

引用格式:侯伟鹏,余国安,岳蓬胜. 典型高山峡谷泥石流堆积扇发育过程及特征——以藏东南帕隆藏布流域天摩沟为例[J]. 山地学报, 2023, 41(4):532-544.

HOU Weipeng, YU Guoan, YUE Pengsheng. Development and geomorphic characteristics of a typical debris flow fan in alpine valley: A case study of the Tianmo Gully in the Parlung Tsangpo basin, Southeast Tibet, China [J]. Mountain Research, 2023, 41(4): 532-544.

典型高山峡谷泥石流堆积扇发育过程及特征 ——以藏东南帕隆藏布流域天摩沟为例

侯伟鹏^{1,2}, 余国安^{1*}, 岳蓬胜^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049)

摘 要:高山峡谷区泥石流动力地质作用强烈,是区域地貌变化的重要驱动力。泥石流堆积扇是支流(支沟)和主河(主沟)地貌外营力交互作用的地带,其形态变化反映了泥石流沟道自身水沙动态和地貌过程,也有助于理解高山河谷地貌的长期演变趋势。研究堆积扇发育过程和驱动因素有助于确定高山区河谷地貌演变成因和趋势。然而,受限于野外自然条件和数据资料,对高山区泥石流堆积扇发育过程的观测研究仍较少。本文以中国藏东南帕隆藏布流域天摩沟为研究对象,结合遥感影像、DEM 数据、无人机航拍、RTK 地形测量以及野外勘探调查,分析 4 次泥石流事件中天摩沟沟口堆积扇发育过程及形态特征。结果表明:(1)泥石流堆积扇发育过程受泥石流事件与一般水流过程共同影响。泥石流事件造成堆积扇宏观形态剧烈变化(扇面淤积抬升、扇体规模扩大等);一般水流过程则在泥石流间歇期缓慢塑造堆积扇沟道(沟床冲刷下切、流道局部平面摆动等)。(2)泥石流堆积扇发育与主河(帕隆藏布)相互影响。堆积扇外缘形态受主河径流调整和塑造,扇体沟道溯源侵蚀下切受控于主河河床侵蚀基准变化;主河局部地貌由原本相对窄深的单一线型发育成较为游荡的辫状河道。本研究可为泥石流沉积学、泥石流堆积扇工程选址及泥石流灾害风险防控等提供一定的科学数据支撑。

关键词:泥石流堆积扇;高山区;地貌效应;天摩沟;藏东南

中图分类号: P931.1; P954

文献标志码: C

全球气候变化促使高山区泥石流频发^[1-2],泥石流动力地质作用显著改变了区域地貌形态。在高山峡谷区,泥石流挟带泥沙而下,在沟口平缓开阔地带减速并漫流堆积,形成扇状堆积地貌,扇缘端多交汇于主河(主沟)。泥石流堆积扇是支流(支沟)和主河(主沟)地貌外营力交互作用的地带,其形态变化反映了泥石流沟道自身水沙动态和地貌过程,也揭示了主沟河谷地貌的长期演变趋势。因此,明确

泥石流堆积扇地貌过程和驱动因素,将有助于理解高山峡谷区河谷地貌演变成因和趋势。

堆积扇作为物源补给高地和沉积物容纳盆地之间的过渡带^[3],表征了山区河流泥沙输运、堆积和侵蚀过程,是解释和重建沉积盆地构造和地层演变的重要工具^[4-6]。国内外学者针对泥石流沟口堆积扇地貌特征^[7-9]、发育过程^[10-12]和演变机制^[13-15]等已开展不少研究工作,并通过泥石流物源区及沉

收稿日期(Received date): 2022-08-17;改回日期(Accepted date): 2023-06-08

基金项目(Foundation item): 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0903);国家自然科学基金项目(41971010)。[The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research (2019QZKK0903); National Natural Science Foundation of China(41971010)]

作者简介(Biography): 侯伟鹏(1998-),男,江苏淮安人,博士研究生,主要研究方向:河流地貌及灾害。[HOU Weipeng (1998-), male, born in Huai'an, Jiangsu province, Ph.D. candidate, research on fluvial process and geological hazard] E-mail: houwp.20s@igsnrr.ac.cn

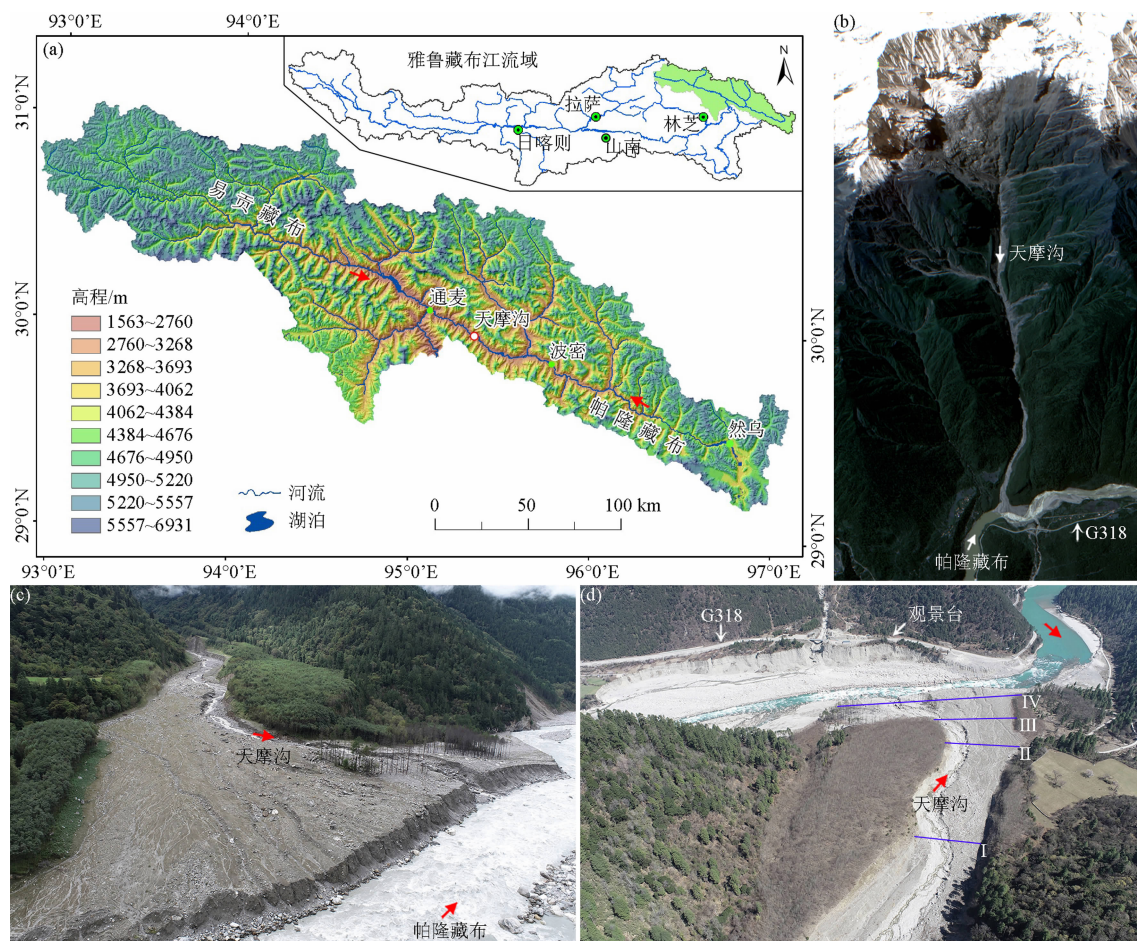
* 通讯作者(Corresponding author): 余国安(1978-),男,博士,副研究员,主要研究方向:泥沙运动、河流地貌及灾害。[YU Guoan (1978-), male, Ph.D., associate professor, research on sediment movement, fluvial process and geo-hazard] E-mail: yuga@igsnrr.ac.cn

积区几何形态、地质岩性和沉积相特征等要素对堆积扇类型进行统计分类^[16-19],总结了堆积扇特征与流域环境的相关性^[20-23]。然而,已有研究主要侧重于干旱半干旱区已经发育成熟或步入间歇期的堆积扇^[24-28],所采用的方法多基于地质学或沉积学证据来推测或演绎堆积扇发育历史、背景和成因^[29-31],而对湿润环境^[32-33],特别是对高海拔或高纬度山区(简称高山区)泥石流堆积扇^[34-36]地貌发育过程的观测研究相对不足。

