

· 非主题来稿 ·

喜马拉雅山脉地震带主要地质灾害与地形地貌关系 ——以西藏日喀则地区为例

熊德清^{1,2}, 崔笑烽²

XIONG Deqing^{1,2}, CUI Xiaofeng²

1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;

2. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734

1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;

2. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu 611734, Sichuan, China

摘要:喜马拉雅山脉是欧亚板块和印度洋板块挤压碰撞形成的巨大山脉,历史上曾多次发生7级以上地震,引发大量次生地质灾害。收集以往资料,结合野外调查和遥感解译,利用喜马拉雅山脉地震带(日喀则段)地貌图和GIS的数据管理与空间分析功能,对日喀则地区主要地质灾害进行分析,绘制地质灾害分布图和密度等值线图。结果表明:①研究区主要地质灾害集中分布,共5个集中区;②主要地质灾害发育于侵蚀剥蚀大起伏高山和冰缘作用的大起伏极高山地貌,河谷平原及冰碛丘陵次之,其他地貌特征发育灾害较少;③滑坡、崩塌灾害易发于海拔3500 m以下阳坡(90°~270°),在南东向敏感性最强,滑坡、崩塌分别易发于斜坡坡度15°~45°和35°~90°;④泥石流灾害多发生于流域面积小于5 km²,相对高差大于100 m的沟谷中,纵坡大于212.56‰的“V”形谷中尤为发育。

关键词:地质灾害;地形地貌;地震带;喜马拉雅山脉;西藏日喀则

中图分类号:P315;P694 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)11-1967-14

Xiong D Q, Cui X F. The relationship between main geological hazard and topography in the Himalayan seismic belt: A case study in the Xigaze area, Tibet. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(11): 1967-1980

Abstract: The Himalayas is a huge mountain formed by the collision between the Eurasian plate and the Indian Ocean plate. In the history, there were many earthquakes with magnitude of 7 or more, which caused a large number of secondary geological disasters, and formed complex and diverse landform. Based on the previous data, field surveys and remote sensing interpretation, combined with the geomorphological map of the Himalayas seismic belt (Xigaze section), the powerful data management and spatial analysis capabilities of GIS were used to analyze major geological hazards in the Xigaze area and make maps of geological hazards and density contour. The results show that the main geological disasters are concentratedly distributed in five areas. The main geological disasters occur in strongly denudated and undulating mountains and periglacial extremely undulating mountain landforms, followed by valley plain and moraine hills. Other geomorphic features have less developmental hazards. Landslides and collapses are prone to occur on sunny slopes below 3500 m (90°~270°), and are most sensitive on the southeast-trending slope. Landslides and collapses are prone to occur at slopes of 15°~45° and 35°~90° respectively. Debris flow disasters occur most often in valleys with basin area less than 5 km², relative elevation difference greater than 100 m, and the longitudinal slope greater than 212.56‰. They are especially developed in V-shaped valleys.

Key words: geological disaster; topography; seismic belt; Himalayas; Xigaze

2015年4月25日,尼泊尔境内发生里氏8.1级强烈地震,震源深度约20 km,随后发生3次7.0级以上强余震;25日17时17分,西藏定日县发生5.9

级地震,26日1时42分,西藏聂拉木县发生5.3级地震。此次地震涉及日喀则市和阿里地区19个县(区),其中与尼泊尔接壤的日喀则市辖区损失最严

收稿日期:2021-03-11;修订日期:2021-06-28

资助项目:日喀则市自然资源局项目《喜马拉雅山脉地震带地质灾害生成规律与防灾对策研究项目》(编号:HDZB-RKZGT-XMLYKY161155)

作者简介:熊德清(1984-),男,博士,高级工程师,从事区域地质灾害调查与评价研究。E-mail:deqingx@qq.com

重,地震波及日喀则市 18 个县区,造成 13 个县(区)受灾,其中聂拉木、吉隆、定日 3 县受灾严重,严重制约了当地经济发展,导致因灾致贫。

强烈地震可以直接造成建筑、地表形态和生态环境的破坏,其次是由地震引起的次生灾害,包括崩塌、滑坡、泥石流等。这种由地震作用造成的地表岩土的不稳定,在相当长的时间内会影响该区的安全形势,因此,急需开展震后地质灾害的成因规律和防治对策研究。近年来,针对喜马拉雅山脉发生的地震,研究重心在地震风险分析上。2013 年,尼泊尔国家地震中心与法国和新加坡科研人员合作发表的文章指出^[1],喜马拉雅山存在 8.0~8.5 级大地震留下的痕迹,意味着未来同等规模的地震可能再次发生。2015 年,印度专家提出^[2],此前认为 1505 年西藏地区发生的地震释放了大部分应力,减少了喜马拉雅山中心地震带的地震风险,但是,此次研究认为,压力并没有被释放,未来可能会爆发大规模的地震。国内外对地质灾害的成因规律、形成机理、演化规律等进行了大量研究,尤其 2008 年 5·12 汶川地震后,为及时了解灾情,为抢救及救灾工作提供服务,许多学者把 3S 技术应用于地质灾害的调查、分析、评价中^[3],利用遥感的快速数据获取功能,GIS 的数据管理、空间分析、可视化等功能,以及 GPS 的定位技术精度高、速度快、全天候、全自动等特点,对地质灾害进行全面综合评价^[4~6]。

对喜马拉雅山脉地震带震后地质灾害的研究较少,地质灾害的成因规律、形成机理、演化规律等有待研究,本文重点研究日喀则地区 4·25 尼泊尔地震震后主要地质灾害与地形地貌的关系,为震区灾后重建工作提供技术支撑,从而提升西藏地区地震地质灾害防治、管理科技水平。

1 地质背景

新构造运动时期,由于印度板块向北运移并在喜马拉雅地区与欧亚板块发生强烈的陆-陆碰撞,以及东部菲律宾海板块和太平洋板块向西俯冲到欧亚板块之下等联合作用的最终结果,导致青藏高原作为一个整体成为中国大陆新构造期间隆升最强烈的地区,形成了平均海拔在 4500 m 以上的“世界屋脊”。受区域构造应力场的影响,研究区除形成规模宏大的雅鲁藏布江断裂带等东西向构造外,同时还形成了一系列伴生和派生的大型南北向伸

展断裂带,它们在区域上构成了明显的“井”字形构造格局,大型东西向、南北向断裂构造构成了区域的控制性构造。此外,还有一些北东走向断裂,如亚东-谷露断裂等。自 1264 年有地震记载以来,日喀则地区及附近 150 km 范围内共记录 $M \geq 4.7$ 级破坏性地震 384 次,其中 8 级以上地震 3 次,即 1411 年当雄西南一带 8 级地震、1833 年聂拉木 8 级地震和 2015 年尼泊尔 8.1 级地震。

2 数据来源及处理

2.1 数据获取

地形数据、地质数据和地质灾害数据主要来源于日喀则市 18 个县的 1:5 万地质灾害详细调查成果资料;地震数据来源于四川省地震局,获取了地震破裂带分布图、震中位置图、地震烈度图、地震峰值加速度图等相关资料;遥感主要收集国产 GF-1 卫星和 GF-2 卫星多期数据,对研究区的遥感影像进行震前震后的对比,共解译出震后新增地质灾害点 168 处(其中泥石流 58 处、崩塌 85 处、滑坡 25 处)。

2.2 数据整合

由于获得的数据来源不同,必须根据分析需要,选择合适的影像数据并进行相应的预处理才能满足分析需要。

(1) 数据规范化处理

收集的数据格式和存储平台、坐标系多样化,必须进行规范化处理,集成到统一的平台,建立分析所需的基础数据库。所有数据以 1:5 万地质灾害详细调查数据库为匹配基准,进行相应的格式转化、校正、坐标系投影变换等操作,最终将地形、地质、地震数据统一到同一个平台,建立基础数据库^[8]。

(2) 遥感数据选择与预处理

遥感解译所用数据格式统一转化为 ArcGIS 与 ERDAS 均支持,且处理效率较高的 ERDAS IMG 格式,坐标系统与 1:5 万地形数据匹配,并进行波段组合、图像拉伸等预处理,提高影像的解译力^[9]。

3 主要地质灾害概况

通过整合统计,震前、震后日喀则市主要发育的地质灾害类型为泥石流、崩塌和滑坡,其中泥石流灾害 3199 起,崩塌 605 个,滑坡 204 个,总计 4008 个,其空间分布特征见图 1。

