

中国科技核心期刊 《中国科学引用文数据库》来源期刊 Caj-cd规范获奖期刊

THE CHINESE JOURNAL OF GEOLOGICAL HAZARD AND CONTROL

西藏雅鲁藏布江峡谷特大巨型泥石流活动与泥沙输移特征研究

赵 聪,梁京涛,铁永波,马晓波,张 肃,龚凌枫

Study on the activities of the massive debris flows and sediment transport characteristics in the Grand Bend of the Yarlung Zangbo River Gorge, Xizang

ZHAO Cong, LIANG Jingtao, TIE Yongbo, MA Xiaobo, ZHANG Su, and GONG Lingfeng

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202403025

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

雅鲁藏布江下游色东普沟高位地质灾害发育特征遥感解译

Remote sensing interpretation of development characteristics of high-position geological hazards in Sedongpu gully, downstream of Yarlung Zangbo River

李壮,李滨,高杨,王猛,赵超英,刘晓杰 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 33-41

雅鲁藏布江色东普沟崩滑-碎屑流过程模拟及运动特征分析

Numerical runout modeling and dynamic analysis of the ice avalanche–debris flow in Sedongpu Basin along Yarlung Zangbo River in Tibet

李昆仲, 张明哲, 邢爱国 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 18-27

面向东川复杂山地泥石流沟谷三维地形建模及特征分析的无人机遥感探测应用研究

Application research of unmanned aerial vehicle remote sensing detection for 3D terrain modeling and feature analysis of debris flow gullies in complex mountainous area of Dongchuan

毕瑞,甘淑,李绕波,胡琳 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 91-100

基于光学遥感技术的高山极高山区高位地质灾害链式特征分析

An analysis on chain characteristics of highstand geological disasters in high mountains and extremely high mountains based on optical remote sensing technology: A case study of representative large landslides in upper reach of Jinsha River

刘文, 王猛, 朱赛楠, 余天彬, 黄细超, 宋班, 江煜, 孙渝江 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 29-39

云南维西哈达沟中频泥石流特征及堵溃危险性分析

Characteristics of intermediate frequency debris flow and analysis of the hazard of blockage in Hada gully, Weixi County of Yunnan Province

王翔弘绅, 胡桂胜, 杨志全, 倪化勇 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(2): 42-52

四川木里县项脚沟"75"特大型泥石流特征及发展趋势分析

Analysis of the characteristics and development trends of the "75" catastrophic debris flow in Xiangjiao gully, Muli County, Sichuan 杨华铨, 柳金峰, 孙昊, 赵万玉, 张文涛 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(1): 100–107



关注微信公众号,获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202403025

赵聪,梁京涛,铁永波,等.西藏雅鲁藏布江峡谷特大巨型泥石流活动与泥沙输移特征研究[J].中国地质灾害与防治学报,2024, 35(4):45-55.

ZHAO Cong, LIANG Jingtao, TIE Yongbo, et al. Study on the activities of the massive debris flows and sediment transport characteristics in the Grand Bend of the Yarlung Zangbo River Gorge, Xizang[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(4): 45-55.

西藏雅鲁藏布江峡谷特大巨型泥石流活动与 泥沙输移特征研究

赵 聪1,梁京涛1,铁永波2,马晓波1,张 肃1,龚凌枫2

(1.四川省综合地质调查研究所/稀有稀土战略资源评价与利用四川省重点实验室,四川成都
 610081; 2.中国地质调查局成都地质调查中心/西南地质科技创新中心,四川成都
 610218)

摘要:雅鲁藏布江大拐弯地处流域中下游分界处,为中国泥石流灾害活动极为发育的地区之一。以雅鲁藏布江大拐弯入 口段南岸的派巴沟和曲鲁沟为例,基于该地区50年来历史光学卫星影像数据,采用多期遥感对比解译与现场调查相结合 的方式,开展泥石流物源发育分布特征、泥沙输移特征、活动历史演化特征研究,结果表明:1980—2023年,派巴沟进入 主河道的年平均泥沙量1900m³;在2016年修建拦挡坝前,曲鲁沟进入主河道的年平均泥沙量700m³。派巴沟和曲鲁沟均 于1980年左右暴发过大规模泥石流,此后40余年间,派巴沟以洪水及小型泥石流为主;曲鲁沟则暴发过多次规模不等的 泥石流活动。近年来派巴沟流域内物源数量及面积增长幅度较小,泥石流易发性中等;曲鲁沟流域内发育大量沟道堆积 物源以及坡面堆积物源,且近年来物源数量及面积增长幅度较为明显,泥石流易发性高,此前建成的治理工程运行良好, 可有效降低泥石流的风险性。

关键词:遥感;雅鲁藏布江;泥石流;活动特征;泥沙输移特征 中图分类号: P642.23 文献标志码: A 文章编号: 1003-8035(2024)04-0045-11

