

doi: 10.12029/gc20240222001

张佳佳, 杨东旭, 高波, 陈龙, 李元灵, 田尤, 黄海, 李洪梁, 李金洋, 李奕霖. 2025. 怒江干流云南段泥石流时空分异特征、驱动因素及演化趋势分析[J]. 中国地质, 52(6): 2238–2255.

Zhang Jiajia, Yang Dongxu, Gao Bo, Chen Long, Li Yuanling, Tian You, Huang Hai, Li Hongliang, Li Jinyang, Li Yilin. 2025. Spatiotemporal patterns, controlling factors and evolutionary trends of debris flows in the Yunnan section of the Nujiang River mainstream[J]. Geology in China, 52(6): 2238–2255 (in Chinese with English abstract).

怒江干流云南段泥石流时空分异特征、 驱动因素及演化趋势分析

张佳佳^{1,2,3,4}, 杨东旭³, 高波^{1,2}, 陈龙^{1,2,3}, 李元灵^{1,2,3}, 田尤^{1,2}, 黄海^{1,2,3},
李洪梁^{1,2}, 李金洋^{1,2}, 李奕霖⁵

(1. 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; 2. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734; 3. 成都理工大学, 四川 成都 611059; 4. ISTerre, Université Grenoble Alpes, Grenoble 38058, France; 5. 东华理工大学, 江西南昌 330013)

摘要:【研究目的】怒江干流云南段是云南省境内泥石流灾害最为发育的区域之一, 由于人地关系矛盾突出, 历史泥石流事件已造成巨大的人员伤亡和财产损失, 探究该区域泥石流的时空分异特征、驱动因素以及泥石流的未来演化趋势具有重要意义。【研究方法】基于资料搜集、遥感解译、现场调查、走访, 获取较以往研究更为详实的野外一手资料, 更新历史泥石流事件数据库。基于统计学方法分析泥石流的时空分异特征。利用地理探测器揭示泥石流的主控因素。【研究结果】(1) 泥石流在空间上以泸水市上江镇为界表现出北强南弱的空间分异特征。时间上表现为年尺度总体增加, 月尺度分异的特征; (2) 泥石流南北空间分异的主控因子分别为气候条件、断裂构造、地形地貌, 时间分异的主控因素为降雨和地震; (3) 泥石流总体愈加活跃, 自 2000 年以来表现出 3 年左右的周期, 呈上升趋势的极端降雨、突发的强震均会引发泥石流的集中暴发。【结论】怒江干流云南段历史泥石流事件记录由原来的 86 次更新为 134 次, 在此基础上得到的泥石流时空分异、驱动因素和未来演化趋势的研究成果将加深怒江干流云南段泥石流的研究深度, 可为区内场镇、聚居区以及重要交通干线的泥石流灾害风险防御工作提供一定的技术支持。

关键词: 时空分异; 主控因素; 发展趋势; 泥石流; 地质灾害调查工程; 怒江干流云南段

创新点: 怒江干流云南段历史泥石流事件由 86 次更新为 134 次; 在此基础上揭示了泥石流的时空分异特征和驱动因素, 研判了泥石流的未来演化趋势。

中图分类号: P642.23 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)06-2238-18

Spatiotemporal patterns, controlling factors and evolutionary trends of debris flows in the Yunnan section of the Nujiang River mainstream

ZHANG Jiajia^{1,2,3,4}, YANG Dongxu³, GAO Bo^{1,2}, CHEN Long^{1,2,3}, LI Yuanling^{1,2,3}, TIAN You^{1,2},
HUANG Hai^{1,2,3}, LI Hongliang^{1,2}, LI Jinyang^{1,2}, LI Yilin⁵

收稿日期: 2024-02-22; 改回日期: 2024-04-18

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0902) 和中国地质调查局项目(DD20221741) 联合资助。

作者简介: 张佳佳, 男, 1988 年生, 博士, 工程师, 主要从事内动力地质灾害研究; E-mail: jimjia2008@163.com。

(1. *Technology Innovation Center for Risk Prevention and Mitigation of Geohazard, Ministry of Natural Resources, Chengdu 611734, Sichuan, China*; 2. *Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu 611734, Sichuan, China*; 3. *Chengdu University of Technology, Chengdu 611059, Sichuan, China*; 4. *ISterre, Université Grenoble Alpes, Grenoble 38058, France*; 5. *East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China*)

Abstract: This paper is the result of geological hazard survey engineering.

[Objective] The Yunnan section of Nujiang River mainstream (YNR) experiences the most serious debris flow disasters in Yunnan Province. Historical events have caused serious casualties and property losses, highlighting the need to clarify their spatiotemporal patterns, controlling factors, and future evolution. **[Methods]** Based on data collection, remote sensing interpretation, field investigations, and community interviews, a more detailed database of debris flow events was established, updating the historical records from 86 to 134 events. Statistical analysis and the Geodetector method were applied to assess the spatiotemporal differentiation and dominant factors. **[Results]** (1) Debris flows are stronger in the north and weaker in the south, with Shangjiang Town, Lushui City as the dividing line. Temporally, debris flows show an overall increasing trend on the annual scale and significant differentiation on the monthly scale. (2) Climatic conditions, fault structures, and topography/geomorphology dominate the spatial pattern, while rainfall and earthquakes control temporal variations. (3) Since 2000, debris flows have exhibited an activity cycle of about three years and a rising trend of concentrated outbreaks induced by extreme rainfall and strong earthquakes. **[Conclusions]** Historical debris flow records in the Yunnan Nujiang were updated from 86 to 134 events, which provide basic and essential data for the research on the Spatiotemporal patterns, controlling factors, and evolutionary trends of debris flows. These findings improve understanding of debris flow activity in the Yunnan section of the Nujiang River and provide scientific support for disaster prevention in towns, settlements, and critical transportation corridors.

Key words: spatiotemporal patterns; controlling factors; evolutionary trends; debris flow; geological hazard survey engineering; the Yunnan section of the Nujiang River mainstream

Highlights: Historical debris flow records in the Yunnan Nujiang were updated from 86 to 134 events. The spatiotemporal patterns and controlling factor of debris flows have been revealed, and the future evolutionary trend of debris flows has been analyzed and assessed.

About the first author: ZHANG Jiajia, male, born in 1988, doctor, engineer, engaged in the study of endogenic geo-hazards; E-mail: jimjia2008@163.com.

Fund support: Supported by the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (STEP) (No. 2019QZKK0902) and the project of China Geological Survey (No.DD20221741).

1 引言

怒江干流云南段是云南省境内泥石流灾害最为发育的区域之一,也是中国西南地区泥石流灾害最为发育的区域之一,泥石流事件频发(图 1, 唐川和朱静, 2003; 杨迎冬等, 2017; 孔艳等, 2018; Huang et al., 2020)。历史泥石流事件,尤其是具有明确灾情损失的重大泥石流事件可有效反映区域泥石流的发育规律、控制因素、灾情损失以及灾害防御能力,并为将来泥石流的评价预测提供重要数据支撑(Simoni et al., 2011; Kirschbaum et al., 2015; 王高峰等, 2022; 万飞鹏等, 2023)。笔者追溯了怒江干流

云南段 72 年的泥石流事件,根据可获取到的事件记录,怒江干流 1950—2021 年间共计发生泥石流事件 134 次,最远可追溯的泥石流事件为 1950 年腊土河泥石流,该次泥石流事件造成 2 人死亡。暴发次数最多的年份为 2020 年,当年暴发了 14 次重大泥石流事件。其他还有例如 2010 年 8 月 18 日的东月谷溢玛泥石流造成 96 人死亡,并冲毁玉金铁矿公司的东月谷铁矿选冶厂,直接经济损失 1.4 亿元(苏鹏程等, 2012; Zhou et al., 2018; Tang et al., 2018)。2012 年 6 月 28 日贡山县比毕里河暴发泥石流,堵河超过 8 h,形成 3 km 长的堰塞湖(杨顺等, 2021)。2014 年 5 月 10 日怒江州福贡县腊土底

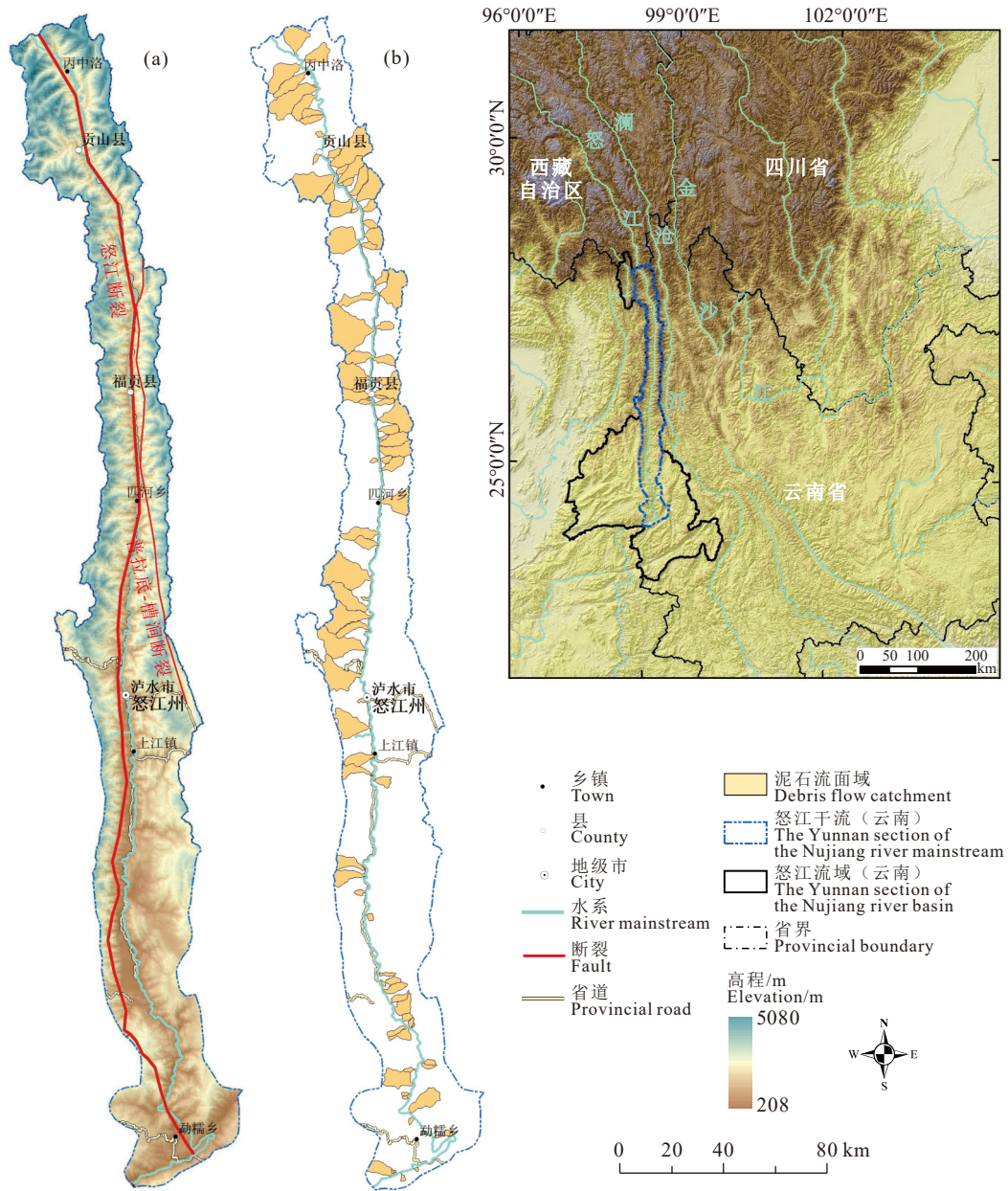


图1 怒江干流云南段地理位置及泥石流分布图

a—主要断裂分布及地势图; b—重大泥石流分布图

Fig.1 Location of the Yunnan section of the Nujiang River (YNR) mainstream and distribution of debris flows

