害的形成或将更加频繁。

参考文献 (References) :

- [1] 殷跃平. 西藏波密易贡高速巨型滑坡概况 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2000, 11(2): 103. [YIN Yueping. The brief of the rapid and mega-scale Yigong landslide, Bomi county, Tibet [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2000, 11(2): 103. (in Chinese with English abstract)]
- [2] YIN Y, XING A. Aerodynamic modeling of the Yigong gigantic rock slide-debris avalanche, Tibet, China [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2012, 71(1): 149-160.
- [3] XU Q, SHANG Y, ASCH T V, et al. Observations from the large, rapid Yigong rock slide-debris avalanche, southeast Tibet [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2012, 49(5): 589-606.
- [4] 曾庆利, 杨志法, 张西娟, 等. 帕隆藏布江特大型泥石流的成灾模式及防治对策——以扎木镇-古乡段为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(2): 27-33. [ZENG Qingli, YANG Zhifa, ZHANG Xijuan, et al. Hazard model and countermeasure to super-large debris-flow in Parlung River—Case study of the section from Zamu Town to Guxiang Gully [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2007, 18(2): 27-33. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 刘建康, 程尊兰. 西藏古乡沟泥石流与气象条件的关系 [J]. 科学技术与工程, 2015, 15(9): 45-49. [LIU Jiankang, CHENG Zunlan. Meteorology conditions for frequent debris flows from Guxiang Valley in Tibet, China [J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(9): 45-49. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 王进东. 中科院专家结合遥感资料和现场调查发出预警-青藏高原须警惕冰湖溃决风险 [N]. 中国科学报, 2020-8-19(4). [WANG Jindong. A expert from CAS warning the risk of glacier lake burst flood on the Tibetan plateau based on the remote sensing data and field Investigation [N]. *Chinese Science News*, 2020-8-19 (4). (in Chinese)]
- [7] 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 西藏自治区交通科学研究所. 川藏公路典型山地灾害研究 [M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1999. [Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Institute of the Transport Research in Tibet Autonomous Region. Typical mountain hazards along with the Chuan-Zang railway [M]. Chengdu: Press of Chengdu University of Science and Technology, 1999. (in Chinese)]
- [8] 李滨, 高杨, 万佳威, 等. 雅鲁藏布江大峡谷地区特大地质灾害链发育现状及对策 [J]. 水电与抽水蓄能, 2020, 6(2): 11-14. [LI Bin, GAO Yang, WAN Jiawei, et al. The china of the major geological disasters and related strategies in the Yalu-Zangbu River Canyon Region [J]. *Hydropower and Pumped Storage*, 2020, 6(2): 11-14. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 孙美平, 刘时银, 姚晓军, 等. 2013年西藏嘉黎县“7.5”冰湖溃决洪水成因及潜在危害 [J]. 冰川冻土, 2014, 36(1): 158-165. [SUN Meiping, LIU Shiyin, YAO Xiaojun, et al. The cause and potential hazard of glacial lake outburst flood occurred on July 5, 2013 in Jiali County, Tibet [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(1): 158-165. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 童立强, 裴丽鑫, 涂杰楠, 等. 冰崩灾害的界定与类型划分——以青藏高原地区为例 [J]. 国土资源遥感, 2020, 32(2): 11-18. [TONG Liqiang, PEI Lixin, TU Jienan, et al. A preliminary study of definition and classification of ice avalanche in the Tibetan Plateau region [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2020, 32(2): 11-18. (in Chinese with English abstract)]
- [11] WEI R, ZENG Q, DAVIES T, et al. Geohazard cascade and mechanism of large debris flows in Tianmo gully, SE Tibetan Plateau and implications to hazard monitoring [J]. *Engineering Geology*, 2018, 233: 172-182.
