

DOI: [10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.03-16](https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.03-16)

强震区叠溪松坪沟景区地质灾害发育分布规律

穆成林¹, 习朝辉^{2,3}, 裴向军³, 崔圣华³

(1. 四川师范大学, 四川成都 610066; 2. 成都市勘察测绘研究院, 四川成都 610000;
3. 成都理工大学, 四川成都 610059)

摘要: 以强震区叠溪松坪沟景区为研究范围区, 通过多元信息手段调查, 共发现地质灾害 107 处, 其中崩塌 82 处, 滑坡 25 处。地质灾害的发育分布的影响因素包括: 原始坡度、高程、坡体结构、水系距离及断裂带距离等。灾害发育分布在坡度 30°~50° 数量多且规模大; 高程 2 200~3 400 m 灾害发育数量多, 尤其是高程 2 600~3 000 m 占总量的 42.5%, 规模则在高程为 3 400~3 600 m 较大; 斜向坡体发育地质灾害数量及规模均较大, 其次为顺向坡和反倾坡; 水系对灾害一般最大影响距离为 4.0 km, 其中 0~1.0 km 范围内灾害发育, 且规模较大; 地质灾害沿地震断裂带呈次“串珠状”分布, 0~2.0 km 范围内最为显著发育, 且符合一定的拟合规律。通过统计归纳分析, 厘定了强震区叠溪松坪沟景区范围内地质灾害的发育的主要影响因素, 系统的总结了其分布规律, 为研究区内的基础建设以及防灾减灾提供了科学依据和参考。

关键词: 强震区; 松坪沟景区; 地质灾害; 分布规律; 影响因素

中图分类号: P694 文献标志码: A 文章编号: 1003-8035(2021)03-0124-07

Development and distribution rules of geohazards in Diexi-Songpinggou scenic area in a meizoseismal area

MU Chenglin¹, XI Zhaojun^{2,3}, PEI Xiangjun³, CUI Shenghua³

(1. Sichuan Normal University, Chengdu, Sichuan 610066, China; 2. Chengdu Institute of Survey & Investigation, Chengdu, Sichuan 610000, China; 3. Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: The Songpinggou scenic area in Diexi was taken as the study area and there are 107 geological disasters were found, including 82 collapses and 25 landslides in this meizoseismal area. The influencing factors of the development and distribution of geological disasters include: original slope, development elevation, slope structure, water system distance and fault zone distance. The number and scale of disasters are distributed in the slope of 30° to 50° and the number and scale of disasters are large; the number of disasters with elevation of 2 200~3 400 m accounts for 42.5% of the total, especially the elevation of 2 600~3 000 m accounts for 42.5% of the total; the number and scale of geological disasters developed in oblique slope are relatively large, followed by consequent slope and reverse slope; the maximum influence distance of water system on disaster is 4.0 km, in which the range of 0~1 km is within. The results show that the geological disasters are developed and large-scale; the distribution of geological disasters along the seismic fault zone is sub "string beads", and the most significant development is in the range of 0~4.0 km, which conforms to a certain fitting law. Based on the statistical analysis, the main influencing factors of the development of geological disasters in the Songpinggou scenic area of Diexi are determined, and the distribution rules are systematically summarized, which provides scientific basis and reference for the infrastructure construction and disaster prevention and mitigation in the study area.

收稿日期: 2020-10-30; 修订日期: 2020-12-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41902296); 国家重点研发计划项目(2017YFC1501000)

第一作者: 穆成林(1985-), 男, 博士, 讲师, 主要从事环境地质与工程地质教学与科研工作。E-mail: 283390229@qq.com

通讯作者: 习朝辉(1995-), 男, 硕士, 主要从事工程地质与岩土力学研究。E-mail: 972099289@qq.com

Keywords: meizoseismal area; Songpinggou scenic area; geologic hazard; development and distribution rules; interfering factor

