

引用格式：龚凌枫，张运达，铁永波，等，2022. 雅鲁藏布江大拐弯典型泥石流全新世以来发育历史及活动特征 [J]. 地质力学学报，28（6）：1024–1034. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.20222826

Citation：GONG L F, ZHANG Y D, TIE Y B, et al., 2022. Development history and activity characteristics of typical debris flows in the Grand Bend of the Yarlung Zangbo River since the Holocene [J]. Journal of Geomechanics, 28（6）：1024–1034. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.20222826

雅鲁藏布江大拐弯典型泥石流全新世以来发育历史及活动特征

龚凌枫^{1,2,3}，张运达⁴，铁永波^{1,2,3}，高延超^{1,2,3}，刘文⁵，李青春⁴，张斌⁴，杨洪⁴，李光辉^{1,2,3,6}，卢佳燕^{1,2,3,7}，鲁拓^{1,2,3,7}

GONG Lingfeng^{1,2,3}，ZHANG Yunda⁴，TIE Yongbo^{1,2,3}，GAO Yanchao^{1,2,3}，LIU Wen⁵，LI Qingchun⁴，ZHANG Bin⁴，YANG Hong⁴，LI Guanghui^{1,2,3,6}，LU Jiayan^{1,2,3,7}，LU Tuo^{1,2,3,7}

1. 中国地质调查局成都地质调查中心，四川 成都 610081；

2. 自然资源部地质灾害风险防控工程技术创新中心，四川 成都 611734；

3. 自然资源部成都地质灾害野外科学观测研究站，四川 成都 610000；

4. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司，四川 成都 610072；

5. 稀有稀土战略资源评价与利用四川省重点实验室，四川省地质调查院，四川 成都 610081；

6. 中国地质大学（武汉）地球物理与空间信息学院，湖北 武汉 430074；

7. 中国地质大学（北京），北京 100083
1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China;

2. Technology Innovation Center for Risk Prevention and Mitigation of Geohazard, Ministry of Natural Resources, Chengdu 611734, Sichuan, China;

3. Observation and Research Station of Chengdu Geological Hazards, Ministry of Natural Resources, Chengdu 610000, Sichuan, China;

4. Chengdu Engineering Corporation Limited of Power China, Chengdu 610072, Sichuan, China;

5. Key Laboratory of Evaluation and Utilization of Strategic Rare Metals and Rare Earth Resource of Sichuan Province, Sichuan Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China;

6. Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China;

7. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

Development history and activity characteristics of typical debris flows in the Grand Bend of the Yarlung Zangbo River since the Holocene

Abstract：Multi-period debris flows have been developed in the last glacial period of the late Pleistocene–Holocene near the Grand Bend of the Yarlung Zangbo River in southeast Tibet, which combined to form a modern large-scale fan-shaped accumulation. The debris flows in the Bangga gully, Pai Town, were explored by ground survey, borehole, and ¹⁴C dating methods to investigate the chronological sequence of formation, accumulation depth, and

基金项目：国家自然科学基金项目（U20A20110-01）；中国地质调查局地质调查项目（DD20221746）

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China（Grant U20A20110-01）and the Geological Survey Project of the China Geological Survey（Grant DD20221746）

第一作者简介：龚凌枫（1989—），男，博士，工程师，主要从事地质灾害风险评价及泥石流形成及致灾机理研究。

E-mail: 308488910@qq.com

通讯作者：铁永波（1979—），男，博士，教授级高工，博士生导师，主要从事地质灾害形成机理与防治研究。

E-mail: tyongbo@mail.cgs.gov.cn

收稿日期：2022-06-21；修回日期：2022-09-24；责任编辑：王婧

outrush range. The analysis results show that there are still small-scale debris flows in the tributaries of the Bengga gully, and they are widely accumulated in the channel, but no debris flow accumulation has been found in the existing accumulation fan area. The Holocene debris flows in the Bunga gully were active around 8500 years ago, and the cumulative accumulation depth of a single period is about 10.9 m. The two carbon samples in the light gray silt sand formed by the shallow lake facies (fluvial facies) show that the modern riverbed of the Yarlung Zangbo River was deposited at a depth of about 0.4 m in 40 to 100 years, and the annual average deposition rate was about 4~10 mm. The boreholes at 2906.1~2896.7 m and 2849.4~2848.2 m above sea level reveal a thickness of 9.4 m and 1.2 m cake-like bluish-gray clay in turn. It is assumed that two river-blocking events occurred. The above results could provide a reference for the study of the debris flow activity characteristics since the Holocene in this region.

Keywords: Grand Bend of the Yarlung Zangbo River; Holocene; debris flow; history of development; activity characteristics

摘 要: 雅鲁藏布江大拐弯附近晚更新世末次冰期—全新世发育多期次泥石流，组合形成了现代大规模扇形堆积体。以派镇蹦嘎沟泥石流为例，采用地面调查、钻孔及¹⁴C 测年等方法，研究泥石流形成年代序列、堆积深度、冲出范围等特征，分析结果表明：现代蹦嘎沟依然有小规模支沟泥石流发育且广泛堆积于沟道内，现存堆积扇区域尚未发现泥石流堆积；距今 8500 年左右为蹦嘎沟全新世泥石流活跃期，单期次累积堆积深度约 10.9 m；滨湖浅水相沉积（河流相）形成的浅灰色粉细砂中的两处碳样表明雅鲁藏布江现代河床在 40~100 年左右沉积深度约 0.4 m，年平均沉积速率 4~10 mm；海拔 2906.1~2896.7 m 及 2849.4~2848.2 m 处钻孔依次揭露厚度为 9.4 m 和 1.2 m 饼状青灰色粉质黏土，推测发生两次堵江事件。上述结果可为该区域全新世以来泥石流活动性特征研究提供参考。

关键词: 雅鲁藏布江大拐弯；全新世；泥石流；发育历史；活动特性

中图分类号: P642.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2022) 06-1024-11

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222826

0 引言

雅鲁藏布江大拐弯附近为雅鲁藏布江流域中游与下游的分界点，历来是地球科学研究的重点区域，其中晚更新世以来的年代学研究为热点之一。雅鲁藏布江中下游地理、气候、植被时空差异明显，且兼有地表隆升（程尊兰等，2009）、河流下切（张沛全等，2009）、气候冷暖交替变化（刘湘伟，2015；杨浩等，2019）及泥石流堵江事件（李翠平等，2015）等复杂过程。随着雅鲁藏布江下游重大工程的推进，流域内关键区段的泥石流活动特性逐步受到重视，尤其是对第四纪全新世以来泥石流活动规律的研究，既是经济建设的需要，又是研究区内泥石流活动历史及活动性预测的基础。然而当前探索泥石流活动历史多限于对新发生泥石流的地表痕迹调查，难以揭示年代更加久远的泥石流发育历史及活动特征。

第四纪作为目前最短最新的地质历史时期，对其重大地质历史事件的研究多通过沉积剖面观察、取样及测年等方法（Hoyos et al.，2015；赵无

忌，2015；Li et al.，2021），其中测年方法多集中于¹⁴C（Wang et al.，2021）、光释光（OSL）（赵秋月等，2013；黄春长等，2019）、孢粉分析（陈剑和崔之久，2014）、树木年代学（Malik et al.，2013；铁永波等，2014）、地衣测年法（Šilhán and Tichavský，2016；Bernhardt et al.，2017）及¹⁰Be 定年（张沛全等，2008）等。李永化等（2002）即采用¹⁴C、光释光等方法对 40 多个泥石流沉积剖面进行分析认为中国第四纪泥石流沉积主要集中在 7 个阶段，其中全新世泥石流主要发育于 8~5 ka B. P. 和 0.2 ka B. P.。

