

doi: 10.12029/gc20220329004

冉涛, 徐如阁, 周洪福, 张景华, 陈浩, 王羽珂, 孙洁, 崔炎宗. 2024. 雅砻江流域深切河谷区滑坡类型、成因及分布规律——以子拖西—麻郎错河段为例[J]. 中国地质, 51(2): 511–524.

Ran Tao, Xu Ruge, Zhou Hongfu, Zhang Jinghua, Chen Hao, Wang Yuke, Sun Jie, Cui Yanzong. 2024. Type, formation mechanism and distribution regularity of landslides in the deeply incised valley area of Yalong River Basin——A case study of Zituoxi–Malangcuo river section[J]. Geology in China, 51(2): 511–524(in Chinese with English abstract).

雅砻江流域深切河谷区滑坡类型、成因及分布规律 ——以子拖西—麻郎错河段为例

冉涛¹, 徐如阁¹, 周洪福^{1,2}, 张景华¹, 陈浩¹, 王羽珂¹, 孙洁¹, 崔炎宗³

(1. 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; 2. 山东科技大学地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 3. 华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州 450045)

摘要:【研究目的】雅砻江流域是中国西部重要的林牧业基地、水电能源基地和少数民族聚居区,开展流域内的滑坡成因和分布规律研究,对于制定科学的防灾减灾策略、保障经济社会稳定发展具有重要意义。【研究方法】以雅砻江中游深切河谷区子拖西—麻郎错河段为研究区,通过高分辨率卫星遥感解译、InSAR 分析、结合现场调查获取滑坡基础数据;采用工程地质分析方法总结分析典型的滑坡类型及其成因机制;利用 GIS 空间分析和统计方法,揭示滑坡的分布规律及发育的优势范围。【研究结果】(1)研究区内共查明滑坡 606 处,其中面积 $10^4\sim 10^5\text{ m}^2$ 的滑坡数量最多,约占总数的 60%;面积 $10^3\sim 10^4\text{ m}^2$ 和面积 $10^5\sim 10^6\text{ m}^2$ 的滑坡数量相当,各约占总数的 20%;(2)根据主控诱发因素将滑坡划分为降雨诱发型、构造控制型、开挖诱发型、河流侵蚀型和蓄水诱发型等 5 种主要类型;降雨和蓄水对岩土体强度的弱化效应、断裂构造对岩体结构及其力学性质的劣化效应、开挖和河流侵蚀对斜坡前缘抗滑支撑作用的解除效应等是导致滑坡形成的关键机理;(3)海拔高程 2500~3500 m、坡度 $15^\circ\sim 35^\circ$ 、坡向 NE-E 和 S-W 是滑坡发育的优势地形范围;(4)由薄层状板岩、粉砂质板岩构成的软变质岩组是滑坡发育的优势岩组,花岗岩、石英闪长岩等坚硬侵入岩构成的岩浆岩组中滑坡最不发育;(5)康都断层、千杯尼玛断层、祝桑断层、唐岗断层、霍泽扎日断层和涅达断层这 6 条断层对滑坡的影响不显著,研究区下游麻子石断层、程章断层、然公断层、鸡打—米龙—木灰断层两侧及其交汇部位滑坡发育最为密集;(6)滑坡发育分布与河流水系距离之间呈明显的负相关性,距河流水系 0~0.5 km 是滑坡发育的优势距离,宏观上滑坡沿着河谷成带状集中分布。【结论】研究成果可以为认识雅砻江深切河谷区滑坡的成因和规律,防控流域链式灾害风险提供重要的科学依据。

关键词: 雅砻江流域; 滑坡; 遥感解译; 合成孔径雷达干涉测量; 成因机制; 空间分布; 地质灾害调查工程

创新点: 从主控诱发因素角度总结分析了雅砻江深切河谷区典型的滑坡类型及其成因机制;系统分析了雅砻江深切河谷区滑坡的空间分布规律及发育的优势范围。

中图分类号: P642.22 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)02-0511-14

Type, formation mechanism and distribution regularity of landslides in the deeply incised valley area of Yalong River Basin——A case study of Zituoxi–Malangcuo river section

收稿日期: 2022-03-29; 改回日期: 2022-07-20

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20221811, DD20211379)和第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0904)联合资助。

作者简介: 冉涛, 男, 1985 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事地质灾害与工程地质调查研究; E-mail: 272173314@qq.com。

通讯作者: 徐如阁, 男, 1985 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质灾害与工程地质调查研究; E-mail: 297065951@qq.com。

RAN Tao¹, XU Ruge¹, ZHOU Hongfu^{1,2}, ZHANG Jinghua¹, CHEN Hao¹, WANG Yuke¹, SUN Jie¹,
CUI Yanzong³

(1. Chengdu Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Southwest China), Chengdu 610218, Sichuan, China; 2. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China; 3. College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, Henan, China)

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

[Objective] The Yalong River Basin is an important base for forestry, animal husbandry, hydropower, energy, and minority communities in western China. It is of great significance to study the causes and distribution of landslides in the Yalong River Basin to formulate scientific disaster prevention and mitigation strategies and ensure stable economic and societal development. **[Methods]** The Zituoxi–Malanguo river section in a deeply incised valley area of the Yalong River Basin was used as the study area. Basic landslide data were obtained through high-resolution satellite remote sensing interpretation, InSAR analysis, and field investigation. The typical landslide types and their formation mechanisms were summarized and analyzed using an engineering geology analysis method, and the distribution regularity and dominant development range of landslides were revealed by means of GIS spatial analysis and statistical methods. **[Results]** (1) A total of 606 landslides were identified in the study area, among which the number of landslides with an area of 10^4 – 10^5 square meters was the most, accounting for approximately 60 percent of the total, and the number of landslides with areas of 10^3 – 10^4 and 10^5 – 10^6 square meters were essentially equal, accounting for approximately 20 percent of the total respectively; (2) Landslides were divided into five main types, i.e. rainfall-induced type, structure-controlled type, excavation-induced type, river erosion type and water impoundment-induced type, according to the main controlling factors of landslides. The key mechanism responsible for the occurrence of landslides mainly including the weakening effect of rock and soil strength by rainfall and impounded water, the deterioration effect of rock structures and its mechanical properties by fault structures, and the release effect of the anti-sliding and supporting action at the front of slope caused by excavation and river erosion; (3) The dominant terrain ranges for landslide development were of elevation 2500–3500 m, slope angle 15° – 35° , and slope aspect NE–E and S–W; (4) The soft metamorphic rock group composed of thin-bedded slate and silty slate was the dominant lithological group for development of landslides, while landslides in the magmatic rock group consisted of hard intrusive rocks such as granite and quartz diorite was the least; (5) the Kangdu fault, Qianbeinima fault, Zhusang fault, Tanggang fault, Huozezhari fault and Nieda fault were found having less impact on the development of landslides, however, landslides developed densely at both sides of the Mazishi fault, Chengzhang fault, Rangong fault and Jida–Milong–Muhui fault and at zones where these faults intersected in the downstream of the study area; (6) A negative correlation between the distribution of landslides and the distance to the river systems can be obviously seen, and a distance to the river systems of 0–0.5 km was found to be the dominant distance range of landslide development. The landslides were macroscopically concentrated along river valleys such as belts. **[Conclusions]** The research results provide a significant scientific basis for understanding the causes and regularities of landslides in the deep incised valley of the Yalong River, and preventing and controlling the risk of geohazard chains in the river basin.

Key words: Yalong River basin; landslide; remote sensing interpretation; InSAR; formation mechanism; spatial distribution; geological hazard survey engineering

Highlights: The typical types of landslides and their formation mechanisms in the deeply incised valley area of the Yalong River Basin were summarized and analyzed from the perspective of the main controlling factors of landslides, and the spatial distribution regularity and dominant development range of landslides in the deeply incised valley area of the Yalong River Basin were systematically analyzed.

About the first author: RAN Tao, male, born in 1985, doctor, senior engineer, mainly engaged in survey and research on geological hazards and engineering geology; E-mail: 272173314@qq.com.

About the corresponding author: XU Ruge, male, born in 1985, master, senior engineer, mainly engaged in survey and research on geological hazards and engineering geology; E-mail: 297065951@qq.com.

Fund support: Supported by the projects of China Geological Survey (No.DD20221811, No.DD20211379), and the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research (No.2019QZKK0904).

