

• 青藏高原重大滑坡动力灾变与风险防控关键技术研究 •

DOI:10.15961/j.jsuese.202000651



本刊网刊

青藏高原东南三江流域滑坡灾害发育特征

戴福初¹, 邓建辉²

(1.北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 2.四川大学 水利水电学院 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

摘 要:青藏高原东南三江流域横跨青藏高原东南的高山峡谷区与藏北高原区, 地形地貌与气候特征差异大, 新构造运动与地震活动强烈, 致使该区地质环境脆弱, 地质灾害频发, 灾害链特征显著, 对人民生命财产和工程建设安全、重要基础设施的正常运营构成了严重威胁。本文在利用遥感解译确定青藏高原东南三江流域滑坡灾害空间分布的基础上, 探讨滑坡灾害的发育规律及其主要影响因素。利用GoogleEarth影像, 结合现场调查进行滑坡灾害的遥感解译, 得到滑坡灾害类型及其空间分布。采用分辨率为90 m的SRTM数字高程模型(DEM)进行地形地貌特征分析, 得到研究区海拔高程、地形坡度、坡向、相对高差栅格图层。以1:500 000地质图的地层岩性为基础, 进行岩组划分并栅格化形成地层岩组栅格图层; 以1:500 000地质图中的主要断层为基础并与1:1 500 000青藏高原及邻区大地构造图中的主要断裂进行整编, 并进行缓冲区分析形成与主要断裂的距离图层。根据1:1 500 000青藏高原及邻区大地构造图获得研究区大地构造单元图层。对上述栅格图层分别进行分带、分类后与滑坡灾害空间分布图层进行叠加分析, 以滑坡所占面积的百分比为依据绘制直方图, 从而得到研究区滑坡灾害的主要发育特征。在面积为 $46.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的青藏高原东南三江流域范围内, 累计解译面积不小于 0.001 km^2 的滑坡灾害60 315处, 包括滑坡体、崩塌堆积体和变形体3类, 以滑坡体为主, 占总数的97.73%。滑坡灾害在空间上具有沿深切峡谷成带分布的规律, 沿部分断裂构造, 如巴塘断裂、维西—乔后断裂、苏哇龙—雄松断裂拉哇—昌波段等密集分布; 滑坡灾害多发育在坡度 $20^\circ \sim 30^\circ$ 、高程小于4 000 m、相对高差超过1 000 m的斜坡内。在18类地层岩组中, 碎屑岩与板岩夹灰岩组合、泥页岩与粉砂岩组、蛇绿混杂岩、板岩与千枚岩岩组、火山岩等5类为滑坡灾害发育的明显优势岩组。在25个大地构造单元中, 金沙江蛇绿混杂岩、中咱碳酸盐地、那曲—洛隆弧前盆地、保山陆表海盆地、盐源—丽江陆缘裂谷盆地、北澜沧江蛇绿混杂岩、甘孜—理塘蛇绿混杂岩等为滑坡灾害明显优势发育的构造单元。尽管距主要断裂距离、坡向等因素对滑坡灾害发育有一定影响, 但不显著。由此可见, 青藏高原东南三江流域滑坡灾害发育, 影响滑坡灾害发育的地形地貌与地质因素主要为地形坡度、高程、相对高差、地层岩组及大地构造单元, 距主要断裂的距离、坡向的影响不显著。

关键词:青藏高原; 三江流域; 滑坡灾害; 滑坡类型; 空间分布; 影响因素

中图分类号:P642

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2020)05-0003-13

Development Characteristics of Landslide Hazards in Three-rivers Basin of Southeast Tibetan Plateau

DAI Fuchu¹, DENG Jianhui²

(1.College of Architecture and Civil Eng., Beijing Univ. of Technol., Beijing 100124, China; 2.State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., College of Water Resource & Hydropower, Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

Abstract: Three-rivers basin, which spans the deeply incised southeast Tibetan Plateau and north Tibetan Plateau with a low relief surface, is characterized by highly varied topography and climate, strong neotectonic movement and frequent seismicity, leading to fragile geological conditions, frequent occurrence of geohazards, and resulting in remarkable hazard chains. This severely threatens the safety of local residents and en-

收稿日期:2020-08-06

基金项目:国家重点研发计划项目(2008YFC1505001)

作者简介:戴福初(1967—),男,教授,博士.研究方向:地质工程与地质灾害. E-mail: 2024314945@qq.com

网络出版时间:2020-09-11 17:02:29 网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20200910.1552.001.html

http://jsuese.ijournals.cn

http://jsuese.scu.edu.cn

gineering constructions, and normal operation of infrastructures. Based on the landslide hazards interpreted from GoogleEarth, the characteristics of landslide hazards in Three-rivers basin were analyzed. The GoogleEarth images were adopted to map the types and spatial distributions of landslide hazards. The results were verified with limited field reconnaissance. The SRTM digital elevation model (DEM) data with a resolution of 90 m were used to analyze the terrain parameters, including elevation, slope angle, slope aspect, and relative relief. The lithological groups were compiled from 1:500 000-scale geological maps based on detailed lithological descriptions. The grid layer of distances to major faults was buffered from the main faults of 1:500 000-scale geological maps, compiled with the major faults obtained from 1:1 500 000-scale tectonic map of Tibetan Plateau and neighboring region, in which the tectonic units were also extracted. All vector layers were rasterized and reclassified together with the raster layers, and then overlaid with the spatial distribution of landslide hazards. Percentage of landslide area (PLA) was used to create histograms and statistically analyze the significance of the factors influencing the occurrence of landslide hazards, based on geographic information system (GIS) method. A total of 60 315 landslides with an area of not less than 0.001 km^2 for single landslide, including slides, rockfalls and deforming bodies, were mapped in the Three-river basins with an area of about $462\,000 \text{ km}^2$. Landslide hazards were mostly slides in type, accounting for 97.73% of the total, and characterized by banded densely distribution along the deeply incised valleys with local differentiation, and densely distribution along some major faults, e.g. Batang fault, Weixi—Qiaohou fault, and Lawa—Wangdalong segment of Suwalong—Xiong-song fault. For terrain parameters, landslide hazards mostly occurred on the slopes with angle ranging from 20° to 30° , elevation varying from 800 m to 4 000 m, and local relief exceeding 1 000 m. Among the 18 lithological groups, the following 5 groups, clastic rock and slate intercalated with limestone, mudstone and shale and siltstone, ophiolitic mélangé, phyllite and slate, volcanic rocks, were mostly prone to slope failure. Among the 25 tectonic units, the following 7 units, including Jinsha River ophiolitic mélangé, Zhongza limestone terrane, Yanyuan—Lijiang Continental margin rift basin, Naqu—Luonong forearc basin, north Lancang River ophiolitic mélangé, Baoshan Terrestrial sea basin, and Ganzi—Litang ophiolitic mélangé, were more vulnerable to landslide hazards. Although slope aspect and distance to major faults might have some influences on the landslide hazards, the role was not significant. Landslide hazards were densely distributed in Three-rivers basin of southeast Tibetan Plateau. The terrain and geological parameters significantly influencing the occurrence of landslide hazards consist of slope angle, elevation, relief, lithological group, and tectonic unit. Both slope aspect and distance to major faults have little impact on the landslide hazards.