研究表明^[37],在一定活跃周期内(百年尺度或更长),第一场或初期若干场泥石流规模通常显著大于后续泥石流规模,初期泥石流事件基本决定了沟口堆积扇总体形态,而后续泥石流的地貌改造作用,囿于泥石流规模,通常以侵蚀作用为主。因此,分析泥石流沟口堆积扇初期形态,有助于阐明堆积

扇演变过程和驱动因素,可为泥石流堆积扇工程选址提供设计参考(也可反演或回溯已经处于稳定状态或步入间歇期的堆积扇发育历史提供参考)。

藏东南帕隆藏布流域是典型的高山峡谷区,发育有古乡沟、扎木弄沟等大型冰川泥石流沟。其中,天摩沟(图1)在2007年以前未有泥石流历史。2007—2018年,天摩沟共发生4场大规模泥石流事件^[38-41],沟道发生强烈侵蚀与堆积,沟口发育大型堆积扇,不同程度堵塞帕隆藏布江,这为认识泥石流堆积扇初期发育过程提供了第一手样本。本文调查了天摩沟2007年以来4场大规模泥石流事件中沟口堆积扇发育过程及形态特征,试图明晰气候变化下高山峡谷区泥石流堆积扇发育动态和驱动因素,并探讨其对区域河流地貌过程的影响。本研究可为泥石流沉积学、泥石流堆积扇工程选址及泥石流灾



I ~ IV为堆积扇典型横断面,其中断面I位于中游峡谷段末端,断面II位于沟道出山口附近,断面III和IV位于堆积扇。

图1 帕隆藏布流域及天摩沟沟口堆积扇示意图:(a)帕隆藏布流域水系构成及天摩沟位置;

(b)天摩沟2016年资源3号卫星影像;(c~d)天摩沟沟口堆积扇与帕隆藏布河道无人机航拍影像

Fig.1 The Parlung Tsangpo basin and Tianmo alluvial fan: (a) drainage network of the Parlung Tsangpo basin and location of the Tianmo Gully; (b) a remote-sensing image of the Tianmo gully from ZY-3 Satellite in 2016;

(c-d) UAV aerial images of the Tianmo alluvial fan and the nearby Parlung Tsangpo reaches

害风险防控等提供一定的科学数据支撑。

1 研究区概况

帕隆藏布流域位于藏东南雅鲁藏布江大拐弯北部,是雅鲁藏布江下游一级支流(图 1a)。帕隆藏布流域面积约 $2.86 \times 10^4 \text{ km}^2$,全长约 266 km,落差约 3380 m,多年平均径流量约 $300 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[42-43]。

帕隆藏布流域地处东喜马拉雅构造结-雅鲁藏布江缝合带,地壳运动活跃、地震活动频繁^[44],流域内河床纵坡降大且河谷断面窄深,河谷两侧岸坡在持续下切过程中趋于陡峭、岸坡势能不断累积,多处于脆弱的临界平衡状态。同时,区域还处于青藏高原四周向高原腹地水汽输送的最大通道^[45],因此帕隆藏布流域降水丰沛,温带海洋性冰川广布^[46]。青藏高原数百万年来强烈构造隆升以及冰川和流水侵蚀等共同塑造了该地区山高谷深坡陡的深切峡谷型地貌。在全球气候变化的大背景下,帕隆藏布流域气温和降雨均呈明显上升趋势(图 2a),冰川末端后退及多年冻土退化使得大量松散冰碛物外露^[47],促进了崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害事件发生^[48],由此产生的高强度泥沙输移是影响区域河流/河谷地貌变化的重要驱动因素。

天摩沟位于林芝市波密县松绕村帕隆藏布左岸

(图 1b),流域面积 17.80 km^2 ,主沟长度 7.10 km,高程范围 2400 ~ 5560 m,平均纵坡 27.20%,沟口正对 G318 国道(图 1d)。天摩沟 2007 年以来泥石流运动较为活跃,成因主要包括降雨、升温导致的滑坡和冰/岩崩等,以土力类过程触发形成泥石流为主。近期四场大规模泥石流事件(表 1)强烈改变甚至重塑了沟口地貌,并影响了帕隆藏布局部河段水沙过程及地貌变化。

表 1 天摩沟四场典型泥石流事件及沟口堆积扇规模变化

Tab. 1 Four typical debris-flow events of the Tianmo gully and corresponding alluvial fan area at gully outlet

泥石流爆发时间	泥石流规模/ 10^6 m^3	堆积扇规模/ km^2
2007-09-04	0.76 ~ 1.34	0.40 ~ 0.41
2010-07-25	0.21 ~ 0.50	—
2010-09-03	0.21 ~ 0.45	0.48 ~ 0.49
2018-07-11	0.18 ~ 0.19	0.67 ~ 0.69

2 研究方法

泥石流沟口堆积扇地貌变化本质上是泥沙输运、堆积和侵蚀的外在体现,本文将支流沟谷堆积扇冲淤变化与泥石流强输沙过程联系在一起,分析堆积扇发育过程及形态特征。对天摩沟开展系统地野外勘探调查以记录沟口堆积扇地貌变化本底过程。

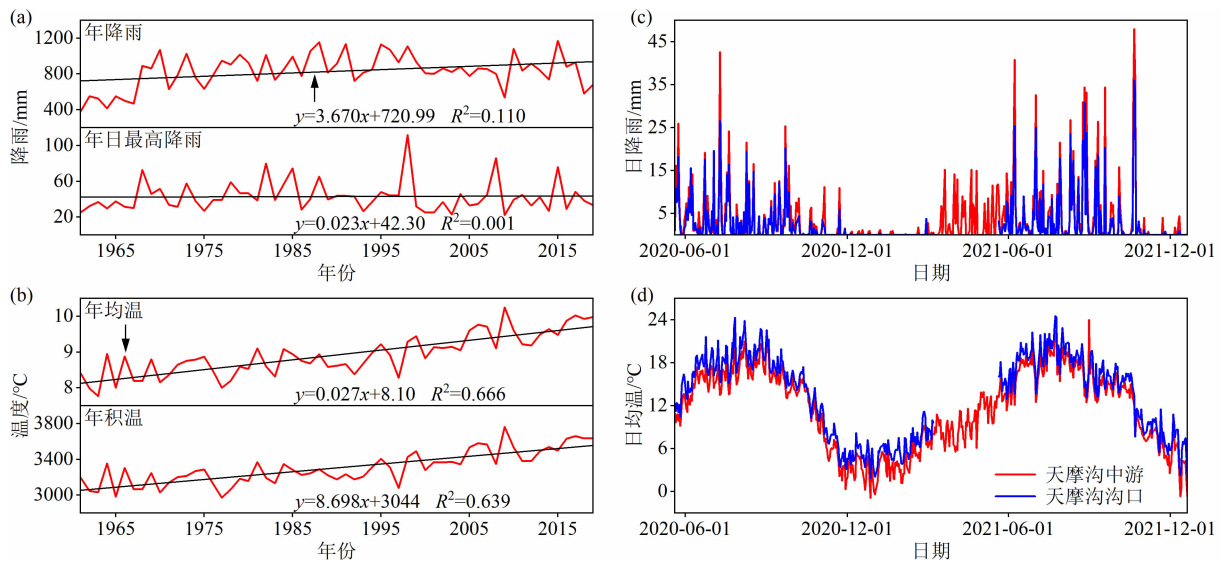


图 2 藏东南波密站及天摩沟降雨和气温年际/年内变化:(a~b)波密站逐年;(c~d)天摩沟逐日

Fig. 2 Variations of mean annual and daily rainfall/temperature at the Bomi meteorological station and the Tianmo gully, respectively: (a-b) Bomi; (c-d) Tianmo

注:波密站数据来源于中国气象科学数据中心;天摩沟数据来源于安装在天摩沟中游和沟口的 HOBO 雨量计,其中 2021-03-09 至 2021-05-20 天摩沟沟口数据缺失。