通过采用上述方法，雅鲁藏布江流域构造运动、气候变迁及泥石流堵江事件等历史得以揭示。然而，现有的成果主要阐述了因河流下切及构造抬升出露地表的沉积物特征，全新世泥石流因其堆积年代较近较少被揭露，尚未对全新世以来的泥石流活动历史进行完整评价。

文章以雅鲁藏布江中下游工程区典型泥石流流域为研究对象，通过遥感地质解译、地表地质调查、工程地质钻探等方法阐明该区域全新世以

来泥石流活动特征，探索评价全新世以来重点泥石流危险性的方法。

1 研究区概况

研究区位于西藏自治区林芝市米林县派镇境内，属高原温带半湿润季风气候区，气候较干燥，降水集中，雨热同季，蒸发量大；地表水系发育，

支沟众多，水量丰沛，流域内植被覆盖度较高，泥沙含量较小；地形特征为宽谷地貌，河谷两侧不对称分布多级阶地，谷底与山前结合部位分布冲洪积扇地形。流域地形地貌见图 1，尼洋河口至派镇发育有多个河口堆积扇，较明显的有 10 处，其中距离雅鲁藏布江下游河道地形骤变最近的为吞白沟（N01）及蹦嘎沟（N02）。文章选取侵蚀最为活跃的大拐弯附近的蹦嘎沟流域进行研究。

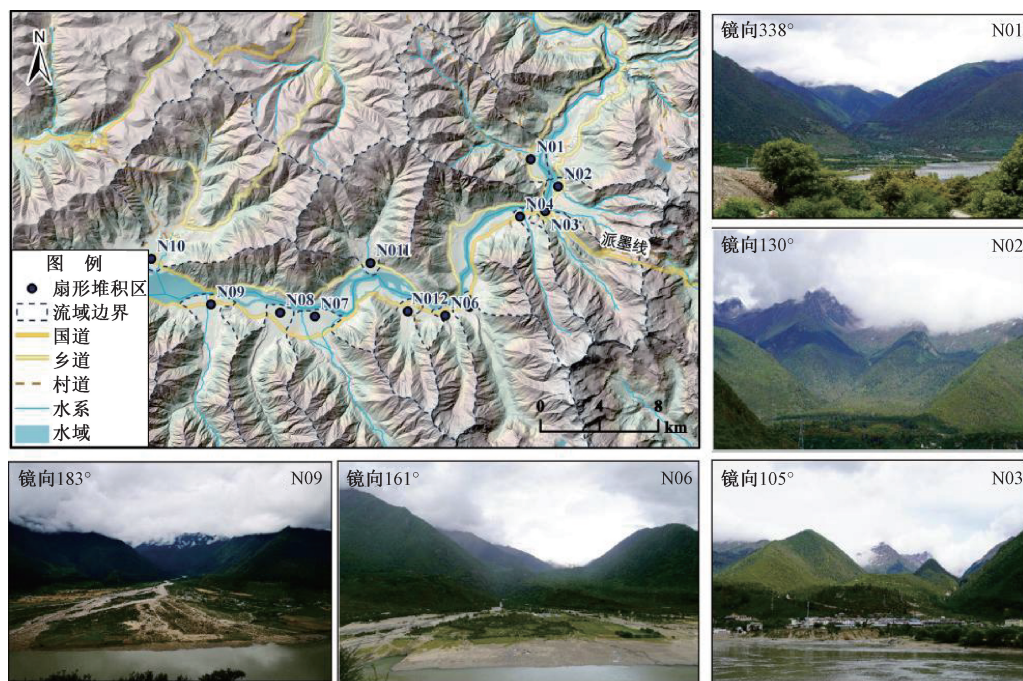


图 1 研究区流域及扇形堆积特征

Fig. 1 Characteristics of the research watershed and fan-delta accumulations

蹦嘎沟流域附近出露地层有第四系更新统冲积层（ Q^{al} ）、第四系更新统冰川堆积层（ Q^{gl} ）、第四系更新统湖积层（ Q^l ），古元古界—中元古界南迦巴瓦岩群 c 岩组（ $Pt_{1-2}N_j^c$ ）、古元古界—中元古界南迦巴瓦岩群 b 岩组（ $Pt_{1-2}N_j^b$ ）、古元古界—中元古界南迦巴瓦岩群 a 岩组（ $Pt_{1-2}N_j^a$ ）（图 2a）。流域面积为 27 km^2 ，主沟长度约 6 km ，沟道纵坡比降约 325‰ ，最高海拔约 4861 m ，最低点海拔约 2911 m 。基于蹦嘎沟流域 DEM 生成了流域的坡度图（图 2b）。坡度图显示，蹦嘎沟流域坡度介于 $6^\circ\sim84^\circ$ ，平均坡度 27.2° ，低坡度主要集中在下游左侧冰碛台地、沟槽及沟道上游冰碛台地区域，而高坡度主要集中分布在右岸岸坡、分水岭地带及右侧支沟深切沟道岸坡。

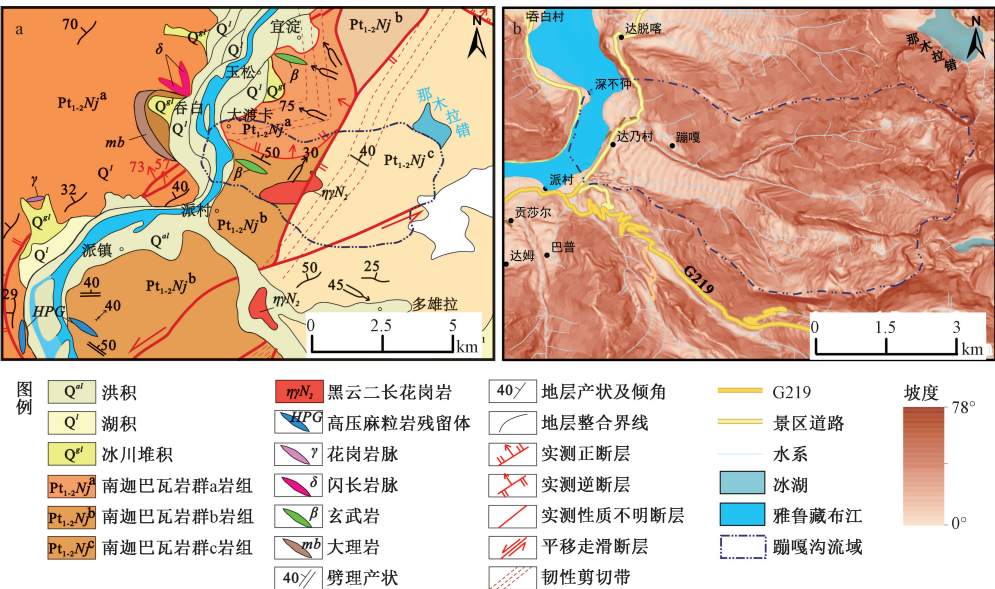
综上所述，蹦嘎沟流域面积适中、沟道纵比降大、山坡坡度大，具有发生泥石流的条件。

2 泥石流历史调查方法

2.1 全新世以来泥石流发育历史调查取样

泥石流暴发伴随强烈的侵蚀、搬运和堆积作用，其发生过程除了将大量固体物质搬运出流域并在沟口堆积外，还会破坏沟道两岸树木等。而泥石流事件后，流域内生态地质环境逐渐恢复，植被逐渐恢复。因此，根据流域内不同区域植被发育程度、堆积体物质特征等差异可窥测过去泥石流发育状况。

