

川西高原鲜水河断裂带炉霍—道孚段泥石流分布特征

梁馨月^{1,2,3}, 曾璐^{1,2}, 葛永刚^{1,2*}, 杜宇琛^{1,2,3}, 曹晓娟⁴

LIANG Xinyue^{1,2,3}, ZENG Lu^{1,2}, GE Yonggang^{1,2*}, DU Yuchen^{1,2,3}, CAO Xiaojuan⁴

1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041;

2. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222

1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. Key Laboratory of Mountain Surface Process and Hazard, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, Sichuan, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. China Water Resources Bei Fang Investigation, Design & Research CO.LTD., Tianjin 300222, China

摘要:鲜水河断裂带炉霍—道孚段泥石流沿断裂带呈线性分布,以中高频泥石流为主,过渡型、稀性居多。断裂带内岩体破碎,次级构造发育且活动性强烈使主河床呈阶梯状,为泥石流灾害发育提供了势能转化、物质补给与水力运输条件。研究区泥石流沟(K_{sn} 约140 m^{0.9})分布在主河陡峭指数高处(K_{sn} 约66 m^{0.9}),且中下游泥石流沟与其入汇主河处的陡峭指数变化趋势较一致。Wilcoxon 秩和检验发现断裂带北东侧泥石流沟的坡度(26.5°)、剩余高度(13.3 m)、地震动峰值加速度显著高于南西侧;南西侧泥石流沟相比北东侧岩性更软、地形湿度指数更大。利用主成分分析发现北东侧泥石流沟地质地貌较相似,以陡峭地形为主,南西侧泥石流沟受岩性、水力运输能力影响,泥石流沟形貌更复杂。系统性认识炉霍—道孚段泥石流沟可为国道G317泥石流灾害防治工作提供参考。

关键词:鲜水河断裂带;构造运动;地质地貌;泥石流

中图分类号:P642.23 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)12-2061-10

Liang X Y, Zeng L, Ge Y G, Du Y C, Cao X J. The distribution characteristics of debris flow along the Luhuo-Daofu section of Xianshuihe fault, west Sichuan Province. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(12): 2061-2070

Abstract: The Debris flow in Luhuo-Daofu section is linearly distributed along the Xianshuihe fault. It is mainly medium and high frequency, transitional and diluted debris flow. In the fault, the rock mass is broken, the secondary structure is developed with strong activity, so that the main riverbed is stepped, which provides potential energy transformation, material supply and hydraulic transport conditions for the development of debris flow disaster. Debris flow gullies (K_{sn} about 140 m^{0.9}) are distributed at the high river steepness indices of the trunk river (K_{sn} about 66 m^{0.9}). Moreover, debris flow gullies on the middle and lower reaches of the river and the trunk river in which they enter are more consistent in the trend of the river steepness indices. Wilcoxon test shows that the slope (26.5°), excess height (13.3 m) and peak ground acceleration of debris flow gullies on the northeast of the Xianshuihe fault are significantly higher than those on the southwest. Compared with debris flow gullies on the northeast of the Xianshuihe fault, the lithology of debris

收稿日期:2021-06-16; **修订日期:**2021-10-14

资助项目:第二次青藏高原综合科学考察研究专题《重大泥石流灾害及风险》(编号:2019QZKK0902)和国家自然科学基金项目《大梯度环境下坡面岩土体物理力学性质与灾变条件空间格局》(批准号:41790432)

作者简介:梁馨月(1995-),女,在读博士生,从事土壤侵蚀与山地灾害研究。E-mail:liangxinyue17@mails.ucas.edu.cn

***通信作者:**葛永刚(1974-),男,博士,研究员,从事山地灾害形成机理及预警技术研究。E-mail:gyg@imde.ac.cn

flow gullies on the southwest side are softer, and the topographic wetness index are larger. The principal component analysis indicates that the geology and geomorphology of debris flow gullies on the northeast side are relatively similar, mainly in steep terrain, and the geomorphology of debris flow gullies on the southwest side are more complex due to the influence of lithology and hydrological transportation capacity. The systematic understanding of debris flow gullies along the Luhuo-Daofu section can provide a reference for the prevention and control of debris flow disasters on the G317 Highway.

Key words: Xianshuihe fault; tectonic movement; geology and geomorphology; debris flow

活动断裂的致灾效应是地质灾害研究的重要内容,内外动力共同作用的灾害形成机理可为活动构造区地质灾害早期识别和防灾减灾提供理论依据^[1]。活动断裂对地质灾害发育有明显的控制作用,影响地质灾害的孕灾环境演化^[2-3]。活动断裂密集或交会处地质灾害多发、易发^[4-5],发震断裂带附近常出现群发性泥石流灾害^[6]。泥石流具有突发性、流速快、破坏力强等特点,不仅造成重大的人员伤亡和财产损失,而且还引发严重的社会和公共安全问题。映秀-北川断裂诱发 2008 年汶川地震,导致地表破裂,流域共发生 $5026 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的同震滑坡,为随后频繁的泥石流活动提供了物质来源^[7]。舟曲三眼峪、罗家峪受光盖山-迭山断裂控制地势陡峭,沟内滑坡、崩塌发育,在暴雨激发下发生特大山洪泥石流^[8]。古乡沟受嘉黎断裂带影响,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,强降雨作用下形成高位泥石流-堵江-洪水灾害链^[9]。小江深大断裂为蒋家沟提供了数量巨大的松散物和沟谷发育的有利条件,导致蒋家沟泥石流爆发次数多、规模大^[10]。因此认识活动断裂带控制下

泥石流沟的地质地貌特征与发育规律十分必要。

鲜水河断裂带长期以来被认为是高速滑动和强震活动频繁的左旋走滑断裂,构造活动复杂、地势险峻,崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害频发,对居民及工程设施带来严重威胁。国道 G317 穿越鲜水河断裂带,面临活动断裂错断、高烈度地震、高陡斜坡稳定性等重大工程地质问题^[11]。炉霍-道孚段作为国道 G317 的重要组成部分(图 1),认识区内泥石流的发育规律和活动特征可为铁路、公路等类似构造活跃区重大工程的地质灾害防灾减灾策略制定提供参考。

1 研究区概况

鲜水河地处川西高原区,为雅砻江的最大支流,全长约 680 km,落差约 1340 m,平均海拔为 3000 ~ 4000 m。炉霍-道孚段主河沿鲜水河断裂带自北西向南东延伸。鲜水河断裂带北起甘孜东谷,经炉霍、道孚至泸定,全长约 350 km。北西段主要由炉霍断裂、道孚断裂、乾宁断裂组成,呈左阶羽状分布^[12-13]。断裂带活动引起的强震频发,近百年间