a—Main faults and terrain; b—Distribution of major debris flows

河发生泥石流, 冲毁房屋 14 栋(郭荣芬等, 2015)。2020 年 5 月 25 日贡山县境内 G219 沿线暴发群发性泥石流(铁永波等, 2021), 造成人员伤亡和财产损失, 等等。

由于年代久远部分泥石流事件可能未能被记录, 但已有的泥石流事件记录和针对怒江流域泥石流的敏感性评价结果足以表明怒江干流云南段是

泥石流灾害的高易发区和高风险区(唐川, 2005; Liu et al., 2012; 孔艳等, 2019; Xu and Wang, 2022; Liu et al., 2024), 需引起高度关注。一方面, 由于怒江干流多高山峡谷地貌的缘故, 人地关系矛盾突出, 县城、场镇、村落等聚居区多直接分布在怒江干流两侧的河谷平坝区, 且往往直接坐落在泥石流沟口的堆积扇上; 另一方面, 人类相关的工程设施也大多分布

在怒江干流河谷及两侧支沟内,例如国道 G219 及相关旅游设施、国网输电线路、桥梁、厂矿等。近年来,随着经济的发展,怒江干流云南段的基础设施建设取得了非常显著的进步,也对泥石流灾害的风险防御提出了更大的需求。

笔者依托第二次青藏高原综合科学考察研究项目和地质调查项目,连续 3 年在怒江干流云南段开展泥石流的调查研究工作。基于资料搜集、遥感解译、现场调查、走访,获取了较以往研究更为详实的野外一手资料,尤其是更新了怒江干流泥石流事件数据库(表 1, 表 2)。在此基础上,分析怒江干流泥石流的时间和空间层面的发育规律和分异特征,进而分析不同驱动因素对泥石流时空分布的影响机制,从而研判怒江干流云南段泥石流的未来发展趋势。需要指出的是,前人研究是本文开展相关工作的基础(唐川和朱静, 2003; 徐慧娟, 2016; 冯倩倩, 2020; Huang et al., 2020)。区别于以往的研究,本文除了进一步丰富泥石流暴发事件数据库,还通过定量方法提取了泥石流主控的影响因子,特别分析了地震、怒江活动断裂对于怒江干流云南段泥石流时空分异的影响,并提取了自 2000 年以来泥石流暴发的活动周期,预测了泥石流未来的演化趋势。相关成果将加深怒江干流云南段泥石流的研究深度,以期对沿线场镇、聚居区以及重要交通干线的泥石流灾害风险防御工作有所裨益。

2 区域地质环境背景

研究区构造位置上处于三江构造带的南段,区内新构造运动活跃(Li et al., 2019),断裂发育,怒江断裂带贯穿研究区的南北,另发育有龙陵—瑞丽断裂带、普拉底—槽涧断裂等次级断裂(图 1a)。其中怒江断裂带为区内的主干活动断裂,性质为右旋走滑并具逆冲分量,年均滑移速率 0.42 mm(王阎昭等, 2008),该断裂带整体走向近南北向,向西陡倾,破碎带宽度达几千米,破碎带内岩石破碎强烈,断层角砾岩、糜棱岩化、片理化带发育(李光涛, 2008);区内地层多呈近南北向展布,与区域构造线方向一致,构造控制明显。地层岩性方面,怒江干流右岸以元古宙片麻岩,中生代基性、超基性岩为主,左岸则以古生代灰岩、中生代砂泥岩出露较多;

地形地貌方面,怒江干流的云南段整体属于横断山脉南段的纵谷地带,地势北高南低,地貌总体受南北向的构造控制,呈两山夹一江的高山峡谷地貌,怒江干流由北至南贯穿全境,东西侧分别为高黎贡山和碧罗雪山。怒江干流两侧沟谷纵生,为泥石流的发生提供了有利的地形地貌条件;气候方面,研究区属西南季风区气候类型,以六库为界,研究区北段以温带季风气候为主,南段则是以亚热带季风气候为主,由于南北范围跨度大,气候受地形和大气环流影响大,立体气候特征明显,全区大部分地区冬无严寒,年均气温 15.1°。受印度洋的暖湿气流影响,水热同期出现,雨季降雨量占全年总雨量的 80% 以上(Zhang et al., 2007),全区怒江河谷雨量北多南少,北段年总量 1000~1600 mm,南段 750~1000 mm,且雨量向干流两侧分水岭剧增;研究区植被覆盖率较高,与气候分段相似,以六库为界,研究区植被也表现出明显的南北分异。北段可见明显的垂直分带,从低往高由灌丛、灌木、阔叶林、针叶林向高山草甸过渡。南段植被垂直分布不明显,主要植被类型为阔叶林、灌木林及草山草坡。海拔较高的山上为针叶林覆盖,比例较小。山间盆地主要为耕地,且以水田居多,是怒江流域主要的农作物区。

3 数据和方法

3.1 数据来源

泥石流编目数据来源于文献资料、现场访问、野外调查和遥感解译,涉及的遥感影像数据资料主要有 1965—1976 年的 Keyhole 数据、Spot、Planet、GoogleEarth 影像;用于泥石流流域边界勾绘的 DEM 数据来源于 NASA 的 Strm DEM,同时该数据也用于泥石流影响因素的地形地貌参数的提取;NDVI(归一化植被指数)和土地利用类型数据基于 Landsat8 卫星影像提取;年均降雨量数据基于国家气象局公开的怒江流域监测站点的逐日降雨量数据,利用 ArcGIS 软件,通过克里金法插值而成;地层岩性和断层数据来源于 1:500000 区域地质图,并按照主干断裂、主干断裂的次级断裂、其他小型断裂三个等级赋予断裂的影响权重,然后利用 ArcGIS 软件生成断裂密度分布图(图 2)。

3.2 研究方法

野外调查采用传统地质调查方法,遥感解译基

于泥石流事件前后对比的目视解译。基于统计学方法开展泥石流的时间分异和空间分异特征分析。驱动因素的权重分析利用地理探测器,在ArcGIS平台上完成。

表 1 怒江干流泥石流事件统计 (可明确具体泥石流沟谷)

Table 1 Statistics of debris flow events in YNR (Specific gullies can be identified)

序号	灾点名称	经度 (E)	纬度 (N)	灾害暴发时间	灾害事件	灾害历史数据来源
1	蛮口河泥石流	98°52'12.45"	25°35'01.88"	2006年夏季	人员伤亡6人, 损失财产36万元	现场调查、访问
2	拉攀河泥石流	98°52'46.17"	25°33'59.64"	2006年夏季	人员伤亡5人, 损失财产30万元	现场调查、访问
3	石头寨泥石流沟	90°53'03.18"	24°53'44.22"	1993年左右	大概30年前曾暴发泥石流, 灾情不详	现场调查、访问
4	新农村泥石流沟	98°56'44.12"	24°50'27.34"	2020年8月、 2021年6月中旬	2020年8月暴发泥石流, 堆积物掩埋农田; 2021年6月发生两次泥石流时间, 泥石流堆积物掩埋农田	现场调查、访问
5	大椿树洼泥石流	99°01'49.25"	24°23'55.19"	2001年左右	近20年内有过暴发迹象, 方量约5000 m ³ , 危害农田、公路, 堆积物最大块径2~3 m	现场调查、访问
6	落水坑河泥石流	99°01'01.76"	24°24'32.77"	2015年	一次性冲出方量约1万m ³ , 无较大灾情损失	现场调查、访问
7	小糯后地洼子泥石流	99°00'55.74"	24°28'33.77"	2003年左右	老泥石流沟道内发生过大规模泥石流, 冲毁农田, 泥石流堆积物最大块石约1.5 m。新华村约20年前搬迁至该沟沟口, 之后未发生过泥石流	现场调查、访问
8	象尾坡河泥石流	99°01'30.11"	24°30'37.70"	2018年	该次泥石流一次性冲出方量约2万m ³ 。之后均以小规模泥石流、水石流为主, 方量约几千方, 冲出块石原岩大理石、灰岩、砂岩等	现场调查、访问
9	白岩河泥石流	98°50'59.20"	25°05'55.80"	2020年	泥石流堆积扇南侧支沟3~4年前曾发生过泥石流, 规模约5000 m ³ , 该次泥石流为雨后夜晚暴发	现场调查、访问
10	蛮蚌河	98°51'41.12"	25°45'03.63"	1968年, 2012年	几乎每年均暴发洪水; 2012年有暴发泥石流, 规模不大; 1968年发生大规模泥石流, 冲毁农田	现场调查、访问
11	登埂河	98°49'40.07"	25°55'41.22"	1952年、1979年	1952年暴发大规模泥石流, 农田及房屋被泥石流堆积物淤埋, 泥石流冲毁房屋5户, 冲出巨石等物质曾堵塞怒江; 1979年暴发小型泥石流	现场调查、访问
12	芭蕉河	98°52'08.63"	26°07'57.51"	2017年左右	每年有洪水暴发, 未直接造成灾情损失; 2017年前后曾发生过一次中等规模泥石流, 淤埋沟道, 未造成人员伤亡	现场调查、访问
13	腊门嘎依玛	98°51'09.79"	26°09'51.76"	1992年左右, 2015年	30年前曾暴发过一次泥石流, 未造成大规模危害; 2015年暴发小—中型泥石流, 冲毁农田若干	现场调查、访问
14	八福比河	98°51'36.00"	26°11'41.15"	2013年	2013年曾暴发泥石流, 冲毁农田若干	现场调查、访问
15	古登河	98°53'39.34"	26°23'11.32"	1992年左右, 2019年	30年前曾有过较大规模泥石流灾害, 灾情不详; 2019年发生泥石流, 冲毁房屋若干间	现场调查、访问
16	嘎梅左河	98°51'53.65"	26°57'04.85"	1979年	1979年曾暴发过大规模泥石流, 未造成人员伤亡	现场调查、访问
17	鹿马登河	98°52'17.83"	27°02'00.15"	2017年	2017年左右曾发生过泥石流, 造成1人死亡	现场调查、访问
18	亚木河	98°52'37.30"	27°07'46.10"	2009年8月1日05:30; 2010年左右	2009年8月1日泥石流造成2人死亡, 2人受伤, 1人失踪(徐慧娟等, 2016); 2010年左右发生过一次小型泥石流, 上游修建了水电站后, 未再发生泥石流灾害(现场访问)	现场调查访问、 文献分析
19	亚左洛河	98°52'38.69"	27°08'19.58"	1979年、 2004年左右	1979年9月份连续下了一个月的雨后, 暴发泥石流, 泥石流淤埋农田; 2004年左右发生过一次泥石流, 未造成人员伤亡	现场调查、访问
20	菜俄洛河	98°53'40.95"	27°15'12.94"	1979年	每年汛期都有发生洪水; 1979年曾发生大规模泥石流, 无人员伤亡	现场调查、访问
21	害扎溢玛	98°52'53.33"	27°15'28.06"	1984年8月22日 02: 00	1984年8月22日大雨, 02: 00发生泥石流, 淹没农田、房屋, 致死42人	现场调查、访问
22	拉马底河	98°52'24.04"	27°16'32.29"	1979年	1979年某天, 09: 00发生较大规模泥石流, 冲毁田地, 沟道内保存有大量泥石流堆积物	现场调查、访问