研究区泥石流沉积历史调查采用了工程地质钻孔和沉积物漂木测年相结合的方法。为了查明蹦嘎沟—吞白沟附近区域的泥石流堆积特征，分别在蹦嘎沟及吞白沟堆积扇附近区域设置钻孔（图 3）。蹦嘎沟沟口附近钻孔编号为 ZK132—ZK135 及 ZKK01，其中 ZK132—ZK135 钻孔深度为 100 m ，



a—研究区地质图; b—崩嘎沟流域地形图

图 2 崩嘎沟流域特征

Fig. 2 Characteristics of the Bengga watershed

(a) Geological map of the study area; (b) Topographic map the Bengga watershed

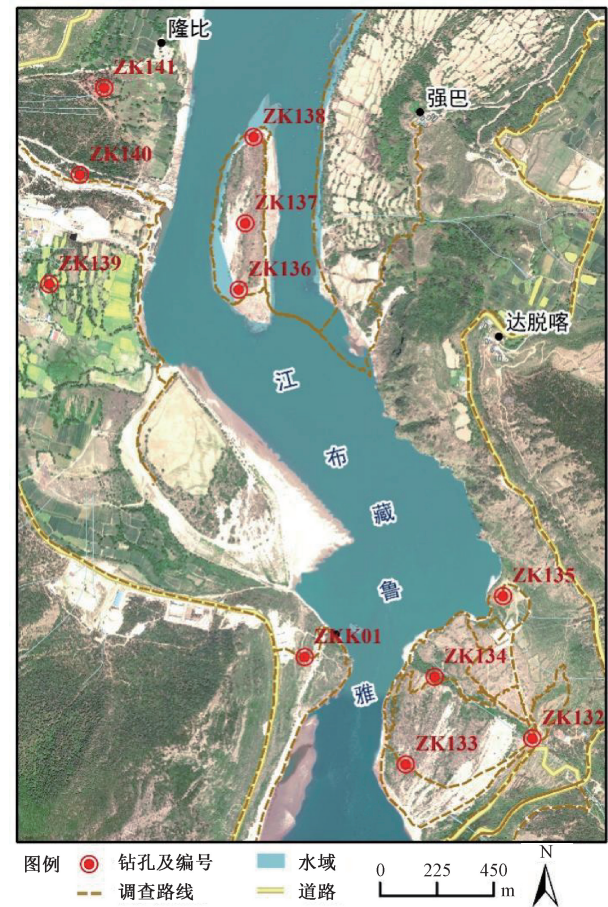


图 3 钻孔位置分布图

Fig. 3 Location map of the boreholes

未揭露基岩; ZKK01 钻孔深度为 535 m, 并于

513 m 处揭露基岩。吞白沟沟口附近钻孔编号为 ZK139—ZK142, 钻孔深度均为 100 m 且未揭露基岩。

通过详细编录, 崩嘎沟 ZK135 钻孔中获取三处碳样, 埋深由地表至钻孔底部分别为 12.6 m、13.0 m 及 38.5 m; 吞白沟 ZK139 钻孔中获取两处碳样, 埋深由地表到钻孔底部分别为 61.0 m 和 61.8 m (表 1)。每处样品取 10 g 送样至 BETA 试验室 (Beta Analytic Radiocarbon Dating Laboratory), 采用美国 AMS 加速器质谱仪进行全新世晚期以来沉积碳样¹⁴C 测年。测年年龄分别用常规放射性碳年龄及校正之后的公历年 (cal. B. C.) 表示, 校准数据库采用 IntCal13。现代泥石流发育历史则采用年轮年代学及调查访问法等 (图 4), 其中年轮调查主要采用泥石流漂砾大量堆积区树木根茎的倾斜树干进行测量 (图 4b; 铁永波等, 2014)。

2.2 泥石流物源评价

泥石流作为山区主要快速地表过程之一, 其暴发需要充足固体物质的参与。为分析泥石流物源供给特征, 文章采用滑坡深度-滑坡体积的计算模型对滑坡活动的物质方量进行评估 (公式 1; Tang et al., 2011; Marc et al., 2015; Jaboyedoff et al., 2020; Leong and Cheng, 2022)

$$V = A \times \bar{h}$$

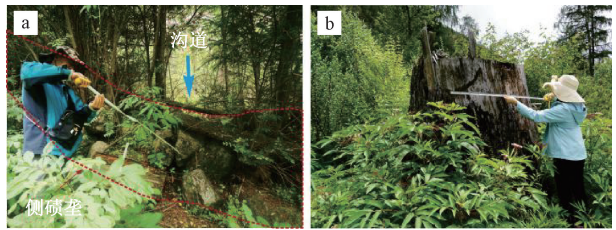
(1)

其中: V 为泥石流物源体积, m^3 ; A 为泥石流

表1 测年取样样品及其位置统计表

Table 1 Statistical table of the samples for dating and their locations

样品位置及取样编号	样品照片
ZK135-1 (埋深 12.6 m)	
ZK135-4 (埋深 13.0 m)	
ZK135-3 (埋深 38.5 m)	
ZK139-2 (埋深 61.0 m)	
ZK139-1 (埋深 61.8 m)	



a—沟道流通区现代泥石流侧积垄；b—树木年轮调查

图4 现代泥石流调查

Fig. 4 Debris flow investigation

(a) Side moraine ridges in the channel flowing area; (b) Ring chronology investigation

崩滑物源面积， m^2 ； $\bar{h}$ 为泥石流流域崩滑物源厚度， m 。

物源面积确定主要采用光学遥感解译及现场调查。根据遥感解译需要，文章选择了高分二号光学遥感卫星数据作为此次调查工作的主要遥感信息源，同时采用高分七号、Worldview-2 等多时相多源光学遥感卫星数据完成泥石流沟物源多时相遥感解译。所采用的遥感图像均经过正射校正、数据融合、几何校正、色调匹配、图像镶嵌和各种增强处理等，且所采用的高分二号光学遥感卫星数据云雪覆盖率

$\leq 5\%$ ，影像清晰、反差适中、色调（色彩）层次丰富，可满足此次地质灾害研究需要。

崩滑物源发育受汇流区域面积、基岩坡度、植被覆盖度、土体结构特征及地震影响程度等因素控制，为了量化泥石流流域物源发育程度，文章在充分考虑崩滑堆积体几何参数背景下采用公式 2 对崩滑物源厚度进行量化：

$$\bar{h} = e^{2.3869} A^{0.2293} (\tan \varphi)^{0.2809} h^{-0.2381} \quad (2)$$

其中： $\bar{h}$ 为泥石流流域崩滑物源厚度， m ； A 为泥石流崩滑物源面积， $10^4 m^2$ ； φ 为崩塌滑坡体平均坡度， $(^\circ)$ ； h 为崩塌滑坡体高度， m 。

现代泥石流活动频率评价需长期的观测数据、目击者、文献记录或较好的地表证据，蹦嘎沟所处大拐弯区域难以获取访查、文献等数据，也缺乏长期的地质灾害观测数据，因而需通过遥感解译及现有的沟道调查获取泥石流残留的堆积物质、泥痕等活动证据。