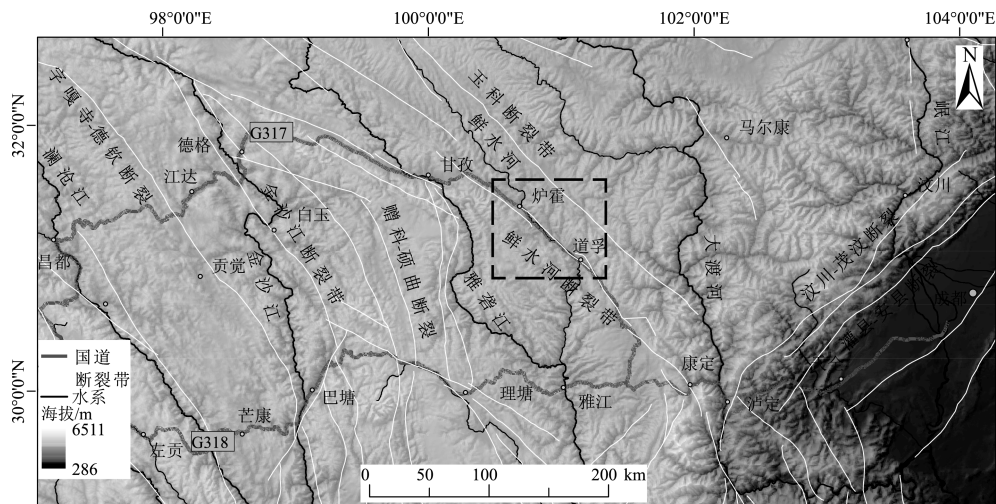


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographic location of the study area

发生 2 次 7 级以上地震,沿断裂带产生近千米宽的破碎带^[14-15]。炉霍—道孚段地质条件极复杂,沿断裂带岩性以变质砂岩、板岩呈韵律互层,强烈的岩层挤压和风化作用导致岩石呈现破碎软弱的特点^[16]。区内河流切割剧烈,形成以深切中高山为主、沟谷呈 V 形的地貌。强烈的构造活动与陡峭地形使地质灾害成群、分带性分布^[16],断裂带 1.5 km 范围发育了 68% 的地质灾害,密度达 1.02 处/ km^2 ^[3],其中炉霍—道孚段灾害分布密度较大。

沿鲜水河炉霍—道孚段长近 110 km 两侧发育 35 条典型沟谷泥石流,流域北东侧发育 17 条,南西侧发育 18 条泥石流沟(图 2;表 1)。炉霍—道孚段泥石流线密度为 0.3 条/ km ,泥石流沟分布密集。按发生频率分类,低频泥石流 11 条,中频泥石流 11 条,高频泥石流 13 条。按泥石流性质分类,稀性泥石流有 12 条,过渡性泥石流 16 条,粘性泥石流 7 条。该段泥石流扇受到较严重破坏,21 条泥石流扇缺失。

2 研究方法

2.1 泥石流沟地质地貌参数

势能由构造活动决定,在构造抬升作用下河流下切侵蚀加剧,沟内形成较大的地形起伏。深切河流易使边坡失稳,形成大量不稳定的临空面,同时

改变水力搬运力。本文从泥石流势能转化(坡度、Melton 指数、面积-高程积分值)、物源形成(剩余高度、岩石软弱度、地震动峰值加速度),以及水力搬运(地形湿度指数、流域圆状率、沟壑密度)等方面分析泥石流的形成。数据源为 12.5 m 分辨率的 ALOS 数字高程模型(DEM)^[17]和 1:20 万地质图^[18]、《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)。通过 ArcGIS 进行填注、流向分析、流量分析等,提取 35 条泥石流沟地貌参数,表 2 为地质地貌参数的计算公式。

2.2 水力侵蚀模型

基岩河道中河流剖面的形状通常通过调整上游流量和泥沙运输达到平衡。基岩河道中某一点的高程随时间的变化($\frac{dz}{dt}$),由岩石抬升速率(U)和水流动力对河床侵蚀速率共同决定^[27]:

$$\frac{dz}{dt} = U - KA^m S^n \quad (1)$$

式中, S 为河段坡度, A 为汇流面积, K 是代表控制河流侵蚀的侵蚀系数,由降水、岩性与沟道地貌等因素控制^[28], m 和 n 是常数。水力侵蚀模型在平衡状态下可表示为^[29]:

$$S = (U/K)^{1/n} A^{-m/n} = k_s A^{-\theta} \quad (2)$$

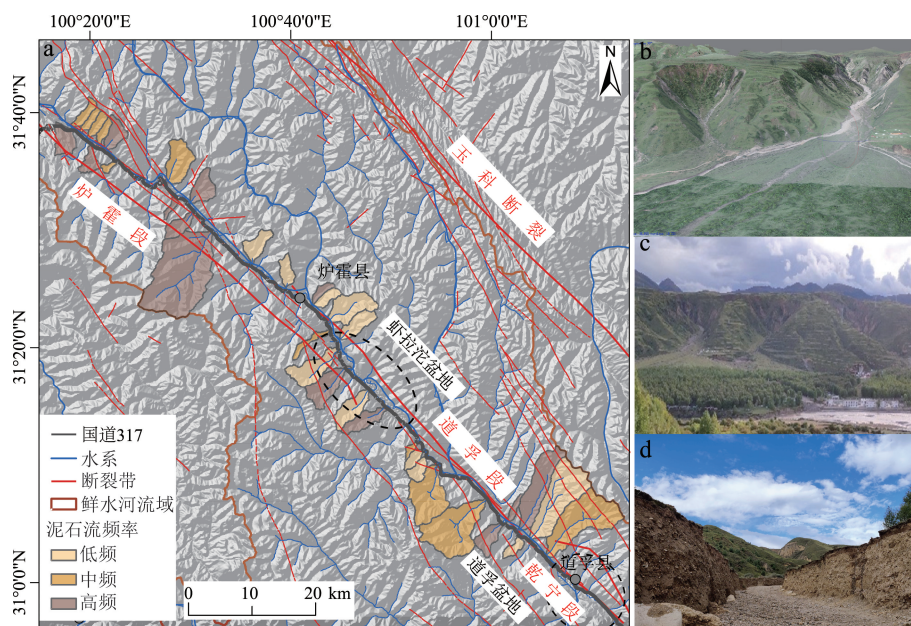


图 2 研究区地形与断裂带分布(a)、泥石流沟群无人机影像(b)和泥石流沟实拍图(c、d)

Fig. 2 Topography and the distribution of the Xianshuihe fault of the study area (a), UAV image of debris flow gullies(b) and photos of debris flow gullies(c,d)

表 1 炉霍-道孚段典型泥石流沟基本信息

Table 1 General information of typical debris flow gullies along the Luhuo-Daofu section