Study on the activities of the massive debris flows and sediment transport characteristics in the Grand Bend of the Yarlung Zangbo River Gorge, Xizang

ZHAO Cong¹, LIANG Jingtao¹, TIE Yongbo², MA Xiaobo¹, ZHANG Su¹, GONG Lingfeng²

 (1. Evaluation and Utilization of Strategic Rare Metals and Rare Earth Resource Key Laboratory of Sichuan Province, Sichuan Institute of Comprehensive Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610081, China; 2. Chengdu Center of China Geological Survey, Geosciences Innovation Center of Southwest China, Chengdu, Sichuan 610218, China)

Abstract: The Grand bend of the Yarlung Zangbo River, located at the boundary between the middle and lower reaches of the basin, is one of the most developed areas for debris flow activities in China. This study focuses on the Paiba gully and Qulu

第一作者: 赵 聪(1994—), 男, 工程师, 地质工程专业, 硕士, 主要从事地质灾害遥感调查监测相关研究。E-mail: 735069327@qq.com

通讯作者:梁京涛(1982—),男,高级工程师,地质工程专业,博士,主要从事遥感地质与地质灾害相关研究。

E-mail: 550124235@qq.com

收稿日期: 2024-03-14; 修订日期: 2024-04-08 投稿网址: https://www.zgdzzhyfzxb.com/

基金项目:西藏科技厅重点研发项目(XZ202401ZY0029);四川省地质调查研究院科研项目(SCIGS-CZDZX-2024004; SCIGS-CZDZX-2024006);部-省合作项目(四川地质灾害遥感 SCDZRS-2023)

中国地质灾害与防治学报

Valley on the south bank of the entrance section of the Yarlung Zangbo River's grand bend. We collected and sorted out the historical optical satellite image data of the region in the past 50 years. By combining multi-period remote sensing image comparative interpretation and field investigation, we carried out the research on the characteristics of the development and distribution of debris flow sources, the characteristics of sediment transport, and the historical evolution of debris flow activities. The results show that from 1980 to 2023, the annual average sediment volume of the Paiba gully entering the main river was about 1900 m³. Before the construction of a retaining dam in 2016, the annual average sediment volume of the Qulu Valley entering the main river channel was about 700 m³. Both Paiba gully and Qulu Valley experienced large-scale debris flow around 1980. Over the next 40 years, Paiba gully was mainly characterized by floods and small-scale debris flow, while Qulu Valley experienced multiple debris flow events of varying scales. In recent years, the number and area of material sources in Paiba gully have increased relatively slowly, and the susceptibility of debris flows is moderate. In contract, Qulu Valley has seen significant increases in the quantity and area of channel and slope material sources, leading to high debris flow susceptibility. Sources developed in the Qulu Valley, and the quantity and area of these material sources have increased significantly in recent years. The susceptibility of debris flows is high, and the previously built control projects are functioning well and can effectively reduce the risk of debris flows.

Keywords: remote sensing; Yarlung Zangbo River; debris flow; activity characteristics; sediment transport characteristics

0 引言

雅鲁藏布江大拐弯地处东喜马拉雅构造结核心区 域,属于雅鲁藏布江中下游分界点,该地区构造运动活 跃、岩体较为破碎、地形条件复杂^[1-3],是中国泥石流灾 害最为发育的活动带之一^[4-5]。雅鲁藏布江流域中下游 段历史上曾发生过多次大规模泥石流-堵江灾害,并造 成重大损失和人员伤亡,如1950年和1968年暴发的则 隆弄冰川泥石流两度摧毁直白村,并短时间堵塞雅鲁藏 布江^[4];1953年暴发的古乡沟泥石流直接摧毁了古乡 村,并阻断雅鲁藏布江支流的帕隆藏布江,形成堰塞 湖^[6-8];2007年天摩沟泥石流导致8人死亡,9人受伤, 阻断帕隆藏布江1h后自然溃决^[9-11];2018年色东普沟 两度暴发泥石流灾害,堵塞雅鲁藏布江时间分别长达 为56h和48h^[12-14]。