Key words: Tibetan Plateau; Three-rivers basin; landslide hazard; landslide type; spatial distribution; influencing factors

青藏高原西起帕米尔高原和兴都库什,东至横断山脉,北起昆仑山和祁连山,南至喜马拉雅山区,是地球上最年轻、海拔最高的高原,平均海拔超过 4 000 m^[1]。青藏高原由北往南依次由西昆仑—祁连山加里东期缝合带、昆仑山华力西期缝合带、金沙江印支期缝合带、班公湖—怒江燕山期缝合带、雅鲁藏布江喜马拉雅期缝合带等 5 条狭长的缝合带和被其分隔开的柴达木地块、巴颜喀拉地块、羌塘地块、藏北地块和喜马拉雅地块等 6 个地块构成^[2]。印度次大陆自晚白垩纪开始以 $180 \sim 100 \text{ mm/a}$ 的速率向北漂移,于始新世与亚洲大陆接壤^[3]。印度次大陆与亚洲大陆的碰撞,导致雅鲁藏布江一带的特提斯残余海最终封闭。在与亚洲大陆碰撞以后,印度次大陆以相对欧亚板块 50 mm/a 的运动速率(相对华南块体的运动速率约 40 mm/a)向北移动,当受到北部亚洲刚性地块阻挡时,青藏高原原处在强大的 NS 向挤压应力作用之下,造成地壳在 NS 方向上缩短,在垂直方向上增厚,并有一部分物质向东滑移,形成了一系列对冲山岭和盆地相间的挤压逆冲构造带,在地貌上自北而南依次形成了祁连山—阿尔金山、昆仑山、唐古拉山、冈底斯山和喜马拉雅山等山脉^[4]。

青藏高原在地貌上表现为一个巨大的凸显地形地貌体,高原腹地海拔高、地势起伏小,平均海拔超

过 4 500 m,冻融作用和干湿循环强烈;高原四周被地势陡降的山链围绕^[5],地形陡峻,河流深切。青藏高原的隆升造成高原构造变形活跃,地震活动强烈^[6],加之高原对气候变化响应敏感及极端气候事件增多^[7],致使滑坡灾害孕灾环境与成灾过程复杂,灾害频发。2000 年 4 月 9 日,在西藏波密县的易贡藏布扎木弄沟发生特大滑坡,滑体从 5 520 m 高处滑下,落差 3 300 m,滑程达 8 km,形成长约 2 500 m,宽约 2 500 m,体积超过 $3.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的堆积体^[8],并堵塞易贡藏布江,之后发生溃决,溃决洪水造成雅鲁藏布江大峡谷下游的 20 座桥梁荡然无存,5 000 多人无家可归,130 余人死亡。2018 年 10 月 11 日在西藏江达县波罗乡白格村与四川白玉县绒盖乡则巴村交界处的金沙江右岸发生约 $2\,200 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的高位滑坡,堵塞金沙江形成堰塞坝,堰塞湖蓄水量约 $2.9 \times 10^8 \text{ m}^3$,10 月 12 日堰塞湖水开始自然下泄,至 13 日全部泄流完成;11 月 3 日滑坡源区后缘再次发生约 $800 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的滑坡,再次堵塞金沙江,形成库容超过 $5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的堰塞湖,通过开挖导流槽主动降低堰塞湖水位后,堰塞体于 11 月 13 日被完全冲开,下泄洪水导致金沙江下游四川云南境内多座桥梁被冲毁,丽江等地被淹,造成巨大的经济损失和广泛的社会影响^[9-11]。

前期对青藏高原滑坡灾害的研究主要包括:1)20

世纪90年代以来,基于“以人为本”的原则,围绕人口密集区,重点开展部分县市地质灾害调查工作;2)开展重大滑坡案例的研究,如易贡滑坡^[12-13]、白格滑坡^[9-11]、乱石包滑坡^[14-15]、塔合曼滑坡^[16-17]等;3)开展服务于重大工程建设的地质灾害调查与危险性评估工作,如川藏公路^[18]、水能资源开发^[19]等。上述研究无疑对深化青藏高原滑坡灾害的机制认识,确保工程安全起到了积极作用。白格滑坡、易贡滑坡的教训让地质工作者更加认识到,不仅需要重视重大滑坡灾害案例的深入剖析,还需要从灾害链风险防范的角度出发,开展流域尺度的滑坡灾害区域规律研究。本文以青藏高原东南三江流域为研究区,采用遥感解译结合现场调查的方法初步查明滑坡灾害空间分布,探讨了滑坡灾害的发育规律,分析了影响滑坡灾害发育的主要因素。

1 研究区地质地理背景

研究区为青藏高原东南三江流域,包括金沙江涛源镇上游流域、澜沧江旧州镇上游流域、怒江上江镇上游流域,累计面积为 $46.2 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中,金沙江 $26.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、澜沧江 $8.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、怒江 $11.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。研究区横跨青藏高原东南的高山峡谷区与地势起伏小的藏北高原区,是青藏高原地区滑坡灾害最为发育的区域,也是最能反映青藏高原地质环境特点的区域。中国多数在建和拟建大型水电工程集中于该地区,进藏主要交通干线(国道G318、G317、G214)和

即将施工的川藏铁路从研究区通过。

地形地貌方面,研究区总体地势西北高、东南低,构成了西北部藏北低起伏高原与东南部高山峡谷地貌组合。西北部的藏北高原区高程一般大于4 300 m,地貌上表现为北西或北西西向展布的盆地与山地相间分布,明显受控于构造尤其是新构造运动,高差一般小于500 m;往南东方向河流密集深切,河谷狭窄,谷坡陡峭,干流河谷高差一般超过1 000 m,为典型的高山峡谷地貌,山脉走向多与构造线方向一致,呈北北西或近南北向展布,在宽分水岭地带保留有高原夷平面特征。上述地形地貌特征控制了研究区的气候分布格局,高原区为亚寒带半湿润高原气候,冻融作用强烈,多年冻土、季节性冻土发育;高山峡谷区受近南北走向的山脉和大气环流的影响,昼夜温差大,降水少,气温垂直分带明显,表现为河谷地区炎热、高山地区寒冷。

地质构造方面,研究区地处印度板块与欧亚板块的碰撞地带,新生代期间经历了右旋压扭、大规模走滑挤出、左旋张扭等构造变形阶段,形成了多期、多组复杂的构造形迹,且多数至今保留显著的线性特征^[20]。第四纪以来,该区转入了新的构造幕,地壳活动仍非常强烈。GPS观测与现代地震活动研究表明,研究区现今的块体活动以围绕东喜马拉雅构造结构顺时针旋转为特征(图1),调节青藏高原地区物质向东挤出的作用或印度板块与扬子地块之间强烈右旋剪切的作用^[21-24],地震活动表现为震级大、频率高的特点^[6, 25]。

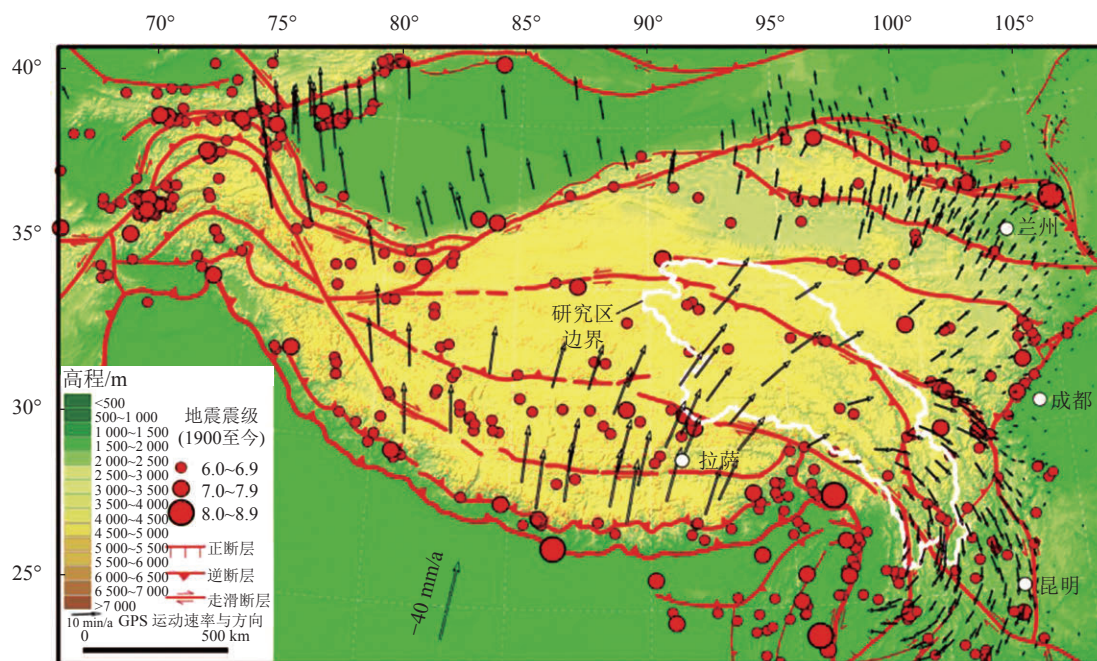


图1 青藏高原及邻区地震构造

Fig. 1 Seismo-tectonics of Tibetan Plateau and its adjacent region

研究区差异性地形地貌与气候特征、强烈的新构造运动与地震活动,导致了该区内外力作用强烈、地质环境脆弱、地质灾害频发、灾害链特征显著,对人民生命财产和工程建设安全、重要基础设施的正常运营构成了严重威胁。