在 ArcGIS 软件的支持下,采用核密度算法,以

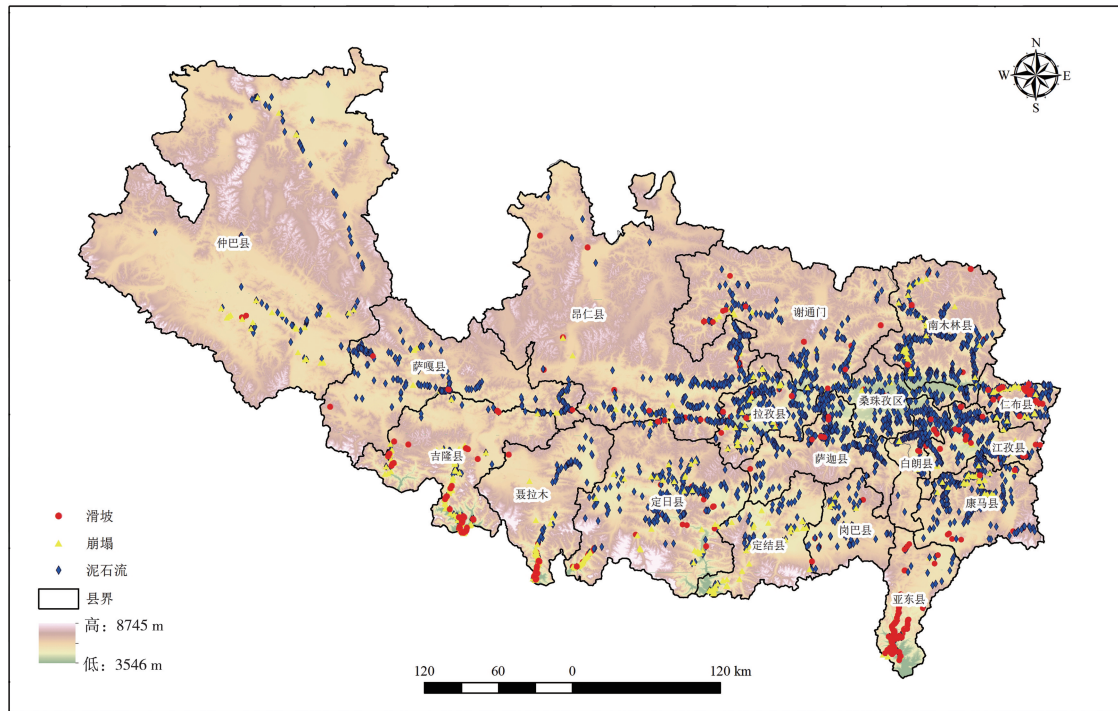


图 1 日喀则地区崩塌、滑坡和泥石流灾害分布图

Fig. 1 Distribution of collapse, landslide and debris flow disasters in the Xigazê area

10 km 为搜索半径,在不考虑地质灾害点规模的情况下,生成研究区崩塌、滑坡和泥石流地质灾害分布的密度等值线图(图 2),可见地质灾害分布密度较大的区域包括日喀则—白朗—江孜—康马段、日喀则—拉孜—定日段、吉隆口岸、樟木口岸和亚东口岸 5 个区域^[10-11]。其中日喀则—白朗—江孜—康马段、日喀则—拉孜—定日段和亚东口岸 3 个区域属于侵蚀剥蚀大的起伏极高山、河谷地貌。吉隆口岸和樟木口岸属于冰碛丘陵地貌。5 个区域主要位于雅鲁藏布江流域、康布麻曲流域、吉隆藏布流域和波曲流域。

雅鲁藏布江流域河谷区受强烈的构造运动、集中降雨(雪)量、人类活动等因素影响,河谷斜坡第四纪冰川沉积、河湖沉积、风化残坡积等松散堆积体集中,是地质灾害最严重且频繁发生的地段。康布麻曲流域地势总体北高南低,南部为高山峡谷区,海拔高度在 2300~4500 m 之间,区内高山林立,河流深切,谷坡陡立,地形较破碎,树枝状水系发育,河床比降较大,水流湍急,地质灾害发育。吉隆藏布流域分布在喜马拉雅山主脉南坡,海拔多在 2430~7299 m 之间,平均海拔 4000 m,山峰陡峭,高

差在 3000 m 左右,地质灾害发育。波曲发源于希夏邦马峰北麓,于立新附近流入尼泊尔,落差 3530 m,地势陡峻,该区距离“4·25”尼泊尔地震中心最近,受地震影响强烈,地质灾害集中发育。

4 地貌类型

研究区地势高亢,平均海拔 4500 m 以上,总地势西高东低,由西向东呈阶梯状递降,其最高点为珠穆朗玛峰,海拔 8848 m,最低点位于聂拉木南部宗曲与波曲汇入口,海拔 1459 m,相对高差 7389 m。雅鲁藏布江及朋曲源头、藏南内陆湖盆为波状起伏的高原,其余为起伏巨大的高山峡谷区,高原面较破碎(图 3)。

地貌骨架除严格受地质构造控制外,还受雅鲁藏布江及年楚河水系的制约。地壳自上新世迅速隆起和断陷以来,剥蚀或侵蚀不断,强烈作用于隆起的山地,断陷谷地则不间断地被外来物质堆积,在演变过程中形成了以广大基岩山地为格架,其间不均匀夹持狭长河(沟)谷的高原地貌景观。一级分水岭和主要谷地的走向与主要构造线方向基本一致,多呈东西向,次为北西向;次级分水岭走向又

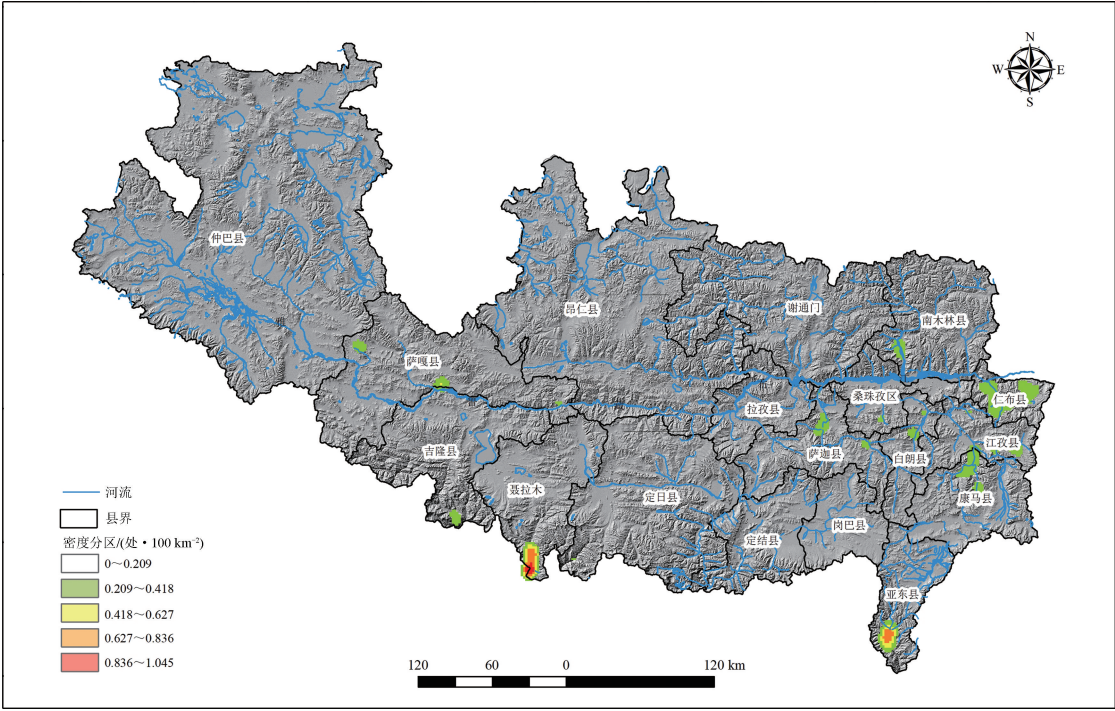


图 2 日喀则地区崩塌、滑坡和泥石流灾害分布密度等值线图

Fig. 2 Density contour map showing distribution of collapse, landslide and debris flow disasters in the Xigaze area