近年来随着高原无人区城镇和工程建设的稳步推 进,高寒高海拔地区的泥石流灾害特征及其危害性等方 面的研究显得尤为重要,且前人已经取得了一定的研究 成果。在泥石流成因机制研究方面:刘建康等^[8]、余忠 水等^[9-10]以及高波等^[11]均对部分冰川泥石流灾害形成 与气象条件的关系进行了分析;童立强等^[12]和李壮等^[14] 采用多源遥感技术手段对雅鲁藏布江下游色东普沟的 历次碎屑泥石流堵江事件进行总结,初步探讨了色东普 沟频繁发生碎屑泥石流的原因;胡桂胜等^[15]则从地形地 貌、物源、水源及气温等方面分析了雅鲁藏布江流域中 下游段泥石流灾害的形成条件;铁永波等^[16-18]对西南 地区泥石流-堰塞湖灾害链等泥石流型灾害链成灾模式 进行了总结。在泥石流发育演化以及危险性评估方面: 李翠平等^[19]基于光释光和¹⁴C测年等方法,对泥石流堵 江与堰塞湖演化规律进行了分析;常鸣等^[20]基于流域高 差、物源量等基本参数,建立了雅鲁藏布江中游段泥石 流危险范围预测模型;王俊豪等^[21]、刘波等^[22]以及柴波 等^[23]采用数值模拟的方式分别开展了高海拔地区的降 雨型以及冰湖溃决型泥石流演化进程研究;黄艳婷 等^[24]采用层次分析法对藏东南地区泥石流危险性进行 了评估;龚凌枫等^[25]采用地面调查、钻探以及¹⁴C测年 等方法,对雅鲁藏布江大拐弯典型泥石流的形成年代序 列、堆积深度、冲出范围等特征进行了研究。但对雅鲁 藏布江流域的泥石流泥沙输移特征遥感分析、泥石流 活动历史遥感回溯研究方面的文献较少。

本文以雅鲁藏布江大拐弯入口段2处泥石流为例,收 集整理50年来多期光学卫星影像数据,采用多期遥感 对比解译与现场调查相结合的方法,开展泥石流物源发 育分布特征、泥沙输移特征、活动特征及其时序变化研 究,以期为该流域的泥石流灾害防治工作提供技术支撑。

1 研究区概况

雅鲁藏布江大拐弯地处西藏自治区林芝市,属高原 温带半湿润季风气候区,气候较为干燥,降水充沛,年均 降水量 640 mm^[3]。区域内新构造运动活跃,地层挤压 褶皱,断裂切割,使得地势起伏大,山顶与河谷高差多大 于 2 000 m,河流下切强烈,属典型高山深切割区。构造 快速隆升加之充沛的降水,使得该地区的冰川活动较为 活跃,同时为泥石流活动提供了水力条件与固体物

历史与泥石流输移特征对比研究。两条支沟流域中下 游及沟口均可见碎石等堆积物分布(图1),派巴沟流域 面积为 40.19 km²,曲鲁沟流域面积为 23.45 km²,具体参 数如表 1 所示。



图1 研究区地质图

Fig. 1 Geologic map of the study area

		the study area	
Table 1	Basi	ic parameters of the watershed w	ithin
	表1	研究区泥石流流域基本参数	

编号	沟道名称	流域面积/km ²	主沟道长度/km	平均纵比降/‰
N1	派巴沟	40.19	9.9	251
N2	曲鲁沟	23.45	10.7	237

研究区主要出露元古界和第四系地层,其中元古界 地层基本分布于2条支沟整个流域内,具体包括南迦巴 瓦岩群直白岩组(An∈zh)、派乡岩组(An∈p)、多雄拉 混合岩(Dmi)等,第四系地层主要包括冲积层(Q^{al})、冰 积层(Q^{sl})、湖积层(Q^l)等,集中分布于主沟道中下游及 沟口位置,中上游冰川活动形成的冰碛土是该地区泥石 流的主要物源。此外,各支沟流域中下游段发育多组北 东—南西向断层(图1)。

2 数据及方法

2.1 遥感数据源

本次研究采用的遥感数据源包括 GF-2、Worldview-

2等亚米级高分辨率光学卫星数据,以及 ETM、KH-1等早期中低分辨率光学卫星数据,遥感信息源参数如 表 2 所示。多源遥感数据时相周期为 1972—2022年, 云雪覆盖率<5%,数据质量满足历史回溯分析要求。

表 2 遥感信息源一览表 Table 2 List of remote sensing data

数据源	空间分辨率	影像时间
GF2	全色0.8 m,多光谱3.2 m	2021-12-04/2021-02-12/ 2022-04-02
Worldview-2	全色0.46 m,多光谱1.84 m	2014-12-28
ETM	多光谱15 m	1987-03-08/2000-11-09
KH-1	全色3~6 m	1972-11-28

2.2 泥石流物源发育特征评价方法

采用多源、多期高精度光学卫星影像数据,在建立 泥石流灾害要素特征遥感解译标志的基础上,识别不同 时间段泥石流堆积扇(早期堆积扇、新近堆积扇)、物源 条件(崩滑堆积物源、坡面堆积物源、沟道堆积物源)、 水动力条件(冰湖)等要素特征的分布位置及面积,结合 野外现场调查,最终实现泥石流物源发育分布特征的动态评价。