2 数据和研究方法

2.1 数据

采用分辨率为90 m的SRTM数字高程模型(DEM)进行地形地貌分析。SRTM DEM数据由美国航天飞机雷达地形测绘任务(Shuttle Radar Topography Mission, SRTM)获得,并于2003年公开发布,经历多次修订完善,形成了目前的V4.1版本,数据的水平精度为20 m,高程精度为16 m^[26]。该数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(<http://www.gscloud.cn>)。研究区地层岩性、断裂构造采用1:500 000地质图整编而成。研究区大地构造单元划分由潘桂棠等^[27]编制的1:1 500 000青藏高原及邻区大地构造图矢量化而成。

2.2 研究方法

本文采用遥感解译、现场调查、空间分析相结合的分析方法对滑坡灾害空间分布、发育规律、影响灾害发育的主要因素进行研究。具体包括:

1)研究区流域边界的确定。通过对90 m的SRTM DEM进行填洼处理后,计算流向,汇流图层,确定研究区三江流域的边界。

2)滑坡灾害的解译与验证。首先,利用GoogleEarth对研究区的滑坡灾害进行初步解译;然后,结合现场调查成果,进一步完善解译标志;最后,进行系统的详细解译。结合影像特点和滑坡特征,将研究区滑坡灾害分为滑坡体、崩塌堆积体、变形体3大类。

在GoogleEarth影像上,滑坡在形态上表现为“双沟同源”,后壁陡峻呈圈椅状,一般发育滑坡缓坡平台,因而其剖面形态往往呈上凸型。滑坡体与周围地质体在色调、纹理上有明显差异,新近发生的滑坡一般色调浅、纹理粗糙;老滑坡一般色调较深,与周围对比明显。高山峡谷河段两岸滑坡可能造成堵江,致使该处河流出现激流险滩,在影像上表现为明显的亮白色。崩塌多发育在沟谷或河流两侧的陡崖、陡坎地带,源区岩体破碎、地形陡峭、纹理粗糙且多呈浅色调;堆积体通常具有由于崩塌发生后岩土体顺坡运动而形成的线性纹理,植被稀疏,多显浅色调,纹理粗糙,其剖面形态通常为直线型。变形体是指影像上有可辨识的弧形裂缝、与等高线近于平行的拉张裂缝等变形迹象,但尚未发生明显破坏的斜坡。变形裂缝在影像上往往表现为亮白色或暗黑色条带;变形显著的坡体,其前缘往往形成小型崩塌,解译过程

中将其一并归入变形体范围内。植被覆盖对解译结果的影响主要表现为,在森林覆盖茂密地区,部分小型滑坡由于植被覆盖而形态特征不明显,解译难度较大;部分变形体的变形迹象被植被覆盖难以解译。详细解译完成后,对研究区1 000余处规模较大的滑坡灾害进行了现场验证,结果表明其准确率超过85%。

3)滑坡灾害发育特征分析。利用SRTM DEM数据形成研究区海拔高程、地形坡度、坡向、相对高差栅格图层。地层岩组是根据1:500 000地质图地层岩性特征进行归类并栅格化而成;距主要断层的距离图层根据1:500 000地质图中的主要断层并结合1:1 500 000青藏高原及邻区大地构造图整编后进行缓冲区分析而成;大地构造单元图层根据1:1 500 000大地构造单元矢量图层栅格化而成。在获得上述栅格图层后,分别进行分带、分类,并将其与滑坡灾害空间分布图层进行叠加分析,并以滑坡灾害所占面积的百分比为依据确定研究区滑坡灾害的主要发育特征。

3 滑坡灾害发育特征

3.1 滑坡灾害类型与规模

研究区累计解译面积不小于0.001 km²的滑坡灾害60 315处,其中,金沙江25 476处,澜沧江15 359处,怒江19 480处(图2)。值得指出的是,研究区绝大部分地区GoogleEarth影像清晰,但少数地段(约占研究区面积3%)影像分辨率较差,导致该类地段滑坡灾害难以详细解译,有待于影像更新后进一步完善。尽管存在上述缺陷,目前的解译成果能够反映研究区滑坡灾害的总体规律。

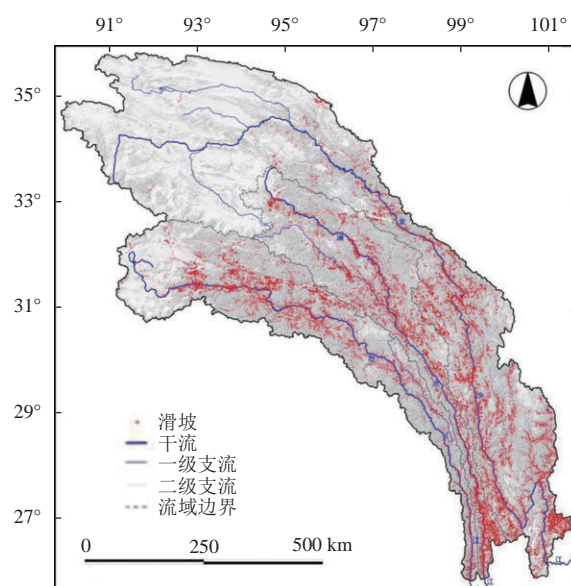


图2 研究区滑坡灾害空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of landslide hazards in the study area

根据遥感解译和现场验证结果, 研究区滑坡灾害包括滑坡、崩塌、变形体等3种类型。其中: 滑坡共有58 945处, 占总数97.73%; 崩塌957处, 占总数1.59%; 变形体413处, 占总数0.68%(表1)。由此可见, 研究区滑坡灾害类型以滑坡为主, 崩塌灾害次之。由于研究区滑坡灾害数量众多, 现场调查难以完整估计各类滑坡灾害的体积, 故仅以滑坡灾害的面积进行统计(表1)。研究区最大滑坡面积为5.56 km², 面积大于

表 1 滑坡灾害面积分布统计

面积/m ²	各滑坡灾害类型数量			总数
	滑坡	崩塌	变形体	
>10 ⁶	272	3	23	298
10 ⁵ ~10 ⁶	13 537	291	212	14 040
10 ⁴ ~10 ⁵	37 636	607	170	38 413
10 ³ ~10 ⁴	7 500	56	8	7 564
合计	58 945	957	413	60 315

1 km²的滑坡272处, 0.1~1.0 km²的滑坡13 537处; 最大崩塌面积为2.08 km², 面积大于1 km²的崩塌3处, 0.1~1.0 km²的崩塌291处; 最大变形体面积为2.52 km², 面积大于1 km²的变形体23处, 0.1~1.0 km²的变形体212处。