1 引言

雅砻江发源于青海省称多县巴颜喀拉山南麓,流域地跨青海、四川、云南 3 省 29 县市,全长 1571 km,流域面积 $13.6 \times 10^4 \text{ km}^2$,是金沙江最大的支流,也是横断山区南北向的主要水系之一。雅砻江流域地理上位于青藏高原东缘向四川盆地过渡区域,跨越了中国地势第一、二级阶梯,河道比降大,河源至河口总落差达 3192 m,因此是中国水能资源最丰富的河流之一,全流域水能理论蕴藏量 $3840 \times 10^4 \text{ kW}$ 。

受中新世以来青藏高原持续强烈隆升的影响(彭建兵等,2004;潘桂棠等,2020),雅砻江快速下切,在中下游河段形成典型的中—高山深切峡谷地貌,境内山高坡陡、谷深流急,断裂发育、地震频繁,风化强烈、岩体破碎,地质环境十分脆弱,加之近年来人类工程活动日益频繁,导致崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害频发,造成严重危害(丁俊等,2005;王德伟等,2017)。1967 年 6 月 8 日,雅江县波斯河乡雨日村西南约 1 km 的雅砻江右岸唐古栋发生大规模山体滑坡,约 $6800 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的滑体冲入雅砻江,在左右两岸分别形成高度达 355 m 和 175 m 的巨型滑坡坝,溃坝洪水致使下游河水位陡涨 40 余米,影响范围波及至重庆市(冷伦,2000;黄润秋,2007)。1993 年 7 月,雅江县城东危岩体垮塌,阻断川藏公路 15 天;紧接着 1994 年雨季,城北滑坡又阻断川藏公路 3 天(郑万模等,1997)。2001 年 8 月 26 日,雅江县城东隧道口发生岩质滑坡,造成 3 人死亡,4 人受伤,部分房屋被推入雅砻江中(倪化勇等,2015)。

雅砻江流域是中国西部重要的林牧业基地和水电能源基地,同时也是重要的少数民族聚居区,因此,开展流域内的地质灾害调查研究工作,对于保障经济社会稳定发展具有重要意义。为此,一些学者从地质灾害区域性规律、灾害隐患早期识别、重大单体灾害特征机理等方面开展了相关研究工作:常晓军等(2009)基于“县(市)地质灾害调查与区划”工作成果,对雅砻江流域地质灾害发育分布特征及成灾机理进行了分析。梁瑞锋等(2016)采用遥感解译、地质测绘和空间分析等手段,研究了雅

砻江流域卡拉段地质灾害的分布特征及影响因素。戴可人等(2020)利用时间序列 InSAR 技术在雅砻江流域雅江—木里段高山峡谷区成功探测到 8 处滑坡隐患,并探讨了几何畸变因素对高山峡谷区滑坡隐患早期识别技术的影响。倪化勇等(2013)通过对雅江县祝桑景区泥石流灾害的实地调查和堆积物颗粒分析,研究了高寒高海拔山原区沟谷型泥石流的特征与成因。易志坚等(2016)采用底摩擦试验和离散元数值模拟对雅砻江唐古栋滑坡的成因机制进行了深入研究。

虽然前期围绕雅砻江流域的地质灾害问题已开展了一些调查研究工作,然而,针对雅砻江流域深切河谷区滑坡成因与发育分布规律的研究却鲜有文献资料报道。近年来,发生在青藏高原大江大河的高位远程崩滑—堵江—溃决洪水灾害链,如 2000 年 4 月 9 日西藏波密贡贡滑坡(殷跃平,2000; Xu et al., 2012)、2018 年 10 月 11 日和 11 月 3 日金沙江白格滑坡(许强等,2018; 邓建辉等,2019; 张永双等,2020)、2018 年 10 月 17 日雅鲁藏布江色东普沟崩滑—碎屑流(刘传正等,2019)等,让地质工作者更加深刻地意识到开展流域性地质灾害规律研究、防控链式灾害风险的重要性(戴福初和邓建辉,2020)。

本文以雅砻江中游深切河谷区子拖西—麻郎错河段为研究区,采用高分辨率卫星遥感解译、InSAR 分析、现场调查验证、GIS 空间分析等综合手段,总结区内典型的滑坡类型,分析不同类型滑坡的成因机制,揭示滑坡的空间分布规律和发育的优势范围,从而为制定科学的防灾减灾策略提供参考依据。

2 研究区地理地质背景

2.1 交通地理

研究区行政上位于四川省甘孜藏族自治州,北起新龙县子拖西乡,南至雅江县麻郎错镇;地理上位于青藏高原东缘、雅砻江中游,地理坐标: $29^{\circ}41'32.29''\text{N} \sim 30^{\circ}37'10.54''\text{N}$, $100^{\circ}24'24.76''\text{E} \sim 101^{\circ}19'15.97''\text{E}$,面积 3918.35 km^2 。雅砻江在该段总体为 NW—SE 流向,干流长度 158.128 km(图 1)。

2.2 滑坡孕灾地质背景

研究区地势总体中间低、两侧高,最低海拔约 2400 m,最高超过 4800 m。雅砻江及其支流所在的

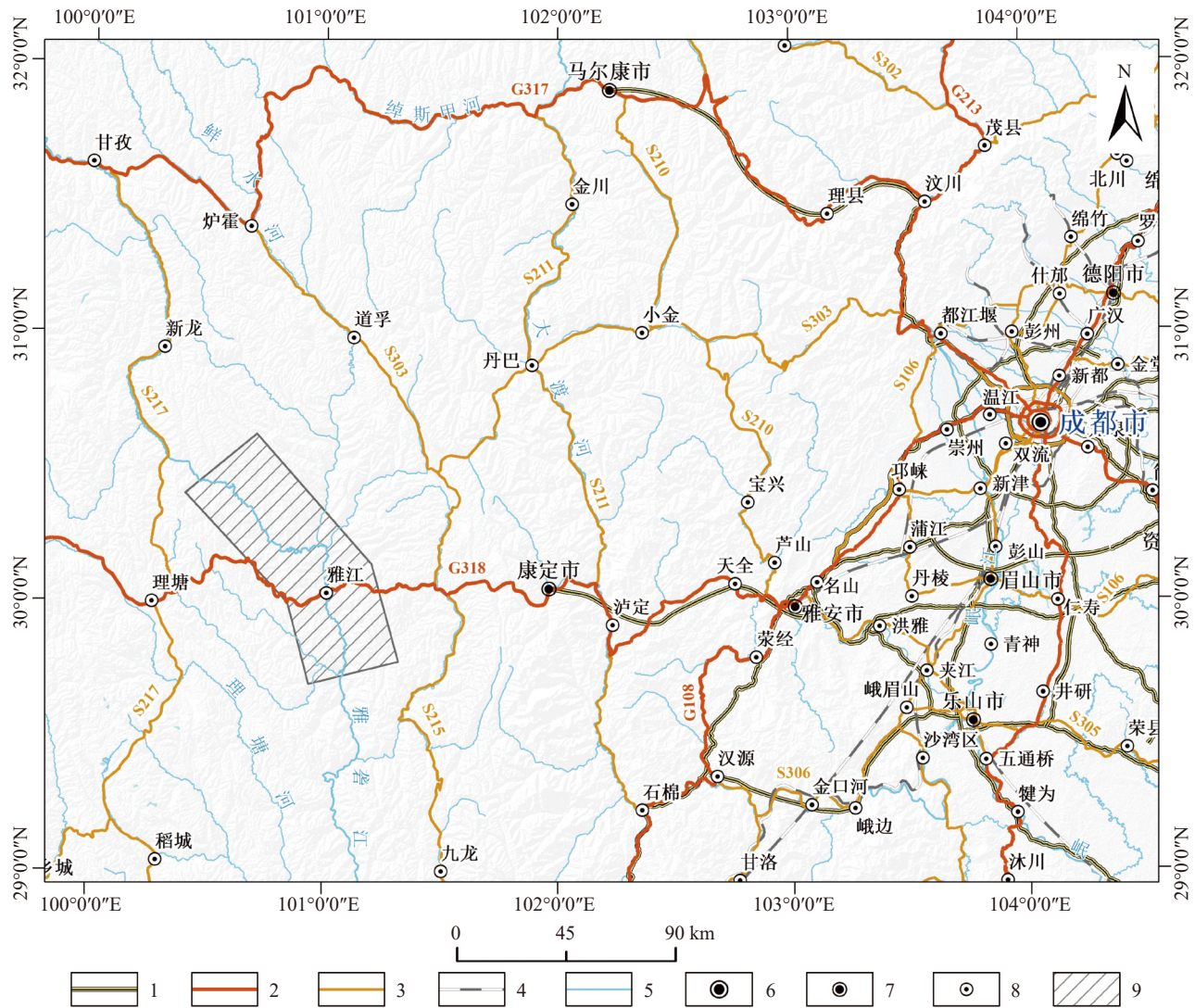


图1 研究区交通位置图

1—高速公路; 2—国道; 3—省道; 4—铁路; 5—河流; 6—省会; 7—地级市或自治州行政中心; 8—县级行政中心; 9—研究区

Fig.1 Traffic location map of the study area

1—Expressway; 2—National highway; 3—Provincial highway; 4—Railway; 5—River; 6—Provincial capital; 7—Prefecture-level city or administrative center of autonomous prefecture; 8—County-level administrative center; 9—Study area

河谷地带为典型的中—高山深切峡谷地貌, 海拔高程相对较低, 河谷断面呈“V”字形, 岸坡坡度一般 $35^{\circ}\sim 60^{\circ}$, 相对高差普遍大于 1000 m。高山顶部为雪峰和地势平缓开阔的丘状高原, 高程大于 4000 m。