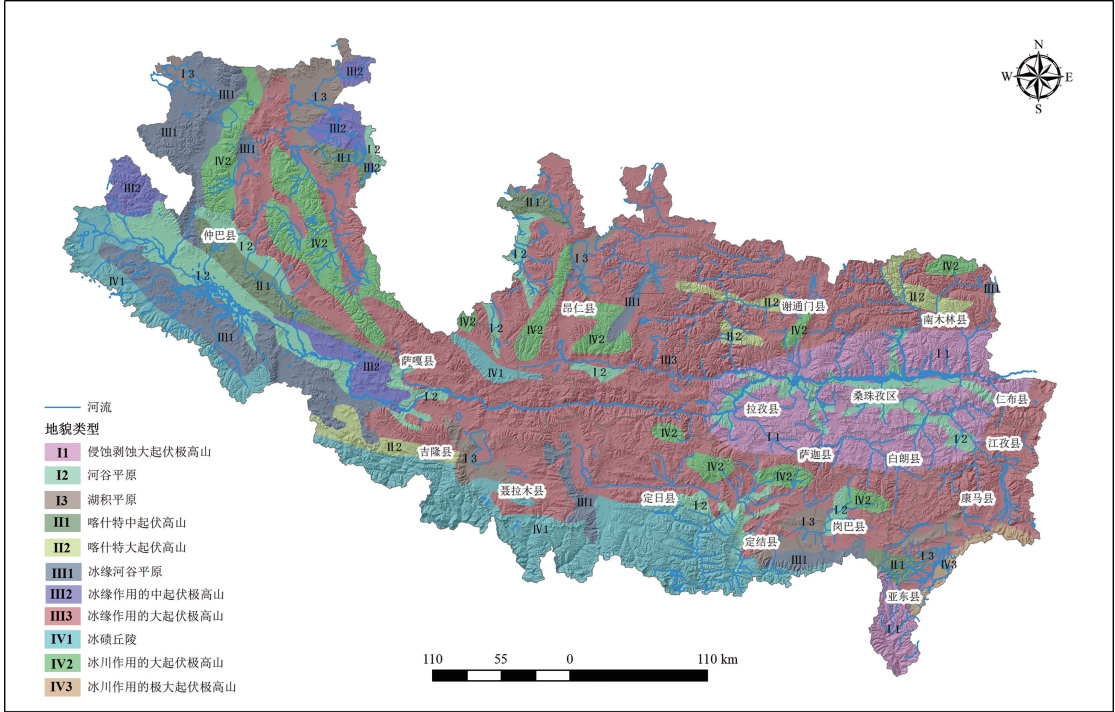


图 3 日喀则地区地貌分区图

Fig. 3 Geomorphic zoning map in the Xigaze area

与支谷走向一致。

根据日喀则市地貌形态特征和区域性差异成因特征,将地貌形态划分为流水地貌、岩溶地貌、冰缘地貌和冰川地貌四大类型,其空间分布特征见图 4,所占面积比例分别为 22.51%、4.95%、54.15% 和 18.39% (表 1)。

4.1 流水地貌

根据水流的冲淤特性,将流水地貌类型细分为侵蚀剥蚀大起伏极高山、河谷平原和湖积平原(表 2;图版 I)。侵蚀剥蚀大起伏极高山海拔多在 5000~6000 m,相对高差大于 1000 m,山体高大、山势雄伟,以流水侵蚀作用为主,主要分布于喜马拉雅山南坡的亚东地区和雅鲁藏布江所流经的仁布、日喀则、拉孜及周边南木林、江孜、白朗等区域;河谷平原主要分布于沿雅鲁藏布江及其支流一带,由雅鲁藏布江河谷漫滩、雅鲁藏布江 I~Ⅲ级阶地、雅鲁藏布江一级支流河漫滩和阶地组成,区内阶地保存完好,阶面平坦宽阔,以Ⅱ级阶地最发育,Ⅱ级阶地阶面宽 2~4 km,高出河水面 10~15 m。湖积平原指由湖泊堆积作用形成的平原,分布于佩枯措、塔若湖、扎布耶他卡、许如湖地区。

4.2 岩溶地貌

根据地势起伏,将岩溶地貌类型细分为岩溶中起伏极高山和岩溶大起伏极高山(表 3;图版 I)。岩溶中起伏高山海拔大于 4500 m,相对高差 500~1000 m,以岩溶作用为主,山坡陡峻,风化作用强烈,溶洞、溶隙、峰丛等发育,主要分布于喜马拉雅山南坡和北坡仲巴部分区域。岩溶大起伏高山海拔 5000~6000 m,相对高差 1000~1500 m,以岩溶作用、寒冻风化作用为主,化学作用同时减弱,主要分布于吉隆地区喜马拉雅山附近、南木林和谢通门靠北的部分区域。

4.3 冰缘地貌

根据冻融作用的地势起伏,将冰缘地貌类型细分为冰缘河谷平原、冰缘作用的中起伏极高山和冰缘作用的大起伏极高山(表 4;图版 I)。冰缘河谷平原指受到冰川作用影响的河谷平原地区,亦分布于雅鲁藏布江及其支流一带,河漫滩发育较好,水流作用以侵蚀作用为主,多为宽而平的平底谷。冰缘作用的中起伏极高山多分布于海拔大于 5000 m

表 1 不同地貌单元面积

Table 1 Statistics of unit area for various geomorphic types

地貌类型		面积/ km ²	百分比/%	
			分项	总计
流水地貌 (I)	侵蚀剥蚀大起伏极高山(I 1)	19482	10.75	22.51
	河谷平原(I 2)	14010	7.73	
	湖积平原(I 3)	7300	4.03	
岩溶地貌 (II)	岩溶中起伏高山(II 1)	4922	2.72	4.95
	岩溶大起伏高山(II 2)	4039	2.23	
冰缘地貌 (III)	冰缘河谷平原(III 1)	15247	8.42	54.15
	冰缘作用的中起伏极高山(III 2)	5280	2.91	
	冰缘作用的大起伏极高山(III 3)	77590	42.82	
冰川地貌 (IV)	冰碛丘陵(IV 1)	19464	10.74	18.39
	冰川作用的大起伏极高山(IV 2)	12877	7.11	
	冰川作用的极大起伏极高山(IV 3)	971	0.54	

表 2 日喀则地区流水地貌分布

Table 2 Distribution of fluvial geomorphology
in the Xigaze area

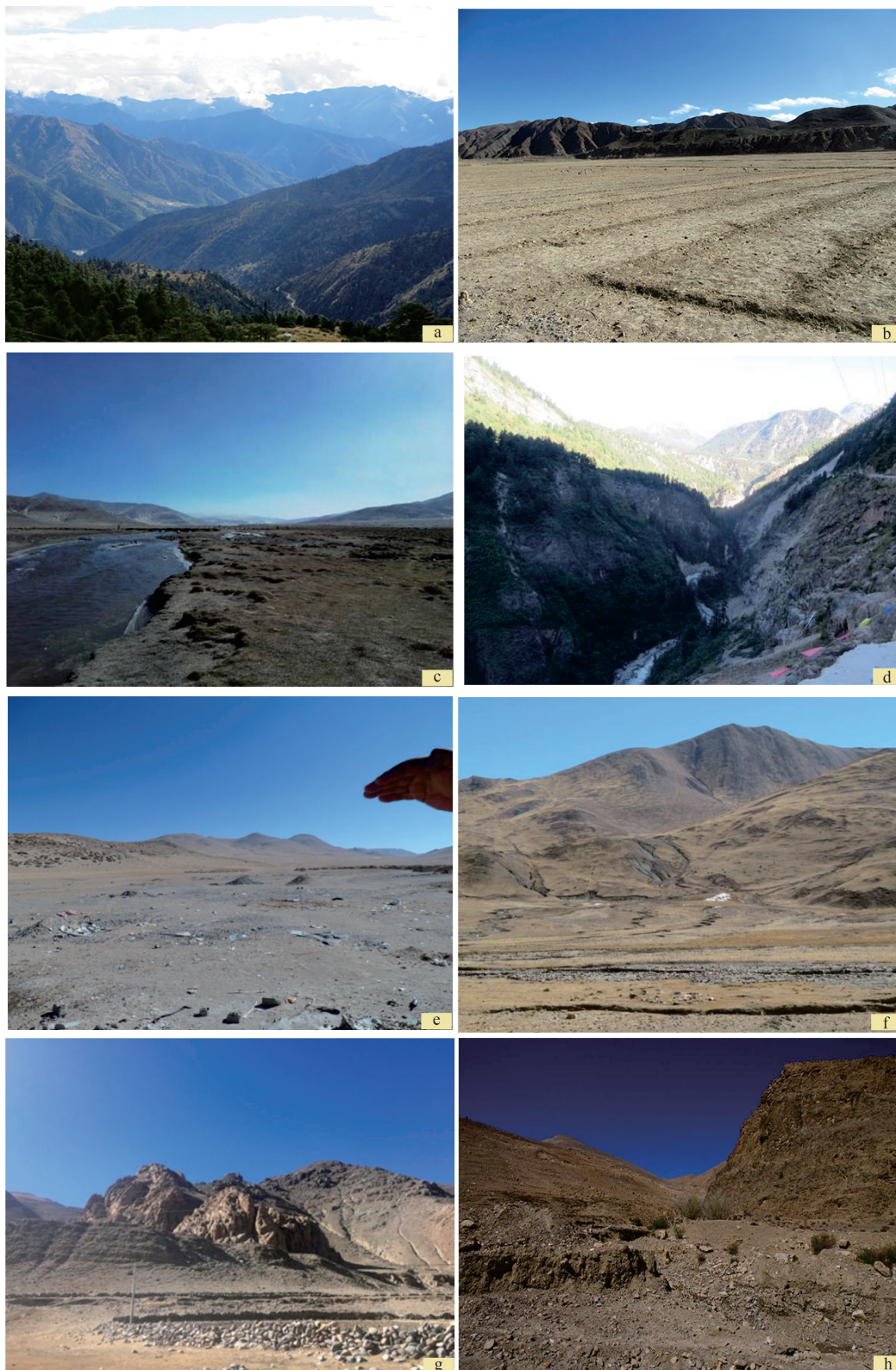
成因类型	形态成因类型	地貌特征
构造侵蚀 山地	侵蚀剥蚀大 起伏极高山	海拔 5000~6000 m, 相对高差大于 1000 m, 以流水侵蚀作用为主。山坡陡峻, 坡面冲沟树枝状发育, 水土流失较发育
	河谷平原	松散堆积物沿河谷分布, 阶地发育, 地面起伏小于 200 m, 由河漫滩、阶地、冲洪积扇组成, 地势平坦开阔
剥蚀堆积平原	湖积平原	松散堆积物环湖分布, 起伏较小, 局部发育沼泽、盐渍土, 发育多级砂砾堤和多级阶地