使用无人机(DJI Phantom 4 Pro)航拍沟口堆积扇,同时布置参考控制点以校正航测数据高程误差(图3),航拍影像通过 Agisoft Metashape、Pix4D mapper 等软件重建沟口堆积扇三维地形,最终获得亚米级精度 DEM 数据和厘米级精度正射影像;利用图帕斯激光测距仪(TruPulse 200,量程 1000 m \pm 20 cm)和 RTK 地形测量系统(合众思壮 G970 II Pro,精度 15 mm \pm 1 ppm)精细测量沟道局部地形(图3),结合生成的高程数据分析堆积扇形态特征及主沟道侵蚀过程。目前对天摩沟堆积扇已开展 5 次无人机航拍,时间分别为 2020 年 5 月中旬、9 月下旬、12 月中旬、2021 年 5 月中旬、2022 年 3 月中旬。



图3 天摩沟沟道及堆积扇地貌野外勘探调查

Fig.3 Field surveys at the Tianmo alluvial fan and its flow channel

通过国家气象科学数据中心([https://data/cma/cn](https://data.cma/cn))下载研究区气象数据;通过地理空间数据云、陆地观测卫星数据服务平台、自然资源卫星遥感云服务平台下载天摩沟沟口堆积扇及帕隆藏布河道 1987—2022 年 Landsat 系列、Sentinel 系列、高分系列、资源系列遥感影像;通过 Earthdata Search、USGS 等网站下载研究区 ASTER GDEM V3 (30 m 精度)、ALOS (12.5 m 精度)系列高程数据,运用 ArcGIS、ENVI 等软件提取支流沟道典型横断面及主河纵剖面高程数据。

3 研究结果

3.1 堆积扇地貌过程及特征

3.1.1 扇体发育过程及形态特征

泥石流过程产生的高强度泥沙输移是堆积扇地貌发育的核心驱动力,同时支流沟道自身水流及主河径流过程对堆积扇形态调整也具有重要作用,而天摩沟沟口堆积扇地貌发育反过来又会在相当程度上影响主河帕隆藏布河流地貌过程。

近 35 年天摩沟与帕隆藏布交汇河段遥感影像(图4)及近 15 年天摩沟沟口堆积扇照片(图5)显示,四场大规模泥石流事件(表1)显著改变天摩沟

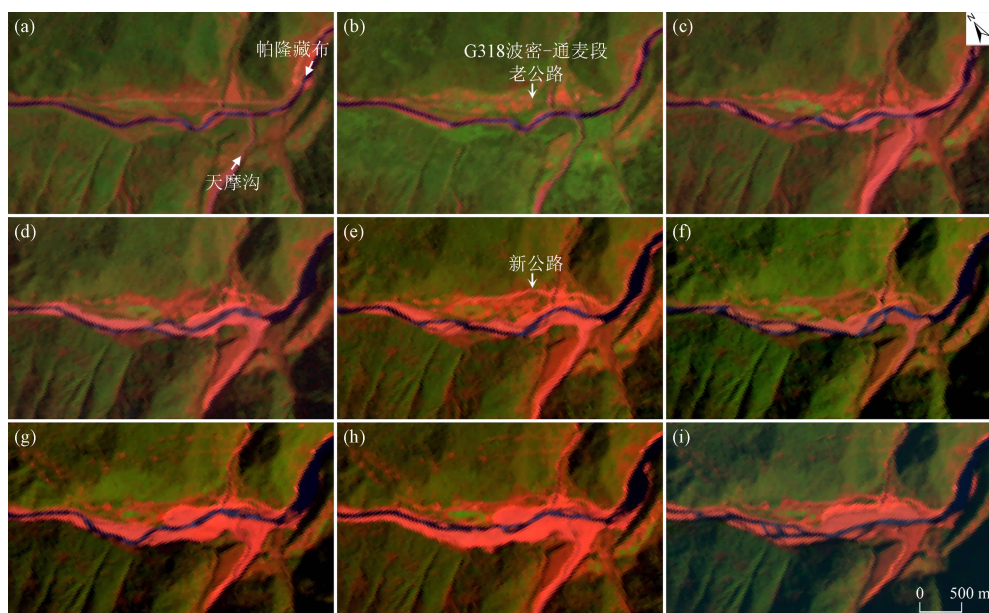


图4 天摩沟四场大规模泥石流事件前后沟口堆积扇及帕隆藏布河道平面形态变化:(a) 1987-04-07;(b) 2007-04-30;(c) 2010-03-21;(d) 2011-02-04;(e) 2014-03-16;(f) 2018-01-22;(g) 2018-11-22;(h) 2020-02-29;(i) 2021-12-24

Fig.4 Morphological variations of planform of the Tianmo fan and nearby the Parlung Tsangpo reaches before and after four large-scale debris-flow events: (a) 1987-04-07; (b) 2007-04-30; (c) 2010-03-21; (d) 2011-02-04; (e) 2014-03-16; (f) 2018-01-22; (g) 2018-11-22; (h) 2020-02-29; (i) 2021-12-24

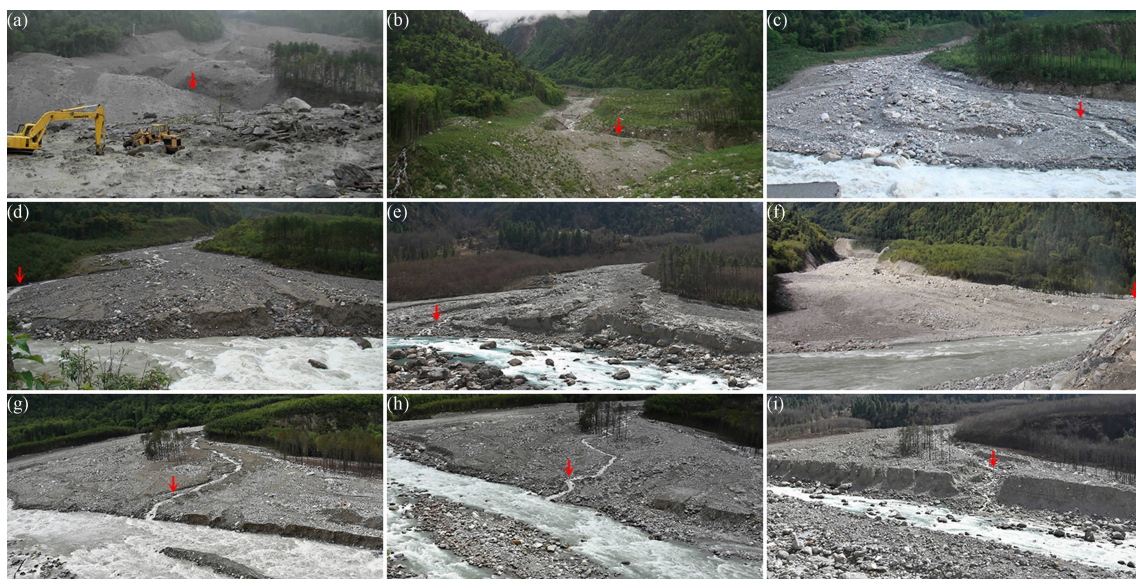


图 5 天摩沟四场大规模泥石流事件前后沟口堆积扇及沟道发育情况：

(a) 2007-09; (b) 2010-03-10; (c) 2011-05-12; (d) 2012-10-02; (e) 2017-03-15; (f) 2018-09-19;
(g) 2019-06-11; (h) 2020-05-17; (i) 2022-03-09

Fig. 5 Development of the Tianmo fan and its flow channel before and after four large-scale debris-flow events;

(a) 2007-09; (b) 2010-03-10; (c) 2011-05-12; (d) 2012-10-02; (e) 2017-03-15; (f) 2018-09-19;
(g) 2019-06-11; (h) 2020-05-17; (i) 2022-03-09

原有沟道地貌并基本奠定沟口堆积扇宏观地貌格局。2007 年 9 月天摩沟第一场大规模泥石流事件发生,泥石流在出山口附近冲破原有河道并形成明显区别于周围环境的新泥石流堆积区(图 4c、图 5a),之后堆积扇规模随后续泥石流事件发生不断扩大(图 4d、图 4g)。在泥石流间歇期,堆积扇整体形态基本不变但沟道发育位置受流水作用持续下切(图 5e),同时主河水流强烈淘蚀冲刷河床水下堰塞体及扇体边缘,堆积扇在蚀退过程中形成明显高于主河河床的陡峭边缘(图 5d、图 5i)。总体上,天摩沟沟口堆积扇在四场大规模泥石流事件发生后迅速淤积抬升,并表现出中间高两侧低的上凸形整体态势(图 6; 图 10c ~ 图 10d),期间流水作用缓慢塑造沟道形态。

