

藏东南地区地质灾害空间分布及影响因素分析^{*}

王 盈¹, 金家梁², 袁仁茂¹

(1. 中国地震局地质研究所 活动构造与火山研究重点实验室, 北京 100029;
2. 国家发展和改革委员会 城市和小城镇改革发展中心, 北京 100045)

摘要: 综合已有研究成果, 在地质灾害解译的基础上, 对藏东南地区的崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害的分布特征、发育规律及其影响因素进行了分析。结果表明: 研究区地质灾害点主要分布在雅鲁藏布江流域北段以及“三江”流域南北两侧, 在空间展布上具有不均匀性和分段群集性。在断裂活动、地层岩性、地形地貌以及人类工程活动等因素的影响下, 地质灾害点集中发育在高山峡谷地貌、河流切割强烈的地区, 以大理岩、板岩、白云岩、石灰岩、钙质砂岩、超基性岩类等为主的较坚硬岩类和以片岩、片麻岩类为主的较坚硬-较软弱岩性分布的地区, 断裂带分布、构造活动强烈的地区以及人类工程活动强烈的地区, 如主要公路沿线等。

关键词: 藏东南地区; 地质灾害; 发育规律; 影响因素

中图分类号: P315.94

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2019)03-0428-10

0 引言

滑坡、泥石流等灾害作为世界范围内广泛分布且又极具破坏力的地质灾害类型, 不但对山区地貌演化过程具有重大影响, 而且经常造成重大的生命财产损失 (Aleotti, Chowdhury, 1999; Dai *et al.*, 2002; Guzzetti *et al.*, 1999)。尤其是在高山峡谷区, 极易发生滑坡、泥石流等灾害, 造成重大灾难和损失。

对区域地质灾害的发育和空间分布规律的研究主要基于 GIS 技术, 运用一定的统计方法分析灾害的分布与气象水文、地质构造、地层岩性以及人类活动等影响因素的相关性, 总结归纳地质灾害的发育和空间分布特征, 进而进行危险性分区与检验。影响因素大致分为地质环境因素, 如地形地貌、地质构造、地层岩性等 (夏金梧, 1995; 夏金梧, 郭厚桢, 1997; 王治华, 2007; Zhang *et al.*, 2012; 强菲等, 2015; 石玲等, 2013) 和诱发因素, 如地震 (祁生文等, 2009; 许冲等, 2013; 沈玲玲等, 2016; 代博洋等, 2017)、降雨 (陈剑等, 2005; Althuwaynee *et al.*, 2015) 等。通过对地质灾害进行概率统计, 可以获得更为广泛的分

布规律。目前研究主要是通过统计一些常见影响因素与地质灾害的面积或数量之间的关系, 或者借助分形理论 (滕宏泉等, 2016; 林涛, 2015) 分析评价影响因子的重要程度以及灾害的空间分布规律。

青藏高原东南缘是我国地震、滑坡及泥石流等地质灾害影响最为强烈的区域之一 (徐则民等, 2013; 张培震等, 2003), 特别是在地震或暴雨条件下, 数百米以上的高陡岸坡经常因集中性失稳而形成特大滑坡 (群), 造成河道堵塞 (Yuan *et al.*, 2010; 万海斌, 2000; 王兰生等, 2012), 因此, 这一地区也成为了全球发生滑坡、崩塌等地质灾害最频繁的地区之一 (徐则民等, 2013), 严重阻碍了当地的社会经济发展。以往对藏东南地区地质灾害的研究, 以川藏公路沿线一些大型或特大型灾害的具体实例或特定公路段的地质灾害分布特征研究居多, 如帕隆藏布 102 大滑坡、迫龙沟泥石流、易贡巨型大滑坡等 (程尊兰, 吴积善, 2011; 廖秋林等, 2003; 鲁修元等, 2000; 罗涛等, 2017; 吕杰堂等, 2003; 王治华, 2003; 袁广祥等, 2010; 曾庆利等, 2009)。也有对该地区地质灾害发生的必要条件、形成机理和发育规律以及灾害的易发性评估等的研究 (杜国梁等, 2016;

^{*} 收稿日期: 2018-09-27.

基金项目: 中国地震局地质研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项重点项目——典型山区地震滑坡评估技术及危险性区划研究 (IGCEA-1604) 资助。

郭佳宁等, 2009; 何果佑等, 2012; 王培清, 黎普明, 2002; 杨志华等, 2017)。

在前人研究基础上, 本文通过统计, 分析了藏东南地区的地质灾害和影响因子的相关性, 探讨了控制研究区地质灾害分布规律的地震构造背景条件, 分析了地质灾害的影响因素。

1 区域构造背景

藏东南地区地处青藏高原东南缘, 地势高陡, 平均海拔超过 4 000 m。总体上, 西北部地势高, 东南区域较低。研究区西北侧, 地貌起伏比较缓和, 湖泊分布广泛, 多年冻土发育, 为山原地貌; 东南侧为雅鲁藏布江流域和三江流域, 河流下切, 相对高差增大, 多为高山峡谷。但雅鲁藏布江流域属于喜马拉雅高山极高山地貌, 在大拐弯附近的高山上的海洋性冰川特别发育, 三江流域属于江河上游高山谷地和横断山高山峡谷地貌。在高山河谷地区, 多为深切峡谷, 山高谷深, 地表破碎, 地质灾害比较发育。

研究区是印度板块和欧亚板块的接触部位, 地质构造复杂, 包含拉萨地块、羌塘地块、川滇地块等, 主要断裂有雅鲁藏布江断裂、金沙江断裂、怒江断裂、嘉黎断裂等。地层岩性主要有前震旦系的千枚岩和板岩, 燕山期花岗岩, 大片的变质岩, 奥陶系的砂板岩、灰岩, 古生界的石英岩、白云岩、千枚岩等, 石炭系的灰岩、含煤碎屑岩、火山岩, 三叠系的灰岩、页岩、粉砂岩及少量火山岩, 侏罗系的灰岩、页岩、粉砂岩、火山岩, 白垩系花岗岩以及第四系沉积物。研究区各时期岩性均有分布, 包括不少侵入岩和变质岩, 在断裂活动的影响下, 岩性更为复杂多样。