2.3 泥沙输移特征评价及输移量估算方法

2.3.1 泥沙输移特征评价

采用多期光学卫星影像数据,分析不同时间段泥石 流主沟道及堆积扇内堆积物变化特征,可实现泥沙输移 特征动态评价。如图 2 所示,在 2014 年 12 月时该区域 内分布大量泥沙等堆积物,未见明显冲刷迹象;在 2021 年 12 月时该区域密集分布了多条冲刷形成的沟道,由 此可以判断,在 2014—2021 年期间,该区域属于典型冲 刷区域。



(a) 2014年12月28日影像

(b) 2021年12月4日影像

图 2 典型冲刷区域影像特征 Fig. 2 Optical satellite images of typical erosion areas

图 3 为典型淤积区域影像特征,在 2014 年时,该区域分布少量泥沙等堆积物,发育一条小型规模冲刷形成的沟道,而在 2022 年时,该区域下游侧分布一处拦挡坝,淤积了大量堆积物,无明显冲刷迹象,由此可以判

断,在拦挡坝修建后,该区域属于典型淤积区域。

参照上述识别标志,采用多源、多期光学卫星遥感数 据,便可将泥石流主沟道及堆积扇分别划分为冲刷区域以 及淤积区域,从而实现泥石流泥沙输移特征的动态评价。



(a) 2014年12月28日影像

(b) 2022年4月2日影像

图 3 典型淤积区域影像特征 Fig. 3 Optical satellite images of typical siltation areas



在上述获取某流域内冲刷区域以及淤积区域分布 位置及面积的基础上,进行野外现场调查,分别获取各 冲刷区域平均深度以及淤积区域平均厚度,便可实现流 域内泥沙冲刷体积,淤积体积以及进入主河道的泥沙输 移量估算,如式(1)(2)所示。

$$V\mathbf{w} = \sum_{i=1}^{n} (S\mathbf{w}_i \cdot H\mathbf{w}_i)$$
(1)

$$V\mathbf{d} = \sum_{i=1}^{n} (S \, \mathbf{d}_i \cdot H \mathbf{d}_i) \tag{2}$$

$$V = V \mathbf{w} - V \mathbf{d} \tag{3}$$

式中: Vw——该流域内泥沙冲刷总体积/m³;

Sw_i——某冲刷区域的面积/m²;

- Hw;——某冲刷区域的平均深度/m;
- Vd——该流域内泥沙淤积总体积/m3;
- Sd;——某淤积区域的面积/m²;
- Hd,——某淤积区域的平均厚度/m;
- V——该流域内泥沙输移至主河道的总体积/m³。

3 典型泥石流活动特征及活动历史

为深入分析近 50 年来雅鲁藏布江大拐弯入口段泥 石流的活动特征,基于 1972—2022 年五期历史光学卫 星影像,开展研究区内泥石流活动历史多期对比解译分 析。结果表明,近 50 年来研究区内派巴沟和曲鲁沟泥 石流活动历史及发展趋势特征存在较大差异。

(1)派巴沟

以派巴沟为例,在1972年11月,该沟沟口早期堆

积扇表部均为耕地,堆积扇表部及流域下游段无明显沟 道冲刷迹象,也未见明显大规模新近泥石流堆积物分 布;在1987年3月,该沟流域下游段主沟道及沟口堆积 扇中部可见明显灰白色条带状堆积物分布(图 4)。两 期光学影像对比解译结果表明,该沟在1972年11月前 短期内尚未暴发大规模泥石流活动,而1972—1987 年间,该沟曾暴发过较大规模泥石流,泥石流冲出物 主要堆积于流域下游及堆积扇表部的主沟道内。基于 1987—2022年的4期光学卫星影像分析,近年来派巴 沟沟口的人类工程活动分布面积显著增大,下游主沟 道及堆积扇表部的灰白色条带状堆积物规模逐渐减 小,特别是在2014—2022年间,流域下游段主沟道及沟 口可见明显冲刷迹象,未见明显新近泥石流堆积物分 布迹象, 这表明在 1987 年后的 30 多年间, 派巴沟并未 发生大规模泥石流活动,以洪水及小规模泥石流活动 为主。





通过调查和访问,该沟曾于 1980 年 8 月中旬正午 12 点左右暴发较大规模泥石流活动,泥石流持续时间 2—3 h,泥石流冲出物掩埋沟口农田,未造成人员伤亡, 且曲鲁沟当天也暴发了一定规模泥石流活动,此后数十 年间,派巴沟未见大规模泥石流暴发。

(2)曲鲁沟

在 1972 年 11 月, 曲鲁沟沟口堆积扇表部及流域下 游段主沟道内未见明显大规模泥石流堆积物分布; 在 1987 年 3 月, 该沟流域中下游段主沟道内可见明显灰 白色条带状堆积物分布(图 5)。结合现场调查可知, 该



图 5 曲鲁沟下游及沟口近 50 年历史影像 Fig. 5 Optical satellite images of the lower reaches and mouth of Qulu gully over the past 50 years