0 引言

地震是地球内部运动释放大量能量的过程,将会对地表岩土体结构、稳定等造成强烈的影响,诱发大量的地质灾害^[1]。例如:汶川地震诱发地质灾害 56 000 多处^[1-2];九寨沟地震诱发地质灾害 1 800 多处^[3];玉树地震距离断裂 2 km 范围内诱发地质灾害 700 多处^[4];芦山地震诱发地质灾害 2 900 多处^[5];鲁甸地震诱发地质灾害 1 700 多处^[6-7]。尤其是在强震山区,由于受各种地形、坡体结构、水系以及地震断裂带因素的影响,诱发地质灾害具有规模大、数量及类型多、运动距离远等特征^[8]。地质灾害的发生将会直接对相关的人民生命财产及基础建设工程安全造成严重的影响。因此,对强震区地质灾害的发育分布规律研究就显得尤为必要和重要,对后期的防灾减灾工作提供科学依据。目前,大量学者对地震区地质灾害的发育分布、变形破坏特征进行了研究,形成了一定的成果资料。例如,黄润秋等^[1]、许强等^[2]以汶川地震触发地质灾害为例,对地质灾害发育类型、分布位置、发育规模以及形成机理等进行了详细论述;程强等^[9-10]分别对汶川和九寨沟震区内公路沿线发育崩滑灾害进行了统计分类,厘定了主要影响因素和总结了崩塌和滑坡数量、发育特征和规律,提出了相对应的防治对策;梁靖等^[11]以九寨沟地震为例,系统的统计九寨沟景区内的灾害数量、类型,并通过确定相关的影响因素,分析了地震诱发地质灾害发育分布规律;戴岚欣等^[3]、王绚等^[12]对九寨沟地震灾害进行分布特征、活动性预测、易发性评价初步研究;高会会等^[13]对汶川震区震后地质灾害发育分布及演化特征统计分析,以滑坡和泥石流为例,从规模、烈度及时间 3 个方面对汶川震后 9a 来地质灾害演化特征及差异性进行了初步统计分析,并预测了 2018—2025 年滑坡和泥石流的演化趋势;李明威等^[14]对汶川震区泥石流的物源分布特征及规律进行分析,刻画泥石流灾害的演化过程等。

强震区叠溪松坪沟景区地质灾害多发于高陡边坡,对于地质工作者来说进行地质灾害调查的危险性和难度较高。本文通过前期的 InSAR、无人机技术配合人工调查而构建“空-天-地”一体化的多源信息研究成果资料,对研究强震区范围内地质灾害发育受影响的主要因素以及分布数量、破坏面积等进行统计归纳分析,揭示发育分布规律,拟合相关分析模型,为强震区的防灾

减灾提供可靠依据和参考数据。

1 研究区地质背景

叠溪松坪沟景区,地处青藏高原东南边缘,属于典型的构造侵蚀高山地貌,具有“高陡山,窄河谷”特点,区域内地质构造复杂,新近构造活动强烈。历史上遭受多次地震的影响,包括:汶川地震、松潘地震、叠溪地震。区域内发育有大面积的三叠系地槽沉积物,基岩则以杂谷脑组、新都桥组的板岩、千枚岩为主。区内海拔高度在 1868~4 800 m,高差约 3 000 m。松坪沟左岸主要为顺向坡、斜向坡,右岸主要为反向坡。区域内水系以松坪沟水系为主,居中贯穿整个研究区。断裂带以松坪沟断裂带为主,其大致沿松平沟断续分布,长近 30 km。1933 年叠溪 7.5 级地震即发生于该断裂之上,造成了大量的山体滑坡,也是造成“6·24”新磨村滑坡区岩体震裂的主要因素^[15-16]。

2 地质灾害发育分布规律

强震区山高坡陡,传统的调查手段和方法难以全区域、全空间的开展灾害识别和调查测绘,通过构建“空-天-地”一体化的多源信息调查手段,共发现地质灾害 107 处,其中崩塌 82 处,滑坡 25 处。通过对叠溪松坪沟景区地质灾害统计分析,甄选原始坡度、发育高程、坡体结构、水系距离及断裂带距离等为地质灾害发育分布规律的 5 个影响因素。

2.1 灾害发育分布与原始坡度之间规律

原始坡度的大小不但可以直接影响灾害的易发性^[1-2],而且同样影响灾害的发育特征。研究区内 92% 的灾害发育的坡度大于 30°,其中 30°~50° 坡度区域,滑坡和崩塌灾害分别为 18 处、73 处,各占滑坡和崩塌总数的 72%、89%;滑坡破坏面积为 $1\,285.32 \times 10^4$ m²,约占滑坡总破坏面积的 95.2%;崩塌破坏面积为 268.26×10^4 m²,约占崩塌总破坏面面积的 86.4%。其中,单个最大破坏面积的滑坡、崩塌均在该坡度范围内。依据统计分析,灾害发育数量和规模与原始坡度之间关系见图 1—图 3。