区内出露的地层主要包括三叠系变质岩、印支—燕山期岩浆岩以及第四系松散堆积物(图2)。其中, 三叠系分布最广, 岩性以层状的板岩、变质砂岩为主; 岩浆岩在研究区下游出露较多, 岩性主要为花岗闪长岩($\gamma\delta_5^{1b}$)、石英闪长岩($\delta\delta_5$)等侵入岩类; 第四系包括分布在斜坡地带的残坡积(Q_4^{el+dl})和崩

滑堆积($Q_4^{col+del}$)、河谷地带的冲洪积(Q_4^{al+pl})以及沟口地带的泥石流堆积(Q_4^{set})。

区域构造上, 研究区位于松潘—甘孜褶皱系巴颜喀拉印支冒地槽褶皱带雅江复向斜中段核心部位, 发育的断裂构造主要有 NW—SE 向的康都断层(F2)、千杯尼玛断层(F4)、霍泽扎日断层(F15)、然公断层(F9); NE—SW 向的唐岗断层(F14); 以及 SN 向的米龙—木灰—鸡打断层(F10)等(图2)。

3 滑坡数据来源

研究区滑坡数据是通过高分辨率卫星遥感影

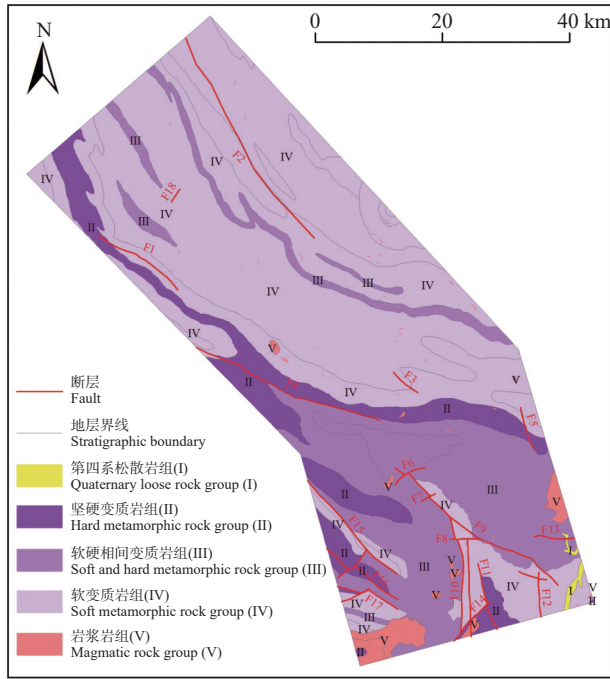


图 2 研究区滑坡孕灾地质背景图

Fig.2 Background map of landslides in the study area

像解译、干涉雷达测量分析(InSAR)、结合地面调查验证等手段综合获取。滑坡遥感解译主要是依据滑坡特有的地形地貌特征和遥感影像的色调、阴影、纹理等图像特征对其进行识别(王治华, 2012)。对于影像特征不太明显、但是又正在发生变形的潜在滑坡区域, 先是利用 InSAR 技术探测出地表形变区域, 再结合遥感影像特征, 对其进行综合识别判定(陆会燕等, 2019; 刘星洪等, 2020)。因此, 在获取研究区滑坡数据的过程中, 光学遥感解译和 InSAR 分析两种手段相辅相成、互为补充。

3.1 滑坡遥感解译

选择国产高分六号(GF-6)卫星遥感数据作为滑坡解译的数据源, 其全色数据空间分辨率为 2 m, 多光谱数据空间分辨率为 8 m。本次解译共选择多光谱数据 3 景, 成像时间分别为 2020 年 1 月 1 日、2020 年 10 月 26 日和 2021 年 1 月 16 日, 云、雪覆盖率小于 5%, 影像清晰, 可以满足解译要求。

具体的解译流程为: 首先, 在遥感影像预处理的基础上, 建立滑坡解译标志, 在 ArcGIS 平台上采用人工目视解译的方法进行初步解译; 然后, 结合现场调查验证, 修正完善解译标志; 最后, 进行系统

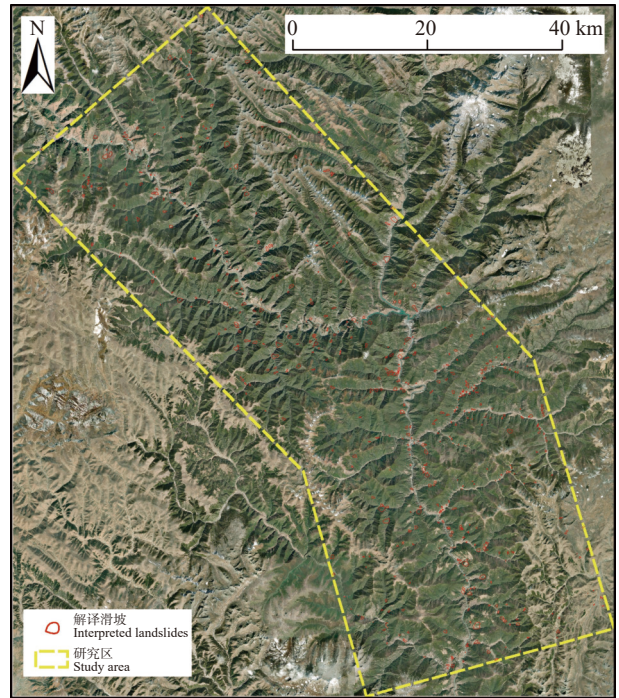


图 3 研究区滑坡遥感解译图

Fig.3 Remote sensing interpretation map of landslides in the study area

的详细解译, 并编制滑坡遥感解译成果图件。综合考虑遥感影像的分辨率以及研究目的, 本次滑坡解译的最小尺度为 1000 m², 共解译滑坡 592 处(图 3)。

3.2 滑坡隐患综合识别

研究区地形陡峻, 植被茂密, 综合考虑到数据的相干性、时间序列的连续性、覆盖范围的全面性以及干涉雷达测量技术的需求性等因素, 采用短基线集干涉雷达测量技术(SBAS-InSAR)进行研究区地表形变提取。数据方面选择欧空局 Sentinel-1A 卫星 C 波段干涉宽幅模式 SAR 数据, 其方位向分辨率为 13.9 m, 距离向分辨率为 2.3 m, 时间范围从 2019 年 1 月 2 日至 2020 年 4 月 2 日, 共计 38 景。

基于 SBAS-InSAR 技术解算出研究区地表在雷达视线向的年平均形变速率为 -72.40~36.47 mm/a(图 4)。随后, 将地表形变分析结果叠加在光学遥感影像之上, 综合识别出滑坡隐患 14 处(PL01~PL14)。

3.3 滑坡数据

基于上述遥感解译和 InSAR 分析, 在研究区共解译滑坡 606 处(图 5), 经现场调查验证表明, 解译准确率超过 85%。因此, 获取的滑坡数据能够客观

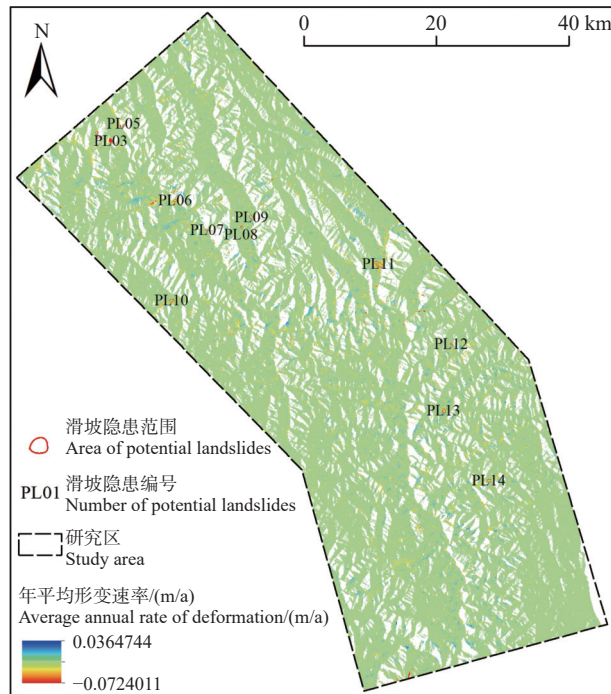


图4 研究区地表年平均形变速率及识别的滑坡隐患
注:靠近雷达方向形变为正(蓝色),远离雷达方向形变为负(红色)

Fig.4 Average annual ground surface deformation rate and identified potential landslides in the study area

Note: Deformation closing to the radar is positive (blue), deformation away from the radar is negative (red)

反映其在研究区内的发育分布规律。

4 滑坡类型及其成因机制

滑坡的发生通常受到地形、地质、降雨、地震、人类工程活动等多种因素影响,因而其发育特征和成因机制各有差异。本文从滑坡的主控诱发因素入手,将研究区的滑坡划分为降雨诱发型、构造控制型、开挖诱发型、河流侵蚀型和蓄水诱发型5种主要类型,并分别论述每种类型滑坡的形成机制。需要说明的是,研究区内某些滑坡可能为地震作用所触发,但由于缺少准确的历史地震资料,因而在分类时未考虑地震诱发类型。