3 典型泥石流全新世以来发育历史及活动特征分析

3.1 钻孔及样品测试结果

通过蹦嘎沟-吞白沟堆积区附近 5 处钻孔揭露的分层特征对比分析，选取蹦嘎沟钻孔中揭露的多种沉积成因固体物质，根据孔内固体物质颗粒组成，将其沉积物成因类型总结为坡积物、冲洪积物、泥石流堆积物、滨湖浅水相（河流相）沉积物、湖泊深水相沉积物、冰水堆积物及冰碛物，物质组成主要有①粉砂、②细砂、③粗砂、④黏土、⑤粉质黏土、⑥卵砾石及⑦砾石（图 5）。

通过钻孔中漂木样品获取测年结果（表 2），采用放射性碳年龄 $\pm 1\sigma$ 表示经过 AMS $\delta^{13}C$ 同位素分馏作用校正的值。测年概率的百分比为年龄出现在该范围相对于另一个范围的可能性，百分比越高，范围越接近真实年龄范围。

3.2 泥石流发育历史特征

蹦嘎沟的 ZK135-1、ZK135-4、ZK135-3 分别为取自滨湖浅水相（河流相）沉积形成的浅灰色粉细砂中的碳样（13.0 m 处及 12.6 m 处）和泥石流弱胶结碎石土中的碳样（38.5 m 处）。通过测年结果可知该孔位处 40~100 年左右的湖相沉积深度约 0.4 m，年平均沉积速率 4~10 mm。埋深 38.5 m 处的单期泥石流发生时间为 6696~6568 cal. B. C. 。

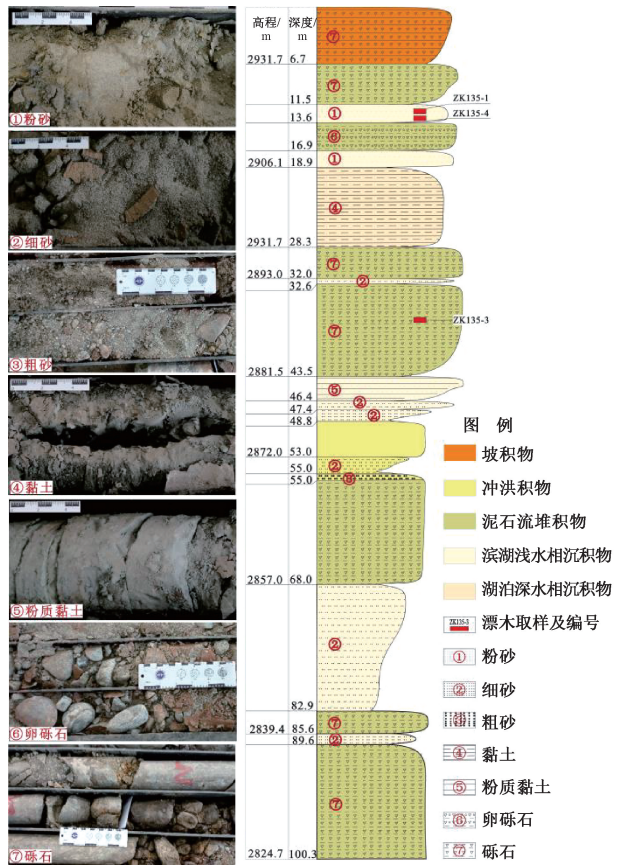


图 5 ZK135 剖面及不同沉积成因物质成分特征照片

Fig. 5 Characteristics of the material compositions of different sedimentary facies in the ZK135 profile

表 2 漂木样品测年结果

样品 编号	埋深/ m	放射性碳年龄	公历校正	测年 概率/%
ZK135-1	12.6	7120+/-30 a B. P.	6062—5977 cal. B. C.	76.0
			5948—5919 cal. B. C.	19.4
ZK135-4	13.0	7220+/-30 a B. P.	6100—6011 cal. B. C.	76.7
			6219—6135 cal. B. C.	18.7
ZK135-3	38.5	7810+/-30 a B. P.	6696—6568 cal. B. C.	93.4
ZK139-2	61.0	9370+/-40 a B. P.	8753—8547 cal. B. C.	93.7
ZK139-1	61.8	9420+/-30 a B. P.	8792—8622 cal. B. C.	95.4

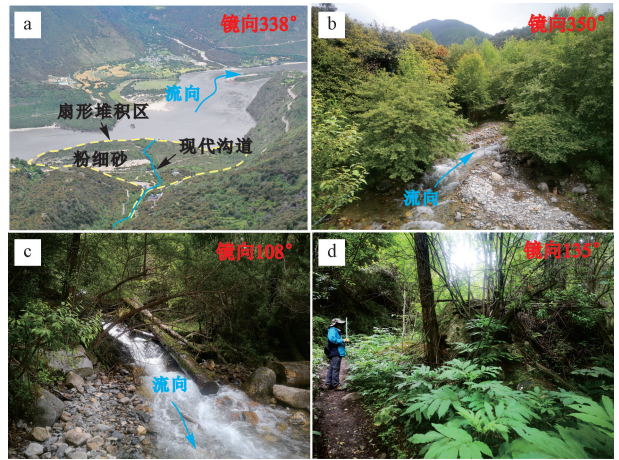
综合蹦嘎沟钻孔编录 (图 5) 和测年结果推测, 在距今 8500 年左右, 蹦嘎沟曾为泥石流活跃期, 单次或累积堆积深度约 10.9 m。在此次泥石流沉积的 38.5 m 之上共有三期堆积形成的碎石土, 详情如下:

I 期沉积物埋深 28.3~32.0 m, 为松散碎石土, 碎石含量 70%, 粒径 2~40 cm, 呈次棱状一次圆状; II 期沉积物埋深 13.6~16.9 m, 松散堆积, 碎石土含量 18%, 粒径 2~10 cm, 呈次棱状一次圆

状, 其中 13.6~15.2 m 为灰白色细砂, 15.2~16.9 m 为青灰色粉质黏土; III 期埋深 6.7~11.5 m, 为松散碎石土, 碎石含量 24%, 粒径 1~36 cm, 呈次棱状一次圆状, 其中 10~10.4 m 处及 11.2~11.4 m 处含青灰色泥块。

根据磨圆度、泥质含量推测 I 期沉积物和 II 期沉积物的成因为泥石流堆积, III 期沉积物的成因为洪积物。其中 I 期沉积物所揭露的泥石流年代较远, II 期沉积物揭露的泥石流年代稍近。II 期沉积物中未发现可供测年的碳样, 根据沉积速率推测 II 期沉积物中揭露的泥石流发生时间远大于 200 年, 因而蹦嘎沟流域现代大型泥石流不发育。

蹦嘎沟泥石流上游有少量现代冰川发育, 虽然冰川的面积和活跃程度相对较弱, 但泥石流流域上游的冰碛土为泥石流的发生提供了充足的物源。现场工程地质调查显示, 堆积扇区域现沟道分布有砂卵石、少部分砾石, 磨圆较好, 未见大型泥石流堆积物, 成因为常规降雨条件下的洪水堆积及小规模稀性泥石流堆积 (图 6)。



a—堆积扇形态; b—扇顶稀性泥石流沉积; c—流通区漂木及漂石; d—主沟流通区泥石流堆积

图 6 蹦嘎沟新近泥石流特征

Fig. 6 Photos showing the features of recent debris flows in the Bengga gully

(a) Morphology of the alluvial fan; (b) Debris flow sediments at the fanhead; (c) Driftwood and boulder in the inundation area; (d) Debris flow accumulation in the inundation area