2.2 灾害发育分布与高程之间规律

研究区内灾害发育位置高程幅度较大,从 2 000~4 200 m 范围内均存在。其中,高程为 2 200~3 400 m 范围内灾害最为发育,滑坡、崩塌分别为 10 处、43 处,

分别占该类型总量的 40%、51.5%，但该高程范围内灾害破坏面积小。高程 3 400~3 800 m 范围内，发育滑坡 4 处，崩塌 5 处，破坏面积高达 $718.44 \times 10^4 \text{ m}^2$ ，占总破坏面积的 42.6%，其中以大型变形破坏滑坡最为显著，例如，2017 年发生于叠溪的新磨村滑坡等。依据统计分析，灾害发育数量和破坏面积与高程之间关系见

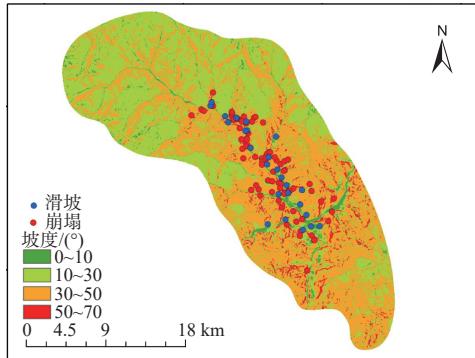


图 1 灾害发育与原始坡度关系图

Fig. 1 The relationship between disaster development and original slopes

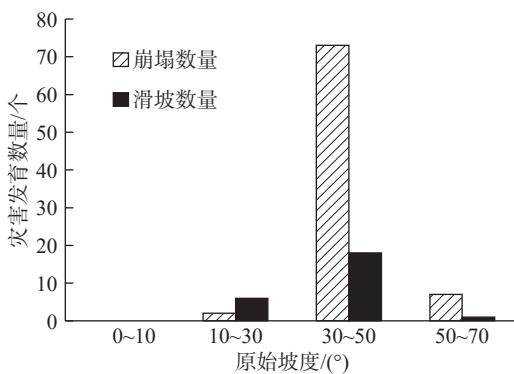


图 2 灾害发育数量与原始坡度关系图

Fig. 2 The relationship between disaster development quantity and original slopes

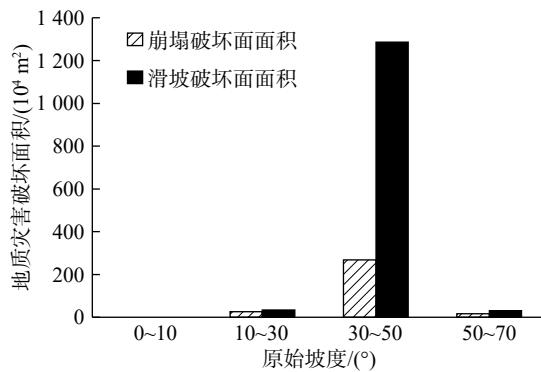


图 3 灾害破坏面积与坡度关系图

Fig. 3 The relationship between disaster damage area and original slopes

图 4—图 6。

2.3 灾害发育分布与坡体结构之间规律

震区灾害的发育程度受坡体结构控制，这是大量的研究成果一致的结论^[2, 9]。针对研究区坡体结构特征，将其分为顺向坡、斜向坡和反倾坡。崩塌主要发育于斜向坡中，共 43 处，占总数的 52.4%，总破坏面积高达 $193.32 \times 10^4 \text{ m}^2$ ，占崩塌破坏面积的 62.2%，最大规模的崩塌发育于反倾坡中；滑坡主要发育于顺向坡和斜向坡中，两种类型的斜坡共有 20 处滑坡，且破坏面积巨大，其中顺向坡中最大滑坡单体破坏面面积为 $173.73 \times 10^4 \text{ m}^2$ ，斜向坡中顺向坡中最大滑坡单体破坏面面积为 $332.94 \times 10^4 \text{ m}^2$ ，顺向坡和斜向坡发育滑坡的总破坏面积高达 $12.7354 \times 10^6 \text{ m}^2$ ，占滑坡破坏面积的 94.4%。依据统计分析，灾害发育数量和破坏面积与坡体结构之间关系见图 7—图 8。