2 数据选取

本文中的崩塌、滑坡、泥石流地质灾害数据一部分来源于高鹏 (2010) 的研究及全国地质灾害通报 (2009—2016 年)^① (中国地质灾害环境监测院), 共计有崩塌 156 个、滑坡 174 个、泥石流

608 个; 另一部分通过野外调查和基于 Google Earth 解译获取, 共计有崩塌 118 个、滑坡 201 个、泥石流 106 个。综上, 研究区内地质灾害点共有 1 363 个, 包括崩塌 274 个、滑坡 375 个、泥石流 714 个, 其分布状况见图 1, 其中, 泥石流灾害数量超过总数的 50% (表 1)。相关水系和流域数据则来源于中国科学院资源环境科学数据中心^②; 高程、坡度、坡向、斜坡曲率等数据是基于 NASA SRTM1 v3.0 30m 的 DEM 数据; 公路网数据来源于 1:500 万西藏交通地图 2014 版; 地层数据来源于 1:50 万数字地质图^③; 活动断层数据来源于 1:400 万活动构造图 (邓起东, 2007) 矢量数据。

表 1 各流域地质灾害数量分布
Tab. 1 Distribution of the number of geological hazards in some drainage

灾害种类	流域名称				合计
	金沙江	澜沧江	怒江	雅鲁藏布江	
崩塌	52	49	52	121	274
滑坡	56	73	66	176	371
泥石流	103	137	166	306	712
合计	211	259	284	603	1 357

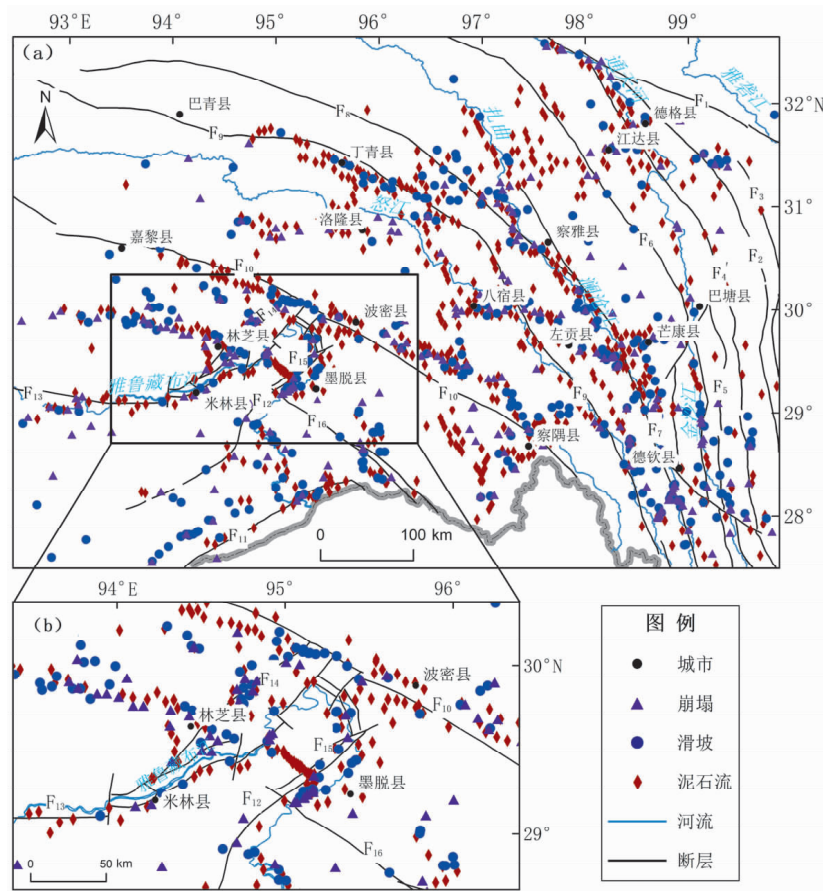
注: 由于雅鲁江流域仅小部分处于研究区范围内, 地质灾害数量很少, 故不做统计分析。

3 地质灾害分布特征

藏东南地区由于其独特的构造背景条件、复杂的地形地貌、多样的气候分区, 地质灾害非常发育, 具有明显的区域性和地形特征, 在空间展布上具有不均匀性和分段群集性的特点 (高鹏, 2010)。

地质灾害的不均匀性特征主要体现于明显的依据流域分布, 且研究区西北侧分布数量特别稀疏, 其他区域相对密集。研究区内的流域主要包括雅鲁藏布江流域、怒江流域、澜沧江流域、金沙江流域, 其中, 雅鲁藏布江流域的分布面积最大, 怒江流域次之, 分别占研究区总面积的 38% 和 24%, 金沙江和澜沧江流域所占面积相当。地质灾害大致分布在雅鲁藏布江流域北段以及怒江、

① 中国地质环境信息网 . <http://www.cigem.gov.cn>.
② 资源环境数据云平台 . <http://www.resdc.cn>.
③ 国家地质资料数据中心全国馆数字地质资料馆 . <http://www.ngac.org.cn>.



F₁: 甘孜—玉树—风火山断裂带; F₂: 德格—乡城断裂; F₃: 赠科—硕曲断裂; F₄: 定曲河断裂; F₅: 金沙江断裂带;
F₆: 字嘎寺—德钦断裂; F₇: 澜沧江断裂; F₈: 巴青—类乌齐断裂; F₉: 怒江断裂带; F₁₀: 嘉黎—察隅断裂;
F₁₁: 喜马拉雅南麓主边界和主山前冲断裂; F₁₂: 马尼翁断裂; F₁₃: 雅鲁藏布江断裂;
F₁₄: 米林—东久断裂; F₁₅: 阿尼桥断裂; F₁₆: 阿帕龙断裂

图1 藏东南地区地质灾害分布图 (a) 及雅鲁藏布江大拐弯北段灾害集中分布区 (b)
Fig. 1 Distribution of geological hazards in Southeast Tibet (a) and disaster distribution area in northern section of Yarlung Zangbo River (b)