此次调查共发现 7 处泥石流活动痕迹 (图 7), 由上游至下游分别命名为 1#—7#泥石流。

1#泥石流位于右侧沟道与主沟交汇处上游约 100 m 处, 其物质来源为上游泥石流堆积的漂石,

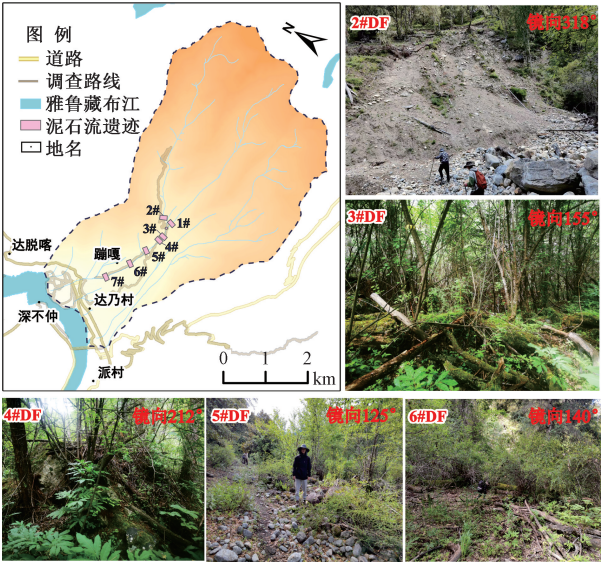


图 7 蹦嘎沟现代泥石流遗迹

Fig. 7 Remains of the modern debris flows in the Bengga gully

部分为村道弃渣。经流水冲刷，目前残留漂石占固体物源的 70%，且该处沟道纵坡降较大，易在较强的水动力条件下进一步形成黏性泥石流。2#—6#泥石流分别位于主沟流通区，残留固体物质主要为卵砾石及漂石，沿河展布，颗粒物质呈次棱状—次圆状，卵砾石粒径 3~20 cm，漂石最大粒径

1.4 m×1.0 m×0.3 m，长轴方向与沟道水流方向大角度相交表明泥石流搬运过程中固体物质主要以滚动为主，且搬运距离较近。7#泥石流位于沟口桥梁上游 100 m 处，主要为洪水冲刷岸坡导致局部垮塌形成的小型泥石流，沟道最大侵蚀深度约 1.8 m，侵蚀方量约 1000 m³，根据调查访问此次小规模泥石流发生时间为 2020 年。

调查尚未发现蹦嘎沟大型泥石流发育，数十年来以小规模的泥石流为主。2007 年以来的遥感解译表明，上游新增崩滑物源、不断累积的沟道物源及人类工程活动新增物源导致流域内物源量增加，有发生较大规模泥石流的可能性。

3.3 物源时空分布特征

崩滑物源的形成时间分析及崩滑物源形成位置的遥感影像解译表明，2007 年以来沟道侵蚀有逐步向高海拔区域发展的趋势，2018 年影像显示新增的沟道物源主要源自流通区沟道的扩展，其固体物质主要累积于两沟交汇形成的主沟内（图 8），与野外考察现状一致。沟道上部 2014 年新增崩滑物源及 2018 年新增沟道物源表明蹦嘎沟流域目前处于发展期（表 3），未来一段时期内蹦嘎沟流域泥石流将较为活跃。

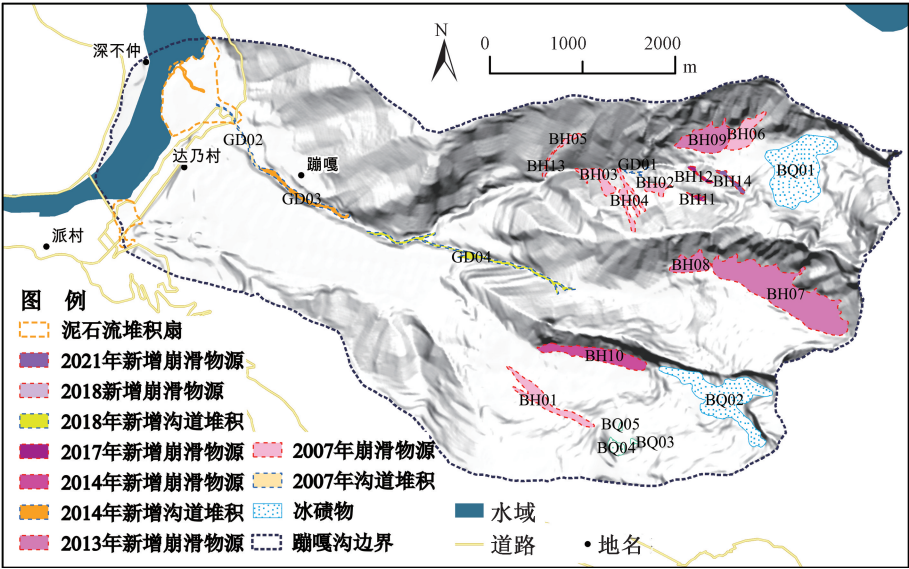


图 8 蹦嘎沟流域内崩滑物源及沟道堆积分布特征

Fig. 8 Distribution characteristics of landslide sources and channel accumulations in the Bengga watershed

蹦嘎沟沟道物源主要来源于前期小规模泥石流堆积，沟道堆积物在流域内的主支沟均有分布，堆积厚度差异较大，侵蚀剖面调查表明流通区下游段泥石流侵蚀厚度为 1.0~2.0 m。常遇降雨条件下泥石流沟道物源较难搬运至堆积区，中游沟道

断续出现小规模淤积，现阶段不足以形成大规模泥石流。但不断累积的卵砾石、漂木为大规模泥石流形成蓄积了物源，有发生较大规模泥石流的物源条件。

表 3 蹦嘎沟泥石流物源分布及时间变化特征

Table 3 Source distribution and temporal variation characteristics of the sources in the Bengga gully

编号	类型	面积/ m ²	厚度/ m	体积/ ×10 ⁴ m ³	影像日期
BH01	崩滑物源	95734	4. 21	40. 29	2007-9-17
BH02	崩滑物源	26254	3. 13	8. 21	2007-9-17
BH03	崩滑物源	44733	3. 54	15. 81	2007-9-17
BH04	崩滑物源	51883	3. 66	18. 98	2007-9-17
BH05	崩滑物源	12012	2. 61	3. 14	2007-9-17
BH06	崩滑物源	76095	3. 99	30. 39	2007-9-17
BH07	崩滑物源	483453	6. 10	294. 98	2013-10-9
BH08	崩滑物源	67118	3. 88	26. 04	2013-10-9
BH09	崩滑物源	126595	4. 49	56. 81	2013-10-9
BH10	崩滑物源	134525	4. 55	61. 21	2014-11-8
BH11	崩滑物源	5820	2. 21	1. 29	2017-12-4
BH12	崩滑物源	8658	2. 43	2. 10	2017-12-4
BH13	崩滑物源	7208	2. 33	1. 68	2018-12-26
BH14	崩滑物源	15242	2. 76	4. 21	2021-1-23
GD01	沟道堆积	4149	2. 05	0. 85	2007-9-17
GD02	沟道堆积	16190	2. 80	4. 53	2007-9-17
GD03	沟道堆积	47282	3. 58	16. 93	2014-11-8
GD04	沟道堆积	71395	3. 94	28. 09	2018-12-26