此外,泥石流事件输送的巨量泥沙还使天摩沟下游河段沙洲及边滩发展十分迅速,经常与天摩沟堆积扇相连形成规模巨大的泥沙堆积区(图 4g ~ 图 4h),在短期内显著改变帕隆藏布河床垂向和横向侵蚀进而引起河岸局部淘蚀蚀退、凹凸冲淤等强烈地貌变化(图 4c ~ 图 4d; 图 4f ~ 图 4g),帕隆藏布局部受影响河段也由原本相对较为窄深的单一峡谷河道逐渐发育形成较为游荡的辫状河道。

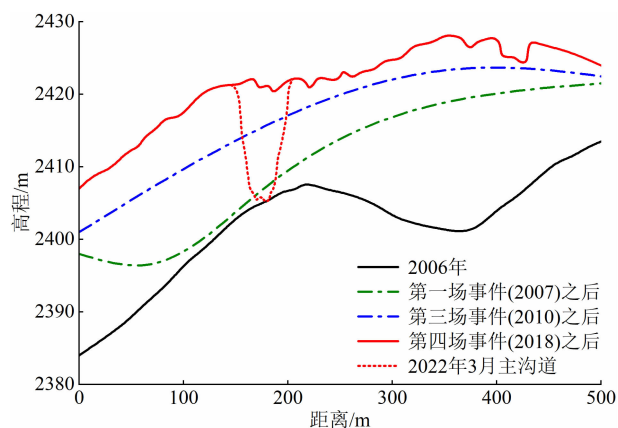


图 6 天摩沟四场大规模泥石流事件前后沟口堆积扇
断面 IV 形态变化

Fig. 6 Variations of cross-sectional profile of Section IV at the outlet of the Tianmo gully before and after four large-scale debris-flow events

注:断面 IV 位置参见图 1d,其中 2006 年数据来源于 Google Earth; 2018 年及 2022 年数据来源于 RTK 地形测量结果;2007 年及 2010 年数据基于野外考察照片示意性勾勒,可能与实际情况有所差异,但不影响对断面整体形态的反映。

2018 年汛期天摩沟泥石流事件(表 1,第四场事件)显著扩大沟口堆积扇规模并挤压帕隆藏布河道,泥石流过程产生的高强度泥沙输移显著改变了帕隆藏布河流水沙过程和河道平面形态。直至

2020 年汛期,天摩沟堆积扇沟道仍大部分处于堵塞状态(图 5h)。无人机航拍数据生成的天摩沟沟口堆积扇正射影像显示(图 7),2020 年 9 月堆积扇扇体边缘相比于 5 月存在明显蚀退,这主要是由汛期帕隆藏布水流强烈冲刷冲刷扇体边缘造成的。

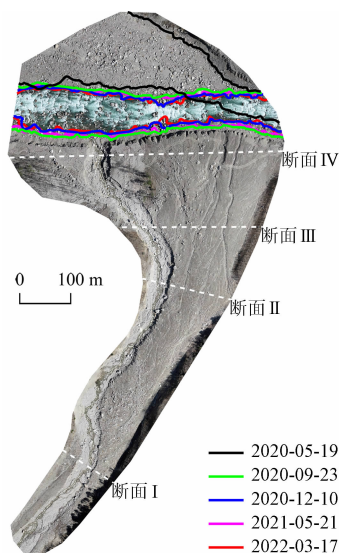


图 7 基于无人机航拍数据生成的天摩沟沟口堆积扇正射影像(2022-03-17)及帕隆藏布河道边界变化

Fig. 7 Orthoscopic image of alluvial fans in the Tianmo gully generated by UAV aerial photography data (2022-03-17) and lateral migration of nearby the Parlung Tsangpo channel

3.1.2 沟道平面摆动与侵蚀过程

沟道主流线改道是泥石流堆积扇地貌变化的显著特征,通常在滑坡、泥石流、高含沙水流、山洪等外界扰动下发生,仅靠沟道自身发育演变造成的流道摆动即便能够发生也将十分缓慢。2007—2018 年间天摩沟沟道主流线受四场大规模泥石流事件影响多次发生改道,根据野外调查记录(图 5)可将其划分为 A、B、C 三个阶段:

阶段 A(图 5a ~ 图 5b):2007 年 9 月,天摩沟第一次发生大规模泥石流事件。泥石流过程完全摧毁了沟谷两侧原有植被,现有泥石流沟口堆积扇初步成型,天摩沟主沟道呈 S 型由堆积扇左侧汇入帕隆藏布(图 5a);至 2010 年汛前,沟道两侧堆积扇上已率先生长起尼泊尔漆木等先锋植被(图 5b)。

阶段 B(图 5c ~ 图 5e):2010 年 7 月至 9 月,天摩沟连续发生两场泥石流事件使原有堆积扇被全部淤埋,主沟道呈 C 型由堆积扇左侧汇入帕隆藏布,此时扇体表面高程明显低于其左侧松树林(图 5c);

至 2012 年 10 月,主沟道已摆动至由堆积扇右侧汇入帕隆藏布(图 5d);至 2017 年 3 月,主沟道再次改道为由堆积扇中部汇入帕隆藏布(图 5e),期间堆积扇沟道下切明显。

阶段 C(图 5f ~ 图 5i):2018 年 7 月,天摩沟再次发生泥石流事件使堆积扇整体淤积抬升并部分掩埋了左侧松树林(图 5f),至 2019 年 6 月天摩沟主沟道由两处松树林中间穿过(图 5g);至 2020 年 5 月,主沟道又改道为由松树林内部穿过(图 5h);至 2020 年 9 月,主沟道再次改道为由两处松树林中间穿过(图 5i)。

总体上,泥石流高强度泥沙输移会在沟道出口附近淤埋、突破并废弃原有河道,同时沟道主流线改道通常伴随着堆积扇整体淤积抬升(图 5c、图 5f)。尽管泥石流事件常引起堆积扇沟道的剧烈变化,但天摩沟实例表明,沟道改道并非都由泥石流事件触发,汛期非泥石流过程(如高含沙水流、山洪等)也可能引起流道局部平面摆动与改道(图 5c ~ 图 5e、图 5g ~ 图 5i)。2018 年以来,天摩沟未发生大规模泥石流事件,期间流水作用冲刷沟床与沟道两侧边坡造成沟道侵蚀下切与流道局部平面摆动(图 8、图 9),这说明尽管不像泥石流事件那样强烈而短促,泥石流事件间歇期径流水沙过程也会缓慢

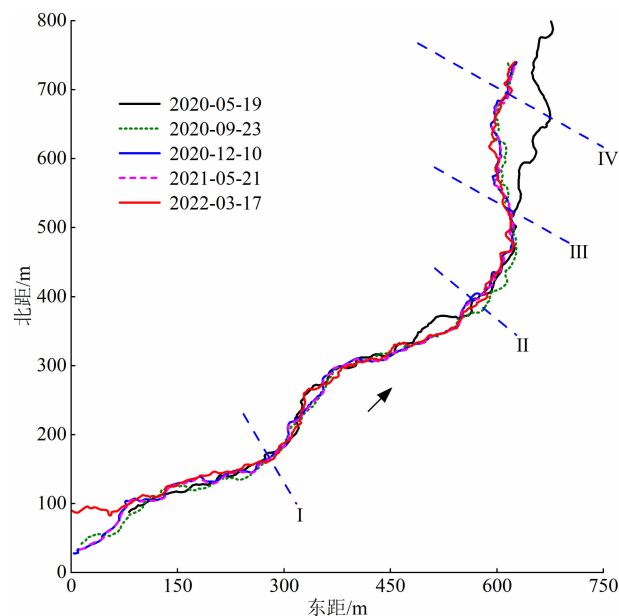


图 8 天摩沟第四场泥石流事件(2018-07)以来间歇期沟口堆积扇沟道主流线平面摆动情况

Fig. 8 Lateral migration of flow channels on the fan after the fourth debris-flow event in July 2018