4.1 降雨诱发型

研究区降雨主要集中在每年5—9月,雨季是滑坡的高发期。研究区斜坡地带广泛分布第四系残坡积、崩坡积松散堆积物,为堆积层滑坡的形成提供了物源。雨水一方面增加土体重度,增大下滑力;另一方面,雨水入渗引起地下水位抬升,土体孔隙水压力增大,基质吸力减小,导致土体强度降低

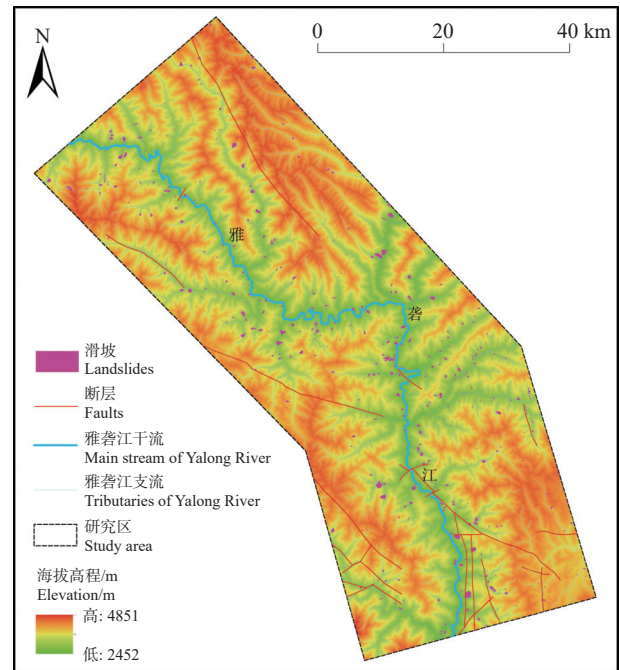


图5 研究区滑坡空间分布图

Fig.5 Spatial distribution of landslides in the study area

形成滑坡(金艳丽和戴福初,2007)。图6a为典型的降雨诱发的残坡积层滑坡。研究区的岩质斜坡节理裂隙普遍较发育,雨水沿裂隙渗流,一方面产生动、静水压力推动、拖拽岩体下滑(刘才华等,2005);另一方面软化下伏软岩或泥化夹层,使其演化成为岩质滑坡的滑带(卢海峰等,2010)。

4.2 构造控制型

研究区地处青藏高原东缘的川西地区,区域上构造变形复杂,断裂活动强烈(张培震,2008;杨志华等,2022)。遥感和调查显示,研究区的滑坡沿部分断裂构造密集发育。由于断层错动对岩体产生的挤压、剪切等力学作用,导致岩体结构破碎,完整性和力学强度降低,风化作用更容易进行(范雷和张琪,2016);断层的突然错动往往诱发强烈地震,使断裂附近的山体成为震裂松动山体(黄润秋,2009;张永双等,2016),大大降低斜坡稳定性。图6b为典型的断裂构造控制型滑坡,该滑坡位于然公断层与麻子石断层交汇处附近,岩体节理发育,结构破碎,在风化和重力作用下形成碎裂结构岩质滑坡,该区段的滑坡具有群集性特征。

4.3 开挖诱发型

随着研究区内经济社会的发展,切坡建房和切坡筑路等人类工程活动日益频繁。调查显示,区内



图 6 研究区典型滑坡类型
Fig.6 Representative types of landslides in the study area

大量的新生滑坡和古/老滑坡复活是由开挖所诱发。开挖诱发滑坡的机理主要包括: 一是减小了前缘抗滑段长度, 导致斜坡抗滑力降低(陈春利等, 2014); 二是导致潜在滑面或顺坡向的优势结构面在坡面出露, 使滑体具备下滑的临空条件(冉涛等, 2020)。图 6c 为切坡建房诱发的鲜水河库区杜米村移民安置点滑坡, 切坡后斜坡前缘发生大面积滑塌, 造成在建民房倾覆破坏; 图 6d 为切坡筑路诱发的雅洼公路边坡楔形岩体滑坡, 开挖导致边坡中发育的两组优势结构面出露, 楔形岩体在重力作用下沿两组结构面交线发生滑动破坏。

4.4 河流侵蚀型

研究区河流水系发达, 受地形高差影响, 河道纵坡降较大, 河流对岸坡的侵蚀作用强烈。一方面造成河谷加深、岸坡变陡, 诱发岸坡顶部产生卸荷拉裂变形(Azañón et al., 2005); 另一方面河水持续冲刷坡脚, 致使岸坡下部岩土体流失, 上部坡体由于失去支撑而失稳破坏。图 6e 为典型的河流侵蚀型滑坡, 该滑坡位于雅砻江支流绒巴沟右岸, 滑体成分为强风化碎裂板岩, 由于河水持续冲刷坡脚, 下部板岩逐渐被软化、掏蚀, 坡体上部由于支撑不足形成弧形圈椅状错坎, 最终在重力作用下形成滑坡。

4.5 蓄水诱发型

位于研究区中部的两河口特大型水电站自建成蓄水以来, 库区内多处古/老滑坡堆积体发生了复活变形破坏。图 6f 为蓄水诱发的雅砻江库区索依村老滑坡堆积体前缘复活, 随着库水位上升, 滑坡前缘陆续出现多条横向拉张裂缝和错坎, 前缘公路内侧发生局部滑塌。蓄水诱发滑坡的机理主要包括: 一是增大了滑体前缘容重; 二是增大了滑体和滑带孔隙水压力, 产生底部浮托力; 三是浸泡、软化滑带, 弱化其抗剪强度(文宝萍等, 2008; 肖诗荣等, 2013)。

5 滑坡发育分布规律

5.1 滑坡规模

滑坡规模通常是按照滑坡堆积体方量进行划分, 由于研究区滑坡数量众多, 难以全面调查和估算其体积, 因此采用滑坡面积来表征滑坡规模, 统计结果见表 1。可以看出, 研究区面积为 $10^4 \sim 10^5 \text{ m}^2$ 的滑坡数量最多, 约占滑坡总数的 60%; 面积为

表 1 滑坡面积统计结果

滑体面积/ m^2	滑体数量/处	占比/%
$10^3 \sim 10^4$	122	20.13
$10^4 \sim 10^5$	363	59.90
$10^5 \sim 10^6$	121	19.97

$10^3\sim 10^4\text{ m}^2$ 和面积为 $10^5\sim 10^6\text{ m}^2$ 的滑坡数量大致相当,各约占滑坡总数的 20%。最大滑坡面积为 837400 m^2 ,最小滑坡面积为 1300 m^2 。

5.2 滑坡分布与各影响因素的关系

遥感解译和现场调查显示,研究区滑坡的形成与多种内外因素相关,本文选取地形地貌、地层岩组、断裂构造和河流水系 4 个主要影响因素,通过分析滑坡与各因素之间的空间关系来探讨滑坡的发育分布规律。需要指出的是,由于缺少详细的降雨资料及降雨型滑坡数据,因而未对降雨因素进行分析。

具体分析方法为:首先,利用 GIS 空间分析功能,求取每处滑坡的坐标位置与平面面积;利用分辨率 12.5 m 的数字高程模型(DEM)生成研究区的海拔高程、坡度和坡向等栅格图层;利用包含研究区的 4 幅 $1:20$ 万区域地质图(禾尼幅、康定幅、理塘幅、贡嘎幅)整编得到研究区的地质岩性、断裂构造和河流水系等矢量图层,然后,将地质岩性分组并栅格化得到岩组栅格图层,对断裂构造和河流水系分别进行缓冲区分析得到距断层、河流水系的距离图层;最后,将滑坡数据图层与各因素图层进行叠加和提取分析,统计各因素图层不同区间内滑坡发育的点密度(统计区内滑坡的数量密度)和面密度(滑坡面积占统计区面积的百分比)(Dai et al., 2011),从而得到滑坡的发育分布规律。

从整个研究区来看,滑坡总数为 606 处,数量密度为 $0.15\text{ 处}/\text{km}^2$;滑坡总面积为 40.83 km^2 ,占研究区总面积的 1.04%。滑坡的数量密度和面积百分比表征了滑坡在研究区内的平均发育程度,考虑到滑坡是具有一定空间范围的地质体,因而选择面积百分比作为评判依据,分析滑坡在各因素中发育的优势范围,数量密度作为参考。

5.2.1 地形地貌

(1) 海拔高程

研究区海拔高程跨度大,高程范围 $2452\sim 4851\text{ m}$ (图 3)。通常海拔高程不同,地貌类型和人类活动强度不同,气候和植被也表现出明显的垂直分带特征,从而影响滑坡的发育分布(白永健等, 2014)。