泥石流沟 编号	泥石流沟 名称	经度/°	纬度/°	左右岸	面积/km ²	沟长/km	高差/m	性质	类型	频率	堆积扇
1	进达下沟	100.287	31.620	右岸	12.74	7.22	808	粘性	泥石流	高频	较完整
2	日郎达沟	100.324	31.664	左岸	6.87	7.11	1350	过渡性	泥石流	中频	缺失
3	侏倭沟	100.332	31.652	左岸	4.72	5.44	1189	过渡性	泥石流	中频	缺失
4	颠谷下沟	100.327	31.626	左岸	6.06	5.75	1263	粘性	泥石流	中频	较完整
5	颠古下沟	100.331	31.604	右岸	7.87	7.04	931	稀性	泥石流	高频	缺失
6	国日阿沟	100.355	31.637	左岸	5.02	5.15	1276	稀性	泥石流	中频	缺失
7	绒龙沟	100.373	31.633	左岸	11.01	7.99	1253	粘性	泥石流	高频	较完整
8	马阿上沟	100.361	31.586	右岸	2.40	3.40	728	粘性	泥石流	中频	较完整
9	知日马沟	100.479	31.592	左岸	22.31	8.63	1410	过渡性	泥石流	中频	缺失
10	当克沟	100.462	31.526	右岸	2.93	4.66	1014	粘性	泥石流	高频	较完整
11	棒达沟	100.373	31.577	左岸	13.92	7.21	1378	过渡性	泥石流	高频	缺失
12	觉如沟	100.476	31.499	右岸	9.93	7.31	1342	过渡性	泥石流	高频	缺失
13	邓达沟	100.474	31.431	右岸	106.95	19.73	1956	过渡性	泥石流	高频	较完整
14	晏尔龙沟	100.606	31.470	左岸	12.29	7.11	1108	过渡性	泥石流	低频	较完整
15	尔村沟	100.655	31.435	左岸	8.57	6.49	1069	过渡性	泥石流	低频	完整
16	额日上沟	100.713	31.403	左岸	4.61	5.35	999	过渡性	泥石流	高频	较完整
17	额日下沟	100.720	31.395	左岸	6.61	6.49	1202	稀性	泥石流	低频	较完整
18	扎角对沟	100.761	31.381	左岸	24.52	11.08	1485	稀性	泥石流	低频	较完整
19	克木沟	100.712	31.345	右岸	5.88	9.13	1546	稀性	泥石流	中频	缺失
20	额尔米对沟	100.770	31.357	左岸	13.75	9.29	1418	过渡性	泥石流	低频	缺失
21	瓦达村沟	100.689	31.291	右岸	22.86	12.20	1585	稀性	泥石流	低频	缺失
22	斯木沟	100.715	31.268	右岸	21.70	10.40	1356	过渡性	泥石流	高频	较完整
23	忠仁达沟	100.757	31.236	右岸	16.74	9.49	1320	稀性	泥石流	低频	缺失
24	亚日沟	100.776	31.220	右岸	13.25	9.18	1328	粘性	泥石流	高频	缺失
25	高新龙沟	100.855	31.179	右岸	2.44	3.95	888	过渡性	泥石流	中频	缺失
26	巴日上沟	100.859	31.164	右岸	5.39	4.94	1172	稀性	泥石流	低频	缺失
27	巴日下沟	100.865	31.149	右岸	7.46	5.21	1162	稀性	泥石流	低频	缺失
28	油龙沟	100.882	31.112	右岸	37.87	12.86	1819	稀性	泥石流	中频	缺失
29	崩龙沟	100.922	31.064	右岸	55.96	15.55	1967	过渡性	泥石流	中频	缺失
30	麻湾对沟	100.981	31.050	右岸	11.88	7.54	1688	过渡性	泥石流	高频	较完整
31	麻湾下沟	101.024	31.092	左岸	3.82	5.90	1307	过渡性	泥石流	高频	较完整
33	下咀日沟	101.017	31.034	右岸	5.55	4.97	1519	过渡性	泥石流	低频	缺失
33	亚托沟	101.068	31.120	左岸	37.88	16.52	1785	粘性	泥石流	高频	缺失
34	沃尔多沟	101.099	31.107	左岸	54.85	17.35	1787	稀性	泥石流	低频	缺失
35	鲁恰沟	101.138	31.073	左岸	58.40	17.75	1845	稀性	泥石流	中频	缺失

表 2 泥石流沟地质地貌参数计算公式与释义

Table 2 Calculation formula and interpretation of geological and geomorphological factors of debris flow gullies

名称	公式	释义
面积—高程积分值 (HI)	$HI = \frac{H_{mean} - H_{min}}{H_{max} - H_{min}}$	H_{max} 、 H_{min} 、 H_{mean} 分别表示流域内海拔最大值、最小值、平均值。 $HI < 0.35$, 为老年期; $0.35 < HI < 0.6$, 为壮年期; $HI > 0.6$, 为幼年期 ^[19]
地形湿度指数 (TWI)	$TWI = \ln(S/\tan\beta)$	反映地势变化及其对地表径流的影响, 是对潜在土壤水分和产流能力的量化, TWI 越大, 土壤含水量越易达到饱和 ^[20-21]
Melton 指数	$R_m = \frac{dH}{\sqrt{A}}$	Melton 指数可反映流域中的泥沙输移机制。 R_m 值越大, 泥沙输移主要以泥石流为主; R_m 值越小, 泥沙输移主要以洪水为主 ^[22]
剩余高度 (ET)	$z_E(x, y) = z(x, y) - z(x, y)$	剩余地形 z_E 是用来计算地形表面 (z) 和理想地形 ($\hat{z}$) 之间的岩石高度 ^[23] 。 z_E 越大, 地形越陡, 表示沟内潜在物源越多 ^[23] 。将斜坡 30° 以上的高度定义为剩余高度
岩石软弱度 (FI)	/	按工程地质岩组的软弱程度将岩石分为软岩、较软岩、较硬岩、硬岩分别赋值为 1、0.75、0.5、0.25。 FI 越高, 表明集水区整体岩性越软
流域圆状率 (CR^2)	$CR^2 = \frac{L}{L_{all}}$	L 表示流域的长度, L_{all} 表示流域的周界长, CR^2 反映了河流汇集量, 同等降水条件下, CR^2 越小, 越易形成洪峰 ^[24]
坡度 (S)	/	决定了松散物的汇水条件与启动条件, 坡度越陡, 越有利于物质搬运
地震动峰值加速度 (PGA)	/	PGA 为地震记录的瞬时极大值, 在一定程度上反映地震动的整体作用水平。随着地震动峰值加速度增大, 坡体变形位移增大, 地质灾害也越严重 ^[25]
沟壑密度 (GD)	$GD = \frac{\sum N}{A}$	$\sum N$ 为沟谷中总沟壑长度, 沟壑密度影响径流量、含沙量, 影响河道的输沙能力 ^[26] 。沟壑密度越大越利于泥沙输移