澜沧江、金沙江“三江”流域的南北两侧 (图1)。总体上,雅鲁藏布江流域的地质灾害数量最多,但是灾害分布密度和澜沧江相当。地质灾害的群集性特征主要表现为沿江两岸呈带状相对集中分布,主要发育于雅鲁藏布江流域北段和“三江”流域,多数分布在主流及支流的河谷地带。特别是在雅鲁藏布江大拐弯的北段,正好是西藏公路南线经过区域,加上人类活动的影响,灾害众多,曾发生东久滑坡群、易贡巨型滑坡、102大滑坡、迫龙沟泥石流等。

雅鲁藏布江流域的滑坡有176个,“三江”流域的滑坡有近200个。以澜沧江流域滑坡灾害分布最广,其次是怒江流域,在澜沧江流域和雅鲁藏布江流域,滑坡点密度最大 (图2)。研究区内

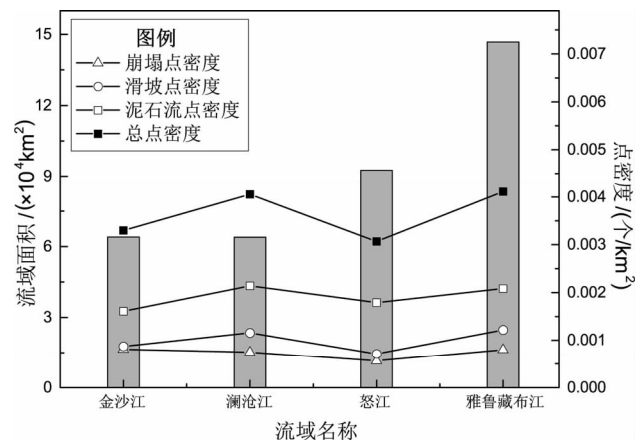


图2 流域面积与地质灾害点密度统计图
Fig. 2 The correlation statistics between drainage areas and point density of geological hazards

的崩塌也十分发育，其分布特征与滑坡几乎一致，分布于雅鲁藏布江流域的数量最多，“三江”流域的数量约为雅鲁藏布江流域的一半。在金沙江和雅鲁藏布江流域，崩塌点密度相近，怒江和澜沧江流域的点密度则相对较小。泥石流是研究区内分布最广泛的灾害，分布在雅鲁藏布江流域的数量远多于其他流域（表1），但是澜沧江流域和雅鲁藏布江流域的泥石流点密度最大，约为 0.002 个/ km^2 ，稍大于金沙江和怒江流域（图2）。

4 地震构造控制条件

藏东南地区地质灾害的分布特征主要受块体活动性、断裂活动等区域构造条件控制。在嘉黎断裂中段、雅鲁藏布江断裂、米林—东久断裂、阿尼桥断裂交汇的南迦巴瓦区域以及澜沧江和怒江断裂带附近，构造环境复杂，地震活动强烈，地质灾害分布密集。

藏东南地区包含多个活动块体和多条边界断裂，活动强烈。在印度板块与欧亚板块强烈碰撞的过程中，藏东南地区的各地块位于不同的构造部位，受到不同大小、性质的构造应力作用。块体之间的活动差异，明显改变了山脊水系的走向，影响了地貌环境，进而影响地质灾害的发育及分布。研究区内的断裂活动具有差异性的特征：金沙江断裂总体呈右旋走滑的特征，但是在右旋为主的背景下，多处表现出了左旋运动特征（吕弋培等，2002）；澜沧江断裂带在新生代以来，活动强烈，以走滑逆冲运动为主，并且伴有区域变质及岩浆侵入活动（钟康惠等，2004）；怒江断裂带则是继承性断裂带，新近纪以来，表现为挤压逆冲和右旋走滑运动（唐方头等，2010）；嘉黎断裂带是喀喇昆仑—嘉黎断裂带的东南段，Armijo等（1989）认为它是青藏高原主体向东挤出的南边界，具有强烈的右旋走滑活动；雅鲁藏布江断裂总体呈EW向展布，东段（米林以东）急剧偏转为NE向，中段呈EW向，但波状起伏特征明显，而且断裂的最新活动表现为以正断或右行平移—正断为主，米林以东活动性较强，米林以西断裂活动性较弱（彭小龙，王道永，2013）；阿尼桥断裂的总体运动学性质为具逆冲性质的右行走滑；东久—米林断裂是一条具逆冲性质的左行走滑带，

可能是夹持中间南迦巴瓦构造结地块的两边界（丁林等，1995；张进江等，2003）。

总之，藏东南地区块体活动差异大，断裂性质不同，这种复杂构造分布及其强烈的活动性为地质灾害的发生提供了重要的前提条件，也因此导致地震频繁发生。在频发地震动的破坏下，边坡的应力平衡遭到破坏，各种结构面扩展或联通，大大降低了边坡的稳定性，最终可能导致失稳破坏，发生大量地质灾害；而活跃的构造活动或地震动也会造成岩土体松散，稳定性下降，在降雨等诱发因素的作用下，发生失稳破坏。所以研究区的地震构造分布及其强烈的活动性特征形成了该区域地质灾害发生的宏观控制条件。

5 影响因素分析

藏东南地区的地质灾害分布特征受到宏观地震地质条件的控制，但地质灾害集群分布特征则受到多种地质、地理条件因素的影响，包括地形地貌、地质构造、地层岩性、人类活动等。

5.1 地形地貌

地形地貌是影响地质灾害发生的重要因素之一。藏东南地区山系众多，水系发育，包含横断山高山峡谷、江河上游高山谷地、江河源丘状山原、喜马拉雅高山极高山4种地貌，兼有谷地、盆地、丘陵、山地等地貌（李炳元等，2013）。其西北部地势起伏相对较小，地质灾害数量较少，东南部多高山峡谷地貌，地形高差大，河流侵蚀主要以下切为主，由此形成了大量高陡斜坡，为崩塌、滑坡、泥石流的发生提供了地形条件。地形地貌对崩塌、滑坡、泥石流等灾害的影响因素主要包括高程、地形起伏度、坡向、坡度、水系等。