- [12] 高波, 张佳佳, 王军朝, 等. 西藏天摩沟泥石流形成机制与成灾特征 [J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(5): 144-153. [GAO Bo, ZHANG Jiajia, WANG Junchao, et al. Formation mechanism and disaster characteristics of debris flow in the Tianmo gully in Tibet [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(5): 144-153. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 吕儒仁, 李德基. 西藏波密冬茹弄巴的冰雪融水泥石流 [J]. 冰川冻土, 1989, 11(2): 148-160. [LYU Ruren, LI Deji. Ice-Snow-Melt water debris flows in the Dongru Longba (gully) Bomi County, Xizang (Tibet) [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1989, 11(2): 148-160. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 孔纪名, 张小刚, 强巴. 川藏公路拉月滑坡的块状破坏特征 [J]. 山地学报, 2003, 21(2): 228-233. [KONG Jiming, ZHANG Xiaogang, Qiang Ba. Rock lump of landslide of Layue destruction feature analysis in Sichuan-Xizhang highway [J]. *Journal of Mountain Science*, 2003, 21(2): 228-233. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 李德基, 游勇. 西藏波密米堆冰湖溃决决议 [J]. 山地研究, 1992, 10(4): 219-224. [LI Deji, YOU Yong.

- Bursting of the Midui moraine lake in Bomi, Xizang [J] . Mountain Research, 1992, 10(4): 219–224. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 冀琴, 杨太保, 李霞. 念青唐古拉山东段八盖乡地区近 40 年冰川与气候变化研究 [J] . 水土保持研究, 2014, 21(2): 306–310. [JI Qin, YANG Taibao, LI Xia. Study on relationship between glacier retreat and climate change in the Eastern Nyainqentanglha in the past 40 years [J] . Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(2): 306–310. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 丁林, MAKSATBEK S, 蔡福龙, 等. 印度与欧亚大陆初始碰撞时限、封闭方式和过程 [J] . 中国科学: 地球科学, 2017, 47(3): 293–309. [DING Lin, MAKSATBEK S, CAI Fulong, et al. Processes of initial collision and suturing between India and Asia [J] . Science China Earth Sciences, 2017, 47(3): 293–309. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 刘志飞, 王成善, 李祥辉. 西藏南部雅鲁藏布江缝合带的沉积-构造演化 [J] . 同济大学学报, 2000, 28(5): 537–541. [LIU Zhifei, WANG Chengshan, LI Xianghui. Sedimentary-tectonic evolution of the Yarlung Zangbo suture zone, Southern Tibet [J] . Journal of Tongji University, 2000, 28(5): 537–541. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 印度-亚洲碰撞大地构造 [J] . 地质学报, 2011, 85(1): 1–33. [XU Zhiqin, YANG Jingsui, LI Haibing, et al. On the Tectonics of the India-Asia Collision [J] . Acta Geologica Sinica, 2011, 85(1): 1–33. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 吴福元, 黄宝春, 叶凯, 等. 青藏高原造山带的垮塌与高原隆升 [J] . 岩石学报, 2008, 24(1): 1–30. [WU Fuyuan, HUANG Baochun, YE Kai, et al. Collapsed Himalayan-Tibetan orogen and the rising Tibetan Plateau [J] . Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(1): 1–30. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 王成善, 戴紫根, 刘志飞, 等. 西藏高原与喜马拉雅的隆升历史和研究方法: 回顾与进展 [J] . 地学前缘, 2009, 16(3): 1–30. [WANG Chengshan, DAI Jinggen, LIU Zhifei, et al. The uplift history of the Tibetan Plateau and Himalaya and its study approaches and techniques: A review [J] . Earth Science Frontiers, 2009, 16(3): 1–30. (in Chinese with English abstract)]
- [22] LIU X, XU Q, DING L. Differential surface uplift: Cenozoic paleoelevation history of the Tibetan Plateau [J] . Science China Earth Sciences, 2016, 59: 2105–2120.