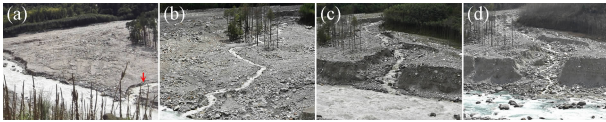


图9 天摩沟第四场泥石流事件(2018-07)以来在帕隆藏布入汇口附近沟道下切情况:
(a) 2018-09-19; (b) 2020-05-17; (c) 2020-09-23; (d) 2022-03-09
Fig. 9 Gradual incision of the channel bed of the Tianmo gully near the confluence of the Parlung Tsangpo after the fourth debris-flow event in July 2018: (a) 2018-09-19; (b) 2020-05-17; (c) 2020-09-23; (d) 2022-03-09

持久地塑造堆积扇形态。

一般来说,泥石流等强输沙过程会淤满原有沟槽,那些漫上堆积扇滩面并堆积的泥沙将大部分得以保留,因此堆积扇扇体整体上会随泥石流事件的发生而不断淤积抬升(图 5c、图 5f),泥沙侵蚀仅发生在堆积扇沟道发育位置(图 5h ~ 图 5i)。由于泥石流过程产生的高强度泥沙输移会显著抬高主河河床,甚至可能形成堰塞体,因此泥石流事件间歇期堆积扇沟道侵蚀下切在相当程度上受控于主河河床侵蚀基准变化,具体表现为沟道随主河侵蚀基准下降而相应下切,并逐渐溯源发展(图 9、图 10c ~ 图 10d)。

2018 年汛期天摩沟泥石流事件使沟道主流线

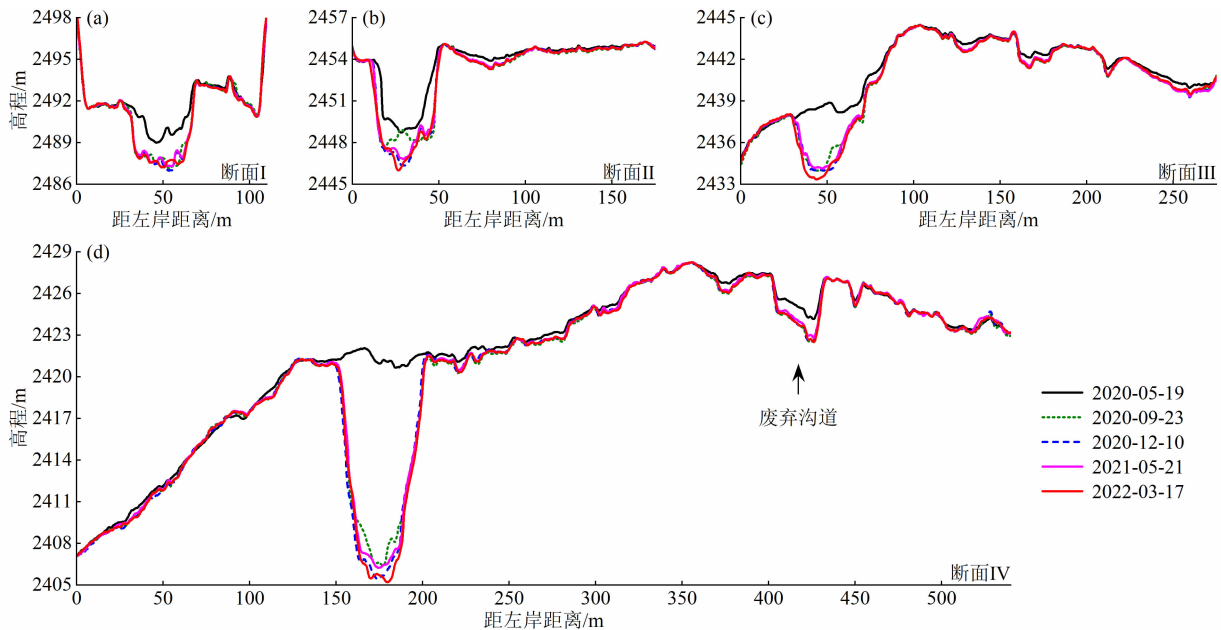


图10 天摩沟第四场泥石流事件(2018-07)以来沟口堆积扇典型横断面形态及沟道冲淤变化

Fig. 10 Erosion-deposition variations of typical cross-sectional profiles and the flow channel on the Tianmo fan after the fourth debris-flow event in July 2018

注:断面 I ~ IV 具体位置参见图 1d 和图 7。

由扇体右侧摆动至扇体左侧(图 5e、图 9a),这一点同样可以从其沟口堆积扇横断面冲淤变化图上看,至今堆积扇滩面上仍保留着原有旧沟道(图 10d,黑色箭头)。泥石流事件发生后天摩沟中游流通区沟床显著淤积抬升(图 10a、图 10b),而堆积扇沟道直到 2020 年汛期才随帕隆藏布河床下降(图 5h、图 5i)而溯源侵蚀下切(图 10c、图 10d)。目前天摩沟主沟道在入汇帕隆藏布附近已发育十分稳定的巨石消能结构,同时沟口堆积扇边缘也已高出帕隆藏布河道约 16 ~ 22 m (图 11)。

3.2 堆积扇地貌发育的影响因素

3.2.1 泥石流事件与一般水流过程的接力塑造

泥石流沟口堆积扇地貌变化受泥石流事件与一般水流过程的接力塑造,其中泥石流过程产生的高强度泥沙输移经常造成堆积扇整体形态的剧烈变化,主要表现为扇面淤积抬升、扇体规模扩大以及沟道主流线改道等,这一过程往往持续时间很短(几小时甚至几分钟);而一般水流过程则主要表现为在泥石流间歇期对堆积扇沟道进行长时间的持续缓慢塑造,包括沟道冲刷下切与侧蚀展宽、流道局部平面摆动等,这一过程通常持续几个月、几年甚至几十年。2007—2018 年,天摩沟发生的四场大规模泥石流事件奠定了天摩沟沟口堆积扇宏观地貌格局(图

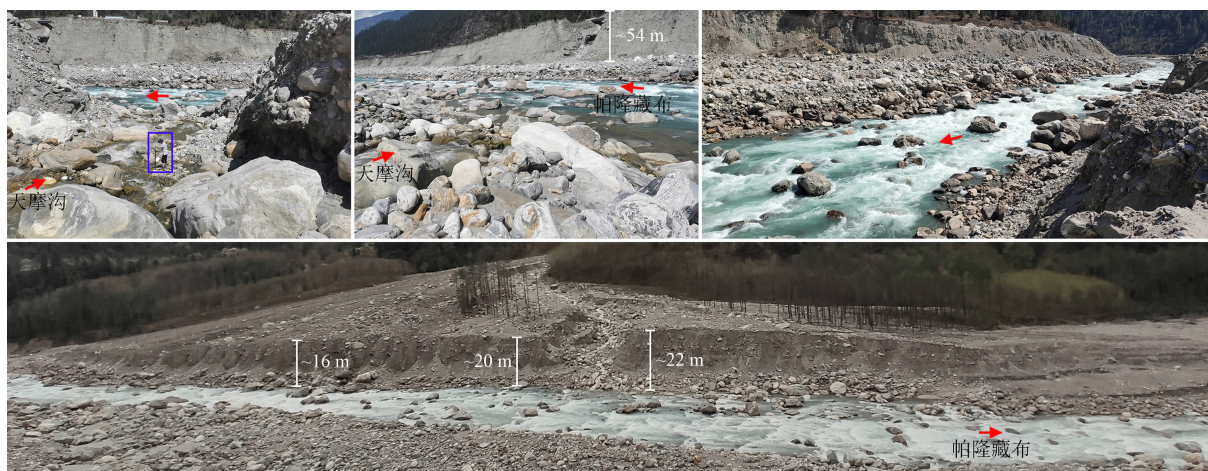


图 11 天摩沟主沟道在帕隆藏布入汇口附近发育高强度河床结构

Fig. 11 Strong bed structures developed in the alluvial fan channels of the Tianmo gully near the confluence of the Parlung Tsangpo
注:照片拍摄时间为 2022 年 3 月下旬,其中蓝色框中测量者身高约 170 cm。