式中, k_s 是河流陡度指数, 反映河道纵剖面的整体陡峭程度; θ 是凹度指数, 反映河道纵剖面上凹程度。侵蚀系数与坡度指数为常数时, 抬升速率与陡峭指数 k_s 有关, 因此 k_s 可定量判断构造活动情况。其在典型流域的比率为 $0.4 \sim 0.6$ ^[30-32], θ_{ref} 为参考凹凸指数, 本文取 0.45, 得到标准陡峭指数 (K_{sn})。

3 结果与分析

3.1 断裂带影响下泥石流空间分布

炉霍—道孚段鲜水河主河两侧各宽 10 km 内相对高度大于 700 m, 地势较陡峭, 鲜水河两侧各宽 500 m 的相对高度在 60 ~ 80 km 与 110 ~ 120 km 处接近 0, 为炉霍断裂、道孚断裂拉张形成的虾拉沱盆地与道孚断裂和乾宁断裂拉张形成的道孚盆地 (图 3-a)。受炉霍断裂、道孚断裂及次级断裂带的走滑速率、隆升速率差异影响, 河流局部比降改变。陡峭指数 (K_{sn}) 计算结果 (图 3-b) 显示, 研究区上游至下游 K_{sn} 呈现增大趋势, 表明构造活动由上游向下游增强。虾拉沱盆地与道孚盆地内 K_{sn} 较小, 平均 K_{sn} 约为 $34 \text{ m}^{0.9}$, 盆地两侧短小支沟众多 (图 3-

c、d)。在断裂带作用下, 形成的断层陡坎、构造裂缝等使河床呈阶梯状, 虾拉沱盆地边缘存在 $K_{sn} > 600 \text{ m}^{0.9}$ 的异常陡峭值, 道孚断裂中段 $K_{sn} > 200 \text{ m}^{0.9}$ 的数量多, 构造抬升运动强烈, 也是泥石流密集分布区域。

泥石流与高陡峭指数的空间分布有较好的相关性。鲜水河断裂带上泥石流沟主要分布在主河高陡峭指数处, 泥石流沟与主河交汇处的平均 K_{sn} 约为 $66 \text{ m}^{0.9}$, 虾拉沱盆地下游 82% 的泥石流沟都处于主河 $K_{sn} > 50 \text{ m}^{0.9}$ 处。图 4 中列出 6 条泥石流沟与主河交汇处的 K_{sn} 均高于 $100 \text{ m}^{0.9}$ (图 4-a)。受主河道构造抬升影响, 泥石流沟内 K_{sn} 多为 $100 \sim 200 \text{ m}^{0.9}$, 平均 K_{sn} 约为 $140 \text{ m}^{0.9}$, 表明沟内构造活动强烈, 为泥石流爆发提供了有利条件。随泥石流沟与主河交汇处 K_{sn} 增大, 泥石流沟 K_{sn} 呈现增大趋势, 中下游泥石流沟 K_{sn} 变化与主河 K_{sn} 变化趋势较一致 (图 4-b)。

3.2 泥石流沟地质地貌特征

炉霍—道孚段 70% 泥石流沟的面积小于 20 km^2 , 平均面积为 18 km^2 ; 沟长为 $3.4 \sim 19.8 \text{ km}$, 平

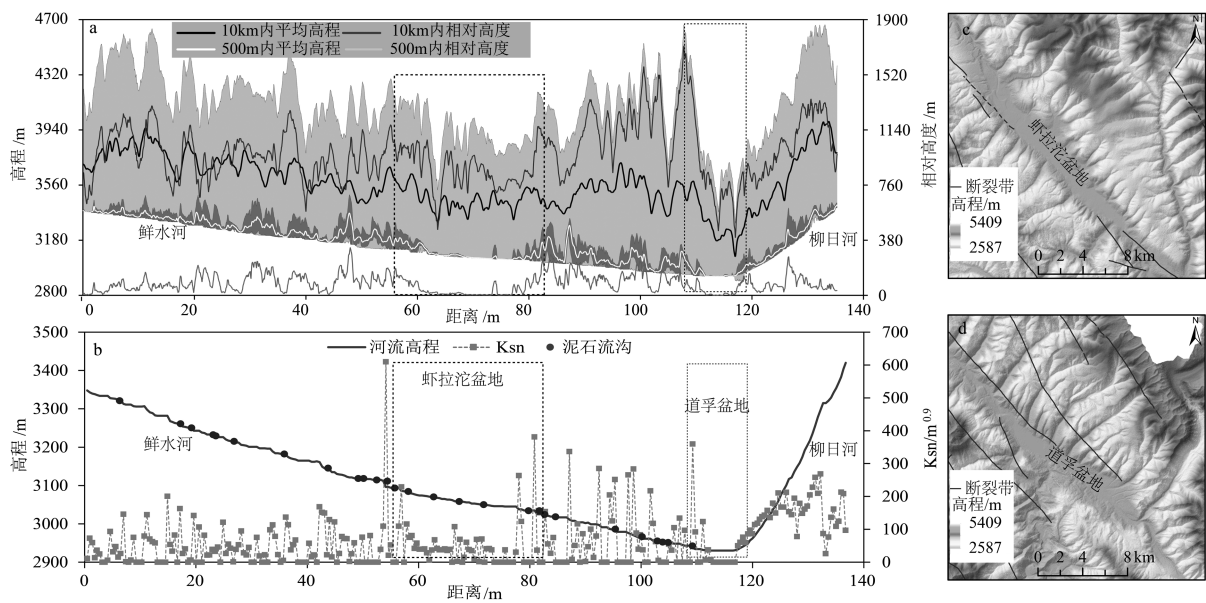


图3 炉霍-道孚段鲜水河两侧地形(a)

和炉霍-道孚段鲜水河河流纵剖面与陡峭指数(b)

(浅灰色区域为10 km内最高/最低海拔,深灰色区域为500 m内最高/最低海拔)

Fig. 3 Maximum / minimum elevation on both sides along the Luhuo-Daofu section of Xianshui River(a)

and river profile and river steepness indices along the Luhuo-Daofu section of Xianshui River(b)