续表 1

序号	灾点名称	经度 (E)	纬度 (N)	灾害暴发时间	灾害事件	灾害历史数据来源
23	扎泸河	98°52'31.85"	27°17'57.42"	2019年	2019年雨季暴发泥石流, 淹没旺基独村的部分房屋。2020年修建泥石流排导槽	现场调查、访问
24	双拉菁河	98°36'16.92"	27°58'29.78"	2006年, 2020年6月	2006年曾暴发泥石流, 灾情不详; 2020年6月份连续降雨一周后某天12:00发生泥石流, 冲毁一栋房屋, 淹没农田, 无人员伤亡	现场调查、访问
25	龙坡依玛河	98°40'28.62"	27°52'48.50"	1985年左右, 2020年 5月25日04:00	1985年左右发生泥石流, 无人员伤亡; 2020年5月份连续降雨10天后, 于25日04:00泥石流, 冲毁农田, 冲走家畜, 堵塞沟道	现场调查、访问
26	江西赤科洛河	98°40'59.54"	27°48'14.13"	2019年8月, 2020年8月	2019年8月暴发泥石流, 灾情不详; 2020年8月份暴发泥石流, 未造成人员伤亡	现场调查、访问
27	迪甲	98°41'13.26"	27°47'43.07"	2020年5月25日 15:00	连续降雨10天后于2020年5月25日15:00左右暴发泥石流, 冲毁房屋及修路施工措施	现场调查访问、 遥感解译
28	牛郎当河	98°41'34.75"	27°43'16.05"	2008年7月30日01: 20; 2020年5月25日	2008年7月30日凌晨1:20暴发泥石流, 造成直接经济损失165万(徐慧娟等, 2016); 2020年5月25日暴发泥石流, 冲毁桥墩(现场访问)	现场调查访问, 遥感解译, 文献分析
29	齐得洛河 (嘎拉博)	98°42'16.13"	27°42'11.13"	1965年左右; 2008年 7月30日; 2010年4月 2日09:40	1965年左右曾发生过一次泥石流(现场访问); 2008年泥石流造成经济损失568.08万(冯倩倩, 2020); 2010年暴发黏性泥石流, 造成2人死亡, 汽车被泥石流淤埋(徐慧娟等, 2016)	现场调查访问、 文献分析
30	力透洛河	98°45'39.30"	27°37'32.63"	1990年左右	1990年代发生过泥石流, 未造成直接经济损失和人员伤亡; 近20年来未再发生过泥石流	现场调查、访问
31	匹河	98°53'52.06"	26°31'57.38"	2020年	每年汛期有小型水石流暴发。2020年曾发生泥石流, 未造成直接影响	现场调查、访问
32	加车益玛	98°54'11.99"	26°38'35.04"	2017年	每年汛期有洪水冲出; 2017年有小规模泥石流暴发, 泥石流堆积物主要以泥土和树木为主, 冲断跨沟道桥梁, 未造成人员伤亡	现场调查、访问
33	帕玛底	98°53'40.71"	26°40'26.87"	2020年	每年汛期都有洪水伴随少量砂石冲出; 2020年, 有较多石块以及树木冲出, 冲毁房屋1处	现场调查、访问
34	甲木树子(东)	98°53'57.41"	26°40'47.12"	2000年	2000年暴发大规模泥石流, 3户房屋被破坏, 死亡5人, 桥墩被冲毁	现场调查、访问
35	子里甲溢玛	98°53'43.90"	26°40'09.13"	2020年	2020发生大规模泥石流, 石块和水流漫过桥堤, 对居民造成明显影响	现场调查、访问
36	鹿曼溢玛	98°53'28.07"	26°46'58.45"	2017年	每年汛期有洪水冲出; 2017年暴发黏性泥石流, 过水涵洞被堵塞, 下游居民连夜疏散	现场调查、访问
37	拉甲木底河	98°52'25.72"	26°52'15.74"	1980年, 2020年	1980年发生大规模泥石流, 受威胁人口达千余人, 冲毁一座大理石加工厂; 2020暴发大规模水石流, 沟底侵蚀严重, 未造成显著影响。2021年泥石流沟道内修建拦沙坝	现场调查、访问
38	山神庙河	98°52'18.22"	26°54'07.86"	2018年	2018年发生大规模泥石流, 冲毁桥梁1座、房屋1间。每隔几年会暴发泥石流	现场调查、访问
39	腊士河	98°52'26.62"	26°54'24.98"	1979年、2018年	1979年暴发大规模泥石流, 2座大桥被毁; 2018年流通区山体滑坡, 堆积物在降雨期间全部冲出, 形成大型泥石流, 未造成人员伤亡	现场调查访问、 遥感解译
40	腊咱溢玛	98°49'48.52"	27°32'41.72"	2006年5月29日、 2017年7月5日、 2017年8月4日、 2018年5月31日、 2018年7月10日	2006年泥石流造成光缆损毁(徐慧娟等, 2016); 2017年7月5日暴发泥石流, 堆积扇两侧居民受灾严重, 造成1人死亡, 2人轻伤, 受灾群众636人, 经济损失1368.25万元(冯倩倩, 2020); 2017年8月4日暴发泥石流, 受灾群众161人, 经济损失13.5亿万元(冯倩倩, 2020); 2018年5月31日, 受灾人数430人, 未造成人员伤亡, 直接经济损失1762.5万元(冯倩倩, 2020)	现场调查访问、 文献分析

续表 1

序号	灾点名称	经度 (E)	纬度 (N)	灾害暴发时间	灾害事件	灾害历史数据来源
41	迪巴底河	98°49'03.03"	27°33'22.64"	2014年	2014年暴发泥石流, 造成1户房屋被毁	现场调查、访问
42	得来洛河	98°47'18.87"	27°34'53.34"	2010年7月26日 00: 30、2011年、 2013年、2014年	2010年某日经历连续降雨后暴发泥石流, 泥石流冲毁工棚, 造成11人失踪、11人受伤 (徐慧娟, 2016); 2011年暴发泥石流, 造成沟口上部两公里路段受损严重; 2013年和2014年均有泥石流暴发, 未造成显著影响 (现场访问)	现场调查访问、 文献分析
43	秋那桶	98°34'18.58"	28°04'59.36"	2020年	2020暴发泥石流, 伴随大石块冲出, 无灾情记录	现场调查访问、 遥感解译
44	格咱溢玛	98°40'43.26"	27°52'30.78"	2008年、2020年	2008年暴发泥石流灾害, 冲毁农田; 2020年汛期暴发泥石流, 有大量木头冲出	现场调查访问、 遥感解译
45	其郎当洛	98°43'49.67"	27°40'03.33"	2006年5月29日, 2006年8月16日 01: 00, 2016年	2006年5月29日, 16日暴发大规模泥石流, 造成5人死亡, 冲毁房屋9户, 损毁企业厂房8间, 经济损失1000.3万元 (现场访问, 徐慧娟等, 2016); 2007年修建30 m双边排导槽; 2016年发生小型泥石流, 无灾情记录 (现场访问)	现场调查访问, 文献分析
46	东月谷溢玛	98°43'57.26"	27°38'11.59"	1997年; 2010年8月 18日01: 30	1997年发生重大泥石流灾害, 5间房屋被毁, 13人死亡, 一座桥梁被毁, 大石头堵江, 对岸房屋受损 (现场访问); 2010年泥石流造成96日人死亡, 冲毁矿厂, 直接经济损失1.4亿元, 泥石流冲出方量350万m ³ , 局部堵江, 怒江水位提高6 m (苏鹏程等, 2012; Zhou et al., 2018)	现场调查访问、 文献分析、 遥感解译
47	害咱卡溢玛	98°46'45.59"	27°35'50.88"	2010年8月18日; 2020年	2010年8月18日暴发大规模泥石流灾害, 共造成22人死亡, 90人失踪, 10人重伤, 28人轻伤, 路基被毁200多米, 石拱桥被毁一座; 2020年发生山洪, 伴随石块冲出, 无灾情记录	现场调查、 访问
48	腊土河	98°52'12.62"	26°52'49.34"	1950年	1950年暴发大规模泥石流, 泥位达到3 m, 掩埋农田、冲毁房屋、造成2人死亡; 2000年以来每年均有小规模水石流冲出	现场调查、 访问
49	腊土底河	98°51'41.94"	26°54'08.54"	2014年5月10日 07: 00	2014年5月10日暴发泥石流, 冲毁房屋14座, 2座采石场、淹没电站, 经济损失1.8279亿元 (现场访问、冯倩倩, 2020; Huang et al., 2020)	现场访问、 文献分析
50	古木	98°51'31.61"	26°56'29.21"	2005年	2005年暴发泥石流, 於埋农田、冲毁房屋, 泥位最高5 m, 最近几年未发生泥石流	现场调查、 访问
51	腊土底罗干	98°51'48.39"	26°53'38.69"	2019年	2019年暴发泥石流, 当时已有工程治理措施, 未造成较大影响	现场调查、 访问
52	古当村泥石流	98°50'07.58"	27°27'34.46"	1979年、2014年8月 20日04: 30; 2016年	1979年暴发大规模泥石流, 灾情不详; 2014年泥石流暴发大规模泥石流, 冲出的固体物质摧毁1间房屋, 造成2人失踪2人死亡, 公路、电力、通信中断, 古当河电站受损严重, 经济损失1020.68万元 (现场访问、徐慧娟, 2016); 2016年泥石流冲毁民房1间	现场调查访问、 文献分析
53	比毕里河	98°39'04.96"	27°56'09.01"	2011年6月23日; 2012年6月28日	2011年泥石流造成42户民房被毁, 经济损失4400万元 (徐慧娟等, 2016); 2012年泥石流泥位达5 m, 冲毁堆积扇上修建的房屋5间, 公路桥梁被冲毁, 阻塞怒江8小时, 形成3 km长的堰塞湖 (现场访问, 杨顺等, 2021)	现场调查访问、 文献分析
54	茨干河	98°39'54.81"	27°44'14.33"	2012年3月3日 07: 30	泥石流造成3人死亡, 2人受伤 (徐慧娟等, 2016)	文献分析