- [23] 任金卫, 沈军, 曹忠权, 等. 西藏东南部嘉黎断裂新知 [J] . 地震地质, 2000, 22(4): 344–350. [REN Jinwei, SHEN Jun, CAO Zhongquan, et al. Quaternary faulting of Jiali fault, southeast Tibetan Plateau [J] . Seismology and Geology, 2000, 22(4): 344–350. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 王保弟, 刘函, 王立全, 等. 青藏高原狮泉河-拉果错-永珠-嘉黎蛇绿混杂岩带时空结构与构造演化 [J] . 地球科学, 2020, 45(8): 2764–2784. [WANG Baodi, LIU Han, WANG Liquan, et al. Spatial-temporal framework of Shiquanhe-Laguoco-Yongzhu-Jiali ophiolite mélange zone, Qinghai-Tibet Plateau and its tectonic evolution [J] . Earth Science, 2020, 45(8): 2764–2784. (in Chinese with English abstract)]
- [25] ARMIJO R, TAPPONNIER P, HAN T. Late Cenozoic right-lateral strike-slip faulting in southern Tibet [J] . Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1989, 94(B3): 2787–2838.
- [26] LEE H Y, CHUNG S L, WANG J R, et al. Miocene Jiali faulting and its implications for Tibetan tectonic evolution [J] . Earth & Planetary Science Letters, 2003, 205(3-4): 185–194.
- [27] ZHANG B, CAI F, CHEN S, et al. Sinistral strike-slip shearing along the Jiali shear zone around the Eastern Himalaya syntaxis region: Evidences for oligocene eastward limited translation of Tibet [J] . Journal of Structural Geology, 2020, 139: 104136.
- [28] WANG H, LI K, CHEN L, et al. Evidence for Holocene Activity on the Jiali Fault, an Active Block Boundary in the Southeastern Tibetan Plateau [J] . Seismological Research Letters, 2020, 91(3): 1776–1780.
- [29] 李吉均, 郑本兴, 杨锡金, 等. 西藏冰川[M]. 北京: 科学出版社, 1986. [LI Jijun, Zheng Benxing, YANG Xijin, et al. Xizang Glacier[M]. Beijing: Science Press, 1986. (in Chinese)]
- [30] 姚檀栋, 余武生, 邬光剑, 等. 青藏高原及周边地区近期冰川状态失常与灾变风险 [J] . 科学通报, 2019, 64(27): 2770–2782. [YAO Tandong, YU Wusheng, WU Guangjian, et al. Glacier anomalies and relevant disaster risks on the Tibetan Plateau and surroundings [J] . Chinese Science Bulletin, 2019, 64(27): 2770–2782. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 吴坤鹏, 刘时银, 鲍伟佳, 等. 1980-2015 年青藏高原东南部岗日嘎布山冰川变化的遥感监测 [J] . 冰川冻土, 2017, 39(1): 24–34. [WU Kunpeng, LIU Shiyin, BAO Weijia, et al. Remote sensing monitoring of the glacier change in the Gangrigabu Range, southeast Tibetan Plateau from 1980 through 2015 [J] . Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(1): 24–34. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 韩培锋, 王镁河, 姜兆华, 等. 西藏吉隆县地质灾害及其影响因素分析 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(2): 111–118. [HAN Peifeng, WANG Meihe, JIANG Zhaohua, et al. Geological disasters and their influencing factors in Jilong County, Tibet [J] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(2): 111–118. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 段学良, 马凤山, 郭捷, 等. 基于 Massflow 模型的西藏仁布杰仲沟泥石流运动特征分析 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(6): 25–33. [DUAN Xueliang, MA Fengshan, GUO Jie, et al. Movement characteristics of Jiezhonggou debris flow of Renbu, Tibet based on massflow model [J] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(6): 25–33. (in Chinese with English abstract)]
- [34] 章旭, 郝红兵, 刘康林, 等. 西藏加查象牙泉水文地球化学特征及成因 [J] . 水文地质工程地质, 2019, 46(4): 1–9. [ZHANG Xu, HAO Hongbing, LIU Kanglin, et al. Hydrogeochemical characteristics and formation of the Ivory Spring in Jiacha County of Tibet [J] . Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(4): 1–9. (in Chinese with English abstract)]