不同高程的气候、温度、湿度、水系、岩石风化程度都会有所不同，导致土壤、植被类型也有所差异，且高程与降雨之间具有很好的相关性，而降雨又是滑坡灾害重要的诱发因素之一（杜国梁，2017）。为了统计高程和地质灾害分布的关系，对研究区的高程进行分类，然后统计各分类面积以及各类地质灾害的点密度，如图3a显示，分类面积最大的高程为 $4.0 \sim 5.0$ km，约占52%，其次是高程为 $3.5 \sim 4.0$ km和 $5.0 \sim 5.5$ km。各类地质灾害的易发高程范围有所不同：崩塌点密度

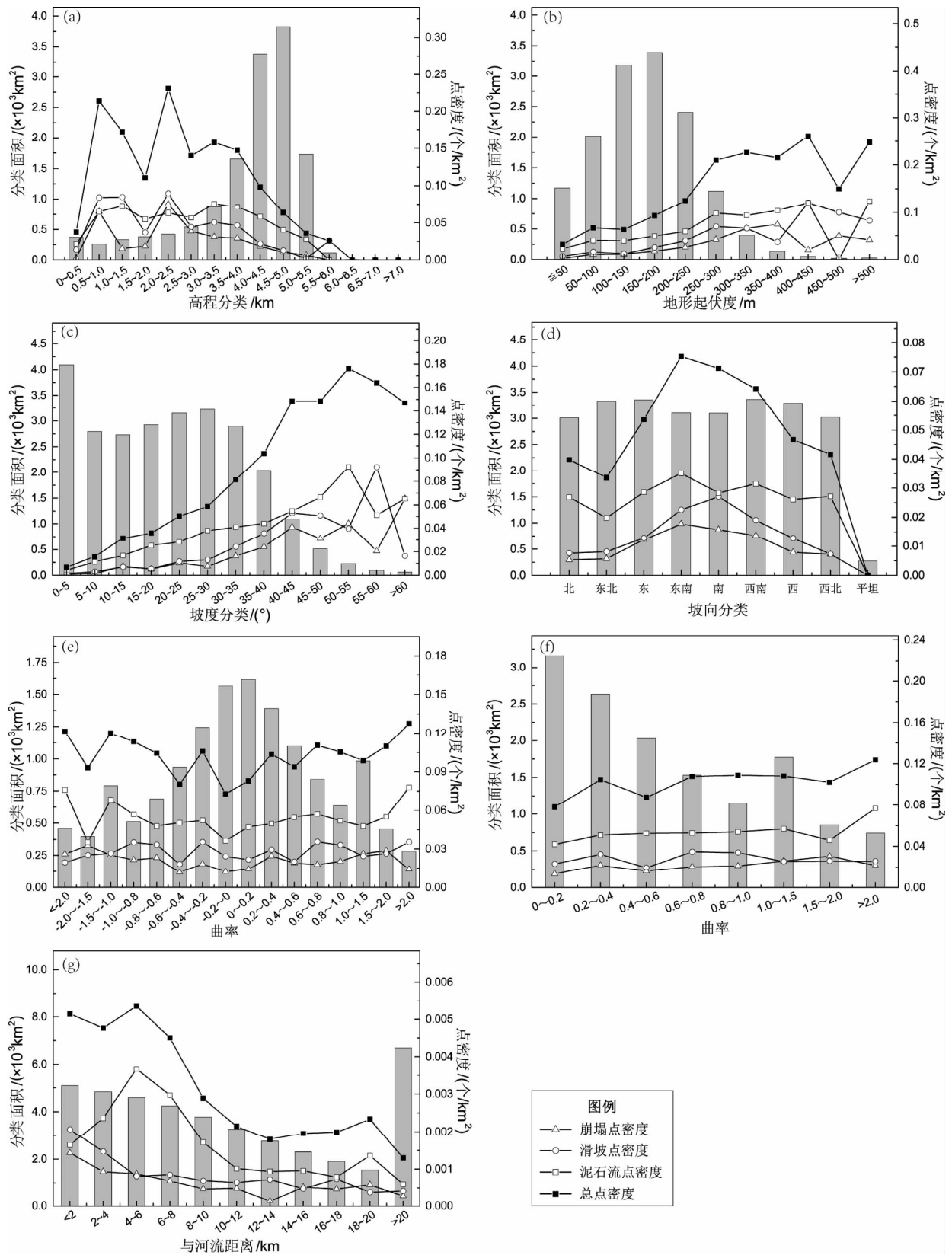


图3 高程 (a)、地形起伏度 (b)、坡度 (c)、坡向 (d)、曲率 (e、f)、与河流距离 (g) 与地质灾害点密度关系统计图

Fig. 3 The correlation statistics of elevation (a), relief (b), slope (c), slope aspect (d), curvature (e, f), the distance from rivers (g) and point density of geological hazards

最大高程范围在 0.5 ~ 1.0 km 和 2.0 ~ 2.5 km；滑坡的点密度最大值则位于 1.0 ~ 1.5 km 以及 2.0 ~ 2.5 km；泥石流的点密度最大值在 3.0 ~ 4.0 km；总的最大点密度分布在 0.5 ~ 1.0 km 和 2.0 ~ 2.5 km。总体上地质灾害主要发生在 <4.0 km 的范围内，其主要原因是这个高程范围主要为集水区，地表径流强烈，侵蚀严重，灾害易发生。

地形起伏度主要反映地表的起伏变化，起伏度越大，地势变化越明显。本文利用变点分析法确定了最佳起伏度窗口尺寸（陈宇，2016），生成起伏度图层，对研究区不同地形起伏度的分类面积和点密度进行统计。图 3b 显示：地形起伏度在 100 ~ 250 m 的分类面积最大，总体上各类地质灾害点密度随着相对高程的增加而呈递增趋势，在 400 ~ 450 m 总灾害点密度相对较大，灾害易发性较高，在 450 ~ 500 m 存在突降，可能是收集的数据量不够导致。