沟在 1972 年 11 月前短期内未暴发大规模泥石流,在 1980 年暴发过较大规模泥石流活动,泥石流冲出物主 要堆积于流域中下游主沟道内,尚未掩埋沟口早期堆积 扇。相较于 1987 年卫星影像,2000 年卫星影像显示该 沟堆积扇表部左侧区域可见明显新近灰白色条带状堆 积物分布,2014 年该沟堆积扇中部区域可见新近灰白 色条带状堆积物分布(图 5)。这表明在此期间,该沟曾 暴发 2 次及以上中小规模泥石流活动,不同期次的泥石 流冲出物分别堆积于流域中下游主沟道、堆积扇左侧 以及中部等区域。2014—2022 年期间,流域下游主沟 道内新建一处宽约 90 m 的拦挡坝,拦挡坝内侧淤积大 量堆积物,拦挡坝下游侧主沟道内及堆积扇表部的堆积 物分布区域及规模未见明显变化,泥石流活动减弱。

2 处支沟的泥石流活动历史分析结果表明,派巴沟 和曲鲁沟均于 1980 年暴发过较大规模泥石流活动,此 后的 40 余年,派巴沟未发生大规模泥石流活动,以洪水 及小规模泥石流活动为主;曲鲁沟曾暴发2次及以上中 小规模泥石流活动,但2014年修建拦挡坝后,泥石流活 动逐渐减弱。

4 泥石流物源时序发育分布时序特征

(1)派巴沟

根据多期光学卫星影像遥感动态解译,未开展工程 治理的派巴沟流域内主要发育崩滑堆积物源、沟道堆 积物源、坡面堆积物源 3 种物源类型。截至 2022 年,派 巴沟流域内发育崩滑堆积物源 2 处、沟道堆积物源 5 处、坡面堆积物源 5 处,共计 12 处物源(表 3)。崩滑堆 积物源分布于流域上游段主沟道右侧支沟周边区域;沟 道堆积物源主要分布于主沟道及其左侧支沟内;坡面堆 积物源集中分布于流域中游段主沟道左侧支沟上部斜 坡区域,见图 6(a)。

表 3 研究区内泥石流物源分布及时空变化特征 Table 3 Distribution and spatiotemporal variation of debris flow material sources in the study area

伯旦	泥工法女称	物源类型 —	2014年		2022年	
細亏	泥口沉石桥		数量/处	总面积/m²	数量/处	总面积/m²
N1		崩滑堆积物源	2	106 696		_
	派巴沟泥石流	沟道堆积物源	5	713 774	—	—
	机口的化力机	坡面堆积物源	3	59 507	2	44 078
		总计	10	879 977	2	44 078
N2		崩滑堆积物源	1	15 211	2	23 613
	曲鱼沟泥石流	沟道堆积物源	4	413 779	3	5 692
	四百行びについ	坡面堆积物源	17	305 160	2	26 104
		总计	22	734 150	7	55 409

2014—2022年,该沟仅新增2处坡面堆积物源,位 于早期坡面堆积物源周边区域,即流域中游段主沟道左 侧支沟上部斜坡区域,新增物源总面积为44078m²,新 增物源比例为5.01%(表3)。整体而言,该沟流域以沟 道堆积物源及坡面堆积物源为主,且近年来该沟物源数 量及面积增长趋势较小。

(2)曲鲁沟

截至 2022 年,已开展工程治理的曲鲁沟流域内发育 崩滑堆积物源 3 处、沟道堆积物源 7 处、坡面堆积物源 19 处,共计 29 处物源(表 3)。崩滑堆积物源分布于流 域中游段主沟道左侧支沟周边高海拔区域;沟道堆积物 源主要分布于主沟道及其中上游支沟内;坡面堆积物源 主要分布于流域中游段主沟道左右两侧斜坡,见图 6(b)。

2014—2022年期间,该沟新增了崩滑堆积物源 2处、沟道堆积物源3处、坡面堆积物源2处,新增物 源主要分布于流域中上游段主沟道及其右侧斜坡,新增物源总面积约55409m²,新增物源面积比例为7.55%(表3)。整体而言,该沟流域以沟道堆积物源及坡面堆积物源为主,近年来物源数量及面积均呈一定幅度上升趋势。

5 泥沙输移特征与泥沙输移量估算

5.1 泥沙输移特征分析

(1)派巴沟

采用多期光学卫星遥感影像,对未开展工程治理的 派巴沟泥沙输移特征进行评价分析。该沟流域内较为 明显的冲淤活动特征主要集中分布于流域下游及早期 泥石流堆积扇中部主沟道内(图7),该区域的活动特征 以冲刷为主,冲刷区域面积为56026m²,零星的淤积区 域分布于早期堆积扇沟口位置,面积为2912m²(表4)。