续表 1

序号	灾点名称	经度 (E)	纬度 (N)	灾害暴发时间	灾害事件	灾害历史数据来源
55	六库芭蕉河	98°50'56.64"	25°50'30.50"	1980年、1989年	1980年泥石流冲击淤埋堆积扇上的城镇房屋, 冲毁沟口公路桥, 造成10余人死亡或失踪 (现场访问); 1989年暴发较大规模泥石流, 泥石流龙头高3 m, 直接经济损失889万元 (徐慧娟等, 2016)	现场调查访问、文献分析
56	火都独泥石流	98°52'19.39"	27°18'39.84"	2001年8月2日	泥石流造成1人死亡, 2人失踪, 冲毁公路、桥梁、民房6户, 经济损失306万元 (冯倩倩, 2020)	文献分析
57	石缸河泥石流	98°53'33.62"	25°50'7.93"	1997年10月3日; 2007年8月7日 00: 30	1997年泥石流曾发生泥石流, 灾情未知; 2007年泥石流造成7人死亡, 1人失踪, 冲毁淤买矿山1座, 厂房9间, 经济损失75万元 (徐慧娟等, 2016)	现场调查访问、文献分析
58	沙瓦沟泥石流/碧巧孔	98°54'22.24"	26°34'26.28"	2014年7月9日03: 00	泥石流造成9人死亡, 8人失踪, 1人受伤, 直接经济损失2107万元 (冯倩倩, 2020)	文献分析
59	丹当泥石流	98°39'43.46"	27°44'32.46"	2010年5月11日 13: 00	泥石流造成2人失踪 (徐慧娟等, 2016)	文献分析

表 2 怒江干流泥石流事件统计 (未能分辨具体泥石流沟谷)

Table 2 Statistics of debris flow events in YNR (Specific gullies can not be identified)

序号	泥石流发生位置	发生时间	灾害事件
1	福贡县	1952年10月3—12日	死亡87人, 38人受伤, 冲毁民房100多间, 牲畜149头, 农作物受灾面积达803 ha
2	福贡县	1952年10月22	2人死亡, 30受伤
3	贡山县	1952年10月3—12日	受灾人数4815人, 死亡26人, 13人受伤, 冲毁民房48间, 受灾农田312 ha
4	福贡县	1952年10月22—24日	泥石流灾害造成死亡2人, 30人受伤
5	贡山县	1961年5月29—31日	日最大降水量为88.8 mm, 山崩路垮, 被泥石流冲毁微型电站一座
6	贡山县	1962年8月	贡山县暴发山洪泥石流灾害, 冲毁道路桥梁, 交通中断
7	碧江县	1976年3月2日—4月13日	总降雨量达560.3 mm, 最大日降雨量为72 mm, 造成山洪泥石流灾害, 冲毁农田200 ha, 死亡10人, 房屋损坏185间
8	福贡县达普罗村	1976年4月12日	福贡县达普罗村发生泥石流, 1人死亡, 冲毁房屋3间
9	福贡县	1976年, 月份不详	福贡暴雨不断, 引发泥石流, 冲毁1个村寨, 死亡32人
10	福贡县	1979年10月	福贡县发生洪灾, 造成滑坡泥石流, 90户住房被冲毁, 30人死亡, 重伤25人, 毁坏经济林66 ha, 破坏粮田788 ha, 冲毁公路桥6座
11	福贡县利沙底乡马底村	1977年8月	利沙底乡马底行政村里咱村7户33人, 除5人幸免于难外, 其余全部被泥石流冲埋
12	贡山、福贡、碧江、六库	1979年9月26日—10月8日	造成143人死亡, 88人重伤, 冲毁房屋574间, 冲毁农田4129 ha, 淹没农作物7820 ha, 冲塌公路1020处, 冲毁公路桥梁41座, 26座电站受到严重破坏
13	怒江州	1985年5月20日	持续降雨33天, 全州范围山洪泥石流灾害, 大春作物受灾达10361 ha, 冲毁房屋197间, 桥梁148座, 443条人马驿道, 中断交通, 死亡10人, 受伤11人, 损失大量牲畜
14	怒江州	1989年10月3日—20日	共冲毁房屋1397间, 死亡12人, 重伤5人, 损失牲畜1198头, 受灾农田9391 ha, 公路、桥梁、通讯线路严重受损
15	泸水六库镇泥石流	1992年7月27日	1人死亡, 经济损失144万元
16	福贡咱利村	1995年	小型泥石流
17	福贡县子里甲乡	2002年8月10日	失踪4人, 受灾52户, 冲毁房屋、牲畜以及基础设施, 经济损失约150万
18	福贡县石月亮乡	2003年5月18日	1人死亡, 3人受伤, 经济损失14.40万元
19	福贡县	2004年3—4月	5人死亡, 4人失踪, 直接经济损失1.5亿元
20	福贡县子里甲乡	2004年6月18日	损坏公路100 m, 经济损失22万元
21	福贡县俄科底村	2004年10月	死亡3人, 冲毁房屋2间, 田地0.2 ha
22	贡山县	2005年2月13日	2人死亡, 15人受伤
23	贡山县	2004年3月5日	15人死亡, 20多人受伤, 经济损失1.7亿元

续表 2

序号	泥石流发生位置	发生时间	灾害事件
24	福贡旺基独村	2007年	中型泥石流, 毁坏了建于沟道旁小型电站设施
25	福贡鹿马登乡亚坪村	2009年8月1日05:30	2人死亡、2人受伤、1人失踪
26	福贡吉马乡境内瓦贡线	2009年9月7日03:00	冲毁石拱桥阻断交通, 直接损失160万元
27	马吉乡街道	2009年9月7日	直接经济损失158万
28	贡山吉束底村泥石流	2010年5月12日	中型泥石流, 2人死亡
29	福贡上帕镇瓦贡县S228线	2010年10月9日15:00	冲毁石拱桥阻断交通
30	福贡马吉乡	2011年3月18日	交通中断、房屋倒塌
31	石月亮乡	2011年3月18日	交通中断、房屋倒塌
32	鹿马登乡	2011年3月18日	交通中断、房屋倒塌
33	福贡马吉米村	2011年3月23日	冲毁公里数百米
34	贡山县格咱村泥石流	2011年6月23日	中小型山洪泥石流
35	贡山县城后山泥石流	2012年3月3日07:30	3人死亡, 2人受伤
36	福贡县果科村泥石流	2012年7月7日	冲毁房屋1间, 经济损失15万元
37	贡山县积娃村泥石流	2012年7月26日	无人员伤亡, 直接经济损失980万元
38	福贡旺基独村	2013年8月1日	对村卫生院造成了影响
39	福贡县马吉乡	2013年9月1日	造成交通中断
40	福贡县马吉乡	2014年2月16日17:30	部分公路交通中断, 暴雨引发
41	福贡县旺基独村泥石流	2014年8月5日	直接经济损失30.78万
42	福贡县知子村泥石流	2015年8月12日	道路受损, 掩埋房屋
43	福贡县腊吐底村泥石流	2015年8月13日	道路受损, 掩埋房屋
44	福贡县马吉乡街道泥石流	2016年4月16日	淤埋街道数百米
45	福贡县赤恒底村泥石流	2016年4月22日	冲毁房屋5间, 直接经济损失50万元
46	福贡县架科底乡维独村	2016年4月24日	1人死亡, 房屋倒塌
47	福贡县古泉村泥石流	2016年4月24日	直接经济损失200万元
48	泸水拖托村	2016年4月25日17:30	冲毁房屋3间, 冲毁桥梁一座, 造成道路阻断
49	福贡县上帕村泥石流	2016年6月24日	直接经济损失53万元
50	贡山县	2020年5月25日	发生泥石流65处, 全县受灾严重

地理探测器是探测空间分异性, 以及揭示其背后驱动力的一组统计学方法, 其基本思想是: 假设研究区分为若干子区域, 如果子区域的方差之和小于区域总方差, 则存在空间分异性(王劲峰和徐成东, 2017)。假设一组自变量 X 和因变量 Y 的空间分布趋于一致, 地理探测器能探测其统计关联性, 进而可以揭示两者之间的关联性, 度量空间分异性、探测解释因子。本文以每个泥石流流域作为分析单元, 采用地理探测器模型探测各影响因子对泥石流发育的影响程度, 地理探测器公式表达如下:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (1)$$

式中: h 为泥石流影响因子的分级, $h \in [1, L]$; N_h 为对应某一分级 h 的分析单元数, N 为研究区全部泥石流流域分析单元; σ_h^2 和 σ^2 分别是影响因子某一分级 h 的方差和全区方差。 $q \in [0, 1]$, q 值越大说明分层异质性越明显; 由于泥石流发育是由于各个因素共同作用的结果, q 值越大表示影响因子对

泥石流发育的解释力越强, 相反则越弱; $q=1$ 时表明影响因子完全控制泥石流发育; $q=0$ 时表明泥石流发育不受该因子影响。

为更准确地表征不同泥石流的发育程度, 体现差异性, 选取研究区泥石流近 50 年暴发频率作为因变量 Y , 数据来源于现场调查、访问和文献分析。影响因子为自变量 X , 基于地理探测器模型, 通过计算并比较各自变量因子 q 值大小, 定量分析各影响因子对研究区泥石流发育的影响程度。自变量 X 方面, 参考了大量泥石流评价所采用的影响因子, 结合怒江流域的地质、环境特征, 以及实地考察的经验。为了突出反映本研究区泥石流形成的主导因子作用, 最终选取了坡度, NDVI 指数, 降雨指数, 断裂分布, 岩性, 土地利用类型 6 个影响因子进行怒江流域泥石流主控因子分析(图 2)。