表 3 日喀则地区岩溶地貌分布

Table 3 Distribution of karst geomorphology
in the Xigaze area

成因类型	形态成因类型	地貌特征
构造溶蚀山地	岩溶中起 伏极高山	海拔大于 5000 m, 相对高差 500~1000 m, 岩溶作用为主。山坡陡峻, 风化作用强烈, 溶洞、溶隙、峰丛等岩溶地貌现象发育
	岩溶大起 伏极高山	海拔 5000~6000 m, 相对高差 1000~1500 m, 岩溶作用为主。寒冻风化作用为主, 化学风化作用较弱

图版 I Plate I



a.拉孜县中部侵蚀剥蚀大起伏极高山地貌;b.雅鲁藏布江沿岸河谷平原地貌;c.定结县东部湖积平原地貌;d.吉隆喜马拉雅山附近岩溶大起伏极高山地貌;e.仲巴县冰缘河谷平原地貌;f.萨嘎县中部冰缘作用中起伏极高山地貌;g.昂仁县东南部冰缘作用大起伏极高山地貌;h.定日县南部冰碛丘陵地貌

表 4 日喀则地区冰缘地貌分布

Table 4 Distribution of periglacial geomorphology in the Xigaze area

成因类型	形态成因类型	地貌特征
构造剥蚀山地	冰缘河谷平原	由冰碛、冰水堆积物组成,略有起伏,局部发育沼泽。山麓地带寒冻风化形成的碎石流、岩屑堆等广布
	冰缘作用的中起伏极高山	海拔大于 5000 m,相对高差 500~1000 m,冰冻泥流作用为主。缓坡地带发育融冻泥流、多边形土。强烈的物理风化作用常在山坡上形成大面积分布的岩屑坡、山麓地带形成较大规模的倒石锥、石河、石海等
	冰缘作用的大起伏极高山	海拔大于 5000 m,相对高差 1000~1500 m,冰冻泥流、寒冷风化作用为主。冰碛物大量分布,寒冻风化作用十分强烈,岩屑坡、倒石锥、石河、石海等冰缘地貌现象普遍

地区,相对高差 500~1000 m,强烈的物理风化作用常在山坡上形成大面积的岩屑坡、山麓地带形成较大规模的倒石锥、石河、石海等,缓坡地带常形成融冻泥流、多边形土,主要分布于萨嘎中部及仲巴西部和北部部分区域。冰缘作用的大起伏极高山多分布于海拔大于 5000 m 地区,相对高差 1000~1500 m,以冰冻泥流、寒冷风化作用为主,冰碛物大量分布,寒冻风化作用十分强烈,岩屑坡、倒石锥、石河、石海等冰缘地貌现象普遍,分布于喜马拉雅山北坡的大部分区域。

4.4 冰川地貌

根据冰川塑造的地势起伏,将冰川地貌类型细分为冰碛丘陵、冰川作用的大起伏极高山和极大起伏极高山(表 5;图版 I)。冰碛丘陵属于冰碛地貌的一种,是冰川消融后表碛、中碛、内碛沉落于底碛上形成的起伏不平的地面形态,主要分布于喜马拉雅山脉沿线,由冰碛漂砾、卵石组成,相对高差约 100 m,低洼处发育沼泽、冻胀丘。形成高度小于 100 m 的丘状、垄岗状地形或冰碛平台。冰川作用的大起伏极高山多分布于海拔 5000~6000 m 地区,相对高差 1000~1500 m,以冰川作用为主,主要分布于喜马拉雅山北坡海拔较高处。其中寒冻风化作用、冰川作用强烈。冰川作用的极大起伏极高山多分布于海拔大于 5500 m 地区,相对高差大于 1500 m,冰川作用强烈,主要分布于康马和亚东地区东南。

表 5 日喀则地区冰川地貌分布

Table 5 Distribution of glacial geomorphology in the Xigaze area

成因类型	形态成因类型	地貌特征
构造剥蚀山地	冰碛丘陵	由冰碛漂砾、卵石组成,相对高差约 100 m,低洼处发育沼泽、冻胀丘。形成高度小于 100 m 的丘状、垄岗状地形或冰碛平台
	冰川作用的大起伏极高山	海拔 5000~6000 m,相对高差 1000~1500 m,冰川作用为主。寒冻风化作用、冰川作用强烈
	冰川作用的极大起伏极高山	海拔大于 5500 m,相对高差大于 1500 m,冰川作用强烈。基岩裸露,山坡陡峻,寒冻风化作用及冰川作用十分强烈

5 主要地质灾害与地形地貌相关性分析

5.1 地质灾害与地貌单元的叠加分析

地形地貌特征是影响地质灾害发育的主控因素之一。不同的地貌类型控制着地质灾害的发生类型:高陡的自由临空面是崩塌、滑坡产生的有利地形,残坡积层较发育,软硬岩层相间的山区和丘陵区是崩塌、滑坡多发区;山高坡陡且较开阔的瓢状地形是泥石流产生的良好条件,地形起伏大、沟谷发育、岩土体破碎、松散的山区往往是泥石流的多发地区^[12]。日喀则市各地貌单元与地质灾害叠加如图 4 所示。

据统计,研究区地质灾害集中发育于侵蚀剥蚀大起伏极高山、冰缘作用的大起伏极高山、河谷平原及冰碛丘陵,这 4 个区域地质灾害点数量合计 3673 处,占总数的 91%;湖积平原、喀斯特中起伏高山、喀斯特大起伏高山、冰缘河谷平原、冰缘作用的中起伏极高山、冰川作用的大起伏极高山及冰川作用的极大起伏极高山数量较少,仅 335 处,占总数的 9%(图 5)。地质灾害主要集中在雅鲁藏布江缝合带附近及喜马拉雅山以南高山峡谷区域。

侵蚀剥蚀大起伏极高山区、冰缘作用的大起伏极高山区内滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害极发育,主要是因为在此海拔高度范围,沟谷切割大、临空面发育、冰川融雪发育等有利于地质灾害的发生。冰川作用的极大起伏极高山区域基岩裸露,山坡陡峻,寒冻风化作用及冰川作用十分强烈,灾害类型