Fig. 6 Remote sensing interpretation map of the distribution of debris flow material sources in the study area



图 7 派巴沟泥沙输移特征

Fig. 7 Characteristics of sediment transport in Paiba gully

Table 4	Statist	tical table of the area of debris flow erosion and
		sedimentation areas

编号	泥石流名称	类型	面积/m ²
N1	派巴沟泥石法	冲刷区域	56 026
		淤积区域	2 912
N2	曲鲁沟泥石流	冲刷区域	18 397
		淤积区域	15 397

(2)曲鲁沟

对于已开展工程治理的曲鲁沟而言,冲淤活动区 域集中分布于流域下游段主沟道内,早期泥石流堆积扇 未见明显分布(图 8)。以主沟道拦挡坝为界,其上游侧 主沟道的活动特征以冲刷为主,面积为 18 397 m²,其下 游侧主沟道的活动特征以淤积为主,面积为 15 397 m² (表 4)。

5.2 泥沙输移量估算

(1)派巴沟

对于未开展工程治理的泥石流而言,在获取冲刷区 域和淤积区域面积的基础上,分别获取各冲刷区域平均 深度以及淤积区域平均厚度,便可实现泥沙输移量的估 算。根据现场调查,派巴沟下游段主沟道内冲刷区域的 平均厚度与堆积扇主沟道内冲刷区域的平均厚度具有 较大差异,下游段主沟道内平均厚度2m,堆积扇主沟 道内平均厚度1m。

为保证估算准确性,分别估算下游段及堆积扇主沟 道内的泥石流冲刷体积,其中下游段主沟道内冲刷区域 面积为 28 917 m²,平均厚度 2 m,则该区域冲刷体积约 57 834 m³;堆积扇主沟道内冲刷区域面积为 27 109 m², 平均厚度 1 m,则该区域冲刷体积约 27 109 m³(图 9)。 因此,自该沟暴发大规模泥石流后,泥石流冲刷总体积 约 84 943 m³。此外,现场调查沟口堆积扇零星的淤积 区域平均厚度 1 m,则淤积体积约 2 912 m³,进入主河道 的泥沙体积约 82 031 m³。

根据前文分析,派巴沟曾于 1980 年暴发较大规模 泥石流,此后的 40 余年间以洪水及小规模泥石流活动 为主。因此,1980—2023 年的 43 年间,该沟进入主河 道的泥沙体积 82 031 m³,由此可估算,该沟进入主河道 的年平均泥沙量为 1 908 m³。

(2)曲鲁沟

根据多期对比遥感解译及现场调查,在曲鲁沟流域 下游段分别修建有谷坊以及拦挡坝,谷坊长约25m,高 约1.5m,谷坊具体建成时间不详,谷坊库容淤满后,便 在其下游侧110m处修建拦挡坝,该拦挡坝长约90m,



图 8 曲鲁沟泥沙输移特征

Fig. 8 Characteristics of sediment transport in Qulu gully



(a)流域下游段主沟道冲刷区域

(b) 堆积扇主沟道冲刷区域

图 9 派巴沟泥沙输移特征现场调查照片 Fig. 9 Photos of sediment transport characteristics in Paiba gully

高约7m,采用钢筋混凝土结构,建成时间为2016年 (图10)。根据光学遥感解译,拦挡坝至谷坊处淤积面 积约6200m²,现场调查结果表明拦挡坝上游侧至谷坊 处淤积厚度约 0.8 m。因此, 在 2016—2023 年的 7 年间, 该拦挡坝内侧共淤积堆积物体积约 4 960 m³, 年淤积体 积约 708 m³。



(a)早期修建的谷坊已淤满

(b) 2016年修建的拦挡坝上游侧淤积现状

图 10 曲鲁沟泥沙输移特征现场调查照片 Fig. 10 Photos of sediment transport characteristics in Qulu gully

因此若未修建拦挡坝,自然条件下该沟进入主河道 的年平均泥沙量 708 m³。根据现场调查,在修建拦挡坝 后,拦挡坝下游侧的泥石流排导槽内未见明显新近堆积 物分布。因此,在修建拦挡坝后,工程约束条件下该沟 进入主河道的泥沙量趋近于 0。

6 结论

(1)20世纪80年代以前,雅鲁藏布江大拐弯地区泥 石流活动性较强,其两侧部分支沟内可见明显泥石流冲 出物于沟口及主沟道中下游堆积。此后40余年间,派 巴沟以洪水及小型泥石流为主;曲鲁沟则先后暴发过多 次规模不等的泥石流活动。派巴沟流域内物源类型主 要为沟道堆积物源,近年来该流域内物源数量及面积增 长幅度较小,泥石流易发性中等;曲鲁沟流域内发育大 量沟道堆积物源以及坡面堆积物源,且近年来物源数量 及面积增长幅度较为明显,泥石流易发性高,前期建成 的泥石流治理工程运行良好,可有效降低泥石流风险性。