4 泥石流编目

4.1 泥石流分布

为获取准确的泥石流编目, 采用文献资料分

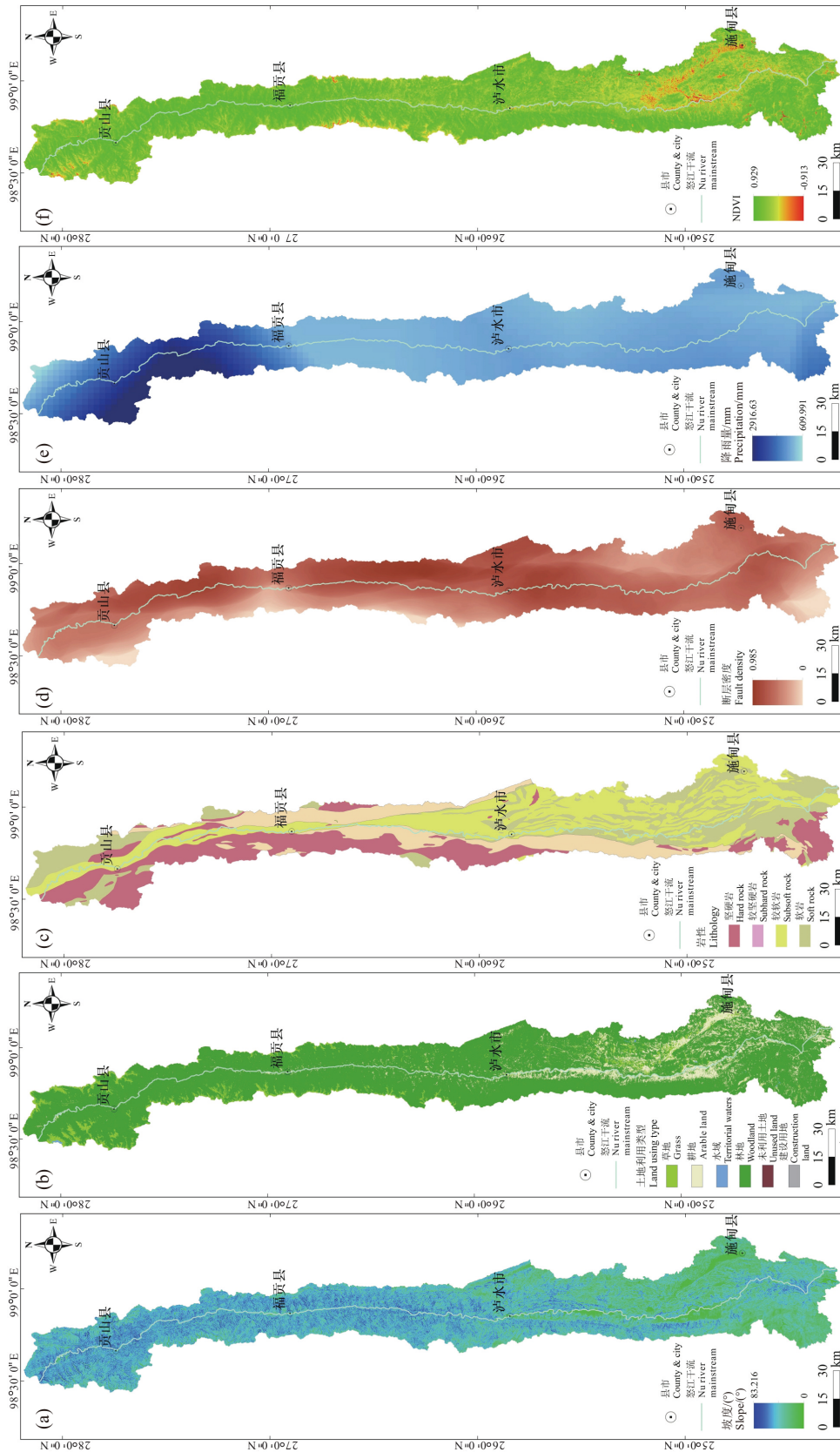


图 2 泥石流的影晌因子特征图
 a—坡度; b—土地利用类型; c—岩性; d—断层密度; e—降雨量; f—NDVI
 Fig.2 The influencing factors of debris flow in YNR
 a—Slope; b—Land using type; c—Lithology; d—Fault density; e—Precipitation; f—NDVI

析、现场访问、野外调查、遥感解译方法,相互补充验证。以往的文献资料记录了部分怒江干流泥石流的暴发事件,尤其是有直接经济损失的典型事件,作为本次泥石流编目的一部分;因泥石流有时间维度的概念,现场能访问到的最久远的泥石流为1950年,因此泥石流事件记录限定在1950—2021年,主要访问泥石流沟谷附近的居民,从而最大可能保证访问结果的准确性;现场调查是泥石流研究的重要方法,该方法可直接获取泥石流的方量、规模、期次、物源分布情况、堵溃情况等详细信息;遥感解译可以直观识别二维尺度的泥石流堆积扇、物源分布、堵溃情况等,多期次的遥感影像解译还可以对比分析泥石流前后的地形地貌特征,从而识别泥石流。现场调查和遥感解译可以对文献资料及现场访问的结果进行验证。综合以上方法获取的泥石流活跃程度、冲出方量、物源分布、灾情险情信息最终形成怒江干流103处重大泥石流的编目数据,并基于DEM数据、遥感影像和GIS平台勾绘泥石流的流域边界,获取怒江干流泥石流的空间分布数据(图1b)。

4.2 泥石流事件

在参考已有文献资料的基础上(唐川和朱静,2003;徐慧娟,2016;冯倩倩,2020;Huang et al.,2020),为了充分获取怒江干流云南段重大泥石流的事件记录,除了现场调查访问,还利用包括Keyhole、RapidEye、Planet、Google Earth在内的多期次遥感影像数据进行泥石流事件的解译分析(图3),最终将泥石流事件次数由原有文献的

86次(Huang et al.,2020)更新为134次。但即便如此,因为能被回忆或者记录的泥石流事件往往为大规模或者灾情严重的重大泥石流,故实际泥石流事件应大于本次统计结果。其中可明确具体泥石流沟谷的事件记录见表1。其他未能分辨具体沟谷的事件记录见表2,这部分泥石流事件记录均来自于文献分析(徐慧娟,2016;冯倩倩,2020),其中包含了若干大面积极端降雨造成的群发性泥石流事件。

5 怒江干流泥石流时空分异特征

5.1 空间分异特征

怒江干流的泥石流总体表现出北强南弱的空间分异特征,以泸水市上江镇为界,以北至贡山县丙中洛的滇藏交界为泥石流的多发区段(图1)。上江镇以南至临沧市镇康县勐捧镇的中缅边界泥石流总体发育程度较低。细分到局部区段,由北至南,贡山丙中洛镇至福贡县城,怒江干流两侧发育数量较为均等的泥石流。福贡县城向南至匹河乡泥石流集中分布在怒江干流右岸,而匹河乡向南至泸水市上江镇泥石流则主要分布在怒江干流的左岸。上江镇向南怒江干流两侧泥石流发育数量无明显分异。

泥石流规模等级、暴发频率方面,整个区段发育小型规模泥石流11处,中型规模泥石流86处,大型及以上泥石流6处(图4a);发育低频泥石流58处,中频泥石流24处,高频泥石流21处(图4b)。总体而言,怒江干流云南段泥石流



图3 基于RapidEye影像的怒江干流典型泥石流暴发前后的遥感解译对比图(东月谷溢玛)

Fig.3 Comparison of remote sensing interpretation before and after a typical debris flow outbreaking based on RapidEye imagery (Dongyueguyima gully)

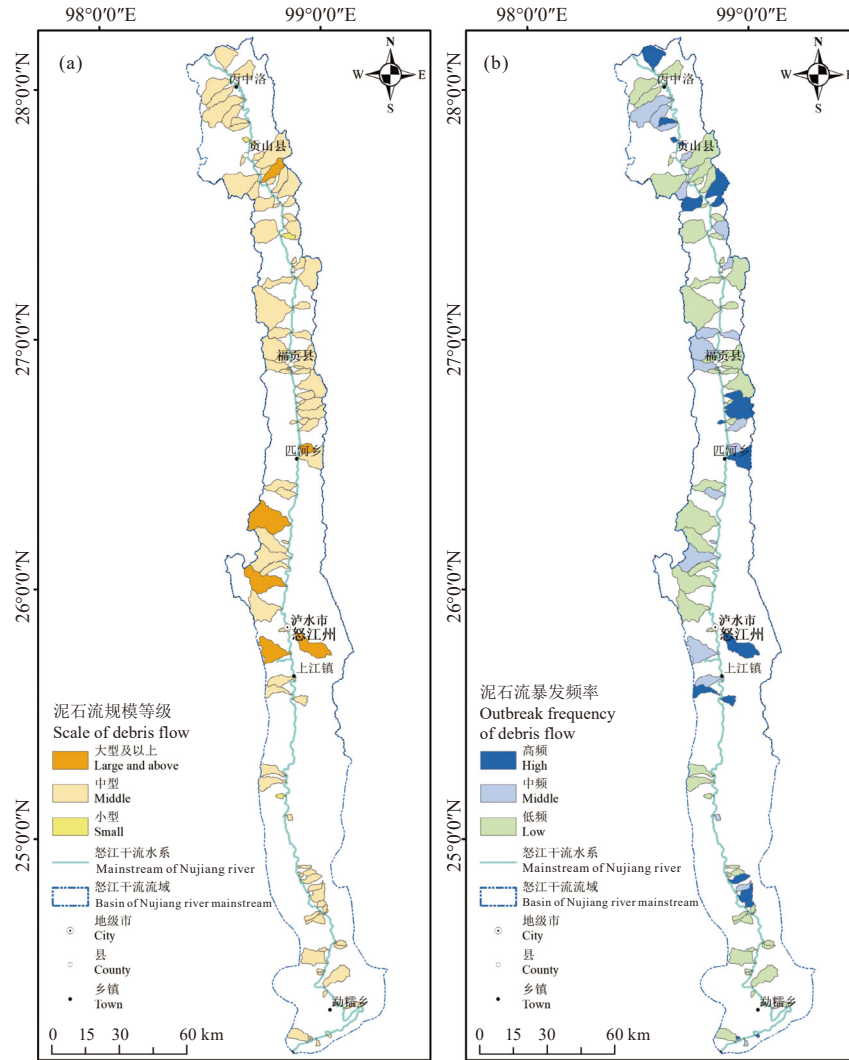


图 4 怒江干流云南段泥石流规模、暴发频率空间分布特征

a—泥石流规模分布图; b—泥石流暴发频率分布图

Fig.4 Spatial distribution feature of debris flows scale and outbreaking frequency in YNR

a—Scale of debris flow; b—Outbreak frequency of debris flow

总体以中型规模、中—低频泥石流为主,其中大型规模、高频泥石流主要分布在泸水市上江镇以北区段(图 4)。

5.2 时间分异特征

5.2.1 多年时间尺度

据怒江干流云南段可追溯的 1950—2021 年的年度重大泥石流事件频次的统计结果(图 5), 1950 年代研究区共计发生泥石流 6 次, 其中 1952 年发生 5 次。1960 年代共计发生泥石流 4 次。1970 年代累计发生泥石流 13 次, 其中 1979 年发生 9 次。1980 年代共计发生泥石流 7 次。1990 年代共计发生泥石流 7 次。2000 年代共计发生泥石