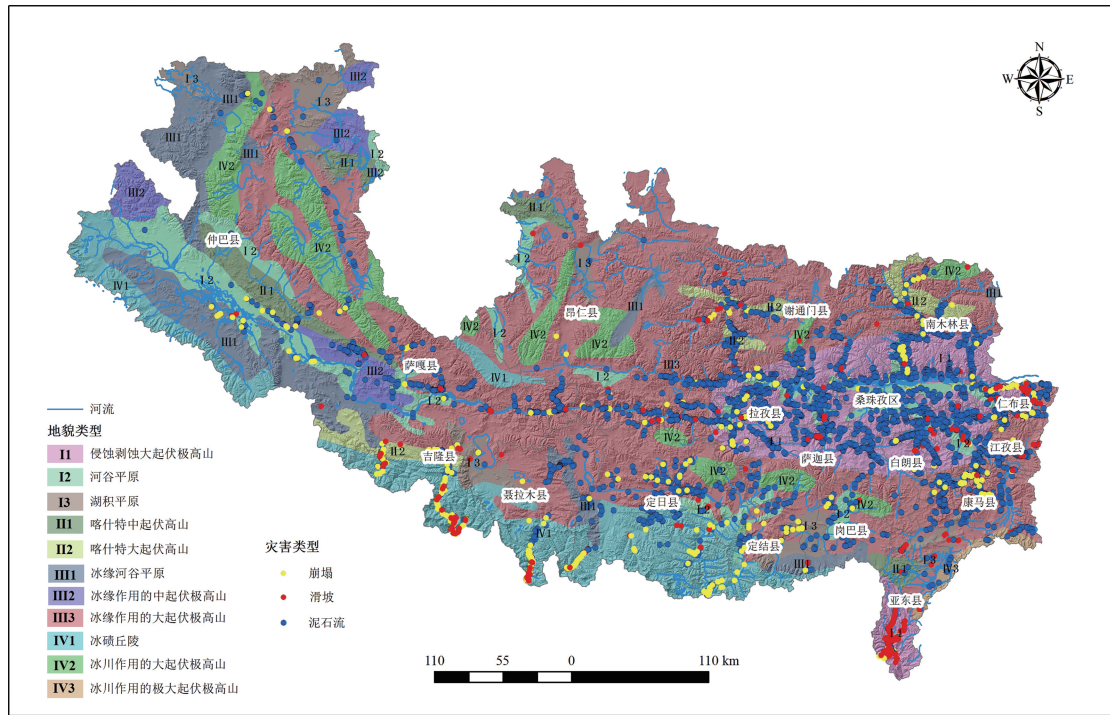


图 4 日喀则地区地貌分区与地质灾害叠加图

Fig. 4 Superimposed map of geomorphic zoning and geological hazards in the Xigaze area

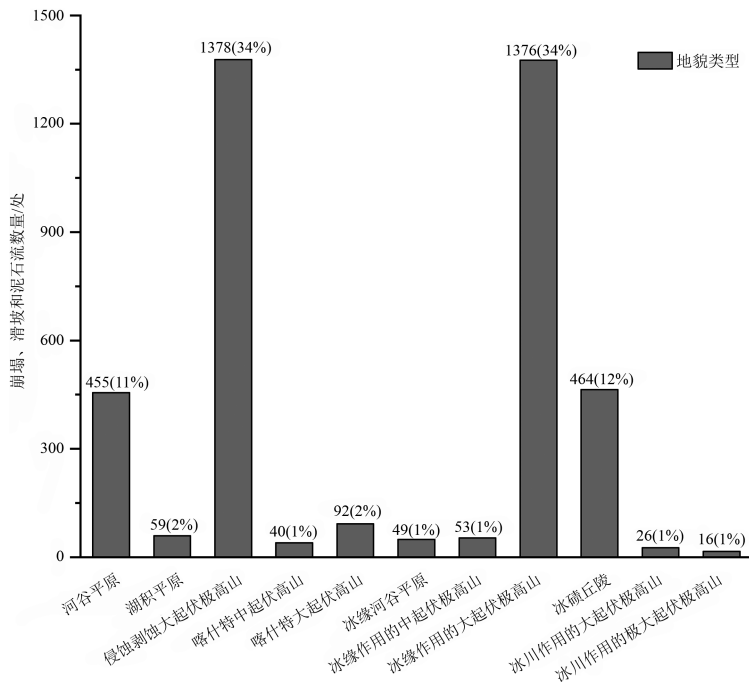


图 5 日喀则地区地质灾害与地貌单元叠加统计

Fig. 5 Statistical map of superposition of geological hazards and geomorphic units in the Xigaze area

主要表现为泥石流。冰碛丘陵区内地质灾害较发育。河谷平原区泥石流地质灾害较发育,滑坡、崩塌地质灾害发育情况一般,这是由于河谷平原区阶地较平坦的缘故,其他地貌类型地质灾害不发育。

研究区各地貌单元地质灾害发育类型统计情况见表 6、图 6。

5.2 斜坡类地质灾害与地形坡度的关联性分析

滑坡、崩塌是在重力作用下发生的地质灾害,其孕育需要一定的斜坡地形,可将其统称为斜坡类地质灾害,地形地貌是此类地质灾害发生的基本要素。地形地貌主要包括坡度、坡向、高程等要素,其数据的获取依赖于数字高程模型,本文 DEM 基于日喀则市 1:5 万地形图,通过 ArcGIS 三维分析功能获得。

5.2.1 斜坡类地质灾害与坡度的关联性

坡度是斜坡类地质灾害发生的重要影响因子之一,不仅影响斜坡内的应力分布,而且对斜坡表面风化程度、松散物质的堆

表 6 各地貌单元地质灾害发育类型

Table 6 Geological hazard development types of each geomorphic unit

地貌 灾害类型	流水地貌			岩溶地貌		冰缘地貌			冰川地貌			合计
	侵蚀剥 蚀大起 伏极 高山	河谷 平原	湖积 平原	喀斯特 中起伏 高山	喀斯特 大起伏 高山	冰缘河 谷平原	冰缘作 用的中 起伏极 高山	冰缘作 用的大 起伏极 高山	冰碛 丘陵	冰川作 用的大 起伏极 高山	冰川作 用的极 大起伏 极高山	
滑坡/处	87	5	3	2	6	2	0	36	61	2	0	204
崩塌/处	108	42	14	1	15	14	2	146	261	2	0	605
泥石流/处	1183	408	42	37	71	33	51	1194	142	22	16	3199
合计/处	1378	455	59	40	92	49	53	1376	464	26	16	4008
所占比例/%	34.38	11.35	1.47	1.00	2.30	1.22	1.32	34.33	11.58	0.65	0.40	100

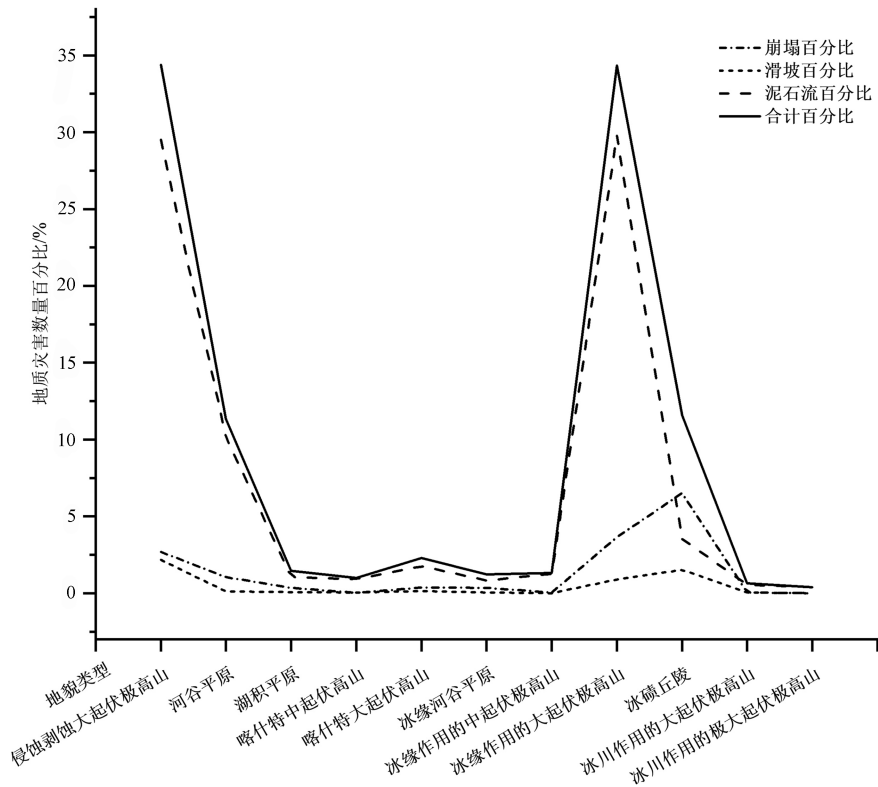


图 6 日喀则地区各地貌单元地质灾害发育类型对比

Fig. 6 Comparison of geological hazard types of each geomorphic unit in the Xigaze area