(2)采用泥沙输移量估算方法,1980—2023年间, 派巴沟进入主河道的年平均泥沙量1900m³;在2016 年修建拦挡坝前,曲鲁沟进入主河道的年平均泥沙量 700m³,修建拦挡坝后,曲鲁沟进入主河道的泥沙量趋 近于0。

(3)历史遥感影像回溯分析具备直观性、广覆盖性、长时序性等优势,能够有效掌握高原无人区的泥石

流物源分布、冲出物堆积以及地质环境条件的发展演 变过程,从而结合现场调查,实现雅鲁藏布江流域内的 泥石流物源发育分布特征、泥沙冲淤特征、活动历史演 化特征等研究,评估其活动性及其发展趋势,该研究方 法和评估结果可为该地区泥石流的防灾减灾工作提供 有效支撑。

参考文献(References):

- BEAYMONT C, JAMIESON R A, NGUYEN M H, et al. Crustal channel flows: 1. Numerical models with applications to the tectonics of the Himalayan-Tibetan orogeny [J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109(B6).
- [2] 雷永良, 钟大赉, 季建清, 等. 东喜马拉雅构造结更新世两期抬升-剥露事件的裂变径迹证据[J]. 第四纪研究, 2008, 28(4): 584 590. [LEI Yongliang, ZHONG Dalai, JI Jianqing, et al. Fission track evidence for two pleistocene uplift exhumation events in the eastern himaiayan syntaxis [J]. Quaternary Sciences, 2008, 28(4): 584 590. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 康文君,徐锡伟,于贵华,等.南迦巴瓦峰第四纪隆升期次 划分的热年代学证据[J].地球物理学报,2016,59(5): 1753 - 1761. [KANG Wenjun, XU Xiwei, YU Guihua, et al. Thermochronological evidence for division of Quaternary uplifting stages of Mt. Namjagbarwa [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(5): 1753 - 1761. (in Chinese with English abstract)]
- 【4】 张沛全,刘小汉.雅鲁藏布江大拐弯人口段泥石流特征及应对措施[J].中国地质灾害与防治学报,2008,19(1):
 12 17. [ZHANG Peiquan, LIU Xiaohan. Debris flow distribution and preventions at the great turning in the gorge of Yarlung Zangbo River, southeastern Tibet [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(1): 12 17. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 彭补拙,杨逸畴,等.南迦巴瓦峰地区自然地理与自然资源[M].北京:科学出版社,1996. [PENG Buzhuo, YANG Yichou, et al. Geography and Resources in Namche Baiwa Region [M]. Beijing: Science Press, 1996. (in Chinese)]
- [6] 朱平一,罗德富,寇玉贞.西藏古乡沟泥石流发展趋势
 [J].山地研究,1997,15(4):296-299. [ZHU Pingyi,
 LUO Defu, KOU Yuzhen. Debris flow development trend of Guxiang Ravine, Xizang [J]. Mountain Research, 1997, 15(4):296-299. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 吕立群,王兆印,漆力健,等.西藏古乡沟泥石流堰塞 湖演化规律[J].泥沙研究,2015(5):14-18.[LYU Liqun, WANG Zaoyin, QI Lijian, et al. Evolution of debris-flow dammed lake at Guxiang gully in Tibet[J]. Journal of

Sediment Research, 2015(5): 14 - 18. (in Chinese with English abstract)]

- [8] 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)]
- [9] 余忠水,德庆卓嘎,马艳鲜,等.西藏波密天摩沟"9•4" 特大泥石流形成的气象条件[J].山地学报,2009,27(1): 82-87. [YU Zhongshui, DEQING Zhuoga, MA Yanxian, et al. Analysis of meteorological conditions about "9•4" debris flow in Tianmo gully Bomi country of Tibet [J]. Journal of Mountain Science, 2009, 27(1): 82 - 87. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 余忠水,德庆卓嘎,罗布次仁,等.西藏波密县天摩沟 "9•4"特大泥石流灾害成因初步分析[J].中国地质 灾害与防治学报,2009,20(1):6-10.[YU Zhongshui, DEQING Zhuoga, LUOBU Ciren, et al. Preliminary analysis about the cause of "9•4" debris flow disaster in Tianmogou, Bomi, Tibet [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2009, 20(1):6-10. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 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 charateristics of debris flow in the Tianmo gully in Tibet [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(5): 144 - 153. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 童立强, 涂杰楠, 裴丽鑫, 等. 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, 2018, 26(6): 1552 - 1561. [TONG Liqiang, TU Jienan, PEI Lixin, et al. Preliminary discussion of the frequently debris flow events in Sedongpu Basin at Gyalaperi peak, Yarlung Zangbo River [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(6): 1552 - 1561. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 刘传正,吕杰堂,童立强,等.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,2019,46(2):219-234.
 [LIU Chuanzheng, LYU Jietang, TONG Liqiang, et al. Research on glacial/ rock fall-landslide-debris flows in Sedongpu basin along Yarlung Zangbo River in Tibet [J]. Geology in China, 2019, 46(2):219-234. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 李壮,李滨,高杨,等.雅鲁藏布江下游色东普沟高位地质灾害发育特征遥感解译[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(3):33-41.[LI Zhuang, LI Bin, GAO Yang, et al. Remote sensing interpretation of development