4、图 5),期间堆积扇发育主要为流水作用缓慢塑造沟道形态(图 5、图 9);2018 年第四场泥石流事件以来天摩沟未发生大规模泥石流事件,实测数据分析也证实,除沟道侵蚀下切与局部小幅摆动调整外,堆积扇宏观形态基本没有变化(图 7、图 8、图 10)。

3.2.2 与主河的相互影响

主河河道地貌变化受泥石流等强输沙事件影响,大规模泥石流运动使堆积扇扇面淤积抬升、扇体规模扩大,同时还会淤高入汇处主河河床、压缩主河

水流宽度,使主河水流呈折线顶冲对岸并由此形成横向冲淤连锁反应,最终引起河岸局部淘刷蚀退、凹冲凸淤等强烈地貌变化(图 12)。反过来,主河则在泥石流事件间歇期对堆积扇发育及自身地貌变化发挥主导作用,一方面,主河水流持续淘刷堆积扇体边缘并缓慢回归原有河道,主河河道再次由弯曲趋于顺直;另一方面,主河河床抬高并控制堆积扇沟道的侵蚀过程,沟道随主河局部侵蚀基准下降而溯源侵蚀下切(图 13,沟床 2),一旦主河河床冲刷下切

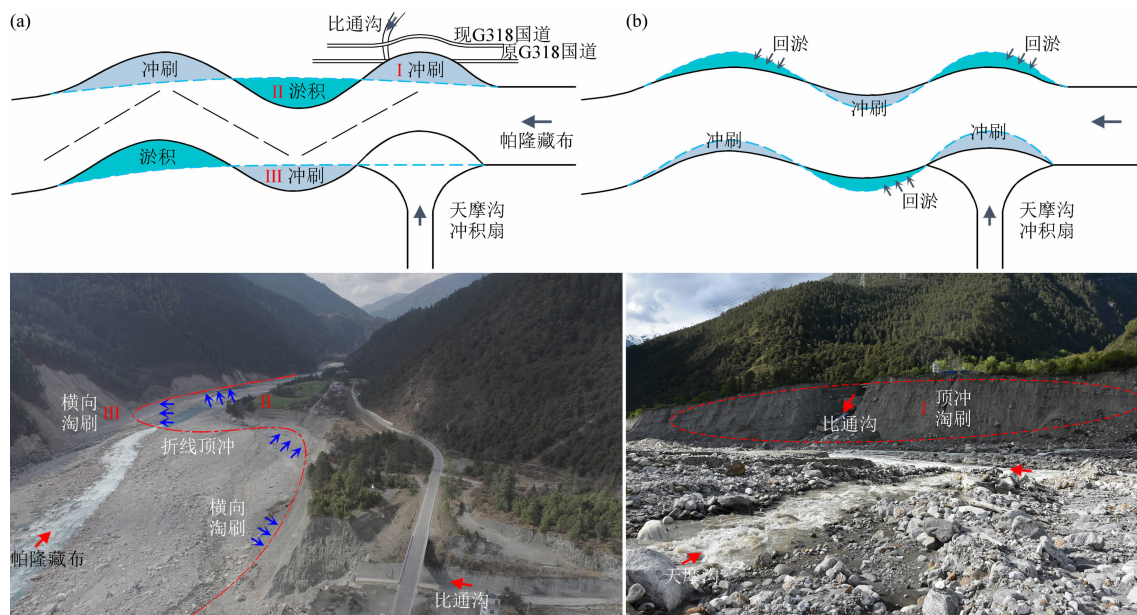


图 12 天摩沟泥石流事件造成帕隆藏布河岸横向冲淤连锁反应:(a)泥石流活跃期;(b)泥石流间歇期

Fig. 12 Lateral erosion and deposition chain reactions of the Parlung Tsangpo river channel caused by debris flows from the Tianmo gully: (a) during debris flows; (b) during the intermittent period of debris flows

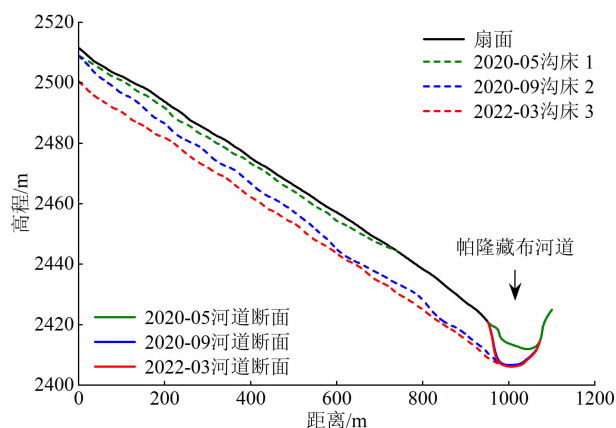


图 13 主河(帕隆藏布)局部河床冲刷变化对天摩沟堆积扇沟道侵蚀下切和纵剖面的影响

Fig. 13 Changes of erosion base in the main river channel (the Parlung Tsangpo) using flow channel incision of the Tianmo fan

受到抑制(即局部侵蚀基准趋于稳定),堆积扇沟道侵蚀下切速率也会相应减小,但沟道纵坡仍继续变化并逐渐与扇面纵坡趋于平行(图 13,沟床 3)。主河河道受堆积扇发育和主河水流共同影响而表现出这种进/退变化,实际上是泥石流事件与一般水流过程相互角力和影响的结果(图 12)。

4 结论

泥石流沟口堆积扇地貌变化受泥石流事件与一般水流过程共同影响,本文结合遥感影像和无人机航拍等手段,分析了四场大规模泥石流事件影响下天摩沟泥石流堆积扇发育过程及特征,并探讨了堆积扇地貌发育与主河的相互影响。主要结论如下:

(1)2007 年以来,天摩沟 4 场大规模泥石流事件基本奠定沟口堆积扇宏观地貌格局,沟口扇体整体淤积抬升,横断面呈中间高两侧低的上凸形态势;扇体沟道受四场大规模泥石流事件影响多次发生改道,泥石流事件间歇期径流过程主要影响沟道侵蚀下切与局部小幅摆动调整。

(2)天摩沟泥石流事件产生的高强度泥沙输移使帕隆藏布局部河段沙洲及边滩发展十分迅速,由原本相对较为窄深的单一峡谷河道逐渐发育形成较为游荡的辫状河道;主河水流在泥石流事件间歇期持续淘刷堆积扇扇体边缘并控制堆积扇沟道侵蚀过程,天摩沟沟道随帕隆藏布局部侵蚀基准下降而溯源侵蚀下切。

高海拔或高纬度山区,尤其高山冰川冻土急剧消退的边缘地带是泥石流等地质灾害多发区,其沟口堆积扇是支流和主河交互作用的地带。泥石流沟口堆积扇地貌变化本质上是泥沙输运、堆积和侵蚀过程,在泥石流活跃期发挥物源堆积作用而在泥石流间歇期发挥物源补给作用。未来应持续关注高山峡谷区典型泥石流沟口堆积扇发育过程及其影响下区域地貌演化。

参考文献(References)