积厚度、植被覆盖率等具有重要的控制作用。对于具有一定坡度的斜坡来说,滑坡、崩塌的发生均有较优的坡度范围,在此范围内,滑坡、崩塌等地质灾害具有相对高发的特点。研究区基于 30mDEM 数据,利用 ArcGIS 软件的表面分析工具中的坡度分析功能,生成日喀则市坡度图,将坡度划分为 0°~15°、15°~25°、25°~35°、35°~45°、45°~55°、55°~90°六个区间,并利用 ArcGIS 软件的空间分析功能将滑坡、崩塌地质灾害分布图层与生成的坡度图层进行叠加运算分析(图 7)。由于滑坡、崩塌地质灾害对

地形坡度的敏感性不同,因此,需依次对滑坡、崩塌与地形坡度的关联性进行分析^[13-16]。

(1)滑坡地质灾害与坡度的关联性

对研究区各坡度范围内滑坡地质灾害进行统计(表 7),根据滑坡分布数量分析可知,研究区滑坡地质灾害产生的地形坡度一般小于 45°,共发育滑坡 201 个,96.08% 的滑坡地质灾害分布于此区域,其中分布数量最多的区间为 25°~35°,共发育滑坡 66 个,随着坡度的增加或减少,滑坡的分布数量呈减少的趋势,大于 45°区间仅分布滑坡 8 处;根据面

积敏感性分析,各坡度范围滑坡密度呈逐渐上升的趋势,其中敏感性最高的坡度为 $55^{\circ}\sim 90^{\circ}$,滑坡分布密度为 0.63 个/ 100 km^2 ,敏感性最低的为 $0^{\circ}\sim 15^{\circ}$,滑坡分布密度仅 0.04 个/ 100 km^2 。综合看,研究区滑坡与坡度的关系符合一般滑坡分布与坡度的关系,即在 $0^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 斜坡体上,滑坡坡度越大,越容易在外力作用下打破其内部应力平衡,最终形成滑坡的现象。

(2) 崩塌地质灾害与坡度的关联性

对各坡度范围崩塌地质灾害进行统计(表8),研究区地形坡度 $55^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 区间,崩塌发育数量最多,为326个,同时此区间崩塌面积敏感性最大,密度达 68.43 个/ 100 km^2 ; $0^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 、 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 区间内崩塌密度接近于0,说明此坡度范围基本不构成形成崩塌体的地形条件,统计数据中此区域的11个崩塌体均为坡体上的孤石型崩塌; $15^{\circ}\sim 55^{\circ}$ 区间,随着坡度的增加,崩塌的面积敏感性和密度逐渐增加,但远小于坡度大于 $55^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 的区域。综上所述,研究区崩塌主要形成于坡度 $55^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 区域,这是由于斜坡越高、坡度越大越易发生滑坡,当坡度超过一定程度时,由于斜坡的水平软弱岩体中垂直分力增大而形成崩塌,并且坡度越大越容易发生崩塌。

5.2.2 斜坡类地质灾害与坡向关联性

坡向对斜坡的影响主要源于太阳辐射强度的大小,阳坡由于日照时间较长,具有植被覆盖好、水蒸发量大、昼夜温差大、坡面风化作用强烈的特征,不利于斜坡稳定,相对阴坡滑坡地质灾害较易发生。研究区基于 30 m 精度的DEM数据,利用ArcGIS软件表面分析工具中的坡向分析功能,生成日喀则市坡向图(图8),将坡向分为平面、北($337.5^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 、 $0^{\circ}\sim 22.5^{\circ}$)、北东($22.5^{\circ}\sim 67.5^{\circ}$)、东($67.5^{\circ}\sim 112.5^{\circ}$)、南东($112.5^{\circ}\sim 157.5^{\circ}$)、南($157.5^{\circ}\sim 202.5^{\circ}$)、南西($202.5^{\circ}\sim 247.5^{\circ}$)、西($247.5^{\circ}\sim 292.5^{\circ}$)、北西($292.5^{\circ}\sim 337.5^{\circ}$)9个方向,并利用ArcGIS软件的空间分析功能将滑坡、崩塌地质灾害分布图层与生成的坡向图层进行叠加运算。统计结果表明,研究区阳坡($90^{\circ}\sim 270^{\circ}$)滑坡、崩塌地质灾害分布466处,占总数的57.6%,略高于阴坡灾害点,研究区坡向在南东向敏感性最强,灾害点分布141处,滑坡、崩塌密度为 0.67 个/ 100 km^2 ,占灾害点总数的17.43%,其次为正西向,略低于南东向为126处,坡向在正北及北东向敏感性最低(表9)。

5.2.3 斜坡类地质灾害与高程关联性

斜坡类地质灾害的发育与其分布高程密切相

关^[17-18]。研究区位于青藏高原西南部,高程跨越范围大,利用ArcGIS软件生成日喀则市高程图(图9),将高程分为小于 2500 m 、 $2500\sim 3000\text{ m}$ 、 $3000\sim 3500\text{ m}$ 、 $3500\sim 4000\text{ m}$ 、 $4000\sim 4500\text{ m}$ 、 $4500\sim 5000\text{ m}$ 、大于 5000 m 8个区间范围,并将滑坡、崩塌地质灾害分布图层与生成的坡向图层进行叠加运算。据统计,日喀则市滑坡、崩塌地质灾害分布数量最高的高程范围为 $4000\sim 4500\text{ m}$,共计250处,其次为 $3500\sim 4000\text{ m}$,155处,分布数量最少的高程范围为大于 5000 m ,仅18处;从分布密度看,随着高程的增加,滑坡、崩塌地质灾害密度呈现逐渐减小的趋势,地质灾害发育密度最大高程范围为小于 2500 m 区域,达到了 62.57 个/ 100 km^2 ,密度最小为大于 5000 m 区域,仅为 0.02 个/ 100 km^2 。出现这种现象是因为研究区位于青藏高原西南部,区内海拔较高,高海拔所占面积较低海拔大幅增加的缘故(表10)。

5.3 泥石流地质灾害与微地貌成生关系

研究区自古近纪地壳构造运动强烈,地形差异大,高山深谷特征普遍,一般情况下泥石流沟谷呈明显的“V”字形,两岸沟坡陡峻,沟道纵降比较大,沟程较短,这种地形短时间内易汇集降水或高山融雪,为泥石流的发育提供了有利条件^[19]。

5.3.1 泥石流与沟谷流域面积的关系

研究区泥石流多发生于流域面积小于 5 km^2 的沟谷中,占总数的74.87%,沟长比沟宽长,这些沟谷松散物质较丰富,在局部暴雨或高山融雪作用下能迅速汇聚地表水,形成泥石流(表11)。

5.3.2 泥石流与流域相对高差的关系

流域的相对高差对泥石流的发育有一定影响。研究区泥石流沟的统计结果表明,区内泥石流沟流域相对高差普遍在 100 m 以上,占统计总数的96.25%,其中相对高差 $100\sim 300\text{ m}$ 与 $300\sim 500\text{ m}$ 中泥石流发育情况相近,分别占总数的28.82%和30.98%,而相对高差大于 500 m 的占总数的36.45%(表12)。

5.3.3 泥石流与沟槽横断面的关系

沟槽横断面对泥石流的发育有一定影响。据统计,区内泥石流沟多分布在“V”形谷,占总数的76.62%,拓宽“U”形谷、复式断面、平坦形谷多位于丘陵、平原地区,地势较平缓,相对高差较小,沟床纵坡降小,受自然临空条件的限制,不易发生规模较大的崩塌、滑坡、泥石流地质灾害(表13)。