4 讨论及结论

4.1 讨论

4.1.1 沉积特征

蹦嘎沟堆积扇调查表明, 堆积扇整体坡度约 6°, 区域内物质组成主要有冰水堆积物、冰碛物、滨湖浅水相沉积物、湖泊深水相沉积物、冲洪积物、泥石流堆积物、坡积物及风积物 (图 9)。堆积扇山体上 ZK132、ZK133 及 ZK134 钻孔岩心对比显示, 扇体上钻孔暂未揭露相互联系的层位。现有证据表明现今扇体并非一次性产出, 推测为多次泥石流堆积体摆动、堰塞成因的湖相沉积及河流相沉积交替产出。

现代堆积扇东北侧为坡积物分布, 主要物质来源为上部坡体的冰水堆积物、冰碛物及物理风化后的产物 (a 点)。该坡积物堆积坡度较陡、颗粒粒径大、渗透性好、厚度小, 稳定性较好。在

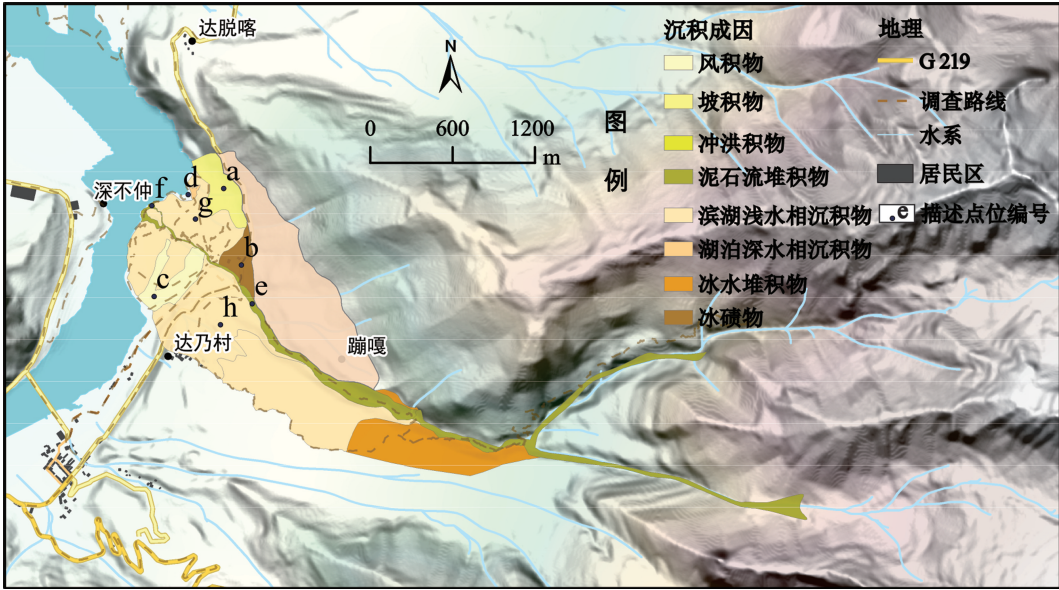


图 9 蹦嘎沟第四纪堆积区域平面物质分区

Fig. 9 Planar source zoning in the Quaternary accumulation area in the Bengga gully

堆积扇扇顶 (东侧) 主要分布有冰碛体残留物质 (b 点), 该位置是堆积扇区海拔最高的区域, 整体稳定性较好 (下覆土体推测为冰碛物及冰水堆积物), 泥石流冲刷对其影响较小。堆积扇南侧发育有面积较大的风积物, 整体厚度较小, 主要物质来源为上游河床两侧的砂粒及粉粒, 在风力作用下发生迁移并在该区域沉积 (c 点)。湖相沉积物大面积分布于堆积扇区域, 主要为滨湖浅水相灰

黄色中细砂, 湖泊深水相粉细砂。

根据堆积扇地形及地表现存固体物质推断, 在堆积扇北侧曾存在一条河道, 位于现今泥石流沟道北侧。目前在河道处可见残留的 U 型槽 (d 点), 河道下游已被湖相沉积物覆盖。现今泥石流沟道位于堆积扇中部, 形态较稳定, 沟道平均深度约 3 m。沟道中堆积大量砾石和卵石 (e 点、f 点), 沟道两岸残留为更新世以来浅水相沉积物

(g 点、h 点), 主要来源为洪水搬运, 其次为稀性泥石流搬运。

蹦嘎沟沟口堆积扇保存较完整, 扇面最大宽度约 880 m, 最大纵长约 575 m, 总体面积约 0.4 km²。堆积扇表层物质成因较复杂, 主要成因有冰碛、冰水堆积、河湖相沉积、泥石流堆积、冲洪积及风积等。现今表层土体主要为含黏粒砂土、细沙及冲洪积成因的卵砾石。根据现场调查沉积历史表明蹦嘎沟泥石流沟口大型堆积扇局部形成于末次冰盛期, 形成年代早于 9 ka B.P.。新近泥石流的堆积范围均未超过老泥石流堆积扇, 由此可见, 察隅-墨脱 8.6 级地震虽在临近区产生了大量崩滑体, 但并未使研究区内的蹦嘎沟产生大规模的泥石流。

4.1.2 全新世以来堵江事件

学者们通过实地调查已发现十余处堰塞湖呈串珠状分布于雅鲁藏布江, 收集研究区附近的样本进行光释光测年、¹⁴C 测年, 从时间和空间上描述该区域堵江事件、演化历史等。祝嵩 (2012)、李翠平等 (2015)、王萍等 (2021) 等学者均对该区段的湖相沉积物进行取样测年, 分别获得了大渡卡、麦朗村、格噶等地沉积剖面中的光释光测年数据, 均认为晚更新世以来末次冰期早冰阶和新冰期存在两期堰塞湖事件, 其中李翠平等 (2015) 记录的沉积年龄分别为 20~30 ka、7~9 ka, 祝嵩等 (2013) 记录的沉积年龄分别为 50.9±2.1 ka B.P. 和 1.8±0.1 ka B.P.。上述成果均完善了雅鲁藏布江流域的沉积相及沉积年代学研究。此次研究中多期次出现的饼状青灰色黏土表明, 在 8500 a 以前至少发育两期湖相沉积层, 且 ZK135 漂木取样测年及 ZK134 湖相沉积层位结果共同表明 2926~2932 m 残留湖相沉积发育年代晚于钻孔漂木测年数据, 推测为新冰期堰塞湖堵江事件在蹦嘎沟堆积扇上的残留体 (图 10), 是蹦嘎沟泥石流堆积扇部位以下切为主的有力证据。

上述结论与李翠平等 (2015)、祝嵩等 (2013) 等学者的测年数据有较好的相互印证关系, 即晚更新世末次冰盛期、新冰期分别在雅鲁藏布江大拐弯处形成了至少两期较大的堰塞体, ZK135 钻孔数据较好地保留了相关证据 (图 11)。同时, 测年数据也是刘宇平等 (2006)、祝嵩等 (2013) 等学者结论的细化, Montgomery et al. (2004) 的测年数据及位置关系需进一步探讨。