均沟长为8.7 km;泥石流沟相对高度为720 ~ 1970 m,平均相对高度为1350 m;陡峭指数为90 ~ 205 $m^{0.9}$ 。炉霍-道孚段泥石流沟9个地质地貌参数统计结果(图5)表明,研究区泥石流沟的势能条件较利于泥石流的形成。泥石流沟坡度(slope)为 16° ~ 30° ,其北东侧泥石流沟的平均坡度为 26.5° ,南西侧泥石流沟的平均坡度 24.2° ,该坡度较利于土体失稳。前人研究表明,当沟谷Melton >0.3 时,易发生泥石流^[33-34],研究区泥石流沟Melton指数为0.19 ~ 0.67,平均Melton指数为0.4,利于泥沙运输。研究区泥石流沟的面积-高程积分值(HI)为0.39~0.62,平均面积-高程积分值为0.52,表明其在鲜水河断裂带构造运动与河流下切影响下,侵蚀基准面不断变化,支流发展受到扰动,沟谷内有大量可被侵蚀的物质,泥石流沟长期处于侵蚀活跃的壮年期。

研究区泥石流沟松散物源供应较充足。根据工程地质岩组分类统计,泥石流沟地层岩性总体以较硬岩为主,北东侧泥石流沟平均岩石软弱度(FI)为0.53,为较硬岩,以变质砂岩夹板岩,下部夹不稳定的砾岩、玄武岩、玄武质火山角砾岩及凝灰岩、灰质角砾岩、灰岩互层为主;南西侧泥石流沟平均岩

石软弱度为0.65,较硬岩与较软岩都有分布,以变质砂岩,板岩夹结晶灰岩、砂岩,石英砂岩与板岩不等厚互层为主,软硬相间,节理裂隙发育,岩体破碎。泥石流沟剩余高度(ET)为0.9 ~ 24.7 m/m^2 ,北东侧泥石流平均剩余高度为13.3 m/m^2 ,南西侧泥石流沟平均剩余高度为8.1 m/m^2 ,北东侧泥石流沟剩余高度更高,产生重力侵蚀的可能性较大。北东侧泥石流沟多处于地震动峰值加速度(PGA)为0.3 g区内,南西侧泥石流沟多处于0.2~0.3 g区内,在地震影响下易产生松散物。

研究区泥石流沟的水力搬运能力较大,为泥石流的产生提供了有利的水文条件。地形湿度指数(TWI)为7.7 ~ 8.3,平均地形湿度指数为7.9,表明区内泥石流沟土体容易达到饱和而产生径流;泥石流沟圆状率(CR^2)为0.45,以狭长形向漏斗形演化,较有利于水流的汇集。沟壑密度(GD)为0.3 ~ 1.2 km/km^2 ,平均沟壑密度为0.59 km/km^2 ,支沟发育,地表破碎,有利于松散物的形成与搬运。

3.3 泥石流地质地貌差异

炉霍-道孚段鲜水河主河道两侧泥石流沟地质地貌呈现显著性差异。对北东侧与南西侧泥石流

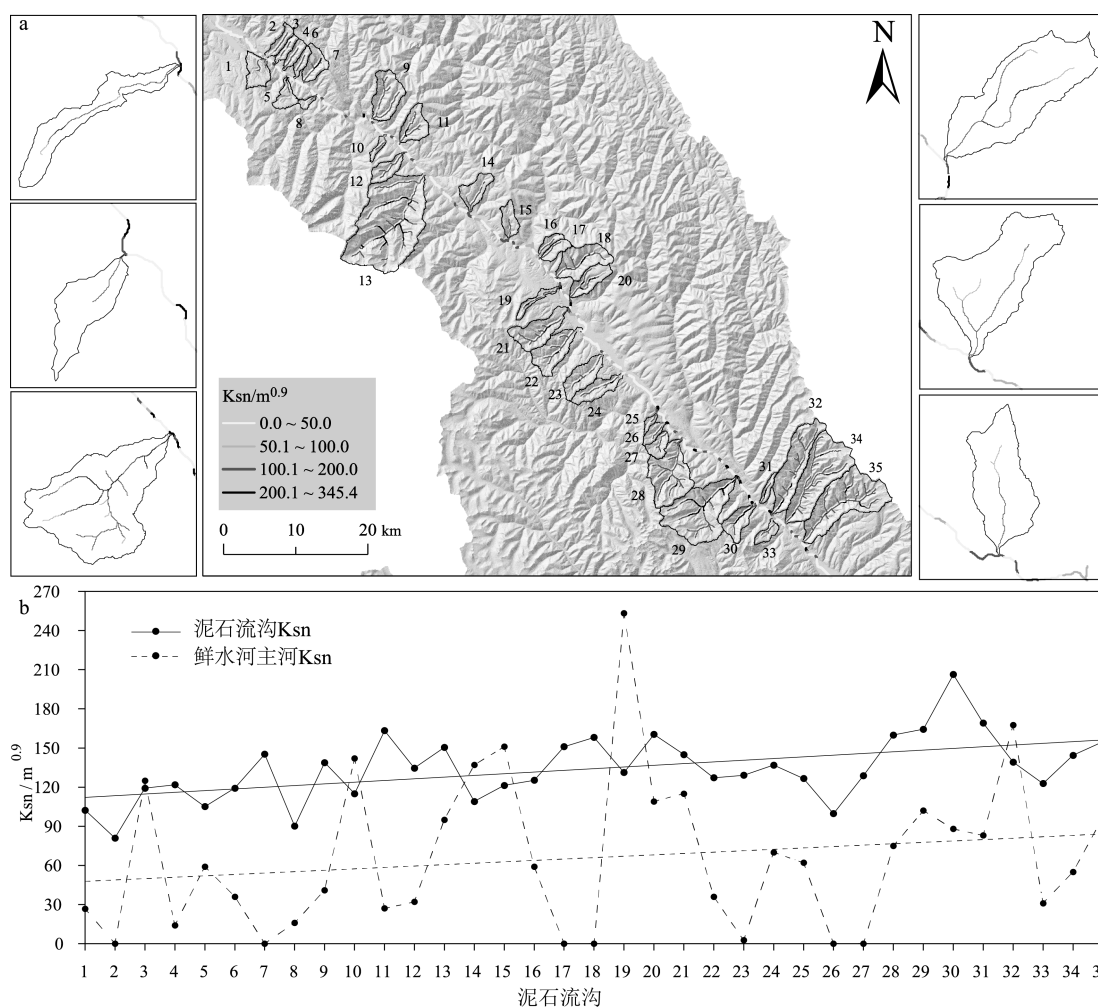


图 4 典型泥石流沟与鲜水河主河陡峭指数空间分布(a)和泥石流沟与其入河口陡峭指数的关系(b)

Fig. 4 Spatial distribution of river steepness indices of typical debris flow gully and the Xianshui River (a) and relationship of river steepness indices of between debris flow gully and its entering estuary (b)

沟 9 个地貌参数进行 Wilcoxon 秩和检验, 结果表明, 两侧泥石流沟的坡度、剩余高度、岩石软弱度、地震动峰值加速度及地形湿度指数 5 个地质地貌参数有显著性差异 (图 6)。