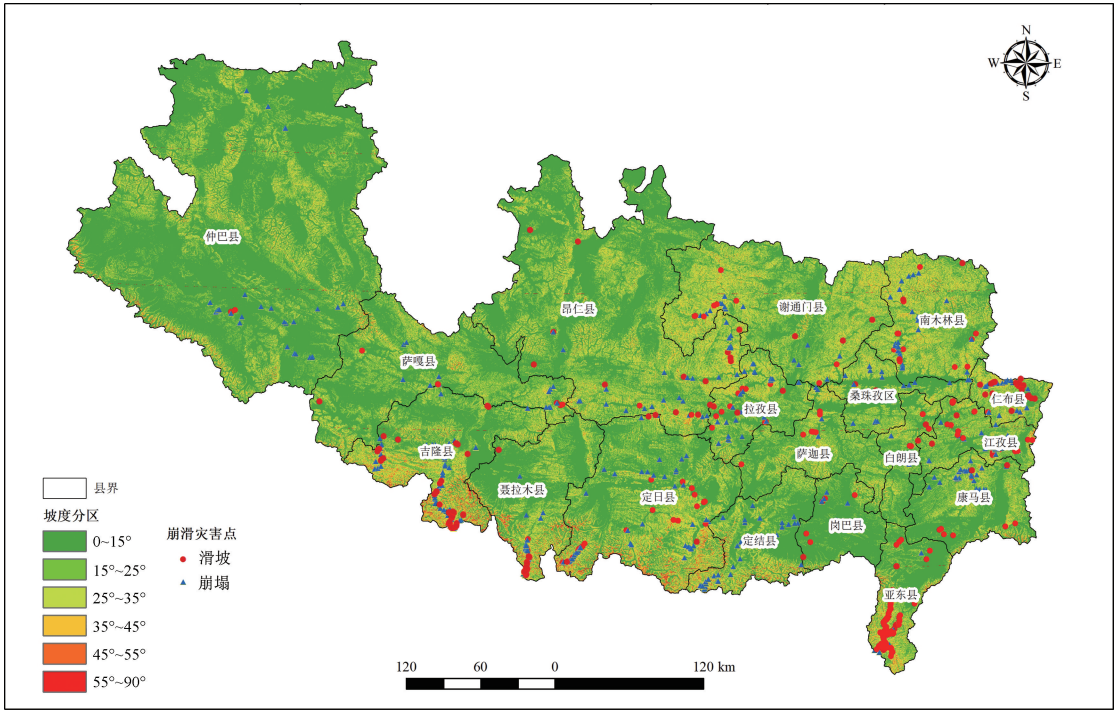


图 7 日喀则地区滑坡、崩塌地质灾害与坡度关系

Fig. 7 Relationship between landslide, collapse geological hazards and slope in the Xigaze area

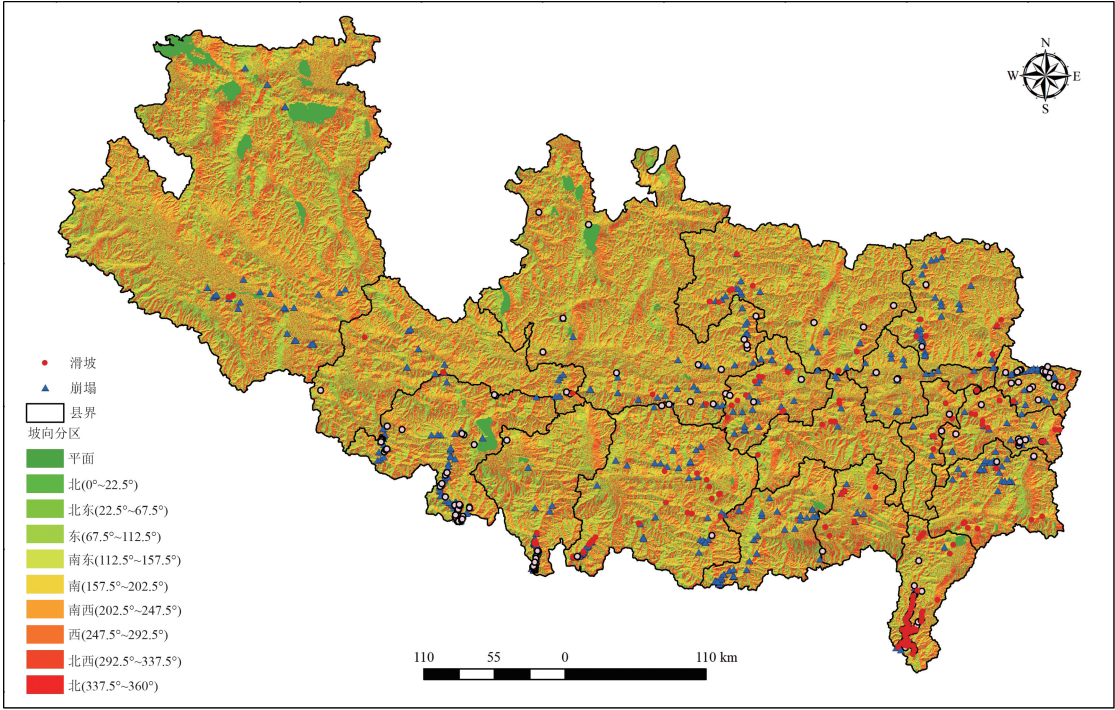


图 8 日喀则市滑坡、崩塌地质灾害与坡向关系

Fig. 8 Relationship between landslide, collapse geological hazards and slope direction in the Xigaze area

表 7 日喀则市滑坡地质灾害与坡度关系
Table 7 Relationship between landslide hazards
and slope in Xigaze City

坡度/°	面积/ km ²	滑坡数 量/个	POA/%	POLN/%	LC/(个· 100 km ⁻²)
0~15	93766.77	40	51.64%	19.61%	0.04
15~25	45117.85	58	24.85%	28.43%	0.13
25~35	31762.05	66	17.49%	32.35%	0.21
35~45	9010.17	32	4.96%	15.69%	0.36
45~55	1447.40	5	0.80%	2.45%	0.35
55~90	476.39	3	0.26%	1.47%	0.63

注:PoA 为面积百分比,PoLN 为数量百分比,LC 为密度

表 8 日喀则市崩塌地质灾害与坡度关系
Table 8 Relationship between collapse hazards
and slope in Xigaze City

坡度/°	面积/ km ²	崩塌数 量/个	POA/%	POLN/%	LC/(个· 100 km ⁻²)
0~15	93766.77	2	51.64%	0.33%	0.00
15~25	45117.85	9	24.85%	1.49%	0.02
25~35	31762.05	51	17.49%	8.43%	0.16
35~45	9010.17	126	4.96%	20.83%	1.40
45~55	1447.40	91	0.80%	15.04%	6.29
55~90	476.39	326	0.26%	53.88%	68.43

表 9 日喀则市滑坡、崩塌地质灾害与坡向关系
Table 9 Relationship between landslide,collapse
hazards and slope direction in Xigaze City

坡向/°	面积/ km ²	滑坡、崩 塌/个	POA /%	POLN /%	LC/(个· 100 km ⁻²)
平面	9957.21	0	5.48%	0.00%	0.00
北(337.5~22.5)	21567.43	75	11.88%	9.27%	0.35
北东(22.5~67.5)	21844.23	58	12.03%	7.17%	0.27
东(67.5~112.5)	21353.85	92	11.76%	11.37%	0.43
南东(112.5~157.5)	21106.32	141	11.62%	17.43%	0.67
南(157.5~202.5)	21772.94	108	11.99%	13.35%	0.50
南西(202.5~247.5)	21742.14	108	11.97%	13.35%	0.50
西(247.5~292.5)	21349.23	126	11.76%	15.57%	0.59
北西(292.5~337.5)	20887.29	101	11.50%	12.48%	0.48

5.3.4 泥石流与主沟纵坡降的关系

研究区泥石流的平均纵坡降在大于 212.56‰时最发育,占总数的 64.05%,小于 52.41‰时不易形成泥石流。这与研究区内的地形地貌特征有很大关系,研究区山地面积占总面积的 69.08%,其间沟谷

表 10 日喀则市滑坡、崩塌地质灾害与高程关系
Table 10 Relationship between landslide,collapse
hazards and elevation in Xigaze City

高程范 围/m	面积/ km ²	滑坡、崩 塌/个	POA/%	POLN/%	LC/(个· 100 km ⁻²)
<2500	121.47	76	0.07%	9.39%	62.57
2500~3000	183.87	87	0.10%	10.75%	47.32
3000~3500	460.99	119	0.25%	14.71%	25.81
3500~4000	3996.70	155	2.20%	19.16%	3.88
4000~4500	19272.80	250	10.61%	30.90%	1.30
4500~5000	69207.42	104	38.11%	12.86%	0.15
>5000	88337.38	18	48.65%	2.22%	0.02

表 11 泥石流沟流域面积
Table 11 Statistics of drainage area of debris flow gully

流域面积/km ²	<5	5~10	10~100	>100
泥石流条数/条	2395	405	384	15
所占比例	74.87%	12.66%	12.00%	0.47%

表 12 泥石流沟域相对高差
Table 12 Statistics of relative elevation difference
of debris flow gully

流域相对高差/m	<100	100~300	300~500	>500
泥石流条数/条	120	922	991	1166
所占比例	3.75%	28.82%	30.98%	36.45%

表 13 泥石流沟槽横断面
Table 13 Statistics of cross sectionfor debris flow trench

流域相对高差/m	V 形谷	拓宽 U 形谷	复式断面	平坦型
泥石流条数/条	2451	427	128	193
所占比例	76.62%	13.35%	4.00%	6.03%

纵横,坡陡沟深,沟床纵坡大,易形成泥石流(表 14)。

5.3.5 泥石流与山坡坡度的关系

研究区泥石流形成区的周边山坡坡度多为大于 25°,占总数的 83.71%,其中坡度大于 32°的占 55.64%,说明陡峻的斜坡是泥石流容易发生的有利条件。此类斜坡的残坡堆积物稳定性较差,受外力