将研究区海拔高程按照 500 m 间距进行分组(其中 $2452\sim 2500\text{ m}$ 和 $4500\sim 4851\text{ m}$ 各为一组),分别统计各高程区间内滑坡的发育情况(图 7)。从图中可以看出,在小于 3000 m 高程范围内,滑坡点密度和面密度均随高程增加而增大;在大于 3000 m

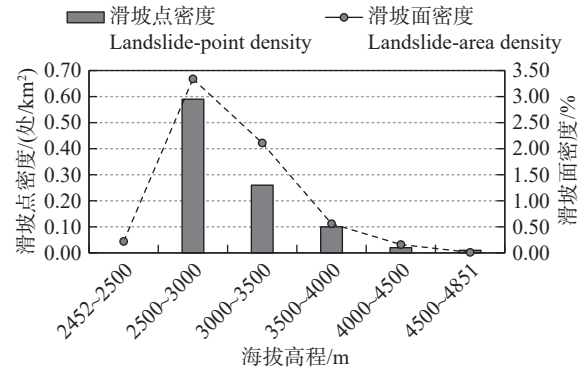


图 7 不同海拔高程发育的滑坡点密度与面密度
Fig.7 Landslide-point density and landslide-area density versus elevation

范围内,二者均随高程增加而减小;在 $2500\sim 3000\text{ m}$ 范围内点密度和面密度同时达到峰值,其值分别为 $0.59\text{ 处}/\text{km}^2$ 和 3.34% 。在 $2500\sim 3000\text{ m}$ 和 $3000\sim 3500\text{ m}$ 范围内,滑坡面密度均大于 1.04% ,因此 $2500\sim 3500\text{ m}$ 是滑坡发育的优势高程范围。该范围为雅砻江及其支流所在的河谷地带,降雨充沛,开挖切坡、水库蓄水等人类工程活动较为集中,因而滑坡最为发育。

(2) 坡度

一般来说,随着斜坡坡度变陡,坡面张力带范围以及坡脚处剪应力会增大,不利于斜坡稳定(张传元等, 1994)。研究区地形坡度变化较大,最小坡度为 0° (平地),最大坡度为 82° 。将研究区地形坡度按 5° 间隔进行分组,分别统计各坡度范围内滑坡的点密度和面密度(图 8)。

从图中可以看出,滑坡点密度与坡度之间无特定规律,在坡度 $60^\circ\sim 65^\circ$ 时达到峰值,为 $0.58\text{ 处}/\text{km}^2$ 。

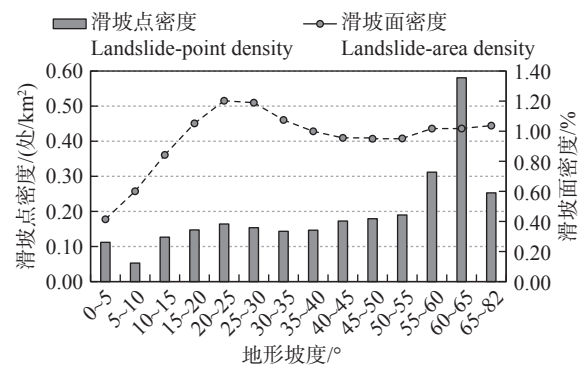


图 8 不同坡度发育的滑坡点密度与面密度
Fig.8 Landslide-point density and landslide-area density versus slope angle

滑坡面密度在坡度小于 25°范围内随着坡度增大而增大;在 20°~25°时达到峰值,为 1.20%;在 25°~55°坡度范围内随着坡度增大而减小;当坡度大于 55°后,面密度又略有增大。在坡度 15°~35°范围内,滑坡面密度均大于 1.04%,因此该范围是滑坡发育分布的优势坡度区间。

本文滑坡点密度是基于滑坡后壁中心点位置进行统计,由于研究区滑坡的后壁形态各不相同,因而点密度与坡度之间无明显规律;但由于研究区地层倾角普遍较大,斜坡中普遍发育陡倾坡外的卸荷裂隙和构造节理,导致滑坡后壁多沿陡倾坡外的结构面发育而成,因而最大点密度出现在坡度较陡的区间。本文滑坡面密度是按照滑坡堆积体的范围进行勾绘统计,由于滑坡在向下运动堆积过程中地形坡度会逐渐变缓,因而最大面密度分布在坡度较缓的区间;又因为解译的滑坡中包含了部分发育在斜坡高陡部位的崩滑堆积体,因而在坡度较陡区间滑坡面密度略有增加。

(3)坡向

斜坡的坡向不同,其接收阳光辐射、降雨及蒸发的强度则不同,植被的生长情况也不同,从而影响岩土体物理力学性质及斜坡稳定性。按照方位 N、NE、E、SE、S、SW、W、NW 对研究区斜坡坡向进行分组,分别统计各坡向范围内滑坡的发育分布情况(图 9)。

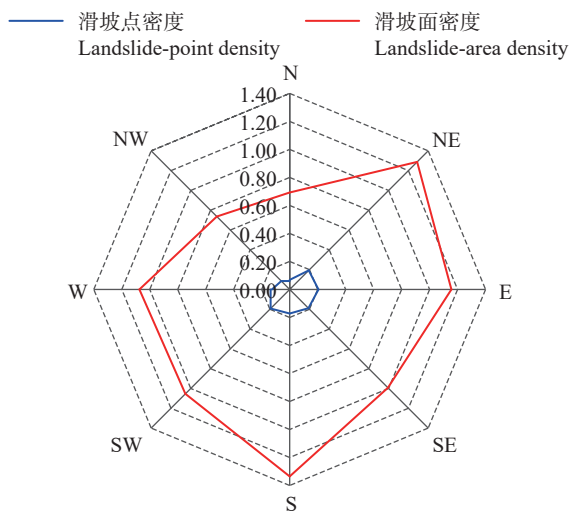


图 9 不同坡向发育的滑坡点密度与面密度
Fig.9 Landslide-point density and landslide-area density versus slope aspect

从图中可以看出,滑坡点密度在 NE-SW 坡向范围均大于 0.15 处/km²,最大点密度出现在坡向 E,为 0.21 处/km²。滑坡面密度在 NE-E 和 S-W 两个坡向范围内均大于 1.04%,最大面密度出现在坡向 S,为 1.34%。因此,NE-E 和 S-W 是滑坡发育分布的优势坡向范围。在 NW-N 坡向范围内点密度和面密度均较小,滑坡不发育。

5.2.2 地层岩组

地层岩性及其组合特征是滑坡形成的物质基础。通过分析研究区地层的成因、岩性以及坚硬程度等,将其划分为第四系松散岩组(I)、坚硬变质岩组(II)、软硬相间变质岩组(III)、软变质岩组(IV)和岩浆岩组(V)等 5 大工程地质岩组(图 2),然后分别统计各地层岩组内滑坡发育的点密度和面密度(图 10)。从图中可以看出,滑坡点密度在第四系松散岩组(I)最大,为 0.22 处/km²;其次为软变质岩组(IV),为 0.17 处/km²,二者均超过 0.15 处/km²。滑坡面密度在软变质岩组(IV)最大,为 1.18%,在其他岩组中面密度均小于 1.04%。因此,软变质岩组(IV)是研究区滑坡发育分布的优势岩组。最小滑坡点密度和面密度均出现在岩浆岩组(V),其值分别为 0.05 处/km²和 0.33%。

结合岩土体工程地质特性可知,第四系松散岩组(I)由于其结构松散,孔隙大、胶结弱,在降雨和人工开挖等条件下容易形成堆积层滑坡;软变质岩组(IV)岩性以薄层状板岩、粉砂质板岩为主,其质地软弱,抗风化能力差,遇水易软化,力学强度较低,因而容易形成岩质滑坡。岩浆岩组(V)主要由

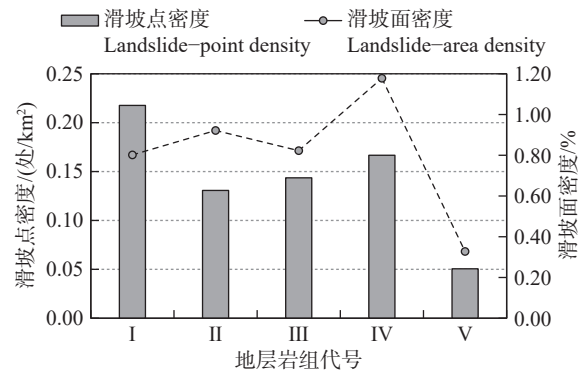


图 10 不同岩组发育的滑坡点密度与面密度
Fig.10 Landslide-point density and landslide-area density versus lithological group