泥石流沟越陡, 松散物累计速率越高, 冲沟越发育, 越有利于沟道水流汇集和松散物的启动。北东侧泥石流沟坡度与剩余高度高于南西侧, 表明北东侧泥石流沟具有更大的势能转化条件与物质基础。坚硬岩层在地震作用下可产生足够的累积位移使斜坡破坏变形, 软弱岩层在构造活动下, 容易形成潜在滑动面。地形湿度指数小, 重力侵蚀以崩塌为主^[35]。北东侧泥石流沟地形湿度指数低于南西侧, 陡峭岩体易崩塌。北东侧泥石流地震动峰值

加速度高于南西侧, 断裂带北东侧岩性较南西侧更坚硬, 北东侧比南西侧更易产生松散物, 形成泥石流物源。因此, 受泥石流松散物的物质补给速度、水流汇集的影响, 鲜水河断裂带北东侧泥石流破碎岩体处于高位卸荷状态, 物源充足, 泥石流主要以过渡性泥石流为主, 南西侧泥石流沟以稀性、过渡性泥石流为主。

基于炉霍—道孚段鲜水河两侧泥石流沟形貌特征差异, 对两侧泥石流沟 5 个差异显著的地质地貌参数进行主成分分析。选取初始特征值大于 1 的 2 个因子, 其累计方差达到 84.23%, 包含了 5 个因子的绝大部分信息。图 7 反映了地质地貌参数在 2 个主成分中的载荷, 轴长越长, 表示载荷越大。剩余高

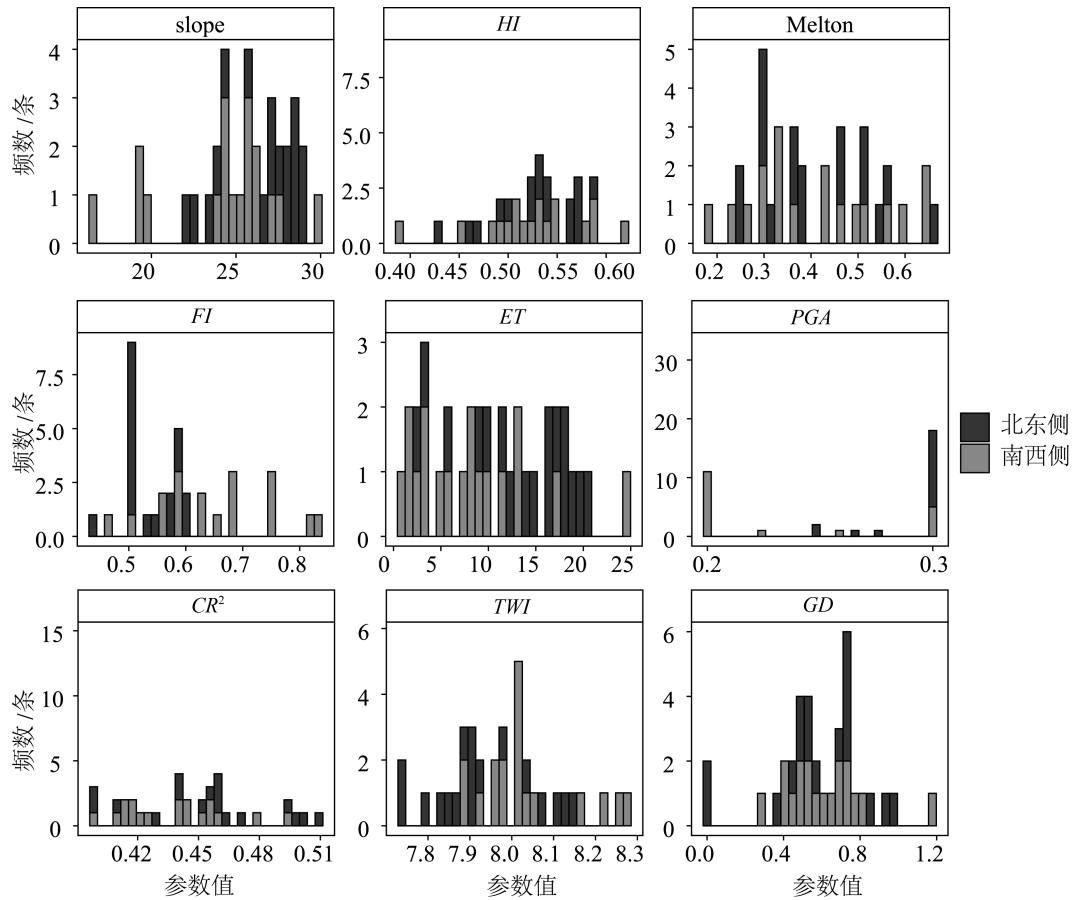


图5 研究区泥石流沟地形地貌参数直方图

Fig. 5 Histogram of geological and geomorphological parameters of debris flow gullies in the study area

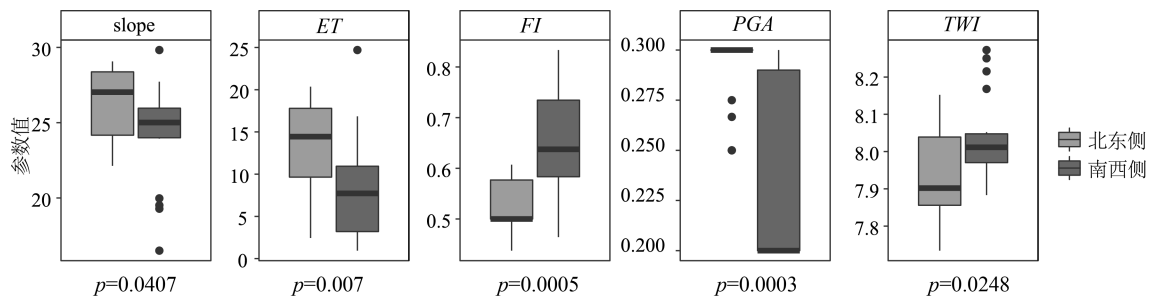


图6 炉霍—道孚段鲜水河两侧泥石流沟地质地貌参数 Wilcoxon 检验

Fig. 6 Wilcoxon test of geological and geomorphological parameters of debris flow gullies on the both sides of the Xianshui River

度、坡度与地形湿度指数对主成分 1 (PC1) 的贡献率大,为地形陡峭参数;地震动峰值加速度、岩石软弱度对主成分 2 (PC2) 的贡献率较大,为物源补给参数。北东侧泥石流沟在剩余高度、坡度与地震动峰值加速度的信息量大,南西侧泥石流沟在岩石软弱度与地形湿度指数的信息量大。泥石流沟在二维空间中的距离代表了泥石流沟的相似性,距离越近,表示泥石流沟地质地貌的相似性越大。北东侧