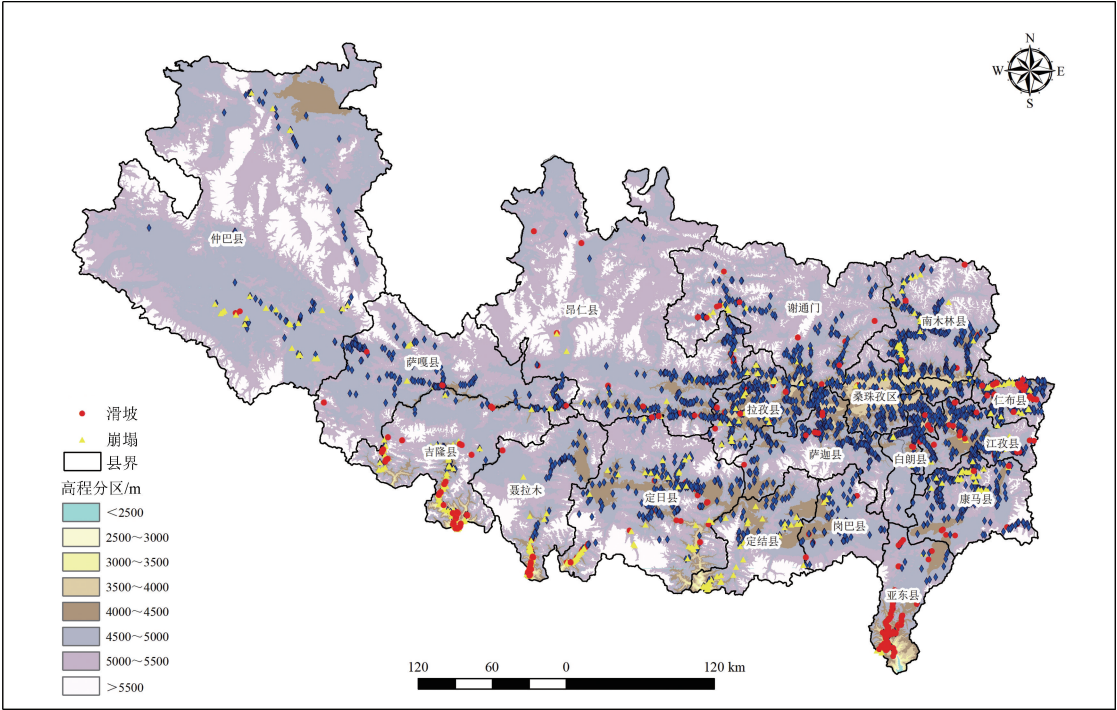


图 9 日喀则市滑坡、崩塌地质灾害与高程关系图

Fig. 9 Relationship between landslide, collapse geological hazards and elevation in the Xigaze city

影响作用易产生变形,为泥石流的产生提供潜在物源,在降雨、冰川融雪的作用下易发生泥石流(表 15)。

6 结 论

- (1)研究区地质灾害主要集中分布在日喀则—白朗—江孜—康马段、日喀则—拉孜—定日段、吉隆口岸、樟木口岸和亚东口岸 5 个区域。
- (2)主要地质灾害发育于侵蚀剥蚀大起伏高山和冰缘作用的大起伏极高山地貌,河谷平原及冰碛丘陵次之,其他地貌特征发育灾害较少。
- (3)滑坡、崩塌灾害易发于海拔 3500 m 以下区域。发育于阳坡(90°~270°)的灾害点略高于阴坡,占总数的 57.6%,在南东向敏感性最强。滑坡、崩塌分别易发于斜坡坡度 15°~45°和 35°~90°。
- (4)泥石流灾害多发生于流域面积小于 5 km²,相对高差大于 100 m 的沟谷中,纵坡大于 212.56‰的“V”形谷尤为发育。流域范围内坡度大于 25°时,更易于泥石流物源的产生。
- (5)重点区段防治建议:建立现有较完善的“四大防治体系”系统—调查评价体系、监测预警体系、

综合防治体系与应急值守体系。针对极高山不同地区(包括口岸场镇、居民聚居区及交通沿线)发育的地质灾害进行针对性的防治,以“防”为主,以“治”为辅,降低灾害损失,消除灾害威胁;选取合适的灾点进行群专结合监测预警,采用普适性监测仪器进行人防加技防。

表 14 泥石流沟主沟纵坡降

Table 14 Statistics of longitudinal gradient for main gully of debris flow

主沟纵坡降	<52.41‰	52.41‰~105.11‰	105.11‰~212.56‰	>212.56‰
泥石流条数/条	46	179	925	2049
所占比例	1.44%	5.60%	28.92%	64.05%

表 15 泥石流沟两侧山坡坡度

Table 15 Statistics of slope gradient on both sides of debris flow gully

沟两侧山坡坡度/°	<15°	15°~25°	25°~32°	>32°
泥石流条数/条	74	447	898	1780
所占比例	2.31%	13.97%	28.07%	55.64%

致谢:四川省华地建设工程有限责任公司的李胜伟、王海波和韩梅东高级工程师参加了野外调查工作,韩梅东高级工程师提供了大量的数据支撑,审稿专家对本文提出了许多建设性修改意见,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] Sapkota S N, Bollinger L, Klinger Y, et al. Primary surface ruptures of the great Himalayan earthquakes in 1934 and 1255[J]. Nature Geoscience, 2013, 6: 71-76.
- [2] Pulla P. New jitters over megaquakes in Himalayas[J]. Science, 2015, 347: 933-934.
- [3] 陶和平, 刘斌涛, 刘淑珍, 等. 遥感在重大自然灾害监测中的应用前景——以 5·12 汶川地震为例[J]. 山地学报, 2008, 26(3): 276-279.
- [4] 乔建平. 滑坡危险度区划方法研究[J]. 资源与人居环境, 1995, (Z5): 35-45.
- [5] 戴福初, 李军. 地理信息系统在滑坡灾害研究中的应用[J]. 地质科技情报, 2000, 19(1): 91-96.
- [6] 吴北平, 李征航, 徐邵栓, 等. GPS 定位技术在三峡库区崩滑地质灾害监测中的试验分析[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2001, (6): 648-652.
- [7] 阳岳龙, 周群, 林剑. 湖南主要地质灾害与地形地貌之关系[J]. 灾害学, 2007, 22(3): 36-40.
- [8] 黄润秋, 唐川, 李勇, 等. 汶川地震地质灾害研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [9] 黄庭, 张志, 谷延群, 等. 基于遥感和 GIS 技术的北川县地震次生地质灾害分布特征[J]. 遥感学报, 2009, 13(1): 177-182.
- [10] 黄润秋, 向喜琼, 巨能攀. 我国区域地质灾害评价的现状和问题[J]. 地质通报, 2004, 13(11): 1078-1082.
- [11] 孙绍崇, 蔡红卫. 我国历史地震时崩塌滑坡的发育及分布特征[J]. 自然灾害学报, 1997, 6(1): 26-30.
- [12] 孙妍, 陈海云, 张志, 等. G318 拉萨-日喀则沿线地质灾害分布规律及其影响因素[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(4): 111-118.
- [13] 殷志强, 陈红旗, 褚宏亮, 等. 2008 年以来中国 5 次典型地震事件诱发地质灾害主控因素分析[J]. 地学前缘, 2013, 20(6): 289-302.
- [14] 陈怡, 范宣梅. 震后地质灾害易发性评价——以映秀震区为例[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(9): 3516-3527.
- [15] 姚远, 李涛, 刘奇, 等. 2020 年 1 月 19 日新疆伽师 M_w 6.0 地震震中区地质灾害特点[J]. 地震地质, 2021, 43(2): 410-429.
- [16] 文广超, 苏林雪, 谢洪波, 等. “5·12”汶川地震前后四川省主要地质灾害时空发育规律[J]. 地质科技通报, 2021, 40(4): 143-152.
- [17] 郭芳芳, 杨农, 张岳桥, 等. 基于 GIS 的滑坡地质灾害地貌因素分析[J]. 地质力学学报, 2008, 14(1): 87-96.
- [18] 孟华君, 乔建平, 田宏岭, 等. 小区域地震地质灾害空间分布特点分析方法探讨[J]. 工程地质学报, 2014, 22(1): 14-22.
- [19] 王钧, 欧国强, 杨顺. 地貌信息熵在地震后泥石流危险性评价中的应用[J]. 山地学报, 2013, 31(1): 83-90.