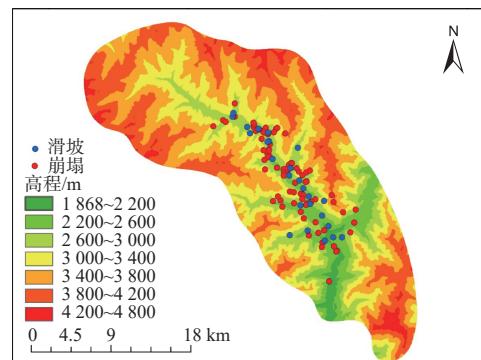


图 4 灾害发育与高程关系图

Fig. 4 The relationship between disaster development and elevation

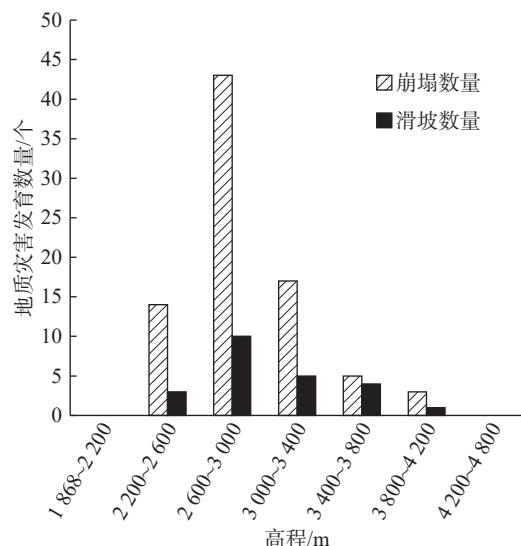


图 5 灾害发育数量与高程关系图

Fig. 5 The relationship between disaster development quantity and elevation

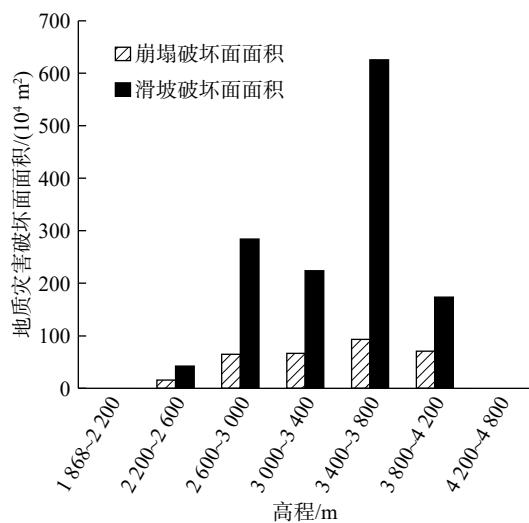


图 6 灾害破坏面积与高程关系图

Fig. 6 The relationship between disaster damage area and elevation

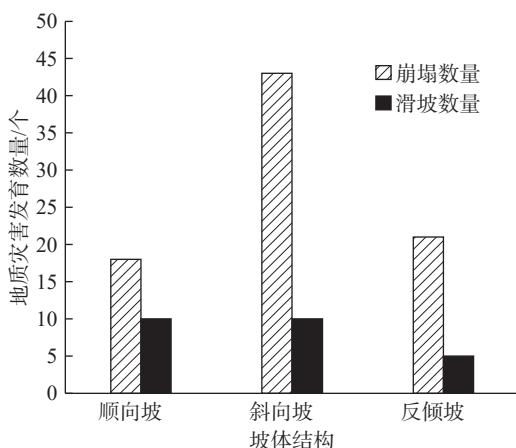


图 7 灾害发育数量与坡体结构关系图

Fig. 7 The relationship between disaster development quantity and slope structure