泥石流沟集聚度较大,南西侧泥石流沟集聚度较低,表明北东侧泥石流沟地质地貌特征相似性较大,南西侧泥石流沟差异性较大。

4 讨论

4.1 构造活动对泥石流沟发育的影响

构造抬升通过改变河道高程而影响河道陡峭指数分布。陡峭指数高意味着侵蚀能力强,道孚断

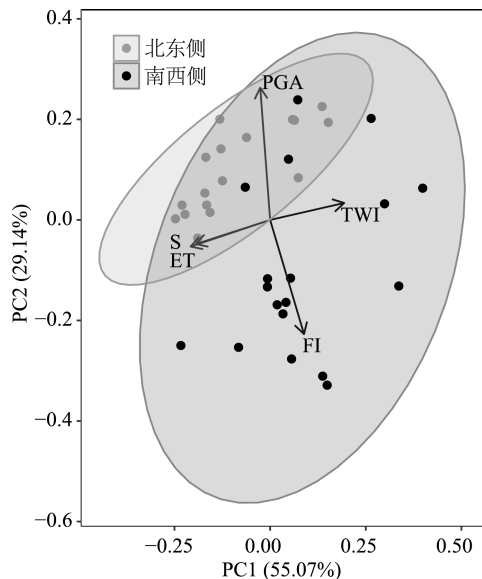


图7 鲜水河主河两侧泥石流沟地质地貌参数主成分分析

Fig. 7 Principal component analysis of geological and geomorphological parameters of debris flow gullies on the both sides of the Xianshui River

裂段陡峭指数高,河流以下切侵蚀为主,形成深切“V”形谷,因此成为泥石流分布的主要区域。走滑断裂带间易积累应变应力形成断裂破碎带,为泥石流发生提供物质基础^[36-38]。炉霍断裂带的滑动速率约为 13 ± 5 mm/a,道孚断裂带与乾宁断裂带的滑动速率相差甚小,均约为 10 ± 2 mm/a^[39],断层快速蠕动,节理裂隙发育,在地震影响下,加剧了地表破裂与变形,为降雨入参与泥石流爆发提供了有利条件。1973年 M_s 7.6地震后,虾拉沱盆地垂直运动速率约为 0.5 mm/a,1981年 M_s 6.9震后,道孚盆地垂直运动速率约为 0.74 mm/a^[40]。1973—1986年北东盘相对南西盘上升约 21 mm^[41]。侵蚀基准面下降与北东盘相对抬升,使泥石流沟内地形起伏度增大,势能增大,坡体更陡峭,河流下切侵蚀与溯源侵蚀不断消耗能量使河道变陡,沟内侵蚀速率增加^[42],北东侧泥石流发生可能性加大。

4.2 地质地貌差异与孕灾特征

断裂带形成的地表破碎带使岩石强度降低和斜坡不稳定性增加^[43]。鲜水河断裂带北东侧为较稳定坚硬的川青块体,南西侧岩体较软^[41],因而道孚段次级断层均发育在主断层北东侧,主断层北东侧损伤带大于南西侧^[44]。北东侧较宽破碎带促进泥石流沟发育演化。由于高强度硬岩抵抗破坏的

能力强,其内部存储高弹性形变能力^[45],加之北东侧地形更为陡峭且多位于 PGA 为 0.3 g 区内,地震作用下的斜坡地形放大效应使山体产生大量的崩塌、滑坡,坡面不稳定性增大^[46-48],泥石流沟在地震触发下易形成崩塌—滑坡—泥石流灾害链。如炉霍地震之后,鲜水河北东侧地震地质灾害比南西侧数量多^[43]。炉霍—道孚段鲜水河北东侧泥石流在坡度、剩余高度与地震动峰值加速度上聚集较强。南西侧泥石流在岩性与地形湿度指数上有聚集。意味着北东侧泥石流沟受地形与地震影响较大,南西侧泥石流沟岩性组成复杂且更易受到冰雪消融的影响,在岩性、水文地貌等因素影响下呈现更多的非均衡状态,因而地貌形态更复杂。

5 结论

(1) 研究区泥石流沟 (K_m 约为 $140 \text{ m}^{0.9}$) 分布在主河陡峭指数较高处 (K_m 约为 $66 \text{ m}^{0.9}$), 中下游泥石流沟的陡峭指数与其入汇主河的陡峭指数变化趋势较一致。

(2) 鲜水河断裂带北东侧泥石流沟坡度、剩余高度、地震动峰值加速度比南西侧泥石流沟更高,南西侧泥石流沟岩性比北东侧泥石流更软,地形湿度指数更大。

(3) 鲜水河断裂带北东侧泥石流沟地质地貌相似性较大,受剩余高度、坡度与地震动峰值加速度影响较大,南西侧泥石流沟受岩性与地形湿度指数影响较大,地貌形态差异较大。

致谢:西南科技大学陈兴长教授和成都理工大学叶成名教授参加了野外泥石流调查工作,审稿专家在论文审稿过程中提出了宝贵意见,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] 张永双,郭长宝,姚鑫,等.青藏高原东缘活动断裂地质灾害效应研究[J].地球学报,2016,37(3): 277-286.
- [2] 谢吉尊,冯文凯,杨少帅,等.则木河断裂带活动特征和地质灾害对地貌演化的影响——以鹅掌河流域为例[J].工程地质学报,2017,25(3): 772-783.
- [3] 郭长宝,杜宇本,张永双,等.川西鲜水河断裂带地质灾害发育特征与典型滑坡形成机理[J].地质通报,2015,34(1): 121-134.
- [4] 马俊,徐连三,李云,等.青峰主干断裂带(房县段)地质灾害发育规律研究[J].资源环境与工程,2020,34(S1): 39-45.
- [5] 闫茂华,魏云杰,李亚民,等.云南德钦日因卡滑坡孕灾背景及形成机理[J].地质通报,2020,39(12): 1971-1980.