3.1.1 滑坡

滑坡的发生受地形地貌、地层岩性、地质构造、气象水文、植被和人类活动等诸多因素控制, 因其控制因素的不同, 发育特征及其组合关系存在差别, 滑坡在机制模式上各有差异。通过遥感解译并结合现场调查成果, 根据滑坡物质组成、滑动模式, 研究区的滑坡主要包括:

1) 堆积层滑坡。研究区崩塌堆积、冲洪积、冰碛及坡残积分布广泛, 为堆积层滑坡的发生提供了物质基础。图3(a)即为典型的堆积层滑坡, 堆积体系碎裂灰岩风化崩塌堆积而成, 在强降雨作用下发生高位滑动, 形成堆积层滑坡。



图 3 研究区典型滑坡特征

Fig. 3 Features of typical landslides in the study area

2) 冻融泥流/蠕滑。研究区总体海拔高, 冻融作用显著, 为山地型和高原型冻融泥流/蠕滑的发育创造了有利条件。高原型冻融泥流/蠕滑一般指在海拔

高程超过4 300 m的低缓高原面上, 由于永久冻土上部1~3 m深度内受气候变暖、降雨增加的影响, 致使该深度内土的含水量增加、冻土融化后沿下伏永久

冻土顶部发生泥流或蠕滑变形。山地型冻融泥流/蠕滑一般发生在山区海拔高度超过3 800 m的斜坡或地形低洼地带,季节冻融作用显著,在冻融作用下高含水量的坡残积、崩塌堆积体顺坡发生泥流/蠕滑变形。图3(b)为发生于坡残积土中的山地型冻融泥流,图3(c)为由于冻融作用而产生的坡残积层蠕滑变形。

3) 岩质滑坡。岩质滑坡是研究区最普遍的滑坡类型。研究区高山峡谷地带的高陡斜坡为该类型滑坡的形成提供了有利的地形地貌条件。斜坡的岩体结构类型综合反映了斜坡坡度、坡向与地层产状等因素的空间组合关系,是决定斜坡岩体强度和可能变形方式的主要因素,对岩质滑坡的形成机制具有控制作用。根据斜坡的岩体结构特征,岩质滑坡主要包括碎裂结构岩质滑坡、顺层滑坡、溃屈破坏、倾倒破坏。碎裂结构岩质滑坡发生是由于斜坡岩体受构造、风化影响,岩体结构破碎的斜坡中,具有弧形滑动特征(图3(d))。顺层滑坡发生于顺向结构斜坡中,主要沿岩层层面或层间软弱岩层发生滑动破坏;图3(e)为典型的板岩、千枚岩等软弱岩层顺层滑坡,图3(f)为灰岩顺下伏板岩发生顺层滑坡。倾倒破坏主要发生于中陡倾薄层状反倾结构斜坡中,图3(g)为发生在变质砂岩、石英片岩反倾结构斜坡中的大型倾倒破坏。溃屈破坏主要发生于中陡倾向结构斜坡中,坡体中后部发生顺层重力变形,由于前缘岩层的阻挡而造成坡体中前部溃屈拱起,随着变形的加剧而发生溃屈破坏,图3(h)为典型的陡倾顺层斜坡溃屈破坏。

在环境发生显著变化的条件下,如地震、强降雨、人类工程活动等,既有老/古滑坡发生复活是研究区内滑坡的重要特征。图3(i)为澜沧江中游因水库蓄水而造成古滑坡前缘产生复活变形破坏。

3.1.2 崩塌

崩塌是指斜坡岩土体在重力作用下发生崩落,并堆积于坡脚的地质作用和现象。研究区内大量陡峻斜坡岩体经裂隙切割后完整性降低,在自重、降雨、

地震作用下常发生崩塌灾害。岩质崩塌是研究区内崩塌的主要类型。研究区内部分地段斜坡在自然因素或人类活动作用下,形成大于70°甚至近于直立的陡坡,不利于斜坡的稳定。陡峻斜坡岩体中发育的陡倾构造裂隙或卸荷裂隙,不仅破坏了岩体的完整性,而且将岩体切割形成许多块体,为崩塌的形成提供了内在的物质基础。岩体裂隙中的动、静水压力不仅可以降低岩石强度,还可以形成润滑作用、融冻风化和冰劈作用等,在重力作用、人类工程活动或地震作用下,使岩块滑落或倾倒形成崩塌。

研究区崩塌发育,尤其是小规模崩塌十分普遍,本文仅对规模较大的崩塌堆积体进行了解译。根据崩塌堆积体的形态和物源特点,可分为集中物源型崩塌和分布物源型崩塌。集中物源型崩塌形成的堆积体形态呈明显的锥形,其顶点对应的坡体上部即为崩塌物源区(图4(a));分布物源型崩塌形成的堆积体(图4(b))形态多样,如梯形及其他不规则形态。

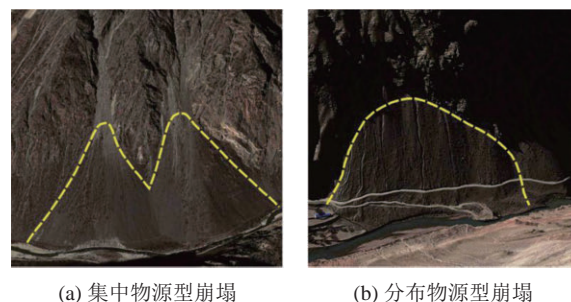


图 4 研究区典型崩塌堆积影像特征

Fig. 4 3-D images of typical rockfalls in the study area

3.1.3 变形体

变形体是指坡体具有明显变形迹象,如拉张裂缝、拉陷槽、变形反坎等,但又没有发生显著破坏的斜坡。现场调查表明,由于研究区板岩、千枚岩、片岩等薄层状软弱岩层分布广泛,倾倒变形十分发育,但在遥感影像上因影像分辨率所限,难以准确解译,故仅对影像上变形迹象较明显的大型变形体进行解译。图5为研究区典型变形体的影像特征。

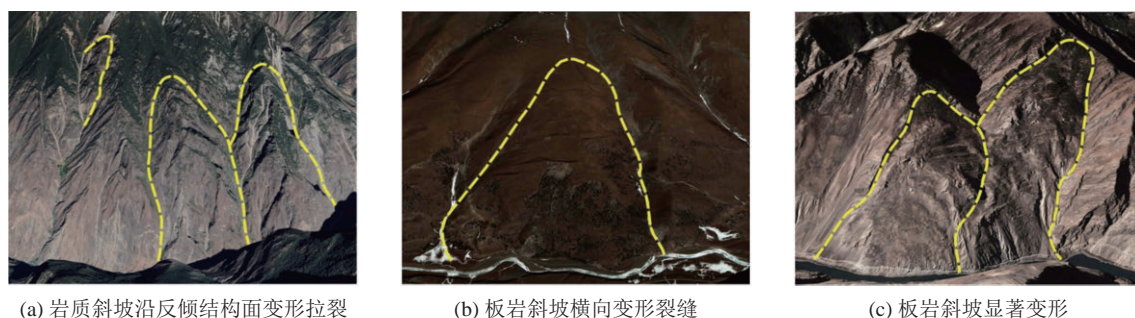


图 5 研究区典型变形体

Fig. 5 Typical deforming bodies in the study area

图5(a)中,岩质斜坡中沿反倾结构面出现明显拉裂变形;图5(b)中,与等高线近于平行的变形裂缝清晰可见;图5(c)为板岩斜坡发生显著变形,变形继续发展即可演化为滑坡。变形体是滑坡、崩塌发生的前奏,在灾害预警中应予以足够的重视。