- [1] 崔鹏,郭晓军,姜天海,等. “亚洲水塔”变化的灾害效应与减灾对策[J]. 中国科学院院刊, 2019, **34**(11): 1313–1321. [CUI Peng, GUO Xiaojun, JIANG Tianhai, et al. Disaster effect induced by Asian Water Tower change and mitigation strategies [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, **34**(11): 1313–1321] DOI: 10.16418/j.issn.1000–3045.2019.11.014
- [2] 余国安,鲁建莹,李志威,等. 气候变化影响下藏东南帕隆藏布流域高山区泥石流的地貌效应[J]. 地理学报, 2022, **77**(3): 619–634. [YU Guoan, LU Jianying, LI Zhiwei, et al. Geomorphic effects of debris flows in high mountain areas of the Parlung Zangbo basin, southeast Tibet under the influence of climate change [J]. Acta Geographica Sinica, 2022, **77**(3): 619–634] DOI: 10.11821/dlxb202203009
- [3] MATHER A E, STOKES M, WHITFIELD E. River terraces and alluvial fans: The case for an integrated Quaternary fluvial archive [J]. Quaternary Science Reviews, 2017, **166**: 74–90. DOI: 10.1016/j.quascirev.2016.09.022
- [4] 崔之久. 泥石流沉积与环境[M]. 北京: 海洋出版社, 1996: 1–192. [CUI Zhijiu. Debris flow deposition and environment [M]. Beijing: China Ocean Press, 1996: 1–192]
- [5] BLAIR T C, MCPHERSON J G. Alluvial fans and their natural distinction from rivers based on morphology, hydraulic processes, sedimentary processes, and facies assemblages [J]. Journal of Sedimentary Research, 1994, **64**(3): 450–489. DOI: 10.1306/D4267DDE–2B26–11D7–8648000102C1865D
- [6] BALLANTYNE C K, WHITTINGTON G. Late Holocene floodplain incision and alluvial fan formation in the central Grampian Highlands, Scotland: Chronology, environment and implications [J]. Journal of Quaternary Science, 1999, **14**(7): 651–671. DOI: 10.1002/(SICI)1099–1417(199912)14:7<651::AID–JQS469>3.0.CO;2–1
- [7] 田连权. 滇东北蒋家沟粘性泥石流堆积地貌[J]. 山地研究, 1991, **9**(3): 185–192+205. [TIAN Lianquan. Accumulational landform of viscous debris flow in Jiangjia Ravine, northeast Yunnan [J]. Mountain Research, 1991, **9**(3): 185–192+205] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.1991.03.008

- [8] 李新坡, 莫多闻, 朱忠礼. 侯马盆地冲积扇及其流域地貌发育规律[J]. 地理学报, 2006, **61**(3): 241–248. [LI Xinpo, MO Duowen, ZHU Zhongli. Developments of alluvial fans and their catchments in Houma Basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2006, **61**(3): 241–248] DOI: 10.3321/j.issn:0375–5444.2006.03.002
- [9] 吕立群, 王兆印, 徐梦珍, 等. 怒江泥石流扇地貌特征与扇体堵江机理研究[J]. 水利学报, 2016, **47**(10): 1245–1252. [LYU Liqun, WANG Zhaoyin, XU Mengzhen, et al. Geomorphic characters of debris flow fans along Nu River and the river blocking mechanisms [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, **47**(10): 1245–1252] DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20160255
- [10] 张金山, 沈兴菊, 魏军林. 泥石流堆积扇发育演化特征观测研究[J]. 长江流域资源与环境, 2010, **19**(12): 1478–1483. [ZHANG Jinshan, SHEN Xingju, WEI Junlin. Observational study on the characteristics of development and evolvement of debris flow deposit fan [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010, **19**(12): 1478–1483]
- [11] 印森林, 刘忠保, 陈燕辉, 等. 冲积扇研究现状及沉积模拟实验——以碎屑流和辫状河共同控制的冲积扇为例[J]. 沉积学报, 2017, **35**(1): 10–23. [YIN Senlin, LIU Zhongbao, CHEN Yanhui, et al. Research progress and sedimentation experiment simulation about alluvial fan: A case study on alluvial fan controlled by debris flow and braided river [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, **35**(1): 10–23] DOI: 10.14027/j.cnki.cjxb.2017.01.002
- [12] VINCENT L T, EATON B C, LEENMAN A S, et al. Secondary geomorphic processes and their influence on alluvial fan morphology, channel behavior and flood hazards [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2022, **127**(2): e2021JF006371. DOI: 10.1029/2021JF006371
- [13] 崔卫国, 穆桂金, 夏斌, 等. 玛纳斯河山麓冲积扇演变遥感研究[J]. 地理与地理信息科学, 2006, **22**(3): 39–42. [CUI Weiguo, MU Guijin, XIA Bin, et al. Evolution of alluvial fans at range-front of Tian Mountains in Manas River Valley based on remote sensing technology [J]. Geography and Geo-Information Science, 2006, **22**(3): 39–42] DOI: 10.3969/j.issn.1672–0504.2006.03.009
- [14] WASKLEWICZ T, SCHEINERT C. Development and maintenance of a telescoping debris flow fan in response to human-induced fan surface channelization, Chalk Creek Valley Natural Debris Flow Laboratory, Colorado, USA [J]. Geomorphology, 2016, **252**: 51–65. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.06.033
- [15] DE HAAS T, DENSMORE A L, STOFFEL M, et al. Avulsions and the spatio-temporal evolution of debris-flow fans [J]. Earth-Science Reviews, 2018, **177**: 53–75. DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.11.007
- [16] 刘希林. 泥石流平面形态的统计分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1995, **15**(3): 93–104. [LIU Xilin. Statistical analysis on the plane shapes of debris flow fan [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1995, **15**(3): 93–104] DOI: 10.16562/j.cnki.0256–1492.1995.03.011
- [17] 屈永平, 唐川, 刘洋, 等. 四川省都江堰市龙池地区“8·13”泥石流堆积扇调查和分析[J]. 水利学报, 2015, **46**(2): 197–207+216. [QU Yongping, TANG Chuan, LIU Yang, et al. Survey and analysis of the “8.13” debris flows fan in Longchi town of Dujiangyan city, Sichuan province [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, **46**(2): 197–207+216] DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2015.02.009
- [18] 李旭, 黄江成, 徐慧娟, 等. 怒江高山峡谷区泥石流堆积扇特征分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2016, **38**(5): 750–757. [LI Xu, HUANG Jiangcheng, XU Huijuan, et al. The characteristics analysis of debris flow fan in Nujiang alpine canyon region [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2016, **38**(5): 750–757] DOI: 10.7540/j.ynu.20160035
- [19] 邹任洲, 张佳佳, 王军朝, 等. 藏东南帕隆藏布流域波密县城至索通泥石流堆积扇形成的制约因素与特征[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2018, **41**(3): 419–426. [ZOU Renzhou, ZHANG Jiajia, WANG Junchao, et al. The restricting factors and characteristics of debris flow fans of Bomi-Suotong Village section of Palong Zangbu River basin in southeast Tibet [J]. Journal of Sichuan Normal University (Natural Science), 2018, **41**(3): 419–426] DOI: 10.3969/j.issn.1001–8395.2018.03.023
- [20] 崔之久, 熊黑钢. 泥石流沉积相模式[J]. 沉积学报, 1990, **8**(3): 128–140. [CUI Zhijiu, XIONG Heigang. A facies model of debris flow [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1990, **8**(3): 128–140] DOI: 10.14027/j.cnki.cjxb.1990.03.013
- [21] SORRISO-VALVO M, ANTRONICO L, LE PERA E. Controls on modern fan morphology in Calabria, southern Italy [J]. Geomorphology, 1998, **24**(2–3): 169–187. DOI: 10.1016/S0169–555X(97)00079–2
- [22] FRANZI L, BIANCO G. A statistical method to predict debris flow deposited volumes on a debris fan [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial and Planetary Science, 2001, **26**(9): 683–688. DOI: 10.1016/S1464–1917(01)00067–8
- [23] 陈杰, 韦方强, 崔鹏. 小江流域泥石流堆积扇形成的制约因素及其特征[J]. 地理科学, 2005, **25**(6): 6704–6708. [CHEN Jie, WEI Fangqiang, CUI Peng. Restricting conditions and their characteristics for debris flow fans in Xiaojiang River valley [J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, **25**(6): 6704–6708] DOI: 10.3969/j.issn.1000–0690.2005.06.009
- [24] HOOKE R L B. Processes on arid-region alluvial fans [J]. The Journal of Geology, 1967, **75**(4): 438–460. DOI: 10.1086/627271