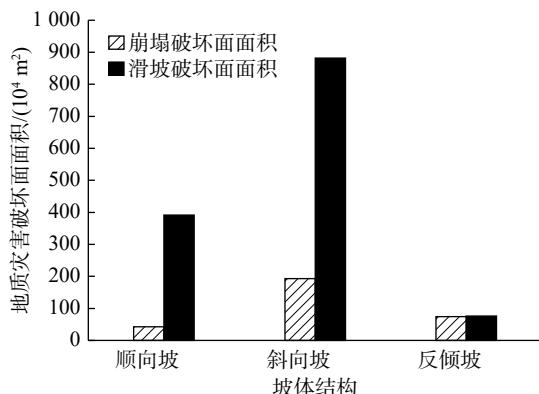


图 8 灾害破坏面积与坡体结构关系图

Fig. 8 The relationship between disaster damage area and slope structure

2.4 灾害发育分布与水系距离之间规律

研究区地质构造复杂且新运动强烈,形成以多条河流水系,其中松坪沟水系则直接居中穿过研究区,而灾害基本发育在松坪沟水系左右 4.0 km 范围内。通过调查分析,灾害的发育程度与水系关系密切,即距离水系距离小,则灾害发育程度高。通常小型崩塌、大型滑坡发育距离水系距离为 0~2.5 km,大型崩塌发育距离为 2.0~3.0 km。滑坡破坏面积以 0~1.0 km 最大,崩塌破坏面积以 2.0~3.0 km 最大,两种灾害的破坏面积呈现差异性分布。依据统计分析,灾害发育数量和破坏面积与水系距离之间关系见图 9—图 11。

通过对灾害发育与水系距离的拟合,获取相关计算模型:

灾害发育数量与水系距离计算模型为:

$$N = 23.73 \ln(D_w) + 75.396 \quad (R^2 = 0.983, D_w \leq 4 \text{ km}) \quad (1)$$

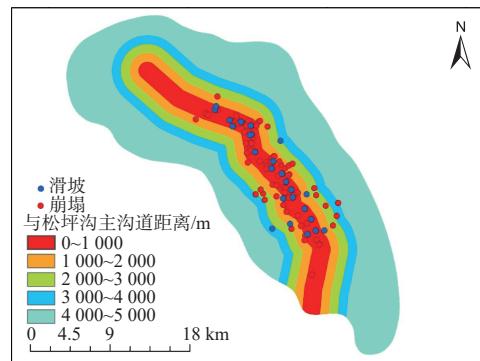


图 9 灾害发育与水系距离关系图

Fig. 9 The relationship between disaster development and river system distance

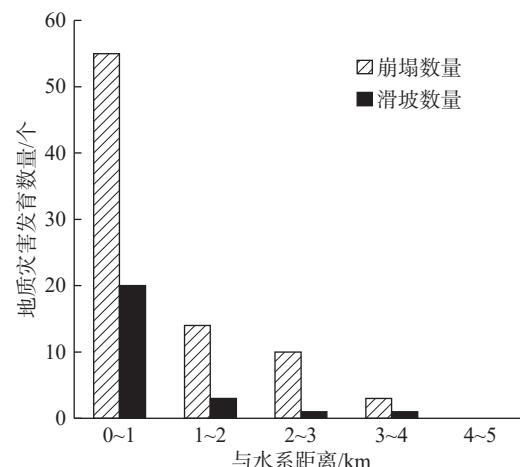


图 10 灾害发育数量与水系距离关系图

Fig. 10 The relationship between disaster development quantity and river system distance

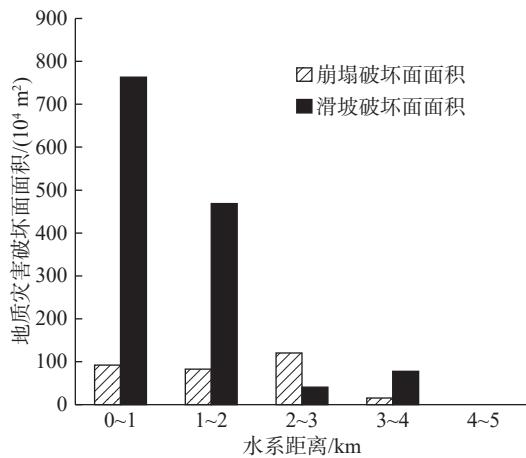


图 11 灾害破坏面积与水系距离关系图

Fig. 11 The relationship between disaster damage area and river system distance

灾害发育破坏面积与水系距离计算模型为:

$$S = 587.67 \ln(D_w) + 905.41 \quad (R^2 = 0.9612, D_w \leq 4 \text{ km}) \quad (2)$$

式中: N —灾害发育数量/处;

S —灾害发育破坏面积/ km^2 ;