图 10 蹦嘎沟扇体表层残留湖相沉积体

Fig. 10 Residual lacustrine sediments on the surface of the Bengga fan-delta

4.1.3 新近泥石流发育影响因素

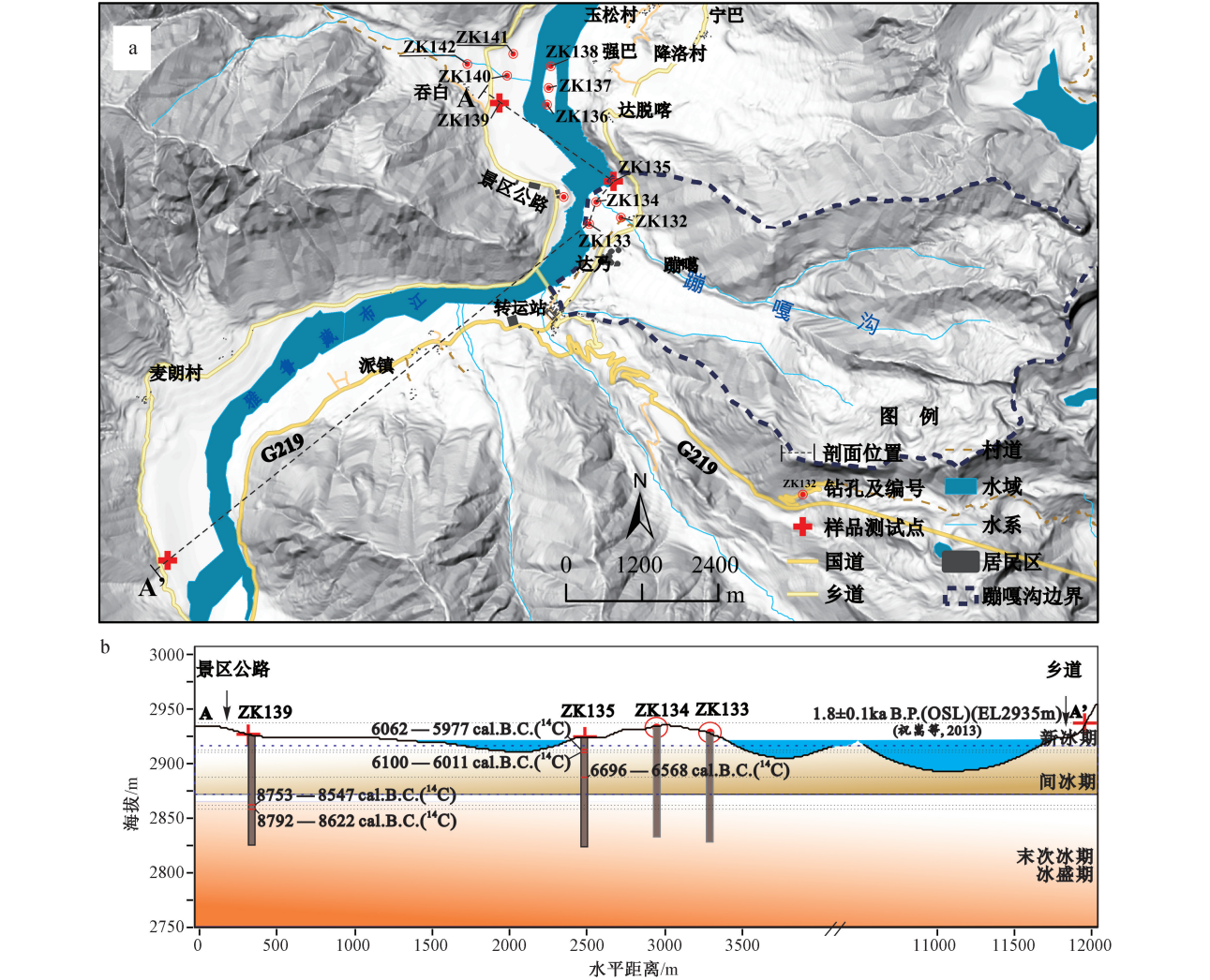
研究区历史上发生的大规模泥石流, 主要分为两种类型: 一为冰川跃动形成的冰川泥石流, 如则隆弄冰川泥石流; 二为大地震诱发的泥石流灾害, 如察隅-墨脱 8.6 级地震诱发的大规模山崩、雪崩, 进而演变为泥石流。

研究显示蹦嘎沟附近的则隆弄冰川于 1950 年、1968 年及 1983 年分别发生过三次大规模的冰川泥石流活动, 直接阻塞了雅鲁藏布江主流 (张沛全等, 2008)。察隅-墨脱 8.6 级地震在震区造成了大量山崩、雪崩现象, 多处巨型崩滑体顺沟而下直接堵塞雅鲁藏布江, 中断交通达一年之久, 同时也直接诱发了 1950 年则隆弄冰川泥石流 (韩立明, 2018)。因此, 研究区内大规模泥石流活动与冰川跃动和地震密切相关, 蹦嘎沟不具备冰川跃动条件。

4.2 结论

基于现场调查、遥感解译、室内实验等方法综合确定了典型流域蹦嘎沟泥石流发育历史及现状, 论述并预测了泥石流活动特征, 具体结论如下:

(1) 结合地形条件、物源条件及水源条件综合判定蹦嘎沟流域有发生暴雨型泥石流的条件。主沟数十年内未暴发大规模泥石流, 但支沟泥石流活动较频繁。沟道内的固体物质主要来源为黏性泥石流堆积, 而沟口沉积物主要来源于高含沙水流。近年发生的泥石流多堆积在主支沟交汇处、沟道宽缓段或堆积扇顶部, 表明泥石流活动总体



a—测年数据空间位置; b—测年数据点海拔高度

图 11 研究区末次冰盛期以来测年数据时空对应关系

Fig. 11 Space-time correspondence of dating data since the last glacial period in the study area

(a) Spatial location of the dating data; (b) Elevation of the dating points

处于衰退阶段。邻区无强震、无超概率极端天气等条件下, 蹦蹦沟以低频中型规模黏性泥石流为主。

(2) 遥感解译、现场调查及室内测试结果表明, 泥石流暴发的物源、水源条件与全新世相比发生明显改变。现代冰川消融、退缩, 积雪主要为季节性冰雪覆盖, 泥石流水源补给主要为降雨补给。1950 年察隅—墨脱 8.6 级地震后, 沟道内未见大规模崩滑堆积体等松散物源, 近年无大规模泥石流暴发历史, 震后物源增加较少。堆积扇 ZK135 号钻孔内碳样测年结果表明更新世以来古堆积扇区域湖相沉积或河流相沉积速率为 4~10 mm, 末次冰盛期以来发育三期泥石流事件。

References

BERNHARDT H, REISS D, HIESINGER H, et al. , 2017. Debris flow recurrence periods and multi-temporal observations of colluvial fan evolution in central Spitsbergen (Svalbard) [J]. *Geomorphology*, 296: 132-141.

CHEN J, CUI Z J, 2014. Development features of the Early Pleistocene debris-flow deposits at the Baima Mountain Pass, Yunnan Province and their paleoclimatic and tectonic significance [J]. *Arid Land Geography*, 37 (2): 203-211. (in Chinese with English abstract)

CHENG Z L, TIAN J C, ZHANG Z B, et al. , 2009. Analysis on environment of disasters resulting from river blockage in Tibet [J]. *Journal of Catastrophology*, 24 (1): 26-30. (in Chinese with English abstract)

HAN L M, 2018. Geological hazard characteristics and risk assessment of Brahmaputra from Wolong to Zhibai stream segment [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology.