流 26 次。2010 年代共计发生泥石流 55 次, 其中 2010 年发生泥石流 10 次。2020 年研究区发生泥石流 14 次, 2021 年发生泥石流 1 次。1950 年至 2021 年累计重大泥石流事件 134 次。

5.2.2 月时间尺度

基于调查、访问及文献分析获取的历史泥石流时间的暴发月份信息, 可以得出研究区的泥石流主要在 3—10 月份期间发生, 而 3—5 月和 7—10 月是两个集中的暴发期间, 其中又以 8 月最多, 该结果与以往的研究一致(Huang et al., 2020)(图 6)。呈现出不同月份间的显著分异特征, 很显然这是与研究区的气候条件密切相关的。

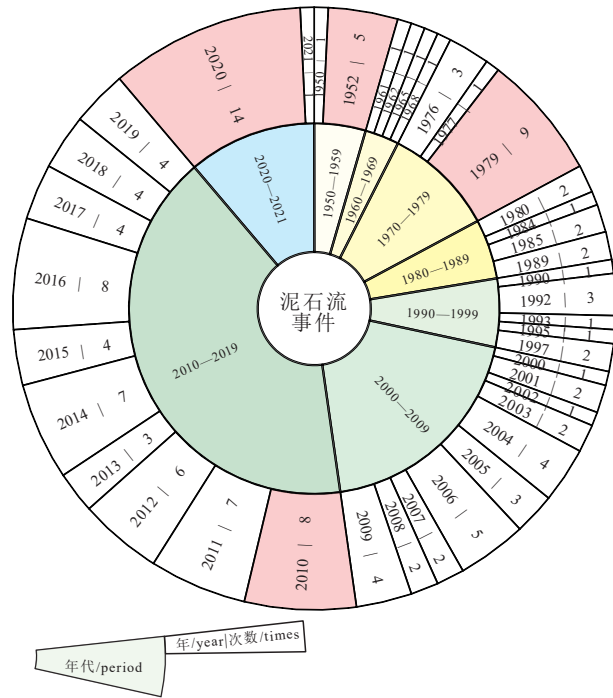


图5 研究区 1950—2021 年泥石流暴发频次统计结果
1950—2000 年泥石流事件数据较少可能为年代久远造成
Fig.5 Statistical results on the annual frequency of debris flows in YNR from 1950 to 2021
The limited data on debris flow events from 1950 to 2000 may be due to the long-standing time

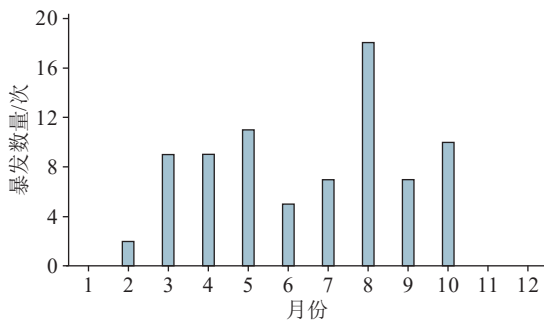


图6 怒江干流泥石流的月度发生频次的统计结果 (1950—2021)
Fig.6 Statistical results on the monthly frequency of debris flows in YNR from 1950 to 2021

6 泥石流空间分异的驱动因素

6.1 驱动因素权重结果

利用地理探测器, 总体按照地形地貌、地层岩性、断裂构造、气象条件、植被及土地利用情况 6 个大类, 基于前述的与泥石流相关的 6 个特征变量 (图 2), 通过地理探测器分析不同驱动因

素对于泥石流空间分布的贡献度。结果显示降雨、断裂和坡度是 q 值最大的三个因子 (表 3), 这三个因子也分别对应了气候条件、断裂构造、地形地貌。

6.2 主控因素分析

6.2.1 气候条件

前已述及怒江干流云南段的泥石流总体表现出北强南弱的空间分异特征, 降雨型泥石流的发生与气候条件密切相关。事实上, 研究区的多年平均降雨量值也呈现非常显著的南北分异特征 (图 2e)。以六库为界, 六库以北的怒江干流区域的降水明显大于六库以南区域。六库以北至贡山为递增的趋势, 贡山年均降雨量最大, 达到 1800 mm/a, 六库以南至临沧的镇康现总体为降低趋势, 且在临沧市镇康县达到最低值, 约 700 mm/a (图 2e)。因此, 作为影响权重最大的因子, 怒江干流云南段的气候条件很大程度的决定了泥石流分布的空间分异特征。

6.2.2 断裂构造

怒江流域发育大量的断裂, 包含主干断裂怒江断裂和其他的次级断裂 (图 1), 由于断裂规模、活动性的显著差异, 怒江断裂对于断裂带及周边区域的岩土体强度、地形地貌的影响程度远大于其他断裂, 基于断裂分级后形成的断裂密度图也能明显看出该特征 (图 2d)。怒江断裂总体走向为近南北向, 其与怒江干流两侧沟谷具有不同的空间交切关系, 这也一定程度影响了断裂对泥石流发生的贡献度。自滇藏交界向南至匹河乡, 怒江断裂基本沿怒江干流河谷展布, 两侧泥石流的数量、规模和暴发频率相对平均 (图 1)。而匹河乡向南至泸水市上江镇泥石流则主要分布在怒江干流的左岸, 该空间分异特征可能很大程度由怒江断裂控制 (图 7)。

6.2.3 地形地貌

由于区域隆升速率和气候的差异, 造就了怒江干流两侧沟谷地形地貌特征由北至南的显著差异。事实上, 不只是坡度因子 (图 2a), 包括相对高差等地形地貌因子均显示了类似的南北差异性, 这样造成了怒江干流南北泥石流地形地貌条件的不

表 3 基于地理探测器获取的泥石流影响因子 q 值
Table 3 Impact factor q -values based on the Geodetector

自变量	坡度	NDVI	降雨	断裂分布	土地利用类型	岩性
q 值	0.026	0.020	0.058	0.036	0.019	0.010

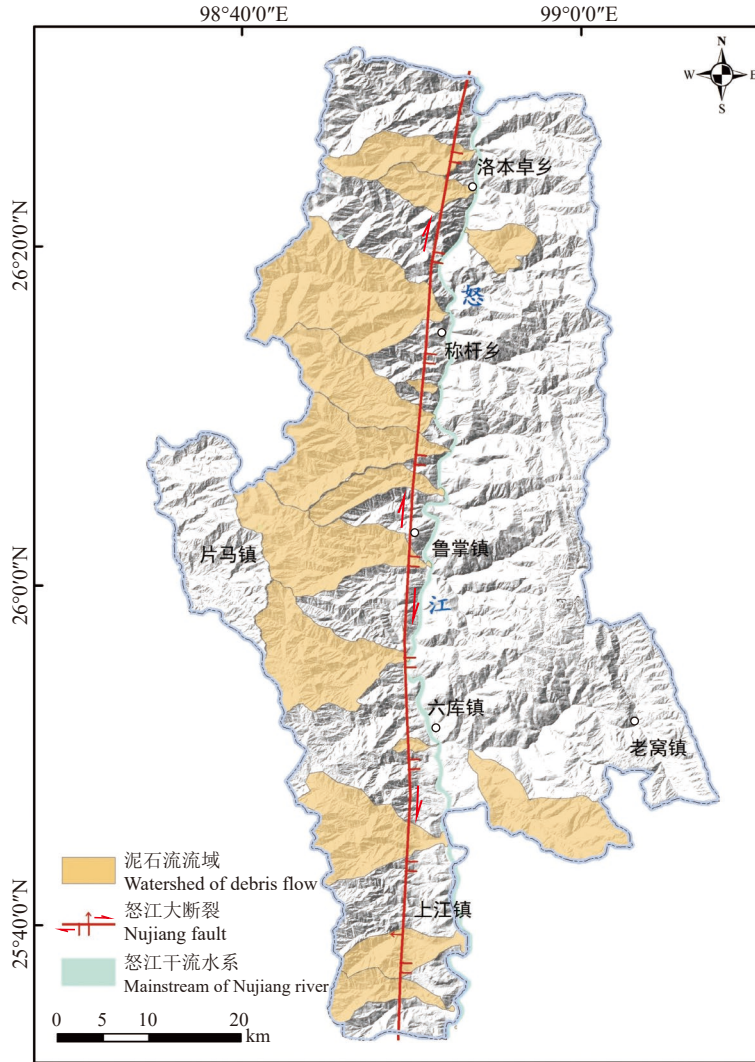


图 7 怒江干流重大泥石流与怒江断裂的空间分布关系
 Fig.7 Spatial distribution relationship between major debris flows and Nujiang fault zone

同,很显然泥石流沟谷流域平均坡度越大、相对高差越大越有利于泥石流的发生。基于统计数据对比分析研究区 103 条泥石流的地形地貌特征差异,结果显示大致以上江镇为界,以北区域的 73 条泥石流的流域平均坡度和相对高差均明显大于南部区域(图 8),怒江干流云南段泥石流的空间分异与地形地貌条件密切相关。

7 泥石流时间分异的驱动因素

7.1 降雨

研究区主要为降雨型泥石流,区内泥石流的发生与气候条件变化密切相关。基于 1950—2021 年的年度重大泥石流事件频次的统计结果,得出研究

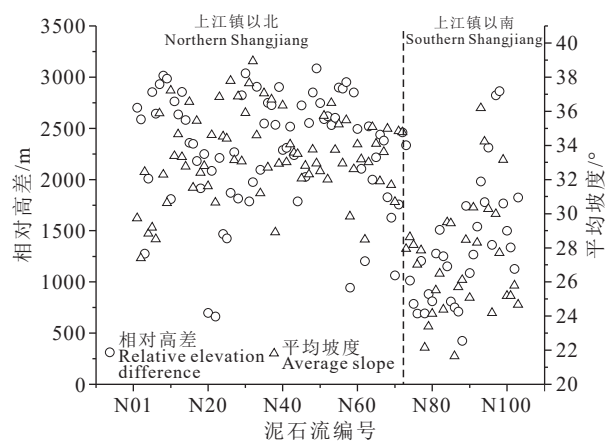


图 8 怒江干流云南段南北泥石流的地貌参数对比
 Fig.8 Comparison of geomorphologic parameters of northern and southern debris flows in YNR