斜坡的坡度与可能转化为滑动面的坡体结构面倾角决定了坡体的临空面能否成为滑坡发育的有效临空面，并决定了滑坡的几何特征，坡度应力分布也决定着滑坡的稳定性（樊晓一，2013），坡度越陡则越容易引发滑坡、崩塌。为了统计坡度与地质灾害分布的关系，将坡度分类，然后统计各级分类坡度的分布面积和各类地质灾害的点密度（图 3c）。研究区内的坡度主要集中在 40° 以下，坡度为 30° ~ 45° 的区域崩塌和滑坡分布数量较多，分别占到了一半以上；泥石流数量在坡度为 25° ~ 35° 的区域最多。坡度低于 10° 和超过 60° 的区域灾害数量很少，这是因为坡度过高，不容易堆积物质，而坡度过低则缺乏滑动的动力。滑坡的点密度随着坡度的增加而不断增加，至 55° ~ 60° 达到最大值，超过 60° 有所下降；崩塌的点密度最大值位于 60° 以上；泥石流点密度在 50° ~ 55° 最高；总灾害点密度都随着坡度的增加而增加，并且最大点密度分布于 50° ~ 55°，最大为 0.176 个 / km²。

坡向影响斜坡的稳定性，一般阳坡容易发生滑坡灾害，表现在阳坡的蒸发量大，土壤含水量小，植被覆盖率偏小，降雨量多，风化程度更强（王朝阳，2008；王朝阳，陈吉普，2007）。非地震滑坡的坡向效应可能主要由于不同坡向的斜坡上的植被覆盖、光照、降雨、土壤条件等的不同。

对于地震地质灾害，坡向效应主要是由于地震因素在不同坡向斜坡上的表现不同，如块体运动方向、主应力方向、地震波传播方向等（许冲，沈玲玲，2014）。坡向与断层破裂方向的夹角，控制地震滑坡的频率、坡度和面积的分布（樊晓一等，2012）。由对灾害点的坡向统计结果（图 3d）可以看出，在各个朝向都有灾害分布，西南、南、东南 3 个方向上灾害最发育。

斜坡的曲率代表了坡形，曲率为正是凸形坡；为负是凹形坡；为 0 是平坡。统计研究区曲率各级面积以及各类地质灾害的点密度。图 3e 显示：研究区的各级面积大致以 0 为中心，向两侧逐渐减少。而曲率靠近 0，各类地质灾害点密度达到最低，向左右两侧有增加的趋势，说明地面越平坦，地质灾害越不容易发生，地形越坎坷，则容易发生。将图 3e 的 16 类曲率合并为 8 类，按照同样的方法进行统计（图 3f），同样显示，越靠近 0，分类面积越大，点密度越小，灾害越不易发生。

研究区内水系发育，河流的侧向侵蚀和下切侵蚀作用，掏蚀河岸，使坡度变陡，临空面增大，是产生滑坡等灾害的重要原因，也是造成高山峡谷地貌的重要因素。一般距离河流越近，受到的影响越大，灾害越发育。利用 ArcGIS 对研究区内的河流进行缓冲区分析，然后统计各个分类面积和区域内的灾害点密度（图 3g）。从图 3g 可以看出，随着与河流距离的增加，各个灾害的数量逐渐减少，但是泥石流呈现出先增加后减少的趋势。这是因为泥石流一般从地势比较高并且松散物质比较多的地方流到地势低的地方，搬运距离相对较长，而河流地势低，大多是泥石流的堆积区，则受到河流的影响比较小，因而在距离河流比较近的区域，数量并不多。各类地质灾害的点密度在小于 6 km 的范围内达到较大，且随距离增加，点密度逐渐减小。这表明，随与河流距离的增加，灾害易发性不断降低。

5.2 地质构造

断裂活动是地质灾害形成过程的重要条件，是许多大型多期古滑坡的主要动因（李晓等，2008）。断裂活动影响地形地貌和岩体结构，断裂剧烈活动（地震）诱发地质灾害，断裂蠕滑作用影响斜坡应力场和稳定性，因此，断裂活动是地质灾害链的源头，为地质灾害提供物源（张永双等，2016）。

研究区内断裂带密集,如嘉黎—察隅、怒江以及澜沧江等大型断裂带以及周围的次级断裂,构造活动强烈,地震频发。断裂带不仅控制了岩性的分布和河流的发育,影响地形地貌,而且这些交叉错杂的断裂破坏了岩石的完整性,造成岩石破碎,降低了岩石的抗风化能力和稳定程度,间接促进了地质灾害的发生。由图4可以看出,随着与断裂距离的增大,地质灾害的点密度不断减少,二者呈负线性相关性。

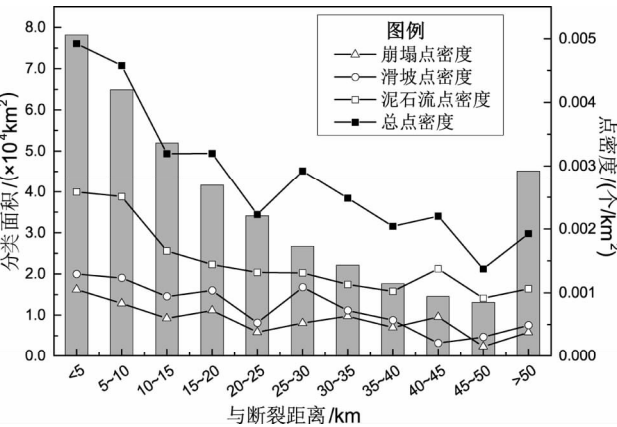


图4 断裂各级缓冲区面积与地质灾害点密度关系统计图

Fig. 4 The correlation statistics of buffer zone area of faults at all the levels and point density of geological hazards

5.3 地层岩性

作为地质灾害的组成物质,地层岩性的组成和岩石性质对灾害的发生起到非常重要的影响。依据《工程岩体分级标准》(GB/T 50218—2014),参照杜国梁(2017)研究成果以及对1:50万地质图地层岩性分析的基础上,将研究区岩性划分为7组(表2),其中,以第2类岩性分布面积最大,其次是第1类岩性和第4类岩性(图5)。第2类岩性主要分布在雅鲁藏布江流域的南、北部以及金沙江流域东部;第4类岩性主要分布在金沙江和澜沧江流域;第1类岩性主要分布在怒江和雅鲁藏布江之间的流域。总之,在雅鲁藏布江流域和金沙江流域东部的岩石硬度较大。但是,在硬度相当的前提下,这2个流域的灾害数量却有显著的差异,这是因为雅鲁藏布江流域位于印度板块和欧亚板块碰撞的缝合线,地质构造错综交错,断裂发育,岩体破碎,非常有利于边坡灾害的发育。