3.2 滑坡灾害空间分布特征

从整个研究区来看,滑坡灾害所占面积为 $5\,324\text{ km}^2$,占研究区总面积的1.15%;滑坡灾害发育数量密度为 $0.13\text{ 处}/\text{km}^2$ 。从三江流域滑坡灾害发育的差异性来看,金沙江流域滑坡灾害所占面积为 $2\,387\text{ km}^2$,占流域面积的0.91%,数量密度为 $0.10\text{ 处}/\text{km}^2$;澜沧江流域滑坡灾害所占面积为 $1\,344\text{ km}^2$,占流域面积的1.54%,数量密度为 $0.18\text{ 处}/\text{km}^2$;怒江流域滑坡灾害所占面积为 $1\,594\text{ km}^2$,占流域面积的1.42%,数量密度为 $0.17\text{ 处}/\text{km}^2$ 。由此可见,无论从滑坡所占面积百分比,还是滑坡灾害发育的数量密度,均以澜沧江流域最为发育,怒江流域次之,金沙江流域最低。

受区域构造活动、地形地貌、地层岩性和人类活动影响,研究区滑坡灾害在空间分布上具有明显的不均匀性(图2)。从滑坡灾害宏观分布特征来看,藏北高原区滑坡灾害不发育,深切峡谷区滑坡灾害数量多、密度大。在深切峡谷区,滑坡灾害的分布具有以下特征:

1)沿深切峡谷分布的成带性与差异性。高山峡谷区由于河流的强烈下切作用,地形陡峭、高差大,位能条件好,具备滑坡灾害最有利的孕灾条件组合,导致滑坡灾害在河谷或支沟内成带状分布。同时,滑坡灾害沿深切峡谷的分布受地层岩性、构造影响,又具有一定的差异性,如马吉—丙中洛上游20 km的怒江干流河段以片麻岩为主,大型滑坡、崩塌灾害不发育;而该河段的上游以板岩、片岩为主,滑坡灾害分布密集。

2)沿部分断裂构造带分布的密集性。研究区地壳运动活跃,隆升及地震强烈。断裂带岩体破碎,裂隙发育,有利于崩塌、滑坡灾害的形成。将滑坡分布图与断裂构造叠加后可以看出,滑坡灾害沿部分断裂带或断裂带的特定区段密集分布,如沿巴塘断裂、维西—乔后断裂两侧滑坡灾害分布密集,具有典型的群发性特征;又如沿金沙江断裂带的苏哇龙—雄松断裂的拉哇—昌波段,金沙江干流及其两侧支沟内大型—巨型滑坡数量众多且密集分布。

4 滑坡灾害发育的影响因素

研究区滑坡灾害与地形地貌、地层岩性、地质构造等地质环境条件密切相关,是滑坡灾害孕育与发生的内在因素。如第3.2节所述,滑坡灾害占研究区总

面积的1.15%,在此,不妨以滑坡灾害所占面积百分比超过2.0%作为滑坡发育的明显优势界限,以小于0.7%作为滑坡灾害不发育的界限。

4.1 地形地貌特征

研究区滑坡灾害的发生与地形地貌关系十分密切,是滑坡灾害孕育发生的主控因素之一。地形地貌特征主要包括地形高程、地形坡度、地形坡向、相对高差等。

研究区高程变化显著,最高海拔高程超过6 900 m,最低约800 m。将研究区内高程按照500 m的间距进行分组,分别统计每个分组内的滑坡面积占该区域面积的百分比,如图6所示。由图6可知:800~2 000 m高程范围内,滑坡所占该范围面积的百分比随高程的增加而逐渐增加;高程大于2 000 m范围,滑坡所占该范围面积的百分比随着高程的增加而减少;大于4 500 m高程范围,滑坡灾害所占该范围面积百分比均小于0.7%,故滑坡灾害不发育;小于4 000 m高程范围内,滑坡灾害所占该范围面积百分比均大于2.0%,故小于4 000 m高程为研究区滑坡发育的优势高程。

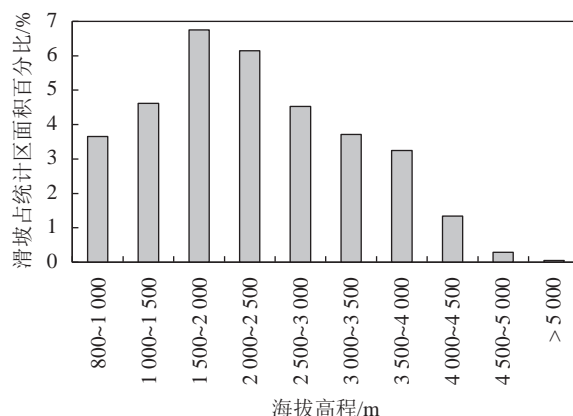


图6 不同海拔高程中滑坡占统计区面积百分比

Fig. 6 Variation of percentage of landslide area with elevation

地形坡度是影响滑坡灾害发生的动力条件。一般来说,较高的地形坡度有利于滑坡灾害的发生。另一方面,过高的地形坡度不仅不利于松散堆积物等滑坡灾害物源的积累,且表面坡体岩体强度较高,不易产生滑坡灾害。研究区地形坡度变化明显,最小坡度为0,最大坡度超过80°,高坡度值主要分布在深切高陡河谷区。将研究区坡度进行分组(大于45°为一组,其余按每5°间距进行分组),并统计各组的滑坡占统计区面积百分比,如图7所示。由图7可知:滑坡所占百分比随着坡度的增大而增加,在20°~25°达到峰值,然后随坡度的继续增大而降低;坡度20°~30°是滑坡发育的明显优势坡度范围;坡度小于10°、大于45°范围内滑坡灾害不发育。

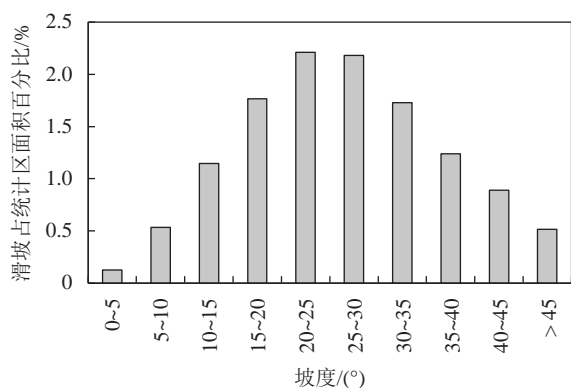


图 7 不同坡度时滑坡占统计区面积百分比

Fig. 7 Variation of percentage of landslide area with slope angle

坡向影响热量和降雨分布,从而影响植被覆盖,并且对于地震触发的滑坡灾害,地震动力的传播方向使得滑坡灾害具有一定的优势坡向。将研究区坡向按照N、NE、E、SE、S、SW、W、NW进行分带,统计每个坡向分带内的滑坡面积所占百分比,制作其与坡向分布的蛛网图(图8)。由图8可知,尽管坡向为NE-E和NW-W的坡体滑坡灾害相对发育,其滑坡面积所占百分比约为其他坡向的1.2~1.3倍,但最大仅为1.33%,因此坡向对滑坡灾害发育的影响不显著。

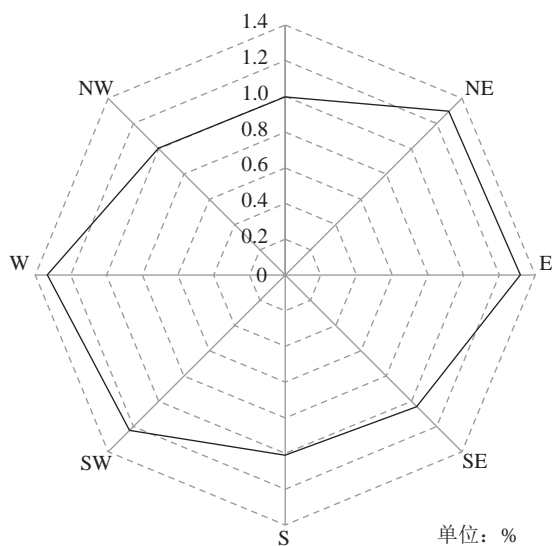


图 8 不同坡向时滑坡所占面积百分比

Fig. 8 Variation of percentage of landslide area with slope aspect

相对高差为一个特定的区域内最高点与最低点海拔高度的差值,不仅是反映地形起伏程度、描述地貌形态的定量指标,也是进行区域地貌类型划分的客观依据^[28]。首先,利用90 m的SRTM DEM,将统计单位设置为40×40栅格(即3 600 m×3 600 m)的方格,将每个方格中最高点和最低点之间的高差作为相对高差;然后,根据中国1:1 000 000数字地貌制图规范^[28],结合研究区具体特点,将相对高差值(单位:m)按