D_w —灾害发育处与水系的距离/km。

2.5 灾害发育分布与地震断裂带距离之间规律

松坪沟断裂带直接穿过研究区, 目前仍具有一定的活动性, 很大程度上控制了灾害的发育程度, 对灾害的发育分布影响最大。研究区地质灾害沿松坪沟断裂带呈“串珠状”分布, 并且灾害的发育与距离呈现一定的规律性: 距离断裂带 1.0 km 范围内, 发育滑坡 16 处、崩塌 34 处; 距离断裂带 1.0~2.0 km 范围内, 发育滑坡 6 处、崩塌 26 处; 距离断裂带 2.0~3.0 km 范围内, 发育滑坡 2 处、崩塌 16 处; 距离断裂带 3.0~5.0 km 范围内, 发育滑坡 1 处、崩塌 5 处; 距离松坪沟断裂带 5 km 以外的范围, 地质灾害发育较少。破坏面积随着距离断裂带逐渐增加而具有逐渐较小分布规律。依据统计分析, 灾害发育数量和破坏面积与断裂带距离之间关系见图 12—14。

灾害发育数量、破坏面积与松坪沟断裂带距离 Dr 的计算模型为:

$$N = 36.329 \ln(Dr) + 53.815 \quad (R^2 = 0.9539, Dr \leq 5 \text{ km}) \quad (3)$$

$$S = 338.51 \ln(Dr) + 1131.6 \quad (R^2 = 0.9781, Dr \leq 5 \text{ km}) \quad (4)$$

式中: N —灾害发育数量/处;

S —灾害发育破坏面积/ km^2 ;

Dr —灾害发育处与水系的距离/km。

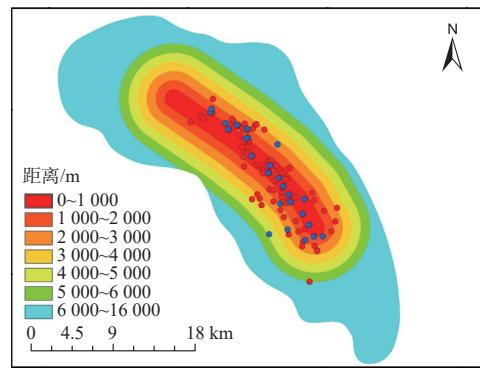


图 12 灾害发育与断裂带距离关系图

Fig. 12 The relationship between disaster development and fault zone distance

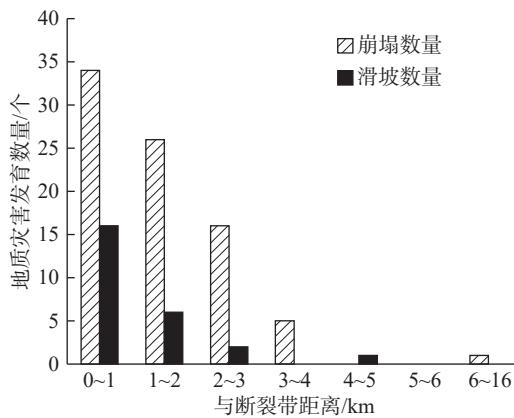


图 13 灾害发育数量与断裂带距离关系图

Fig. 13 The relationship between disaster development quantity and fault zone distance

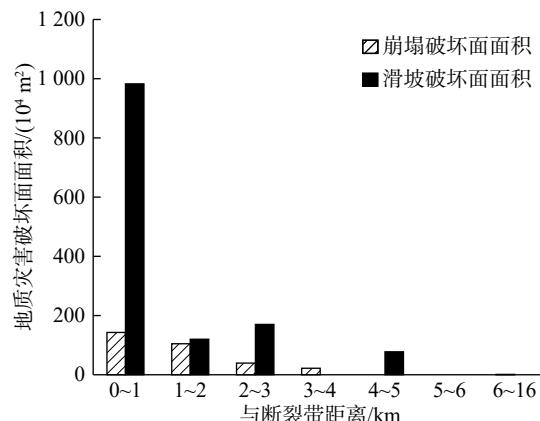


图 14 灾害破坏面积与断裂带距离关系图

Fig. 14 The relationship between disaster damage area and fault zone distance

3 分析与讨论

研究区叠溪松坪沟景区地质构造复杂, 山高坡陡, 地震活动频繁, 为典型的强震区, 其特点为地质灾害发

育数量及破坏面积较大,且具有一定的发育分布规律。本文依据前期多元信息的调查研究成果为基础,对研究区内的107处地质灾害(崩塌、滑坡)进行统计归纳分析,以灾害发育原始坡度、高程、坡体结构、水系距离以及断裂带距离为研究因素,分别进行了与崩塌、滑坡灾害的数量及破坏面积之间发育分布归纳总结,绘制了各因素与灾害之间相应的发育分布规律图以及建立了分析模型。研究基础数据可靠,影响因素选取合理,发育分布规律归纳总结科学准确。