表2 研究区岩性硬度分组

Tab. 2 Hardness classification of lithology in the study area

标号	以岩性硬度分组	主要岩性描述
1	坚硬岩类	花岗岩、闪长岩、辉绿岩、玄武岩、安山岩、石英砂岩、中厚层灰岩和板岩等
2	较坚硬岩类	大理岩、板岩、白云岩、石灰岩、钙质砂岩、超基性岩类等
3	较坚硬—较软弱岩类	片岩、片麻岩类等
4	较软弱岩类	千枚岩、砂质泥岩、泥灰岩、粉砂岩等
5	软岩类	泥岩、泥质页岩、绿泥石片岩、绢云母片岩等
6	第四纪松散堆积物	残坡积、冲洪积、冰川、湖河沉积等成因的砂、砾石、黏土等
7	冰雪覆盖区和湖泊	冰雪覆盖区和湖泊

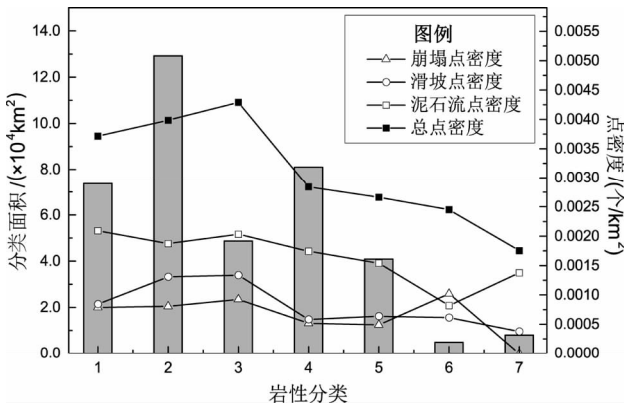


图5 岩性分类与地质灾害点密度关系统计图

Fig. 5 The correlation statistics of lithology classification and point density of geological hazards

统计各个岩性分组的面积和灾害点密度,可见灾害发育与工程地质岩性硬度之间有比较密切的关系。总的来说,在较坚硬—较软弱岩类(0.004 3 个/km²)、较坚硬岩类(0.004 0 个/km²)、坚硬岩类(0.003 7 个/km²)中灾害最为发育。其中,崩塌点密度在第4类岩性中最高,其次是第2类和第3类岩性,而滑坡在第2类和第3类岩性中比较发育,泥石流发育最广泛,在前3类岩性分组中的点密度都比较高。

5.4 人类活动

人类活动日益强烈,对环境的改造作用不断加强,如建设房屋、修路工程、采矿、砍伐森林等可以改变地形地貌,诱发地质灾害。研究区内

有西藏公路和铁路穿过，其沿线发生了大量的地质灾害，多是因为削坡之后防护措施不当导致后期坡体失稳。解译及调查结果显示，研究区内地质灾害集中分布在交通路线的沿线附近。将研究区内公路进行缓冲区分析，统计点密度（图6）表明：随着与公路距离的增大，各地质灾害点密度整体上有递减趋势。但是泥石流灾害点密度随距离增加，先增加后减少，规律性不明显。这是因为泥石流受地形地貌的影响比较大，一般起源于地势高的沟谷上游，在沉积碎屑丰富的前提下，由降雨等因素触发，而崩塌和滑坡规模相对较小，搬运距离较短，受人类活动影响比较大。研究区公路多沿河谷分布，人类居住区也是多建在地势低缓、水源充足、土壤肥沃的区域，属于松散物质的堆积区，因此泥石流的点密度分布并不是随着距离的增加而明显减少。

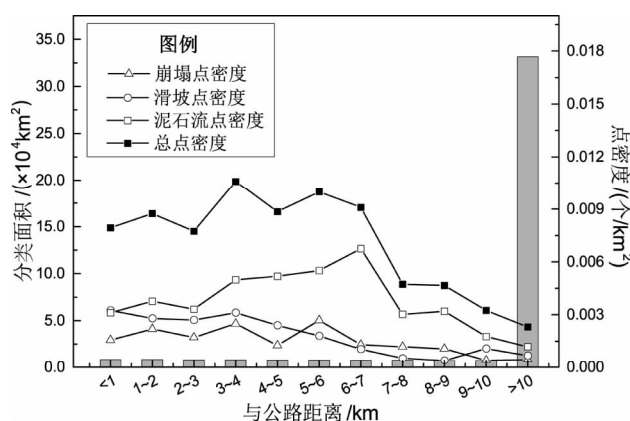


图6 公路各级缓冲区面积与地质灾害点密度关系统计图

Fig. 6 The correlation statistics of buffer zone areas of roads at all the levels and point density of geological hazards

综上所述，地质构造、地震活动、地层岩性、地形地貌以及人类活动因素都对地质灾害的发育有着重要的控制作用。藏东南地区断裂繁多，活动强烈，地层岩性复杂，山高谷深，水系发育以及人类工程活动日益增多，促进了崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害的发生。在这一系列因素的影响下，地质灾害的分布具有一定的规律性，即主要发生在高山峡谷地貌、河流切割强烈的地区，以大理岩、板岩、白云岩、石灰岩、钙质砂岩、超基性岩类等为主的较坚硬岩类和以片岩、片麻

岩类为主的较坚硬—较软弱岩性分布的地区，断裂带分布、构造活动强烈的地区以及人类工程活动强烈的地区。

6 结论

藏东南地区地貌复杂，地势陡峭，地质灾害众多。本文借助 ArcGIS 平台和 Google Earth 影像，基于人机交互解译数据并结合已有成果，分析了地质灾害的空间分布特征，并进一步探讨了控制研究区范围内地质灾害分布规律的地震构造背景条件。同时，通过统计各地质灾害点密度与各影响因子的相关性，得到了研究区内地质灾害的分布规律和影响因素。

(1) 藏东南地区的地质灾害以崩塌、滑坡、泥石流为主，据收集资料以及解译进行统计，共有 1 363 个，包含有崩塌 274 个，滑坡 375 个，泥石流 714 个。泥石流发育最为广泛，占据地质灾害统计总数的 50% 以上，而崩塌和滑坡的数量较少，分别约占 20% 和 28%。