- [25] BLAIR T C, MCPHERSON J G. Alluvial fan processes and forms [J]. *Geomorphology of Desert Environments*, 1994: 354 – 402. DOI: 10.1007/978-94-015-8254-4-14
- [26] MILANA J P, RUZYCKI L. Alluvial-fan slope as a function of sediment transport efficiency [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1999, **69**(3): 553 – 562. DOI: 10.2110/jsr.69.553
- [27] STOCK J D, SCHMIDT K M, MILLER D M. Controls on alluvial fan long-profiles [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2008, **120**(5-6): 619 – 640. DOI: 10.1130/B26208.1
- [28] HARVEY A. Dryland alluvial fans [J]. *Arid Zone Geomorphology: Process, Form and Change in Drylands*, 2011: 333 – 371. DOI: 10.1002/9780470710777.ch14
- [29] BRAZIER V, WHITTINGTON G, BALLANTYNE C K. Holocene debris cone evolution in Glen Etive, Western Grampian Highlands, Scotland [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1988, **13**(6): 525 – 531. DOI: 10.1002/esp.3290130606
- [30] RITS D S, VAN BALEN R T, PRINS M A, et al. Evolution of the alluvial fans of the Luo River in the Weihe Basin, central China, controlled by faulting and climate change: A reevaluation of the paleogeographical setting of Dali Man site [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2017, **166**: 339 – 351. DOI: 10.1016/j.quascirev.2017.01.013
- [31] SCHOCH-BAUMANN A, BLÖTHE J H, MUNACK H, et al. Postglacial outsize fan formation in the Upper Rhone valley, Switzerland-gradual or catastrophic? [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2022, **47**(4): 1032 – 1053. DOI: 10.1002/esp.5301
- [32] KESEL R H, LOWE D R. Geomorphology and sedimentology of the Toro Amarillo alluvial fan in a humid tropical environment, Costa Rica [J]. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 1987, **69**(1): 85 – 99. DOI: 10.1080/04353676.1987.11880199
- [33] SAITO K, OGUCHI T. Slope of alluvial fans in humid regions of Japan, Taiwan and the Philippines [J]. *Geomorphology*, 2005, **70**(1-2): 147 – 162. DOI: 10.1016/j.geomorph.2005.04.006
- [34] CROSTA G B, FRATTINI P. Controls on modern alluvial fan processes in the central Alps, northern Italy [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2004, **29**(3): 267 – 293. DOI: 10.1002/esp.1009
- [35] DAVIES T R H, KORUP O. Persistent alluvial fanhead trenching resulting from large, infrequent sediment inputs [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2007, **32**(5): 725 – 742. DOI: 10.1002/esp.1410
- [36] FRANKE D, HORNING J, HINDERER M. A combined study of radar facies, lithofacies and three - dimensional architecture of an alpine alluvial fan (Illgraben fan, Switzerland) [J]. *Sedimentology*, 2015, **62**(1): 57 – 86. DOI: 10.1111/sed.12139
- [37] 胡凯衡, 崔鹏, 游勇, 等. 物源条件对震后泥石流发展影响的初步分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2011, **22**(1): 1 – 6. [HU Kaiheng, CUI Peng, YOU Yong, et al. Influence of debris supply on the activity of post-quake debris flows [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2011, **22**(1): 1 – 6] DOI: 10.3969/j.issn.1003-8035.2011.01.001
- [38] 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 and Engineering Geology*, 2019, **46**(5): 144 – 153] DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.05.19
- [39] GE Yonggang, CUI Peng, SU Fenghuan, et al. Case history of the disastrous debris flows of Tianmo Watershed in Bomi county, Tibet, China: Some mitigation suggestions [J]. *Journal of Mountain Science*, 2014, **11**(5): 1253 – 1265. DOI: 10.1007/s11629-014-2579-2
- [40] DENG Mingfeng, CHEN Ningsheng, LIU Mei. Meteorological factors driving glacial till variation and the associated periglacial debris flows in Tianmo Valley, south-eastern Tibetan Plateau [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2017, **17**(3): 345 – 356. DOI: 10.5194/nhess-17-345-2017
- [41] WEI Rongqiang, ZENG Qingli, 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. DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.12.013
- [42] 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏河流与湖泊[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 1 – 239. [Tibetan Plateau Scientific Expedition Team of Chinese Academy of Sciences. *Rivers and lakes in Tibet* [M]. Beijing: Science Press, 1984: 1 – 239]
- [43] 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: 1 – 210. [Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Institute of the Traffic Science, Tibet Autonomous Region. *A study of typical mountain hazards along Sichuan-Tibet highway* [M]. Chengdu: Chengdu Science and Technology University Publishing House, 1999: 1 – 210]
- [44] 白玲, 李国辉, 宋博文. 2017 年西藏米林 6.9 级地震震源参数及其构造意义[J]. *地球物理学报*, 2017, **60**(12): 4956 – 4963. [BAI Ling, LI Guohui, SONG Bowen. The source parameters of the M6.9 Mainling, Tibet earthquake and its tectonic implications [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, **60**(12): 4956 – 4963] DOI: 10.6038/cjg20171234
- [45] 杨逸畴, 高登义, 李渤生. 雅鲁藏布江下游河谷水汽通道初探[J]. *中国科学: 化学*, 1987, **17**(8): 893 – 902. [YANG

- Yichou, GAO Dengyi, LI Bosheng. Preliminary exploration of the vapor path in the lower Yalung Tsangpo River valley [J]. *Scientia Sinica (Chimica)*, 1987, **17**(8): 893 – 902] DOI: 10.1360/zb1987-17-8-893
- [46] 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏冰川[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 1 – 98. [Tibetan Plateau Scientific Expedition Team of Chinese Academy of Sciences. *Glaciers in Tibet* [M]. Beijing: Science Press, 1986: 1 – 98]
- [47] 杨威, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 近期藏东南帕隆藏布流域冰川的变化特征[J]. *科学通报*, 2010, **55**(18): 1775 – 1780. [YANG Wei, YAO Tandong, XU Baiqing, et al. Characteristics of recent temperat glacier fluctuations in the Parlang Zangbo River basin, southeast Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, **55**(18): 1775 – 1780] DOI: 10.1007/s11434-010-3214-4
- [48] 鲁建莹, 余国安, 黄河清. 气候变化影响下高山区泥石流形成机制研究及展望[J]. *冰川冻土*, 2021, **43**(2): 555 – 567. [LU Jianying, YU Guoan, HUANG Heqing. Research and prospect on formation mechanism of debris flows in high mountains under the influence of climate change [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, **43**(2): 555 – 567] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0043

Development and Geomorphic Characteristics of a Typical Debris Flow Fan in Alpine Valley: A Case Study of the Tianmo Gully in the Parlung Tsangpo Basin, Southeast Tibet, China

HOU Weipeng^{1, 2}, YU Guoan^{1*}, YUE Pengsheng^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Debris flows in alpine-valley areas play a crucial role in regional geomorphologic evolution by severe dynamic geological effects. A debris flow fan is an interactive result of external geomorphic agencies occurring at a confluence reach between main river (main gully) and its tributary (branch gully); its morphological change reflects water-sediment dynamics and geomorphological process of a debris flow channel itself, and also helps to understand the long-term geomorphological evolution trend of alpine valley. Investigating the development process and driving factors of a debris flow fan helps to determine the geomorphic genesis and evolution of an alpine-valley landscape. Unfortunately, due to poor field working conditions and insufficient technical data, there were still few observation-based research to be conducted regarding to the development processes of debris flow fans in alpine-valley areas.

In this research, a debris flow fan (named after Tianmo fan) developed at the outlet of the Tianmo Gully, a tributary of the Parlung Tsangpo River in the Southeast Tibet, China was aimed for a case study of debris flow fan evolution. It used remote-sensing images, DEM data, UAV aerial photography, RTK topographic survey, and other fieldwork to outline the development process and geomorphic characteristics of the fan after subjected to four times of debris flow events.

It found (1) the formation and developing process of the debris flow fan was controlled by both episodic debris flow events and perennial stream flow. Debris flow events caused dramatic changes in macro-morphology of debris flow fans, such as silting fan surface, expanding fan body; in the case of debris flow fan eroded by perennial stream flow, it had been scoured and reshaped during an intermittent period between debris-flow events, demonstrated by

incision of gully bed or lateral migration of flow channels. (2) Strong interactions existed between the development of the Tianmo fan and the Parlun Tsangpo River. The shape of the outer edge of the Tianmo fan was scoured and reshaped by the runoff of the Parlun Tsangpo River, and the headward erosion was controlled by base level of erosion. Consequently, the local landform of the main river has developed from a relatively narrow and deep single channel into kind of wandering braided river channels.

The study can provide some scientific data support for sedimentology of debris flow, engineering site selection in debris flow fan and risk prevention and control of debris flow disaster.

Key words: debris flow fan; alpine valley; geomorphic effect; the Tianmo Gully; Southeast Tibet

(责任编辑 李嵘)