块状的侵入岩组成,其岩性坚硬,抗风化能力强,因而该岩组中滑坡最不发育。

5.2.3 断裂构造

研究区断裂构造发育,特别是在下游区域,不同走向的断层之间相互交切,型式复杂(图 2)。为了研究滑坡发育分布与断裂构造之间的关系,对断层进行间隔 1 km 的缓冲区分析(距离大于 10 km 单独为一组),分别统计距断层不同距离内滑坡发育的点密度和面密度(图 11)。从图中可以看出,滑坡点密度和面密度与断层距离之间无特定规律,总体上均表现为“两头大、中间小”。对比图 5 发现,事实上研究区内各断层附近滑坡发育的密集程度差异较大,表明滑坡受断层的影响程度并不相同,因而在统计滑坡分布与断层距离之间的关系时,那些受断层影响较小、距离断层较远的滑坡对统计结果产生了干扰,导致随着距断层距离的增加,滑坡密度反而又开始增大。

为了找出断层对滑坡发育分布影响的差异性,对每条断层均进行 1 km 缓冲区分析,统计各断层 1 km 缓冲区内滑坡的点密度和面密度(图 12)。可以看出, F2(康都断层)、F4(千杯尼玛断层)、F13(祝桑断层)、F14(唐岗断层)、F15(霍泽扎日断层)和 F16(涅达断层)这 6 条断层 1 km 缓冲区内滑坡点密度和面密度明显较小,既小于研究区滑坡数量密度 0.15 处/km²,同时也小于研究区滑坡面积百分比 1.04%,因此,可以认为这 6 条断层对滑坡发育分布的影响不显著。对于其余 12 条断层,1 km 缓冲区内滑坡点密度均大于 0.28 处/km²,面密度均大于 1.09%。最大滑坡点密度出现在 F7(麻子石

断层)附近,其值为 0.75 处/km²;最大滑坡面密度出现在 F8(程章断层)附近,其值为 5.32%。从图 5 可以看出,该区段为麻子石断层、程章断层、然公断层、鸡打—米龙—木灰断层交汇的部位,滑坡在该区段密集成群发育。

另外,从图 5 可以看出, F2、F4、F13、F15 这 4 条断层发育在研究区海拔较高的部位,这些区域地势起伏相对较小,地形坡度相对更缓,降雨和人类活动强度更低,因而这些断层附近滑坡不发育。从图 2 可以看出, F4、F14 和 F16 这 3 条断层发育在坚硬变质岩组(Ⅱ)或岩浆岩组(V)中,坚硬的岩性通常更有利于崩塌的形成,因而附近滑坡也不发育。除了海拔高程、地层岩性的影响,断层性质、破碎带宽度以及断层活动性等不同也可能是造成研究区滑坡沿断裂构造发育程度存在差异的原因。

5.2.4 河流水系

河流水系对研究区滑坡的形成具有重要影响。随着高原隆升、河流下切,形成深切峡谷地貌,高陡的岸坡为滑坡的孕育和发生提供了有利的地形和势能条件;河谷下切导致岸坡发生卸荷拉裂变形,形成潜在崩滑体;岸坡坡脚不仅持续受到河水冲刷侵蚀,而且河谷地带是地下水的集中排泄区,地下水在渗流过程中产生的动、静水压力诱发和加剧了滑坡形成。

为了研究滑坡发育分布与河流水系之间的关系,对河流水系进行间隔 500 m 的缓冲区分析,分别统计距河流水系不同距离内滑坡发育的点密度和面密度(图 13)。从图中可以看出,滑坡点密度和

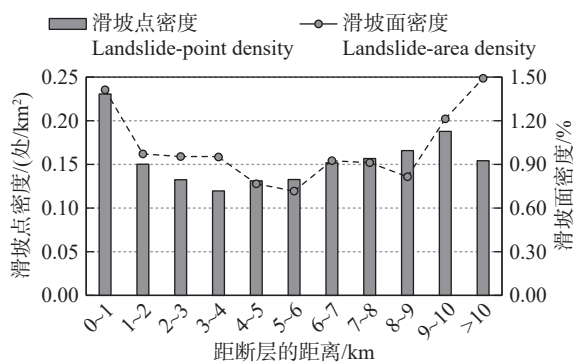


图 11 距断层不同距离发育的滑坡点密度与面密度
Fig.11 Landslide-point density and landslide-area density versus distance to fault

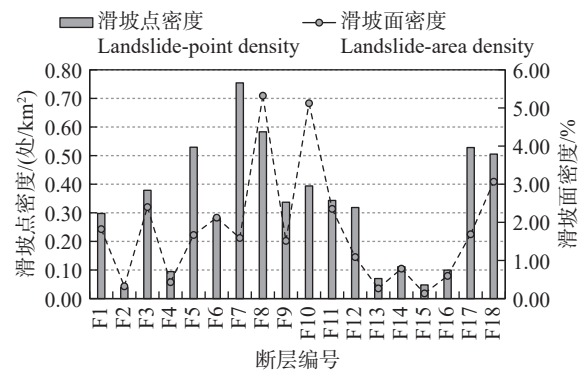


图 12 各断层 1 km 缓冲区内发育的滑坡点密度与面密度
Fig.12 Landslide-point density and landslide-area density versus 1 km buffer zone of the faults

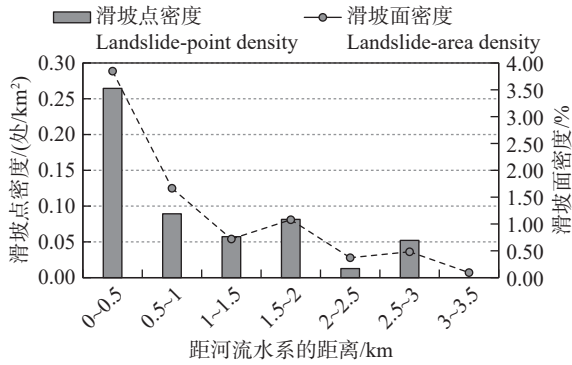


图 13 距河流水系不同距离发育的滑坡点密度与面密度
Fig.13 Landslide-point density and landslide-area density versus distance to river

面密度总体上均随着与河流水系的距离增加而减小,滑坡发育分布与河流水系距离之间表现出较为明显的负相关性。最大滑坡点密度和面密度均分布在距河流水系 0~0.5 km 距离内,其值分别为 0.26 处/km² 和 3.85%。由此可见,与河流水系 0~0.5 km 是滑坡发育分布的优势距离。从图 5 也可以直观地看出,研究区内的滑坡主要沿着河流水系成带状集中分布。

5.3 讨论

通过对比本文与雅砻江流域前期已有的滑坡发育分布规律研究成果(常晓军等, 2009; 刘哲, 2015; 武运泊, 2015; 梁瑞锋等, 2016)可以发现,本文在滑坡数据获取和研究方法方面和前人研究思路总体类似,即主要通过遥感解译结合地面调查来获取研究区的滑坡数据,然后利用 GIS 空间分析功能和一定的统计方法得到滑坡的发育分布规律,不同之处主要在于获取的滑坡数据的详实程度以及统计指标的多元性。前人的研究工作主要着眼于“房前屋后”等直接威胁群众生命财产安全的滑坡灾害,时间上以新近发生的为主,统计指标基本采用单一的滑坡数量密度,对于滑坡规律总结来说,前人获取的滑坡数据和统计分析方法均具有一定的局限性。本文除了利用光学遥感影像对既有的滑坡进行解译,而且进一步利用 InSAR 技术发现了正在发生变形的滑坡隐患,获取数据的手段更加丰富;本文除了关注城镇和村落附近的滑坡,还解译和调查了大量外围的自然滑坡及古/老崩滑堆积体,因而获取的滑坡数据更加全面、详尽。在统计分析方面,本文同时采用了滑坡点密度和滑坡面密度

2 个统计指标,并且对二者结果的差异进行了原因分析,因而得到的滑坡规律分析结果更加客观可靠。

尽管本文在滑坡数据获取和统计分析方面较前人研究有所改进,但本文的研究范围仅为雅砻江中游深切河谷区的一段,获得的滑坡规律认识仅限于研究区本身。因此,笔者对下一步研究工作进行以下几点展望:一是将研究范围扩展至整个雅砻江流域,以获得对青藏高原深切峡谷区滑坡发育分布规律更加全面的认识;二是完善和优化高山峡谷区滑坡遥感解译标志和隐患识别技术方法,充分利用先进的对地观测手段获取高质量的滑坡数据;三是加强对流域内典型滑坡个例的深入剖析,系统总结滑坡发育的地质力学模式与成因机制。

6 结论

(1)通过高分辨率卫星遥感解译、短基线干涉雷达测量分析(SBAS-InSAR)、结合地面调查,在雅砻江中游深切河谷区子拖西—麻郎错河段共查明滑坡 606 处,滑坡数量密度为 0.15 处/km²,滑坡面积百分比为 1.04%。其中,面积 10⁴~10⁵ m² 的滑坡数量最多,约占滑坡总数的 60%;面积 10³~10⁴ m² 和面积 10⁵~10⁶ m² 的滑坡数量相当,各约占滑坡总数的 20%。