(2) 该区域地质灾害的分布有着明显的区域性和地形特征，在空间展布上具有不均匀性和分段群集性，西北部非常稀疏，明显沿各江主流两岸呈带状相对集中分布。总体上，灾害主要分布在雅鲁藏布江流域北段，“三江”流域的南北两侧，而且澜沧江和雅鲁藏布江流域的灾害点密度最大，易发性强。而这种分布特征与区域构造背景密切相关，主要是受到块体活动性、断裂活动等区域构造条件控制。

(3) 运用统计分析方法，分析了地质灾害分布与地形地貌、断裂活动、地层岩性以及与公路距离的关系。地质灾害在 <4.0 km、地形起伏度 400 ~ 450 m、坡度 50° ~ 55° 的区域内集中发育；发育优势方向为西南、南和东南向；曲率靠近 0，各类灾害点密度达到最低，向两侧有增加的趋势。地面越是平坦，地质灾害越不容易发生，地形越坎坷，则容易发生。另外，地质灾害多发育在坚硬、较坚硬、较坚硬—较软弱岩性分组中。而且，随着与断裂、河流和公路的距离的增大，地质灾害数量减少，点密度减小，灾害易发性降低。

(4) 地质灾害的分布受到地形地貌、地层岩性、断裂活动和人类工程活动等因素的影响，集

中发育在高山峡谷地貌、河流切割强烈的河谷地区,以大理岩、板岩、白云岩、石灰岩、钙质砂岩、超基性岩类等为主的较坚硬岩类和以片岩、片麻岩类为主的较坚硬—较软弱岩性分布的地区,断裂带分布、构造活动强烈的地区以及人类工程活动强烈的区域,如主要公路沿线等。

研究区地质灾害的发生受到多种因素的影响,但研究区内断裂带密集分布且活动强烈,地震频发,导致了复杂的地震构造环境,这成为灾害频发的重要原因。此结果有助于进一步理解研究区范围内地质灾害的形成机制,同时也为进一步开展该地区地质灾害的危险性评估预测奠定了基础。

参考文献:

- 陈剑,杨志法,刘衡秋. 2005. 滑坡的易滑度分区及其概率预报模式[J]. 岩石力学与工程学报,24(13):2392-2396.
- 陈宇. 2016. 金沙江旭龙水电站近坝区滑坡分形特征及危险性评价——以茂顶河口为例[D]. 长春:吉林大学.
- 程尊兰,吴积善. 2011. 西藏东南部培龙沟泥石流堵塞坝的形成机理[C]. 北京:第八届海峡两岸山地灾害与环境保育学术研讨会,7.
- 代博洋,吴波,常昊,等. 2017. 2014年云南鲁甸 $M_s6.5$ 与云南景谷 $M_s6.6$ 地震滑坡灾害对比分析[J]. 地震研究,40(1):153-160.
- 邓起东. 2007. 中国活动构造图(1:400万)(附光盘)[M]. 北京:地震出版社.
- 丁林,钟大赉,潘裕生,等. 1995. 东喜马拉雅构造结上新世以来快速抬升的裂变径迹证据[J]. 科学通报,40(16):1497-1497.
- 杜国梁,张永双,吕文明,等. 2016. 基于加权信息量模型的藏东南地区滑坡易发性评价[J]. 灾害学,31(2):226-234.
- 杜国梁. 2017. 喜马拉雅东构造结地区滑坡发育特征及危险性评价[D]. 北京:中国地质科学院.
- 樊晓一,张友谊,杨建荣. 2012. 汶川地震滑坡发育特征及其影响因素[J]. 自然灾害学报,21(1):128-134.
- 樊晓一. 2013. 西南地区地震滑坡坡度分布特征研究[J]. 四川地质学报,(3):328-331.
- 高鹏. 2010. 藏东南地区地质灾害危险性评估及预测[D]. 北京:中国地质大学.
- 郭佳宁,山克强,程捷. 2009. 藏东南地区滑坡发育规律分析[J]. 资源与产业,11(2):132-139.
- 何果佑,白武军,向天葵,等. 2012. 浅析西藏东南部地区地质灾害的形成机理及分布规律[J]. 资源环境与工程,26(5):483-488.
- 李炳元,潘保田,程维明,等. 2013. 中国地貌区划新论[J]. 地理学报,68(3):291-306.
- 李晓,李守定,陈剑,等. 2008. 地质灾害形成的内外动力耦合作用机制[J]. 岩石力学与工程学报,27(9):1792-1806.
- 廖秋林,李晓,李守定,等. 2003. 水岩作用对川藏公路102滑坡形成与演化的影响[J]. 工程地质学报,11(4):390-395.
- 林涛. 2015. 川东巴州区滑坡发育规律及危险性预测评价[D]. 成都:成都理工大学.
- 鲁修元,杨明刚,赵丹,等. 2000. 西藏易贡藏布扎木弄沟特大型滑坡成因及溃决分析[J]. 工程地质学报,8(增刊1):256-257.
- 吕杰堂,王治华,周成虎. 2003. 西藏易贡大滑坡成因探讨[J]. 地球科学—中国地质大学学报,28(1):107-110.
- 吕弋培,廖华,苏琴,等. 2002. 川滇菱形块体边界的现今地壳形变[J]. 中国地震,18(1):28-37.
- 罗涛,吴臻林,贺晓宁. 2017. 国道318线迫龙沟泥石流的发育特征分析及跨越方案[J]. 路基工程,(2):207-211.
- 彭小龙,王道永. 2013. 雅鲁藏布江断裂带活动构造特征与活动性分析[J]. 长江大学学报(自然科学版),(9):41-44.
- 祁生文,许强,刘春玲,等. 2009. 汶川地震极重灾区地质背景及次生斜坡灾害空间发育规律[J]. 工程地质学报,17(1):39-49.
- 强菲,赵法锁,段钊. 2015. 陕南秦巴山区地质灾害发育及空间分布规律[J]. 灾害学,30(2):193-198.
- 沈玲玲,刘连友,许冲,等. 2016. 基于多模型的滑坡易发性评价——以甘肃岷县地震滑坡为例[J]. 工程地质学报,24(1):19-28.
- 石玲,王涛,辛鹏. 2013. 陕西宝鸡市地质灾害基本类型和空间分布[J]. 地质通报,32(12):1984-1992.
- 唐方头,宋键,曹忠权,等. 2010. 最新GPS数据揭示的东构造结周边主要断裂带的运动特征[J]. 地球物理学报,53(9):2119-2128.
- 滕宏泉,谢婉丽,盖海龙,等. 2016. 分形分维理论在地质灾害发育及空间分布规律中的应用——以长安区滑坡、崩塌地质灾害为例[J]. 地质灾害与环境保护,27(1):44-50.
- 万海斌. 2000. 西藏易贡特大山体滑坡及其减灾措施[J]. 水科学进展,11(3):321-324.
- 王朝阳,陈吉普. 2007. 坡向与斜坡稳定性的关系研究[J]. 企业技术开发,26(12):12-14.
- 王朝阳. 2008. 坡向与斜坡稳定性的关系研究[D]. 昆明:昆明理工大学.
- 王兰生,王小群,许向宁,等. 2012. 岷江叠溪古堰塞湖的研究意义[J]. 第四纪研究,32(5):998-1010.
- 王培清,黎普明. 2002. 藏东南地区地质灾害浅析[J]. 水利水电科技进展,22(4):21-22.
- 王治华. 2003. 青藏公路和铁路沿线的滑坡研究[J]. 现代地质,17(4):355-362.
- 王治华. 2007. 三峡水库区城镇滑坡分布及发育规律[J]. 中国地质灾害与防治学报,18(1):33-38.
- 夏金梧,郭厚桢. 1997. 长江上游地区滑坡分布特征及主要控制因素探讨[J]. 水文地质工程地质,(1):19-22.
- 夏金梧. 1995. 金沙江下游干流区滑坡发育特征及主要影响因素初探[J]. 人民长江,(5):42-46.
- 徐则民,刘文连,黄润秋. 2013. 滑坡堵江的地貌效应[J]. 第四纪研究,33(3):490-500.
- 许冲,沈玲玲. 2014. 地震滑坡的坡向效应分析:以2008年汶川地震为例[C]. 北京:中国地球科学联合学术年会,785-788.
- 许冲,徐锡伟,吴熙彦,等. 2013. 2008年汶川地震滑坡详细编目及其空间分布规律分析[J]. 工程地质学报,21(1):25-44.