HOYOS N, MONSALVE O, BERGER G W, et al. , 2015. A climatic

- trigger for catastrophic Pleistocene-Holocene debris flows in the eastern Andean Cordillera of Colombia [J]. *Journal of Quaternary Science*, 30 (3): 258-270.
- HUANG C C, GUO Y Q, ZHANG Y Z, et al., 2019. Holocene sedimentary stratigraphy and pre-historical catastrophes over the Lajia Ruins within the Guanting Basin in Qinghai province of China [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 49 (2): 434-455. (in Chinese)
- JABOYEDOFF M, CARREA D, DERRON M H, et al., 2020. A review of methods used to estimate initial landslide failure surface depths and volumes [J]. *Engineering Geology*, 267: 105478.
- LEONG E C, CHENG Z Y, 2022. A geometry-modelling method to estimate landslide volume from source area [J]. *Landslides*, 19 (8): 1971-1985.
- LI C P, WANG P, QIAN D, et al., 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 Y H, ZHANG X Y, CUI Z J, et al., 2002. Periodic coupling of debris flow active periods and climate periods during Quaternary [J]. *Quaternary Sciences*, 22 (4): 340-348. (in Chinese with English abstract)
- LI Y J, MENG X M, STEVENS T, et al., 2021. Distinct periods of fan aggradation and incision for tributary valleys of different sizes along the Bailong River, eastern margin of the Tibetan Plateau [J]. *Geomorphology*, 373: 107490.
- LIU X W, 2015. Analysis of the meteorological and hydrological characteristics in the Yarlung Zangbo River Basins [D]. Beijing: Tsinghua University. (in Chinese with English abstract)
- LIU Y P, MONTGOMERY D R, HALLET B, et al., 2006. Quaternary glacier blocking events at the entrance of Yarlung Zangbo great canyon, Southeast Tibet [J]. *Quaternary Sciences*, 26 (1): 52-62. (in Chinese with English abstract)
- MALIK I, TIE Y B, OWCZAREK P, et al., 2013. Human-planted alder trees as a protection against debris flows (a dendrochronological study from the Moxi Basin, Southwestern China) [J]. *Geochronometria*, 40 (3): 208-216.
- MONTGOMERY D R, HALLET B, LIU Y P, et al., 2004. Evidence for Holocene megafloods down the Tsangpo River gorge, southeastern Tibet [J]. *Quaternary Research*, 62 (2): 201-207.
- MARC O, HOVIUS N, MEUNIER P, et al., 2015. Transient changes of landslide rates after earthquakes [J]. *Geology*, 43 (10): 883-886.
- ŠILHÁN K, TICHAVSKY R, 2016. Recent increase in debris flow activity in the Tatras Mountains: Results of a regional dendrogeomorphic reconstruction [J]. *CATENA*, 143: 221-231.
- TANG C, ZHU J, DING J, et al., 2011. Catastrophic debris flows triggered by a 14 August 2010 rainfall at the epicenter of the Wenchuan earthquake [J]. *Landslides*, 8: 485-497.
- TIE Y B, MALIK I, OWCZAREK P, 2014. Dendrochronological Dating of debris flow historical events in high mountain area: Take Daozao debris flow as an example [J]. *Mountain Research*, 32 (2): 226-232. (in Chinese with English abstract)
- WANG H Y, TONG K Y, HU G, et al., 2021. Dam and megafloods at the first bend of the Yangtze River since the Last Glacial Maximum [J]. *Geomorphology*, 373: 107491.
- WANG P, WANG H Y, HU G, et al., 2021. A preliminary study on the development of dammed paleolakes in the Yarlung Tsangpo River Basin, southeastern Tibet [J]. *Earth Science Frontiers*, 28 (2): 35-45. (in Chinese with English abstract)
- YANG H, CUI C G, WANG X F, et al., 2019. Research progresses of precipitation variation over the Yarlung Zangbo River basin under global climate warming [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 38 (6): 565-575.
- ZHANG P Q, LIU X H, KONG P, 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 P Q, GAO M X, LEI Y L, et al., 2009. Quantitative terrain analysis of the great canyon region of Yarlungzangbo River, Tibet and discussion of its origin [J]. *Journal of Earth Science*, 34 (4): 595-603.
- ZHAO Q Y, WEI M J, SONG B, et al., 2013. TL evidence of debris flow developments in the Late Pleistocene of Yunnan Jiangjia Valley Basin [J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 33 (7): 865-868. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO W J, 2015. The Formation characteristics and geomorphical evolution of the landslides and debris flow fans in Guide basin, the upper reaches of the Yellow River [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)
- ZHU S, 2012. River Landform and geological environment evolution in the Yarlung Zangbo River Vally [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences. (in Chinese with English abstract)
- ZHU S, WU Z H, ZHAO X T, et al., 2013. The age of glacial dammed lakes in the Yarlung Zangbo River Grand Bend during Late Quaternary by OSL [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 34 (2): 246-250. (in Chinese with English abstract)
- ### 附中文参考文献
- 陈剑, 崔之久, 2014. 云南白马雪山垭口早更新世泥石流发育特征及其古气候和构造意义 [J]. *干旱区地理*, 37 (2): 203-211.
- 程尊兰, 田金昌, 张正波, 等, 2009. 西藏江河堵溃灾害及成灾环境分析 [J]. *灾害学*, 24 (1): 26-30.
- 黄春长, 郭永强, 张玉柱, 等, 2019. 青海官亭盆地喇家遗址全新世地层序列与史前灾难研究 [J]. *中国科学: 地球科学*, 49 (2): 434-455.
- 韩立明, 2018. 雅鲁藏布江卧龙至直白河段地质灾害发育特征及危险性评价 [D]. 成都: 成都理工大学.
- 李翠平, 王萍, 钱达, 等, 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.
- 刘湘伟, 2015. 雅鲁藏布江流域水文气象特性分析 [D]. 北京: 清华大学.
- 李永化, 张小咏, 崔之久, 等, 2002. 第四纪泥石流活动期与气候期的阶段性耦合过程 [J]. *第四纪研究*, 22 (4): 340-348.
- 刘宇平, MONTGOMERY D R, HALLET B, 等, 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.
- 铁永波, MALIK I, OWCZAREK P, 2014. 树木年代学在高寒山区泥石流历史事件重建中的应用: 以磨西河流域倒灶沟为例 [J]. *山地学报*, 32 (2): 226-232.
- 王萍, 王慧颖, 胡钢, 等, 2021. 雅鲁藏布江流域古堰塞湖群的发育及其地质意义初探 [J]. *地质前缘*, 28 (2): 35-45.
- 杨浩, 崔春光, 王晓芳, 等, 2019. 气候变暖背景下雅鲁藏布江流域降水变化研究进展 [J]. *暴雨灾害*, 38 (6): 565-575.
- 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.
- 张沛全, 高明星, 雷永良, 等, 2009. 西藏雅鲁藏布江大拐弯地区量化地貌特征及其成因 [J]. *地球科学 (中国地质大学学报)*: 34 (4): 595-603.
- 赵秋月, 魏明建, 宋波, 等, 2013. 晚更新世云南蒋家沟流域泥石流发育的热释光证据 [J]. *核电子学与探测技术*, 33 (7): 865-868.
- 赵无忌, 2015. 黄河上游贵德盆地滑坡泥石流扇发育特征及地貌演化过程 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京).
- 祝嵩, 2012. 雅鲁藏布江河谷地貌与地质环境演化 [D]. 北京: 中国地质科学院.
- 祝嵩, 吴珍汉, 赵希涛, 等, 2013. 用 OSL 方法确定雅鲁藏布江大拐弯第四纪晚期冰川堰塞湖年龄 [J]. *地球学报*, 34 (2): 246-250.