characteristics of high-position geological hazards in Sedongpu gully, downstream of Yarlung Zangbo River [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(3): 33 – 41. (in Chinese with English abstract)]

- [15] 胡桂胜,陈宁生,邓明枫,等.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,2011,31(2):193-197. [HU Guisheng, CHEN Ningsheng, DENG Mingfeng, et al. Classification and initiation conditions of debris flows in Linzhi Area, Tibet [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(2): 193 197. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 铁永波,徐伟,向炳霖,等.西南地区地质灾害风险"点面双控"体系构建与思考[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(3):106-113.[TIE Yongbo, XU Wei, XIANG Binglin, et al. The thoughts on construction of "double-control of point and zone" system of geological hazard risk in southwest China [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(3): 106 113. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 铁永波,张宪政,龚凌枫,等.西南山区典型地质灾害链成灾模式研究[J].地质力学学报,2022,28(6):1071-1080. [TIE Yongbo, ZHANG Xianzheng, GONG Lingfeng, et al. Research on the pattern of typical geohazard chains in the southwest mountainous region, China [J]. Journal of Geomechanics, 28(6): 1071 1080. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 铁永波, 葛华, 高延超, 等. 二十世纪以来西南地区地质 灾害研究历程与展望[J]. 沉积与特提斯地质, 2022, 42(4): 653-665. [TIE Yongbo, GE Hua, GAO Yanchao, et al. The research progress and prospect of geological hazards in southwest China since the 20th Century [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2022, 42(4): 653 - 665. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 李翠平,王萍,钱达,等.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,2015, 37(4):1136-1146.[LI Cuiping, WANG Ping, QIAN Da, et al. Ages of the recent two episodes of glacially dammed lakes along the upstream of the Yarlung Zangbo Gorge[J]. Seismology and Geology, 2015, 37(4): 1136 - 1146. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 常鸣, 唐川, 苏永超, 等. 雅鲁藏布江米林段泥石流堆积 扇危险范围预测模型[J]. 工程地质学报, 2012, 20(6):

971 – 978. [CHANG Ming, TANG Chuan, SU Yongchao, et al. Prediction model for debris flow hazard zone on alluvial fan in Milin section of Yarlungzangbo River, Tibet [J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(6): 971 – 978. (in Chinese with English abstract)]

- [21] 王俊豪,管建军,魏云杰,等.德钦县城直溪河泥石流成 灾模式及运动过程模拟[J].水文地质工程地质,2021, 48(6):187-195. [WANG Junhao, GUAN Jianjun, WEI Yunjie, et al. A study of the disaster model and movement process simulation of debris flow in the Zhixi River of Deqin County [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(6):187-195. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 刘波,胡卸文,何坤,等.西藏洛隆县巴曲冰湖溃决型泥 石流演进过程模拟研究[J].水文地质工程地质,2021, 48(5):150-160. [LIU Bo, HU Xiewen, HE Kun, et al. Characteristics and evolution process simulation of the Baqu gully debris flow triggered by ice-lake outburst in Luolong County of Tibet, China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(5): 150 - 160. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 柴波,陶阳阳,杜娟,等.西藏聂拉木县嘉龙湖冰湖溃决型泥石流危险性评价[J].地球科学,2020,45(12):4630 4639. [CHAI Bo, TAO Yangyang, Du Juan, et al. Hazard Assessment of debris flow triggered by outburst of Jialong Glacial lake in Nyalam County, Tibet [J]. Earth Science, 2020, 45(12):4630 4639. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 黄艳婷,郭永刚.考虑降雨敏感度的泥石流危险性评价——以藏东南地区为例[J].中国地质灾害与防治学报,2023,34(1):129-138.[HUANG Yanting,GUO Yonggang. Debris flow risk assessment considering different rainfall sensitivity: A case study in southeast Tibet [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(1):129-138.(in Chinese with English abstract)]
- [25] 龚凌枫,张运达,铁永波,等.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,2022,28(6):1024-1034. [GONG Lingfeng, ZHANG Yunda, TIE Yongbo, et al. 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, 2022, 28(6): 1024 - 1034. (in Chinese with English abstract)]