<100(盆地与台地)、100~200(丘陵)、200~500(小起伏山地)、500~1 000(中起伏山地)、1 000~2 500(大起伏山地)进行分类,得到研究区的相对高差分布(图9)。由图9可知,藏北高原区相对高差一般小于200 m,其余除分水岭残留夷平面、盆地区相对高差较小外,其他区域相对高差一般超过500 m,深切峡谷区三江干流及其主要支流相对高差一般超过1 000 m。

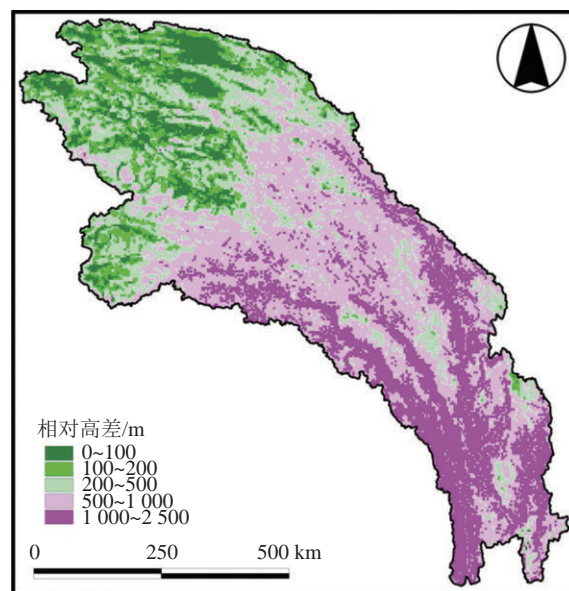


图 9 研究区相对高差分布

Fig. 9 Relief of the study area

通过统计可得到相对高差各组滑坡面积所占百分比,如图10所示。由图10可知,滑坡灾害所占统计区面积百分比随相对高差的增加而急剧增大。相对高差小于200 m的区域为0.04%, 200~500 m区域增加到0.24%, 500~1 000 m区域增加到1.23%, 1 000~2 500 m区域急剧增加到3.09%。因此相对高差是滑坡灾害发育的控制性因素之一。相对高差大于1 000 m是滑坡发育的明显优势高差范围,相对高差小于500 m的范围滑坡灾害不发育。相对高差大的区域可为滑坡灾害的发生提供有利的物质条件及地形临空条件。

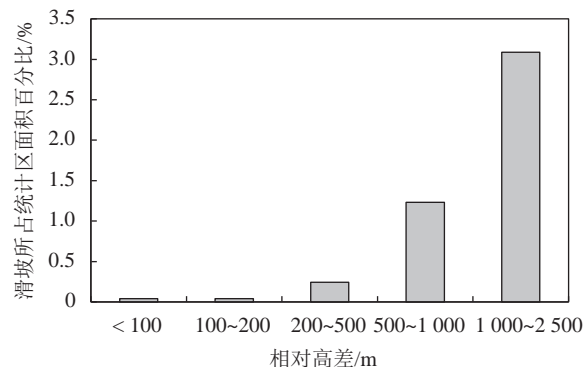


图 10 不同相对高差条件下滑坡所占面积百分比

Fig. 10 Variation of percentage of landslide area with relief

4.2 地层岩性及其组合

地层岩性及其组合特征是滑坡孕育、发生的物质基础。不同的岩土体具有不同的力学性质,不同的岩性组合及斜坡结构类型具有不同的稳定性,其发育的滑坡灾害类型不同。在1:500 000地质图地层岩性分析的基础上,将研究区地层岩性分为第四系松散沉积(A)、碳酸盐岩(B)、碎屑岩(C)、碳酸盐岩夹碎屑岩(D)、碎屑岩与碳酸盐岩组(E)、碎屑岩夹碳酸盐岩(F)、泥页岩与粉砂岩组(G)、碎屑岩与火山岩组合(H)、火山岩(I)、板岩、火山岩与碳酸盐岩组合(J)、片麻岩与片岩岩组(K)、板岩与千枚岩岩组(L)、砂岩与变质砂岩岩组(M)、砂岩与板岩互层(N)、碎屑岩及板岩夹灰岩(O)、中酸性岩(P)、基性岩(Q)、蛇绿混杂岩(R)等18个岩组(图11)。

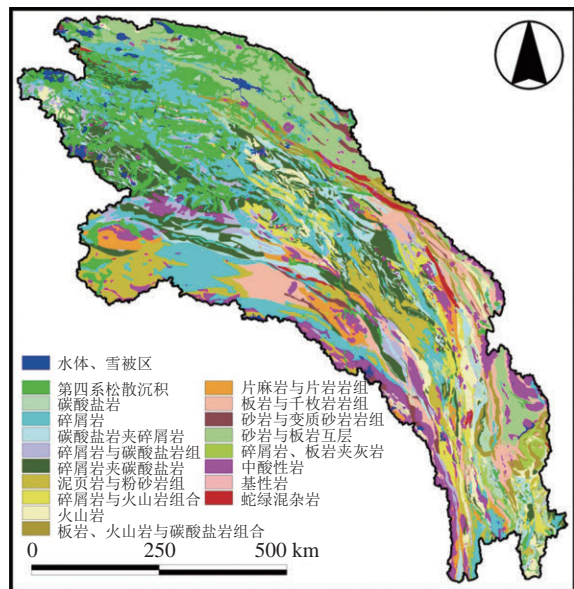


图 11 地层岩组分布

Fig. 11 Distribution of lithological groups

岩组与滑坡灾害占统计区面积百分比的关系如图12所示。

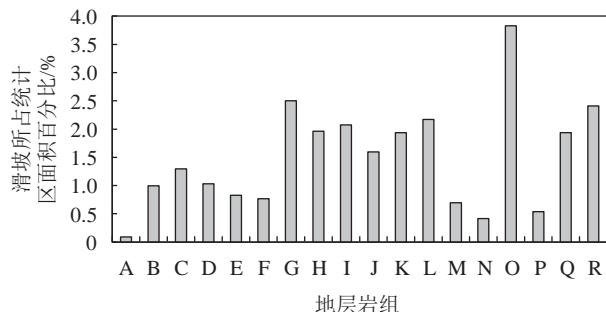


图 12 不同岩组所对应的滑坡面积占统计区百分比

Fig. 12 Variation of percentage of landslide area with lithological groups

由图12可知,滑坡灾害与岩组之间具有密切的关系,滑坡灾害在碎屑岩与板岩夹灰岩(O)岩组中

最为发育,然后依次为泥页岩与粉砂岩组(G)、蛇绿混杂岩(R)、板岩与千枚岩岩组(L)、火山岩(I)。上述岩组中滑坡灾害占统计区面积的百分比均大于2.0%,是滑坡灾害发育的优势岩组。第四系松散沉积(A)、砂岩与变质砂岩岩组(M)、砂岩与板岩互层(N)、中酸性岩(P)岩组中滑坡灾害不发育。从滑坡灾害发育的优势岩组可以看出:软岩(如板岩、千枚岩、泥页岩、粉砂岩)岩性软弱,强度低,易发生滑坡灾害;蛇绿混杂岩、火山岩岩体结构破碎,为典型的碎裂结构岩体,该类岩体构成的斜坡易于失稳;碎屑岩、板岩夹灰岩岩组为典型的软硬相间层状结构岩体,其为顺向坡时易顺软弱岩层发生滑动破坏,其为反向坡时易发生倾倒破坏,在怒江上游开展的现场调查表明,该类岩组中滑坡灾害分布十分广泛。