(2)从滑坡的主控诱发因素入手,将研究区的滑坡划分为降雨诱发型、构造控制型、开挖诱发型、河流侵蚀型和蓄水诱发型等 5 种主要类型;研究发现,降雨和蓄水对岩土体强度的弱化效应、断裂构造对岩体结构及其力学性质的劣化效应、开挖和河流侵蚀对斜坡前缘抗滑支撑作用的解除效应等是导致滑坡形成的重要机理。

(3)通过分析地形地貌因素与滑坡发育分布之间的关系发现,海拔高程 2500~3500 m、坡度 15°~35°、坡向 NE-E 和 S-W 是滑坡发育的优势区间范围。

(4)由薄层状板岩、粉砂质板岩构成的软变质岩组是滑坡发育分布的优势岩组,而花岗岩、石英闪长岩等坚硬侵入岩构成的岩浆岩组中滑坡最不发育。

(5)康都断层、千杯尼玛断层、祝桑断层、唐岗断层、霍泽扎日断层和涅达断层这 6 条断层对滑坡发育分布影响不显著;在研究区下游麻子石断层、

程章断层、然公断层、鸡打—米龙—木灰断层两侧及其交汇部位滑坡发育最为密集。

(6) 滑坡发育分布与河流水系距离之间表现出明显的负相关性, 距河流水系 0~0.5 km 是滑坡发育分布的优势距离, 研究区内的滑坡沿着河流水系成带状集中分布。

References

- Azañón J M, Azor A, Pérez-Peña J V, Carrillo J M. 2005. Late Quaternary large-scale rotational slides induced by river incision: The Arroyo de Gor area (Guadix basin, SE Spain)[J]. *Geomorphology*, 69: 152–168.
- Bai Yongjian, Tie Yongbo, Ni Huayong, Li Minghui. 2014. Temporal spatial distribution and environment pregnant of geohazards in Xianshui River of Sichuan, China[J]. *Journal of Catastrophology*, 29(4): 69–75 (in Chinese with English abstract).
- Chang Xiaojun, Wei Lunwu, Wang Dewei. 2009. Distribution characteristics and influencing factors of geological hazards in Yalong River basin[J]. *Journal of Catastrophology*, 24(3): 83–88 (in Chinese with English abstract).
- Chen Chunli, He Kai, Li Tonglu. 2014. Research on the mechanism of the ancient landslide resurrection triggered by slope toe excavation[J]. *Northwestern Geology*, 47(1): 255–260 (in Chinese with English abstract).
- Dai F C, Xu C, Yao X, Xu L, Tu X B, Gong Q M. 2011. Spatial distribution of landslides triggered by the 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquake, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40: 883–895.
- Dai Fuchu, Deng Jianhui. 2020. Development characteristics of landslide hazards in Three-Rivers Basin of southeast Tibetan Plateau[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 52(5): 3–15 (in Chinese with English abstract).
- Dai Keren, Tie Yongbo, Xu Qiang, Feng Ye, Zhuo Guanchen, Shi Xianlin. 2020. Early identification of potential landslide geohazards in alpine-canyon terrain based on SAR interferometry—A case study of the middle section of Yalong River[J]. *Journal of Radars*, 9(3): 554–568 (in Chinese with English abstract).
- Deng Jianhui, Gao Yunjian, Yu Zhiqiu, Xie Heping. 2019. Analysis on the formation mechanism and process of Baige landslides damming the upper reach of Jinsha River, China[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 51(1): 9–16 (in Chinese with English abstract).
- Ding Jun, Ni Shijun, Wei Lunwu, Zhang Chengjiang, Lai Shaomin, Zheng Wanmo. 2005. Thinking on urban environmental geological survey in southwest China[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 25(4): 108–110 (in Chinese with English abstract).
- Fan Lei, Zhang Qi. 2016. Occurrence and distribution characteristics of landslides at Suwalong–Benzilan along Jinsha River[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 33(3): 38–41 (in Chinese with English abstract).
- Huang Runqiu. 2007. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26(3): 433–454 (in Chinese with English abstract).
- Huang Runqiu. 2009. Mechanism and geomechanical modes of landslide hazards triggered by Wenchuan 8.0 earthquake[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 28(6): 1239–1249 (in Chinese with English abstract).
- Jin Yanli, Dai Fuchu. 2007. Analysis of loess slope stability due to groundwater rise[J]. *Journal of Engineering Geology*, 15(5): 599–606 (in Chinese with English abstract).
- Leng Lun. 2000. Mountain collapse and dam-break flood in Yalong River[J]. *Journal of China Hydrology*, 20(3): 46–50 (in Chinese).
- Liang Ruifeng, Yang Min, Yang Shuancheng, He Zihao. 2016. Distribution characteristics and influencing factors analysis of geological disasters in Kala section along Yalong River[J]. *Pearl River*, 37(11): 13–17 (in Chinese with English abstract).
- Liu Caihua, Xu Jian, Cao Chuanlin, Chen Congxin, Feng Xiating. 2005. Analysis of bedding-slip failure mechanism of rock slope due to hydraulic drive[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(19): 131–135 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chuanzheng, Lü Jietang, Tong Liqiang, Chen Hongqi, Liu Qiuqiang, Xiao Ruihua, Tu Jienan. 2019. Research on glacial/rockfall-landslide-debris flows in Sedongpu basin along Yarlung Zangbo River in Tibet[J]. *Geology in China*, 46(2): 219–234 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xinghong, Yao Xin, Yu Kaibing, Dai Fuchu, Wang Shifeng, Yao Jiaming. 2020. Remote sensing integrated identification of geological hazards in the Batang–Mangkang section of the Sichuan–Tibet highway[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 52(6): 49–60 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zhe. 2015. Hazard Assessment of Geological Disasters in Maidilong–Kala Section of Yalong River Basin Based on GIS[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Lu Haifeng, Chen Congxin, Yuan Conghua, Yu Hongdan, Shen Qiang. 2010. Analysis of failure mechanism of Badong red bed soft rock gently inclined bedding slope[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 29(S2): 3569–3577 (in Chinese with English abstract).
- Lu Huiyan, Li Weile, Xu Qiang, Dong Xiujun, Dai Cong, Wang Dong. 2019. Early detection of landslides in the upstream and downstream areas of the Baige landslide, the Jinsha River based on optical remote sensing and InSAR technologies[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 44(9): 1342–1354 (in Chinese with English abstract).
- Ni Huayong, Chen Xuyu, Zhou Wei, Wang Dewei, Tang Yeqi. 2013. Formation and characteristics of gully-type debris flow on hilly