- [6] 余斌, 马煜, 张健楠, 等. 汶川地震后四川省都江堰市龙池镇群发泥石流灾害[J]. 山地学报, 2011, 29(6): 738-746.
- [7] Huang X, Tang C. Formation and activation of catastrophic debris flows in Baishui River basin, Sichuan Province, China[J]. Landslides, 2014, 11(6): 955-967.
- [8] 胡凯衡, 葛永刚, 崔鹏, 等. 对甘肃舟曲特大泥石流灾害的初步认识[J]. 山地学报, 2010, 28(5): 628-634.
- [9] 万佳威, 褚宏亮, 李滨, 等. 西藏嘉黎断裂带沿线高位链式地质灾害发育特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(3): 51-60.
- [10] 丁明涛, 韦方强. 云南蒋家沟泥石流成因及其防治措施探析[J]. 水土保持研究, 2008, (1): 20-22.
- [11] 王哲威, 徐正宣, 冯涛, 等. 川藏铁路鲜水河构造带地质选线研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(2): 466-477.
- [12] Shen Z K, Lü J N, Wang M, et al. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110: B11409.
- [13] 唐文清, 陈智梁, 刘宇平, 等. 青藏高原东缘鲜水河断裂与龙门山断裂交会区现今的构造活动[J]. 地质通报, 2005, 24(12): 1169-1172.
- [14] 姚鑫, 张永双, 李凌婧, 等. 青藏高原鲜水河活动断裂带蠕变斜坡地质灾害 InSAR 识别研究[J]. 地质学报, 2017, 91(8): 1694-1705.
- [15] 梁明剑. 鲜水河断裂晚第四纪活动习性[D]. 中国地震局地质研究所博士学位论文, 2019.
- [16] 白永健, 铁永波, 倪化勇, 等. 鲜水河流域地质灾害时空分布规律及孕灾环境研究[J]. 灾害学, 2014, 29(4): 69-75.
- [17] Alaska Satellite Facility SAR Data Center (ASF). ALOS PALSAR [DB]. (2008-01-29). [2021-03-10]. https://search.asf.alaska.edu/#/?tdsourcetag=s_ptcm_aiom.sg&flightDir=.. 2008.
- [18] 全国地质资料馆. 中华人民共和国 1:20 万地质图(丹巴幅(H-47-XII); 新龙幅(H-47-XI); 炉霍幅(H-47-V) [CM]. [2013-03-11]. <http://www.ngac.org.cn/DataSpecial/geomap.html>. 2013.
- [19] 张威, 唐倩玉, 刘亮, 等. 基于面积-高程积分的他念他翁山玉曲流域地貌学分析[J]. 地理科学, 2020, 40(8): 1394-1402.
- [20] 何福红, 高丙舰, 王焕芝, 等. 基于 GIS 的侵蚀冲沟与地貌因子的关系[J]. 地理研究, 2013, 32(10): 1856-1864.
- [21] 张彩霞, 杨勤科, 李锐. 基于 DEM 的地形湿度指数及其应用研究进展[J]. 地理科学进展, 2005, (6): 116-123.
- [22] 王丽娟, 马超, 苗绿. 坡面泥石流形态和堆积特征研究[J]. 自然灾害学报, 2020, 29(6): 98-106.
- [23] Blöthe J H, Korup O, Schwanghart W. Large landslides lie low: Excess topography in the Himalaya-Karakoram ranges[J]. Geology, 2015, 43(6): 523-526.
- [24] 赵岩. 基于机器学习的白龙江流域潜在低频泥石流沟识别[D]. 兰州大学博士学位论文, 2020.
- [25] 王秀英, 聂高众, 王登伟. 汶川地震诱发滑坡与地震动峰值加速度对应关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 82-89.
- [26] 乔荣荣, 季树新, 白雪莲, 等. 流域沟壑数量特征与侵蚀量关系[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(6): 9-14.
- [27] Howard A D, Kerby G. Channel changes in badlands [J]. GSA Bulletin, 1983, 94(6): 739-752.
- [28] Chen Y W, Shyu J B H, Chang C P. Neotectonic characteristics along the eastern flank of the Central Range in the active Taiwan orogen inferred from fluvial channel morphology [J]. Tectonics, 2015, 34(10): 2249-2270.
- [29] Flint J J. Stream gradient as a function of order, magnitude, and discharge[J]. Water Resources Research, 1974, 10(5): 969-973.
- [30] Tucker G E, Whipple K X. Topographic outcomes predicted by stream erosion models: Sensitivity analysis and intermodel comparison[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2002, 107(B9): ETG 1-1-ETG 1-16.
- [31] Munack H, Korup O, Resentini A, et al. Postglacial denudation of western Tibetan Plateau margin outpaced by long-term exhumation[J]. GSA Bulletin, 2014, 126(11/12): 1580-1594.
- [32] Kirby E, Whipple K X. Expression of active tectonics in erosional landscapes[J]. Journal of Structural Geology, 2012, 44: 54-75.
- [33] Church M, Jakob M. What Is a Debris Flood? [J]. Water Resources Research, 2020, 56(8): e2020WR027144.
- [34] Jackson L, Kostashuk R, MacDonald G. Identification of debris flow hazard on alluvial fans in the Canadian Rocky Mountains [C]// Debris flow/avalanches: Process, Recognition, Mitigation, 1984: 115-124.
- [35] 胡凯衡, 魏丽, 刘双, 等. 横断山区泥石流空间格局和激发雨量分异性研究[J]. 地理学报, 2019, 74(11): 2303-2313.
- [36] 高翔, 邓起东, 陈汉林, 等. 新疆富蕴断裂带枢纽运动的有限元数值模拟研究[J]. 大地构造与成矿学, 2015, 39(5): 769-779.
- [37] 刘晓霞, 邵志刚. 丽江-小金河断裂带现今断层运动特征[J]. 地球物理学报, 2020, 63(3): 1117-1126.
- [38] Duan B, Oglesby D D. Multicycle dynamics of nonplanar strike-slip faults [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2005, 110: B03304.
- [39] 李天招, 杜其方. 鲜水河活动断裂带及强震危险性评估[M]. 成都: 成都地图出版社, 1997.
- [40] 闻学泽. 四川西部鲜水河-安宁河-则木河断裂带的地震破裂分段特征[J]. 地震地质, 2000, (3): 239-249.
- [41] 葛培基. 鲜水河断裂带在虾拉沱附近的现今活动特征[J]. 地震地质, 1989, (3): 55-63.
- [42] 金德生, 张欧阳, 陈浩, 等. 侵蚀基准面下降对水系发育与产沙影响的实验研究[J]. 地理研究, 2003, (5): 560-570.
- [43] 李明辉, 王东辉, 高延超, 等. 鲜水河断裂带炉霍 7.9 级地震地质灾害研究 [J]. 灾害学, 2014, 29(1): 37-41.
- [44] 伍纯昊, 崔鹏, 李渝生, 等. 青藏高原东缘活动断裂带地壳岩体构造损伤特征与模式讨论[J]. 工程地质学报, 2021, 29(2): 289-306.
- [45] 谢吉尊, 冯文凯, 胡云鹏, 等. 天然和饱水状态下泥岩力学性质及损伤变形能量特征分析[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(3): 66-72, 78.
- [46] 冯文凯, 黄润秋, 许强. 斜坡震裂变形发育分布规律及危险性分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2010, 37(6): 679-684.
- [47] 罗永红, 王运生. 汶川地震诱发山地斜坡震动的地形放大效应[J]. 山地学报, 2013, 31(2): 200-210.
- [48] 张永双, 成余粮, 姚鑫, 等. 四川汶川地震-滑坡-泥石流灾害链形成演化过程[J]. 地质通报, 2013, 32(12): 1900-1910.