4.3 主要断裂构造

研究区内发育许多区域性深大断裂,特别是部分断裂为活动性断裂。断裂带内斜坡岩体结构破碎,两侧岩体结构面发育,使断裂带及其附近一定范围内斜坡岩体的完整性显著降低,岩土体力学性质差,斜坡稳定性降低,且有利于大型滑坡的发生;同时,断裂的发育为地质块体的快速差异性隆升奠定了基础,造成河流深切,为滑坡灾害的产生创造了有利的地形地貌条件^[29-30]。沿活动断裂发生的强烈地震为滑坡灾害的形成提供了动力来源,也会造成斜坡岩体震裂、松动,使震前不存在滑坡隐患的坡体成为灾害易发区,在降雨作用下发生滑坡^[30]。

图13为整编后的研究区主要断裂构造分布。

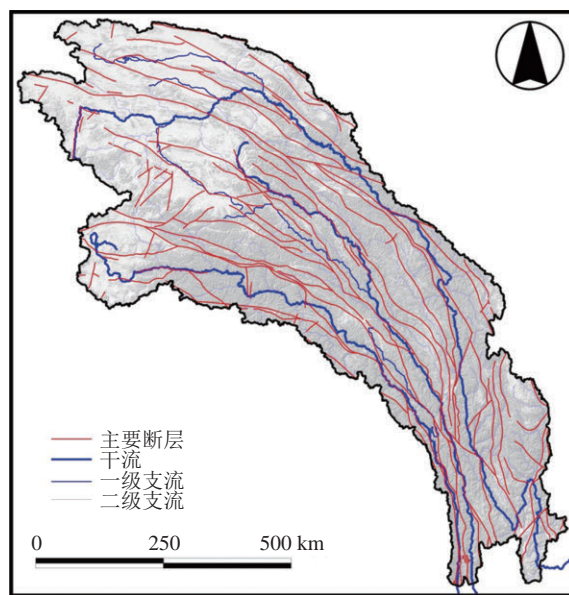


图 13 研究区主要断裂构造分布

Fig. 13 Distribution of major faults in the study area

研究区内距离主要断裂的最远距离超过60 km,将距离主要断裂按照1 km缓冲区进行分析,将大于

表 2 研究区大地构造单元及其代码^[27]
Tab. 2 Tectonic units and code of the study area^[27]

一级构造单元	二级构造单元	三级构造单元
羌塘—三江造山系 (A)	巴颜喀拉地块 (A1)	巴颜喀拉前陆盆地 (A1-1) 雅江残余盆地 (A1-2)
	甘孜—理塘弧盆系 (A2)	甘孜—理塘蛇绿混杂岩 (A2-1) 义墩—沙鲁岛弧 (A2-2) 勉戈—青达柔弧后盆地 (A2-3)
	中咱—中甸地块 (A3)	中咱碳酸盐台地 (A3)
	西金乌兰—金沙江—哀牢山结合带 (A4)	金沙江蛇绿混杂岩 (A4-1) 西金乌兰含蛇绿混杂带 (A4-2)
	昌都—兰坪—思茅地块 (A5)	冶多—江达—维西—绿春陆缘弧 (A5-1) 昌都—兰坪—思茅双向弧后前陆盆地 (A5-2) 开心岭—杂多—景洪陆缘弧 (A5-3)
	乌兰乌拉—澜沧江结合带 (A6)	乌兰乌拉蛇绿混杂岩带 (A6-1) 北澜沧江蛇绿混杂岩 (A6-2)
	北羌塘块体 (A7)	北羌塘弧后前陆盆地 (A7-1) 那底岗日—格拉丹东陆缘弧 (A7-2)
	崇山—临沧地块 (A8)	碧罗雪山—崇山变质基底 (A8)
	羌塘—左贡增生弧盆系 (B1)	吉塘—左贡变形变质杂岩 (B1-1) 南羌塘增生盆地 (B1-2)
	班公湖—怒江—昌宁—孟连对接带 (B)	班公湖—怒江蛇绿岩杂岩 (B2-1) 聂荣增生弧 (B2-2) 嘉玉桥增生弧 (B2-3)
冈底斯—喜马拉雅造山系 (C)	冈底斯—察隅弧盆系 (C1)	那曲—洛隆弧前盆地 (C1-1) 班戈—腾冲岩浆弧 (C1-2)
	保山地块 (C2)	保山陆表海盆地 (C2)
扬子陆块区 (D)	上扬子陆块 (D)	盐源—丽江陆缘裂谷盆地 (D)

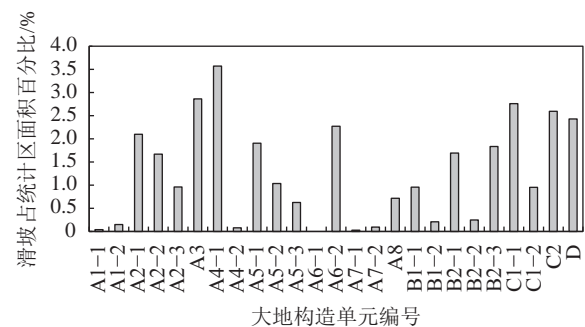


图 16 不同构造单元对应的滑坡所占面积百分比

Fig. 16 Variation of percentage of landslide area with tectonic units

5 结 论

通过研究, 本文得到以下主要结论和认识:

1) 青藏高原东南三江流域滑坡灾害发育, 在面积为 $46.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ 范围内, 解译面积不小于 0.001 km^2 的滑坡灾害 60 315 处; 灾害类型主要包括滑坡体、崩塌堆积体和变形体, 滑坡占总数的 97.73%。

2) 滑坡灾害空间分布具有沿深切峡谷成带分布, 沿部分断裂构造, 如巴塘断裂、维西—乔后断裂、苏

哇龙—雄松断裂的拉哇—昌波段等密集分布的特点。

3) 滑坡灾害多发育在坡度 $20^\circ \sim 30^\circ$, 高程小于 4 000 m, 相对高差超过 1 000 m 的斜坡内。

4) 碎屑岩、板岩夹灰岩组合、泥页岩与粉砂岩组、蛇绿混杂岩、板岩与千枚岩岩组、火山岩为滑坡灾害发育的明显优势岩组。

5) 金沙江蛇绿混杂岩、中咱碳酸盐台地、那曲—洛隆弧前盆地、保山陆表海盆地、盐源—丽江陆缘裂谷盆地、北澜沧江蛇绿混杂岩、甘孜—理塘蛇绿混杂岩为滑坡灾害明显优势发育的构造单元。

6) 影响滑坡灾害发育的地形地貌与地质因素主要为地形坡度、高程、相对高差、地层岩组及大地构造单元, 而与主要断裂的距离、坡向的影响不显著。

参考文献:

[1] Yao Tandong, Chen Fahu, Cui Peng, et al. From Tibetan Plateau to Third Pole and Pan-third Pole[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(9): 924–931. [姚檀栋, 陈发虎, 崔鹏, 等. 从青藏高原到第三极和泛第三极[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(9): 924–931.]

[2] 常承法, 潘裕生. 青藏高原地质构造[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 1–60.