- plateau planes with cold climate and high altitude—A case study of the Zhusang scenic spot in Yajiang County of Sichuan Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 33(1): 211–215 (in Chinese with English abstract).
- Ni Huayong, Wang Dewei, Chen Xuyu, Tang Yeqi. 2015. Formation characteristics and stability assessment of geological hazards in Yajiang City, Sichuan Province[J]. *Geoscience*, 29(2): 474–480 (in Chinese with English abstract).
- Pan Guitang, Ren Fei, Yin Fuguang, Wang Liquan, Wang Baodi, Wang Dongbing, An Xianyin, Tang Yuan, Liu Han, Wang Qiyu, Pang Weihua, Xu Bo. 2020. Key zones of oceanic plate geology and Sichuan–Tibet Railway Project[J]. *Earth Science*, 45(7): 2293–2304 (in Chinese with English abstract).
- Peng Jianbing, Ma Runyong, Lu Quanzhong, Li Xi'an, Shao Tiejuan. 2004. Geological hazards effects of uplift of Qinghai–Tibet Plateau[J]. *Advance in Earth Sciences*, 19(3): 457–466 (in Chinese with English abstract).
- Ran Tao, Zhou Hongfu, Xu Wei, Li Qiaoxue, Zou Linzhi, Zhang Chuanlei. 2020. Research on the instability modes, failure mechanisms and preventive measures of representative rock slopes within Ya'an–Luding section of the western Sichuan transportation corridor[J]. *Journal of Natural Disasters*, 29(4): 200–212 (in Chinese with English abstract).
- Wang Dewei, Ni Huayong, Chen Xuyu, Tang Yeqi. 2017. Dataset of geological hazards survey in Yajiang County, Sichuan Province in 2010[J]. *Geology in China*, 44(S1): 82–87 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhihua. 2012. *Remote Sensing for Landslide*[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Wen Baoping, Shen Jian, Tan Jianmin. 2008. The influence of water on the occurrence of Qianjiangping landslide[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 35(3): 12–18 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yunbo. 2015. *Development Regularity and Formation Mechanism of Landslides in Kala area of Yalong River*[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Xiao Shirong, Hu Zhiyu, Lu Shusheng, Ming Chengtao, Chen Deqian. 2013. Classification of reservoir–triggered landslides in Three Gorges reservoir area[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 30(11): 39–44 (in Chinese with English abstract).
- Xu Q, Shang Y J, van Asch T, Wang S T, Zhang Z Y, Dong X J. 2012. Observations from the large, rapid Yigong rock slide–debris avalanche, southeast Tibet[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 49(5): 589–606.
- Xu Qiang, Zheng Guang, Li Weile, He Chaoyang, Dong Xiujun, Guo Chen, Feng Wenkai. 2018. Study on successive landslide damming events of Jinsha River in Baige Village on October 11 and November 3, 2018[J]. *Journal of Engineering Geology*, 26(6): 1534–1551 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhihua, Wu Ruian, Guo Changbao, Zhang Yongshuang, Lan Hengxing, Ren Sanshao, Yan Yiqiu. 2022. Geo-hazard effects and typical landslide characteristics of the Batang fault zone in the western Sichuan[J]. *Geology in China*, 49(2): 355–368(in Chinese with English abstract).
- Yi Zhijian, Huang Runqiu, Wu Haiyan, He Shunxun, Yang Jian, Zhou Longshou. 2016. Research on formation mechanism of Tanggudong landslide[J]. *Journal of Engineering Geology*, 24(6): 1072–1079 (in Chinese with English abstract).
- Yin Yueping. 2000. Characteristics and mitigation of Yigong rapid huge landslide in Bomi, Tibet[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 27(4): 1072–1079 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Peizhen. 2008. Present tectonic deformation, strain distribution and deep dynamic processes of the western Sichuan region, eastern margin of Tibetan Plateau[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 38(9): 1041–1056 (in Chinese).
- Zhang Yongshuang, Ba Renji, Ren Sanshao, Li Zongliang. 2020. An analysis of geo–mechanism of the Baige landslide in Jinsha River, Tibet[J]. *Geology in China*, 47(6): 1637–1645 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yongshuang, Guo Changbao, Yao Xin, Yang Zhihua, Wu Ruian, Du Guoliang. 2016. Research on the geohazard effect of active fault on the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 37(3): 277–286 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhuoyuan, Wang Shitian, Wang Lansheng. 1994. *Analysis Principles of Engineering Geology (2nd Edition)*[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Zheng Wanmo, Tang Xiaoping, Wang Quan. 1997. Characteristics of the geological hazards in the town area of Yajiang County[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 8(3): 13–20 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 白永健, 铁永波, 倪化勇, 李明辉. 2014. 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*, 29(4): 69–75.
- 常晓军, 魏伦武, 王德伟. 2009. 雅砻江流域地质灾害分布特征及其影响因素分析[J]. *灾害学*, 24(3): 83–88.
- 陈春利, 贺凯, 李同录. 2014. 坡脚开挖诱发古滑坡复活的机制分析[J]. *西北地质*, 47(1): 255–260.
- 戴福初, 邓建辉. 2020. 青藏高原东南三江流域滑坡灾害发育特征[J]. *工程科学与技术*, 52(5): 3–15.
- 戴可人, 铁永波, 许强, 冯也, 卓冠晨, 史先琳. 2020. 高山峡谷区滑坡灾害隐患 InSAR 早期识别——以雅砻江中段为例[J]. *雷达学报*, 9(3): 554–568.
- 邓建辉, 高云建, 余志球, 谢和平. 2019. 堰塞金沙江上游的白格滑坡形成机制与过程分析[J]. *工程科学与技术*, 51(1): 9–16.
- 丁俊, 倪师军, 魏伦武, 张成江, 赖绍民, 郑万模. 2005. 西南地区城市环境地质调查工作的思考[J]. *沉积与特提斯地质*, 25(4): 108–110.

- 范雷, 张琪. 2016. 金沙江苏洼龙—奔子栏河段滑坡灾害发育分布规律[J]. 长江科学院院报, 33(3): 38-41.
- 黄润秋. 2007. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 26(3): 433-454.
- 黄润秋. 2009. 汶川 8.0 级地震触发崩滑灾害机制及其地质力学模式[J]. 岩石力学与工程学报, 28(6): 1239-1249.
- 金艳丽, 戴福初. 2007. 地下水位上升下黄土斜坡稳定性分析[J]. 工程地质学报, 15(5): 599-606.
- 冷伦. 2000. 雅砻江垮山堵江及溃泄洪水[J]. 水文, 20(3): 46-50.
- 梁瑞锋, 杨敏, 杨栓成, 赫子皓. 2016. 雅砻江流域卡拉段地质灾害分布特征与影响因素分析[J]. 人民珠江, 37(11): 13-17.
- 刘才华, 徐健, 曹传林, 陈从新, 冯夏庭. 2005. 岩质边坡水力驱动型顺层滑移破坏机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 24(19): 131-135.
- 刘传正, 吕杰堂, 童立强, 陈红旗, 刘秋强, 肖锐铨, 涂杰楠. 2019. 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, 46(2): 219-234.
- 刘星洪, 姚鑫, 於开炳, 戴福初, 王世锋, 姚佳明. 2020. 川藏高速巴塘—芒康段地质灾害遥感综合早期识别研究[J]. 工程科学与技术, 52(6): 49-60.
- 刘哲. 2015. 基于 GIS 的雅砻江流域麦地龙—卡拉段地质灾害危险性评价[D]. 成都: 成都理工大学.
- 卢海峰, 陈从新, 袁从华, 于洪丹, 沈强. 2010. 巴东组红层软岩缓倾顺层边坡破坏机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 29(增 2): 3569-3577.
- 陆会燕, 李为乐, 许强, 董秀军, 代聪, 王栋. 2019. 光学遥感与 InSAR 结合的金沙江白格滑坡上下游滑坡隐患早期识别[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 44(9): 1342-1354.
- 倪化勇, 陈绪钰, 周维, 王德伟, 唐业旗. 2013. 高寒高海拔山原区沟谷型泥石流成因与特征——以四川省雅江县祝桑景区为例[J]. 水土保持通报, 33(1): 211-215.
- 倪化勇, 王德伟, 陈绪钰, 唐业旗. 2015. 四川雅江县城地质灾害发育特征与稳定性评价[J]. 现代地质, 29(2): 474-480.
- 潘桂棠, 任飞, 尹福光, 王立全, 王保弟, 王冬兵, 安显银, 唐渊, 刘函, 王启宇, 庞维华, 徐波. 2020. 洋板块地质与川藏铁路工程地质关键区带[J]. 地球科学, 45(7): 2293-2304.
- 彭建兵, 马润勇, 卢全中, 李喜安, 邵铁全. 2004. 青藏高原隆升的地质灾害效应[J]. 地球科学进展, 19(3): 457-466.
- 冉涛, 周洪福, 徐伟, 李巧学, 邹林志, 张传磊. 2020. 川西交通廊道雅安—泸定段典型岩质边坡失稳模式、破坏机理及防治措施[J]. 自然灾害学报, 29(4): 200-212.
- 王德伟, 倪化勇, 陈绪钰, 唐业旗. 2017. 2010 年四川省雅江县地质灾害调查数据集[J]. 中国地质, 44(增刊 1): 82-87.
- 王治华. 2012. 滑坡遥感[M]. 北京: 科学出版社.
- 文宝萍, 申健, 谭建民. 2008. 水在千将坪滑坡中的作用机理[J]. 水文地质工程地质, 35(3): 12-18.
- 武运泊. 2015. 雅砻江卡拉地区滑坡发育规律与成因机制分析[D]. 成都: 成都理工大学.
- 肖诗荣, 胡志宇, 卢树盛, 明成涛, 陈德乾. 2013. 三峡库区水库复活型滑坡分类[J]. 长江科学院院报, 30(11): 39-44.
- 许强, 郑光, 李为乐, 何朝阳, 董秀军, 郭晨, 冯文凯. 2018. 2018 年 10 月和 11 月金沙江白格两次滑坡-堰塞堵江事件分析研究[J]. 工程地质学报, 26(6): 1534-1551.
- 杨志华, 吴瑞安, 郭长宝, 张永双, 兰恒星, 任三绍, 闫怡秋. 2022. 川西巴塘断裂带地质灾害效应与典型滑坡发育特征[J]. 中国地质, 49(2): 355-368.
- 易志坚, 黄润秋, 吴海燕, 何顺勋, 杨建, 周龙寿. 2016. 唐古栋滑坡成因机制研究[J]. 工程地质学报, 24(6): 1072-1079.
- 殷跃平. 2000. 西藏波密贡高速巨型滑坡特征及减灾研究[J]. 水文地质工程地质, 27(4): 1072-1079.
- 张培震. 2008. 青藏高原东缘川西地区的现今构造变形、应变分配与深部动力过程[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 38(9): 1041-1056.
- 张永双, 巴仁基, 任三绍, 李宗亮. 2020. 中国西藏金沙江白格滑坡的地质成因分析[J]. 中国地质, 47(6): 1637-1645.
- 张永双, 郭长宝, 姚鑫, 杨志华, 吴瑞安, 杜国梁. 2016. 青藏高原东缘活动断裂地质灾害效应研究[J]. 地球学报, 37(3): 277-286.
- 张倬元, 王士天, 王兰生. 1994. 工程地质分析原理(第二版)[M]. 北京: 地质出版社.
- 郑万模, 唐小平, 王泉. 1997. 雅砻江畔雅江县城区地质灾害特征及其防治对策[J]. 地质灾害与环境保护, 8(3): 13-20.