区 1980 年以前除了 1952 年和 1979 年泥石流多发,其余年际泥石流暴发相对较少。1980 年以后的 1980 年代和 1990 年代研究区泥石流灾害暴发频率低,2000 年以后迎来暴发期,且暴发频次显著高于之前的年代。2001—2003 年期间泥石流暴发频次较低,2004—2006 这 3 年间,泥石流灾害频率较高;2007—2009 年,泥石流活动性较低;2010—2012 年,研究区泥石流灾害暴发最为频繁,为泥石流灾害的频发期,特别是 2010 年泥石流灾害频次最高,并造成重大人员伤亡和财产损失;2013 年泥石流灾害频次相对较低,在 2014—2016 年又显著升高,2017—2019 年泥石流又相对停歇,但 2020 年又迎来暴发期,单年有记录暴发泥石流沟谷 14 条。由此可得:怒江流域云南段高山峡谷区泥石流灾害总体表现为愈加活跃的趋势,尽管该区域年均降雨量无显著的增加趋势(樊辉和何大明, 2012; 刘苏峡等, 2017; Yang et al., 2021),但极端降雨事件是呈明显上升趋势的(图 9)。而 2000 以来的泥石流发生具有一定的周期性,周期大致为 3 年。该周期也与基于道街坝站点获取的怒江干流的降雨量周期一致(刘新有等, 2017)。

泥石流暴发的季节性规律方面,研究区气候属暖温带高原季风气候,受印度洋的暖湿气流影响,水热同期出现,研究区雨季可长达 9 个月,但不同区域降雨量特征又不一致。以研究区泥石流最为多发的六库、福贡、贡山为例,六库的月降雨量为单峰型,雨季为 5—10 月,而福贡和贡山则表现为双峰型,降雨从每年 2 月中旬起就开始明显增多,3 月下旬左右迎来最大值,此后逐渐减少,6—9 月又迎来一个高峰期,为地质灾害的发育提供了良好的气象条件,月降雨量的变化趋势与本文统计的泥石流的月时间尺度的暴发频次趋势基本一致(图 6, 图 10)。所以,研究区泥石流发生的时间规律是与集中降雨规律相一致,具有明显的季节性,一般发生在 3—10 月的多雨季节,泥石流灾害约占该地区全部泥石流灾害的 80% 以上(图 6)。

需要指出的是,虽然研究区泥石流发生规律与月度降雨量规律一致,但偶发的极端降雨往往会触发泥石流事件的集中暴发。例如:1989 年 10 月的极端降雨造成大量的泥石流发生,冲毁房屋 1397 间,死伤 17 人,直接经济损失 3600 万元(表 2;

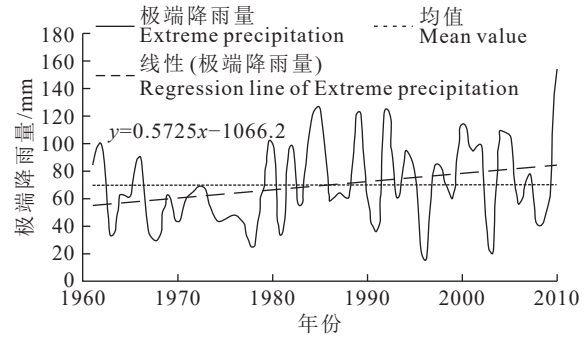


图 9 怒江流域云南段极端降雨量趋势(据洪美玲和何士华, 2019)

Fig.9 Trend in rainstorm in the Yunnan section of Nujiang River Basin (after Hong Meiling and He Shihua, 2019)

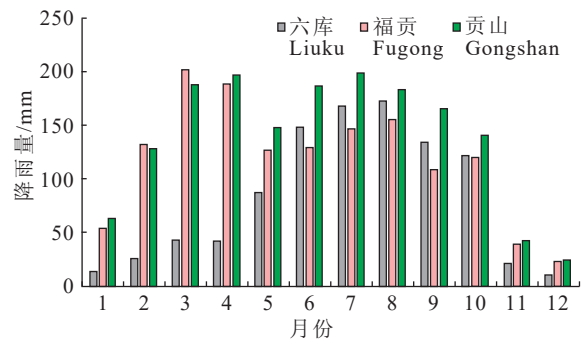


图 10 怒江干流典型场镇多年平均月降雨量分布

Fig.10 Comparison of average monthly rainfall in typical towns in YNR

唐川和朱静, 2003)。2020 年 5 月 24 日至 27 日连续 4 天的降雨达到 348.2 mm,是贡山县境内有气象记录以来最大的持续强降雨天气过程,集中强降雨导致贡山县域内新增地质灾害 208 处,其中新发泥石流 65 条(表 2; 铁永波等, 2021)。

7.2 地震

在降雨型泥石流多发的区域,地震之后往往会迎来泥石流的暴发期(唐川和梁京涛, 2008; 崔鹏等, 2013; 张佳佳等, 2023)。怒江流域云南段总体位于滇西的腾冲—龙陵地震带,1950 年至今对研究区影响最大的两次地震事件分别为 1950 年的墨脱地震和 1976 年的云南腾冲、潞西地震,两次地震后研究区均迎来了泥石流的暴发期。1952 年研究区的泥石流出现了集中暴发期,且均位于福贡县、贡山县这样更靠近震中的区域。而 1976 年的 5—7 月云南腾冲、潞西发生 5 次 6 级以上地震,最大震级 Ms6.6(中国地震台网, 2023),地震 3 年后的 1979 年怒江干流泥石流迎来了暴发期,单年有记录的重大泥石

流事件 9 起,造成了大量的人员伤亡和财产损失(图 5,表 1)。因此,地震是研究区泥石流非常重要的间接触发因素,强震之后研究区均会迎来泥石流的集中暴发期。

8 结论

(1)怒江干流云南段的泥石流总体表现出北强南弱的空间分异特征,以泸水市上江镇为界,以北至贡山县丙中洛的滇藏交界为泥石流的多发区段,同时也是大型、高频泥石流多发区段。空间分异的主控因素为气候条件、断裂构造、地形地貌。

(2)自 1950 年以来怒江流域云南段高山峡谷区泥石流灾害总体表现为愈加活跃的趋势,但有个别年份泥石流暴发事件激增,每年的 3—10 月为泥石流集中暴发期。降雨和地震为泥石流时间分异的主控因素。

(3)泥石流活动自 2000 年以来表现出 3 年左右的周期,周期大体与降水的活动周期一致。呈上升趋势的极端降雨、突发的强震均会引发泥石流的集中暴发,需引起重视。

致谢: 野外工作得到了怒江州自然资源和规划局、保山市自然资源和规划局、福贡县自然资源和规划局的支持, RapidEye、Planet 遥感影像来自于 Planet 公司, Google Earth 影像来自于 Google 公司,西南科技大学李吉康、成都理工大学唐焱、卫应松参与了野外工作,中国地质科学院探矿工艺研究所张勇教授级高级工程师对本文提供了有益的建议,在此一并表示感谢。

References

Cui Peng, Chen Xiaoqing, Zhang Jianqiang, Yang zongji, You Yong, Fan Jianrong, Su Fenghuan, Kong Yingde, Zhu Xinghua. 2013. Activities and tendency of mountain hazards induced by the Ms7.0 Lushan Earthquake, April 20, 2013[J]. *Journal of Mountain Science*, 31(3): 257–265 (in Chinese with English abstract).

CEIC. 2023. Chinese historical earthquake catalog[EB/OL]. <https://www.ceic.ac.cn/history> (in Chinese).

Fan Hui, He Daming. 2012. Regional climate and its change in the Nujiang River basin[J]. *Acta Geographica Sinica*, 67(5): 621–630 (in Chinese with English abstract).

Feng Qianqian. 2020. The Formation Environment and Disaster Trend Research with Debris Flow in Bingzhongluo–Pihe of Nujiang River[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1–122 (in

Chinese with English abstract).

Guo Rongfen, Luo Yan, Tang Sheng. 2015. Analysis on the causes of mudslides in Fugong on May 10, 2014[J]. *Journal of Catastrophology*. 30 (1): 102–107 (in Chinese with English abstract).

Hong Meiling, He Shihua. 2019. Spatial and temporal change of rainfall in Nujiang basin in recent 50 years[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 26(3): 248–252 (in Chinese with English abstract).

Huang J C, Xu H J, Duan X W, Li X, Wang P J. 2020. Activity patterns and controlling factors of debris flows in the Upper Salween Alpine Valley[J]. *Natural Hazards*, 103: 1367–1383.

Kirschbaum D, Stanley T, Zhou Y P. 2015. Spatial and temporal analysis of a global landslide catalog[J]. *Geomorphology*, 249: 4–15.

Kong Yan, Wang Baoyun, Yang Kun, Wei Bao, Zheng Lu, Zhang Zhuhong. 2018. Analysis on the spatial–temporal distribution and the typical areas disaster–pregnant features of debris flows in Yunnan Province[J]. *Journal of Yunnan Normal University*, 38(6): 55–63 (in Chinese with English abstract).

Kong Yan, Wang Baoyun, Wang Naiqiang, Wei Bao. 2019. Debris flow risk assessment in the alpine canyon of western Yunnan: A case study in Nujiang Lisu autonomous prefecture[J]. *Journal of Yunnan Normal University*, 39(3): 63–70 (in Chinese with English abstract).

Li Guangtao. 2008. Tectonics Activity of the Nujiang Fault Zone in Quaternary in the Southern Yunnan[D]. Beijing: Institute of Earthquake forecasting, CEA, 1–74 (in Chinese with English abstract).

Li S, Yin C Q, Guilmette C, Ding L, Zhang J. 2019. Birth and demise of the Bangong–Nujiang Tethyan Ocean: A review from the Gerze area of Central Tibet[J]. *Earth–Science Reviews* 198: 102907.

Liu C X, Wang B Y. 2024. Gully–type debris flow susceptibility assessment based on a multi–channel multi–scale residual network fusing multi–source data: A case study of Nujiang Prefecture[J]. *All Earth*, 36: 1–18.

Liu Suxia, Ding Wenhao, Mo Xingguo, Wang Sheng, Liu Changming, Luo Xian, He Daming. 2017. Climate change and its impact on runoff in Lancang and Nujiang River basin[J]. *Climate Change Research*, 13(4): 356–365 (in Chinese with English abstract).