- 杨志华,郭长宝,姚鑫,等. 2017. 考虑地震后效应的青藏高原东缘地质灾害易发性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, (4): 103–112.
- 袁广祥,吴琦,尚彦军,等. 2010. 雅鲁藏布江大拐弯北段区域工程地质及其对地质灾害发育的影响[J]. 地质灾害与环境保护, 21(3): 34–41.
- 曾庆利,杨志法,尚彦军. 2009. 川藏公路然乌—鲁朗段的松散堆积体及其地质灾害[C]. 北京: 纪念李四光诞辰 120 周年暨李四光地质科学奖成立 20 周年学术研讨会.
- 张进江,季建清,钟大赉,等. 2003. 东喜马拉雅南迦巴瓦构造结的构造格局及形成过程探讨[J]. 中国科学: 地球科学, 33(4): 373–383.
- 张培震,邓起东,张国民,等. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学: 地球科学, 33(增刊1): 12–20.
- 张永双,郭长宝,姚鑫,等. 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.
- 钟康惠,刘肇昌,舒良树,等. 2004. 澜沧江断裂带的新生代走滑运动学特点[J]. 地质论评, 50(1): 1–8.
- Aleotti P, Chowdhury R. 1999. Landslide hazard assessment: Summary review and new perspectives[J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 58(1): 21–44.
- Althuwaynee O F, Pradhan B, Ahmad N. 2015. Estimation of rainfall threshold and its use in landslide hazard mapping of kuala lumpur metropolitan and surrounding areas[J]. Landslides, 12(5): 861–875.
- Armijo R, Tapponnier P, Han T. 1989. Late cenozoic right-lateral strike-slip faulting in Southern Tibet[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 94(B3): 2787–2838.
- Dai F C, Lee C F, Ngai Y Y. 2002. Landslide risk assessment and management: An overview[J]. Engineering Geology, 64(1): 65–87.
- Guzzetti F, Carrara A, Cardinali M, et al. 1999. Landslide hazard evaluation: A review of current techniques and their application in a multi-scale study, central Italy[J]. Geomorphology, 31(1–4): 181–216.
- Yuan R M, Xu X W, Chen G H, et al. 2010. Ejection landslide at northern terminus of Beichuan rupture triggered by the 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 100(B5): 2689–2699.
- Zhang, F, Chen W, Liu G, et al. 2012. Relationships between landslide types and topographic attributes in a loess catchment, China[J]. Journal of Mountain Science, 9(6): 742–751.
- GB/T 50218—2014, 工程岩体分级标准[S].

Analysis on Spatial Distribution and Influencing Factors of Geological Disasters in Southeast Tibet

WANG Ying¹, JIN Jialiang², YUAN Renmao¹

(1. Key Laboratory of Active Tectonics and Volcano, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China)

(2. Urban and Small Town Reform and Development Center, China Center for Urban Development, Beijing 100045, China)

Abstract

Based on interpretation of geological hazards and previous reported research results, we analyzed the distribution characteristics, development laws and influencing factors of geological disasters, such as collapses, landslides and debris flows in Southeast Tibet. The results show that geological disasters characterized by inhomogeneity and sectional clustering are mainly distributed in northern part of Yarlung Zangbo River and the north and south sides of the “Three-Rivers” (Jinsha River, Lancang River and Nu River). Many factors including active fault, lithology, topography and human activities influenced the development and spatial distribution of geological disasters in Southeast Tibet. The geological hazards are concentrated in the areas featured with alpine-gorge landforms and the strong incising region of river, the zones with harder rocks mainly consist of marble, slate, dolomite, limestone, calcareous sandstone and ultrabasic rocks, and hard-weaker rocks mainly consist of schist and gneiss, and the region distribute fault zones and strong tectonic activities, and areas affected by strong human activities, such as along major highways, etc.

Keywords: Southeast Tibet; geological hazards; development laws; influencing factors