- [3] Molnar P, Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision[J]. *Science*, 1975(189): 419–426.
- [4] Yuan Daoyang, Zhang Peizhen. Discussion on progress and problems in the research of Cenozoic structure and Quaternary geology of Qinghai–Xizang Plateau[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2001, 23(2): 199–205. [袁道阳, 张培震. 青藏高原新生代构造和第四纪研究的进展及问题讨论[J]. *西北地震学报*, 2001, 23(2): 199–205.]
- [5] Liu Jing, Ding Lin, Zeng Lingsen, et al. Large-scale terrain analysis of selected regions of the Tibetan plateau: Discussion on the origin of plateau planation surface[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(5): 285–299. [刘静, 丁林, 曾令森, 等. 青藏高原典型地区的地貌量化分析——兼对高原“夷平面”的讨论[J]. *地学前缘*, 2006, 13(5): 285–299.]
- [6] Deng Qidong, Cheng Shaoping, Ma Ji, et al. Seismic activities and earthquake potential in the Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(7): 2025–2042. [邓起东, 程绍平, 马冀, 等. 青藏高原地震活动特征及当前地震活动形势[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(7): 2025–2042.]
- [7] Cui Peng, Chen Rong, Xiang Lingzhi, et al. Risk analysis of mountain hazards in Tibetan Plateau under global warming[J]. *Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis*, 2014, 10(2): 103–109. [崔鹏, 陈容, 向灵芝, 等. 气候变暖背景下青藏高原山地灾害及其风险分析[J]. *气候变化研究进展*, 2014, 10(2): 103–109.]
- [8] Yin Yueping. Characteristics and mitigation of Yigong rapid huge landslide in Bomi, Tibet[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2000, 27(4): 8–11. [殷跃平. 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*, 2000, 27(4): 8–11.]
- [9] Xu Qiang, Zheng Guang, Li Weile, et al. Study on successive landslide damming events of Jinsha River in Baige Village on October 11 and November 3, 2018[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(6): 1534–1551. [许强, 郑光, 李为乐, 等. 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*, 2018, 26(6): 1534–1551.]
- [10] Deng Jianhui, Gao Yunjian, Yu Zhiqiu, et al. Analysis on the formation mechanism and process of Baige landslides damming the upper reach of Jinsha River, China[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(1): 9–16. [邓建辉, 高云建, 余志球, 等. 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*, 2019, 51(1): 9–16.]
- [11] Feng Wenkai, Zhang Guoqiang, Bai Huilin, et al. A preliminary analysis of the formation mechanism and development tendency of the huge Baige landslide in Jinsha River on October 11, 2018[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(2): 415–425. [冯文凯, 张国强, 白慧林, 等. 金沙江“10·11”白格特大型滑坡形成机制及发展趋势初步分析[J]. *工程地质学报*, 2019, 27(2): 415–425.]
- [12] Zhu Boqin, Nie Yueping. Using satellite remotely sensed data to monitor Yigong tremendous high-speed landslide[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2001, 10(3): 103–107. [朱博勤, 聂跃平. 易贡巨型高速滑坡卫星遥感动态监测[J]. *自然灾害学报*, 2001, 10(3): 103–107.]
- [13] Xu Q, Shang Y, van Asch T, et al. Observations from the large, rapid Yigong rock slide–debris avalanche, southeast Tibet[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2012, 49(5): 589–606.
- [14] Guo Changbao, Du Yuben, Tong Yuanqing, et al. Huge long-runout landslide characteristics and formation mechanism: A case study of the Luanshibao landslide, Litang County, Tibetan Plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 2016, 35(8): 1332–1345. [郭长宝, 杜宇本, 佟元清, 等. 青藏高原东缘理塘乱石包高速远程滑坡发育特征与形成机理[J]. *地质通报*, 2016, 35(8): 1332–1345.]
- [15] Wang Y F, Cheng Q G, Lin Q W, et al. Insights into the kinematics and dynamics of the Luanshibao rock avalanche (Tibetan Plateau, China) based on its complex surface landforms[J]. *Geomorphology*, 2018, 317: 170–183.
- [16] Zhu Y, Dai F, Yao X, et al. Field investigation and numerical simulation of the seismic triggering mechanism of the Tahman landslide in eastern Pamir, Northwest China[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(8): 5795–5809.
- [17] Wang Y F, Cheng Q G, Yuan Y Q, et al. Emplacement mechanisms of the Tagarma rock avalanche on the Pamir-western Himalayan syntaxis of the Tibetan Plateau, China[J]. *Landslides*, 2020, 17: 527–542.
- [18] Zhang Luqing, Xu Bing, Shang Yanjun, et al. Engineering geological investigation and assessment on rockfall hazard along Basu—Linzi section of south line of Sichuan—Tibet highway[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(9): 1551–1557. [张路青, 许兵, 尚彦军, 等. 川藏公路南线八宿—林芝段滚石灾害的工程地质调查与评价[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(9): 1551–1557.]
- [19] Fan Lei, Zhang Qi. Occurrence and distribution characteristics of landslides at Suwalong—Benzilan along Jinsha River[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2016, 33(3): 38–41. [范雷, 张琪. 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*, 2016, 33(3): 38–41.]
- [20] Wu Zhonghai, Long Changxing, Fan Taoyuan, et al. The arc rotational-shear active tectonic system on the southeastern margin of Tibetan Plateau and its dynamic characteristics and mechanism[J]. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(1): 1–31. [吴中海, 龙长兴, 范桃园, 等. 青藏高原东南缘弧形旋扭活动构造体系及其动力学特征与机制[J]. *地质通*

- 报,2015,34(1):1-31.]
- [21] Holt W E, Ni J F, Wallace T C, et al. The active tectonics of the eastern Himalayan syntaxis and surrounding regions[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96(B9): 14595-14632.
- [22] Wang E C, Burchfiel B C. Interpretation of Cenozoic tectonics in the right-lateral accommodating zone between the Ailao Shan shear zone and the eastern Himalayan synaxis[J]. *International Geology Review*, 1997, 39: 191-219.
- [23] Zhang Peizhen, Wang Qi, Ma Zongjin. GPS velocity field and active crustal deformation in and around the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Earth Science Frontier*, 2002, 9(2): 442-450. [张培震, 王琪, 马宗晋. 青藏高原现今构造变形特征与GPS速度场[J]. *地学前缘*, 2002, 9(2): 442-450.]
- [24] Xu Xiwei, Wen Xueze, Zheng Rongzhang, et al. Pattern of latest tectonic motion and its dynamics for active blocks in Sichuan—Yunnan region, China[J]. *Science in China Series D Earth Sciences*, 2003, 46(Z2): 210-226.
- [25] Chen Lijun. Seismotectonic and seismic activity of Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Seismological Research*, 2013, 36(1): 123-131. [陈立军. 青藏高原的地震构造与地震活动[J]. *地震研究*, 2013, 36(1): 123-131.]
- [26] Rabus B, Eineder M, Roth A, et al. The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by space borne radar[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2003, 57: 241-262.
- [27] 潘桂棠, 王立全, 张万平, 等. 青藏高原及邻区大地构造图及说明书(1 : 1500000)[M]. 北京: 地质出版社, 2013: 1-28.
- [28] Xu Li, Li Jianghai, Liu Chiheng, et al. Research on geomorphological morphology and regionalization of Hoh Xil based on digital elevation model (DEM)[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2017, 53(5): 833-842. [许丽, 李江海, 刘持恒, 等. 基于数字高程模型(DEM)的可可西里地貌及区划研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(5): 833-842.]
- [29] Peng Jianbing. Some important problems to be addressed in research of active tectonics and environmental disasters in China[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2006, 14(1): 5-12. [彭建兵. 中国活动构造与环境灾害研究中的若干重大问题[J]. *工程地质学报*, 2006, 14(1): 5-12.]
- [30] Zhang Yongshuang, Guo Changbao, Yao Xin, et al. Research on the geohazard effect of active fault on the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2016, 37(3): 277-286. [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.]
- (编辑 李轶楠)

引用格式: Dai Fuchu, Deng Jianhui. Development characteristics of landslide hazards in Three-rivers basin of southeast Tibetan Plateau[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(5): 3-15. [戴福初, 邓建辉. 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*, 2020, 52(5): 3-15.]