Liu X L, Yu C J, Shi P J, Fang W H. 2012. Debris flow and landslide hazard mapping and risk analysis in China[J]. *Frontiers of Earth Science*, 6(3): 306–313.

Liu Xinyou, Li Zishun, Liu Yongxing, Xie Feifan. 2017. Analysis of temporal and spatial variation of rainfall in Yunnan Province of Nujiang River basin[J]. *Yangtze River*, 46(18): 39–44 (in Chinese with English abstract).

Simoni A, Mammoliti M, Berti M. 2011. Uncertainty of debris flow mobility relationships and its influence on the prediction of inundated areas[J]. *Geomorphology*. 132(3/4): 249–259.

- Su Pengcheng, Wei Fangqiang, Xie Tao. 2012. Causal analysis of debris flow on August 18, 2010 in Gongshan, Yunnan province and its harm to the development and utilization of mineral resources[J]. *Resource Science*, 34(7): 1248–1256 (in Chinese with English abstract).
- Tang Chuan, Zhu Jing. 2003. Study on Debris Flow and Landslide in Yunnan Province[M]. Beijing: The Commercial Press, 14–25 (in Chinese).
- Tang Chuan. 2005. Susceptibility spatial analysis of debris flows in Nujiang River basin of Yunnan[J]. *Geological Research*, 24(2): 178–185 (in Chinese with English abstract).
- Tang Chuan, Liang Jingtao. 2008. Characteristics of debris flows in Beichuan epicenter of the Wenchuan earthquake triggered by rainstorm on September 24 2008[J]. *Journal of Engineering Geology*, 16(6): 751–758 (in Chinese with English abstract).
- Tang Y J, Xu Z M, Yang T Q, Zhou ZH, Wang K, Ren Z, Yang K, Tian L. 2018. Impacts of small woody debris on slurring, persistence, and propagation in a low-gradient channel of the Dongyuege debris flow in Nu river, southwest China[J]. *Landslides*, 15: 2279–2293.
- Tie Yongbo, Ruan Chongfei, Yang Shun, Zeng Bo, Zhang Hongbing, Li Fuqiang, Sun Jinfeng, He Zhenqiang. 2021. Characteristics and mechanism of geological disasters induced by “5.25” Rainstorm in Gongshan County of Yunnan Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 41(2): 10–24 (in Chinese with English abstract).
- Wan Feipeng, Yang Weimin, Qiu Zhanlin, Xiang Lingzhi, Qu Jingkai, Wu Jihuan, Zhang Tiantian. 2023. Disaster mechanism and evolution of Nagune Gully landslide–debris flow disaster chain in Minxian County, Gansu Province[J]. *Geology in China*, 50(3): 911–925 (in Chinese with English abstract).
- Wang Gaofeng, Gao Youlong, Yao Yahui, Tian Yuntao, Xu Youning, Sun Xiujian, Li Ruidong, He Yuanxiao, Deng Bing, Ye Zhennan, Chen Zongliang, Guo Ning. 2022. Prediction model of potential debris flow hazard of rainfall type in Bailong River Basin, Gansu Province[J]. *Geology in China*, 49(3): 732–748 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jinfeng, Xu Chengdong. 2017. Geodetector: Principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 72(1): 116–134 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yanzhao, Wang Enning, Shen Zhengkang, Wang Min, Gan Weijun, Qiao Xuejun, Meng Guojie, Li Tieming, Tao Wei, Yang Yonglin, Cheng Jia, Li Peng. 2018. Constrained inversion of present–day activity rates of major ruptures in Sichuan and Yunnan based on GPS data[J]. *Science China Earth Science*, 38(5): 582–597 (in Chinese).
- Xu Huijuan. 2016. Study on Debris–flow Activity Patterns and Hazard Driving Forces of the Alpine Valley Area in Nujiang River Basin[D]. Kunming: Yunnan University, 1–112 (in Chinese with English abstract).
- Xu F S, Wang B Y. 2022. Debris flow susceptibility mapping in mountainous area based on multi—source data fusion and CNN model: Taking Nujiang Prefecture, China as an example[J]. *International Journal of Digital Earth*, 15: 1,1966–1988.
- Yang F, Lu H, Yang K, Huang G W, Li Y S, Wang W, Lu P, Tian F Q, Huang Y G. 2021. Hydrological characteristics and changes in the Nu–Salween River basin revealed with model–based reconstructed data[J]. *Journal of Mountain Science*, 18: 2982–3002.
- Yang Shun, She Tao, Zhang Yong, Liu Jiankang. 2021. The research on the hazard risk of blocking river in Nujiang great valley, Yunnan Province[J]. *Geological Review*, 67(S1): 25–27 (in Chinese).
- Yang Yingdong, Tang Pei, Xiao Huazong, Yan Xiangsheng. 2017. Preliminary analysis on relationships between geo–hazards and river systems of Yunnan Province[J]. *Journal of Catastrophology*, 32(3): 36–39 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jiajia, Chen Long, Li Yuanling, Liu Mingsheng, Shi Shengwei, Yi Jingsong, Zhang Wen, Zhang Shilin, Sun Jinhui, Yang Dong, Xian Jieliang, Cai Jiajun. 2023. Development characteristics and controlling factors of coseismic geohazards triggered by the Luding MS6.8 earthquake occurred on September 5, 2022[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 45(2): 167–178 (in Chinese with English abstract).
- Zhang W C, Xiao Z N, Zheng J M, Ren J Z. 2007. Characteristics of the Nujiang River runoff for a long term and its response to climate change[J]. *Chinese Science Bulletin*, 52(2): 156–163.
- Zhou Z H, Ren Z, Wang K, Yang K, Tang Y J, Tian L, Xu Z M, 2018. Effect of excess pore pressure on the long runout of debris flows over low gradient channels: A case study of the Dongyuege debris flow in Nu River, China[J]. *Geomorphology*, 308: 40–53.

附中文参考文献

- 崔鹏, 陈晓清, 张建强, 杨宗信, 游勇, 范建容, 苏凤环, 孔应德, 朱兴华. 2013. “4·20”芦山 7.0 级地震次生山地灾害活动特征与趋势[J]. *山地学报*, 31(3): 257–265.
- 樊辉, 何大明. 2012. 怒江流域气候特征及其变化趋势[J]. *地理学报*, 67(5): 621–630.
- 冯倩倩. 2020. 怒江丙中洛–匹河乡河段泥石流生成环境及其灾生趋势研究[D]. 成都: 成都理工大学, 1–122.
- 郭荣芬, 罗燕, 唐盛. 2015. “2014.5.10 云南怒江州福贡泥石流成因分析”[J]. *灾害学*, 30(1): 102–107.
- 洪美玲, 何士华. 2019. 1961–2010 年怒江流域降雨时空变化[J]. *水土保持研究*, 26(3): 248–252.
- 孔艳, 王保云, 杨昆, 魏保, 郑璐, 张祝鸿. 2018. 云南省泥石流灾害时空分布规律及典型区域孕灾特点分析[J]. *云南师范大学学报(自然科学版)*, 38(6): 55–63.
- 孔艳, 王保云, 王乃强, 魏保. 2019. 滇西高山峡谷区泥石流危险性评价: 以怒江傈僳族自治州为例[J]. *云南师范大学学报(自然科学版)*, 39(3): 63–70.
- 李光涛. 2008. 滇西南怒江断裂带第四纪以来的构造活动性[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所, 1–74.

- 刘苏峡, 丁文浩, 莫兴国, 王盛, 刘昌明, 罗贤, 何大明. 2017. 澜沧江和怒江流域的气候变化及其对径流的影响[J]. 气候变化研究进展, 13(4): 356-365.
- 刘新有, 李自顺, 刘永兴, 谢飞帆. 2017. 怒江流域云南区段降雨时空变化分析[J]. 人民长江, 46(18): 39-44.
- 苏鹏程, 韦方强, 谢涛. 2012. 云南贡山 8.18 特大泥石流成因及其对矿产资源开发的危害[J]. 资源科学, 34(7): 1248-1256.
- 唐川, 朱静. 2003. 云南滑坡泥石流研究[M]. 北京: 商务印书馆, 14-25.
- 唐川. 2005. 云南怒江流域泥石流敏感性空间分析[J]. 地理研究, 24(2): 178-185.
- 唐川, 梁京涛. 2008. 汶川震区北川 9.24 暴雨泥石流特征研究[J]. 工程地质学报, 16(6): 751-758.
- 铁永波, 阮崇飞, 杨顺, 曾波, 张红兵, 李富强, 孙金峰, 何振强. 2021. 云南省贡山县“5.25”暴雨诱发地质灾害的特征与形成机制[J]. 水土保持通报, 41(2): 10-24.
- 万飞鹏, 杨为民, 邱占林, 向灵芝, 渠敬凯, 吴季寰, 张田田. 2023. 甘肃岷县纳古呢沟滑坡-泥石流灾害链成灾机制及其演化[J]. 中国地质, 50(3): 911-925.
- 王高峰, 高幼龙, 姚亚辉, 田运涛, 徐友宁, 孙秀娟, 李瑞冬, 何元宵, 邓兵, 叶振南, 陈宗良, 郭宁. 2022. 甘肃省白龙江流域降雨型潜在泥石流危险性预报模型[J]. 中国地质, 49(3): 732-748.
- 王劲峰, 徐成东. 2017. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 72(1): 116-134.
- 王闯昭, 王恩宁, 沈正康, 王敏, 甘卫军, 乔学军, 孟国杰, 李铁明, 陶玮, 杨永林, 程佳, 李鹏. 2008. 基于 GPS 资料约束反演川滇地区主要断裂现今活动速率[J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 38(5): 582-597.
- 徐慧娟. 2016. 怒江流域高山峡谷区泥石流活动规律及成灾驱动力研究[D]. 昆明: 云南大学, 1-112.
- 杨顺, 余涛, 张勇, 刘建康. 2021. 怒江云南段高山峡谷区泥石流堵河危险研究[J]. 地质论评, 67 (S1): 25-27.
- 杨迎冬, 汤沛, 肖华宗, 晏祥省. 2017. 云南省地质灾害与水系关系初步分析[J]. 灾害学, 32(3): 36-39.
- 张佳佳, 陈龙, 李元灵, 刘民生, 石胜伟, 易靖松, 张文, 张世林, 孙金辉, 杨栋, 鲜杰良, 蔡佳君. 2023. 2022 年 9 月 5 日泸定 M_S6.8 地震的同震地质灾害发育特征及主控因素分析[J]. 地震学报, 45(2): 167-178.
- 中国地震台网. 2023. 中国历史地震目录[EB/OL]. <https://www.ceic.ac.cn/history>.