上述5种因素如何影响或控制地质灾害发育分布规律?随着关于强震区地质灾害研究的深入,目前较为一致的结论认为^[15~19]:原始坡度的坡面效应和地面径流效应,即在较小坡度($<30^\circ$),坡面的地震效应较小,径流效应较大,而较大坡度($>50^\circ$),坡面的地震效应较大,径流效应较小,因此,在 $30^\circ\sim50^\circ$ 的坡面时,地震效应和径流效应的两者耦合条件下,诱发地质灾害的发育;地震波传播的高程效应,即在一定高程内,地震波具有放大效应;能量传播的距离衰减效应或断层效应,即离发震断裂越远,地震波能量衰减越多,地震动越弱,地质灾害发育越少;同样,距离水系越远的山体,河谷深切产生的卸荷效应减弱,内部含有裂隙水越少、地下水越深,地质灾害发育越少。上述的研究结论仍需进一步的深入的论证,这也是作者目前征在努力的研究方向和工作。

然而,强震区地质灾害的发育受众多因素影响,除了上述的5种影响因素外,还包括区域烈度、地层岩性、坡向(与断裂带方位)、后期的降雨以及人类活动等。因此,灾害的发育是一个复杂的系统的工程,各因素之间相互作用和影响,最终表现出具有一定发育分布的规律现象。如何甄选影响因素并揭示或建立分析模型进而研究其灾害的发育分布规律,对指导强震区社会经济发展、基础工程建设以及防灾减灾等工作都具有重要的意义。然而,目前的研究尚未考虑全面或未能有机相互结合相关影响因素、各种差异的灾害孕育条件等,分析预测系统存在欠缺完整性和实践性,这是强震区地质灾害发育分布规律的研究的难点之一。

同样,以灾害发育分布规律为基础,针对性的划分区域,并建立科学的易发性、稳定性评价模型或方法,是需要进一步深入研究。

4 结论

(1)通过多元信息手段对强震区叠溪松坪沟景区发育的107处地质灾害类型、数量以及破坏面积等进行详细调查,并甄选灾害发育原始坡度、高程、坡体结构、水系距离以及断裂带距离为5个主要影响因素,分

别进行统计归纳,并绘制灾害发育分布规律图以及与水系距离、断裂带距离的分析模型。

(2)研究成果揭示地质灾害发育在 $30^\circ\sim50^\circ$ 坡度区域发育数量最多,占总量的70%以上,破坏面积最大,占总量的85%以上;高程为 $2200\sim3400\text{ m}$ 范围内灾害最为发育,占总量的约50%,高程 $3400\sim3800\text{ m}$ 范围内单个灾害破坏面积最大;顺向坡、斜向坡条件下,滑坡灾害发育数量及破坏面积近似相等,而崩塌在斜向坡最为发育,约占崩塌总量的52.3%;水系距离、断裂带距离在 $0\sim2.0\text{ km}$ 范围内,灾害发生数量大,约占82.5%,破坏面积最大,约占总量的88.3%,整体呈现就近发育数量大,破坏面积大的规律。

(3)针对强震区地质灾害发育分布规律研究成果,对指导强震区社会经济发展、基础工程建设以及防灾减灾等工作都提供科学依据或参考,具有重要的意义;同时,也讨论分析了灾害发育分布规律研究是一个系统的工程问题,目前所存在的问题等需要进一步深入研究和思考。

参考文献 (References) :

- [1] 黄润秋,李为乐.“5·12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2585~2592. [HUANG Runqiu, LI Weile. Research on development and distribution rules of geohazards induced by Wenchuan earthquake on 12th May, 2008 [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12): 2585~2592. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 许强,李为乐.汶川地震诱发大型滑坡分布规律研究 [J].工程地质学报, 2010, 18(6): 818~826. [XU Qiang, LI Weile. Distribution of large-scale landslides induced by the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(6): 818~826. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 戴岚欣,许强,范宣梅,等.2017年8月8日四川九寨沟地震诱发地质灾害空间分布规律及易发性评价初步研究 [J].工程地质学报, 2017, 25(4): 1151~1164. [DAI Lanxin, XU Qiang, FAN Xuanmei, et al. A preliminary study on spatial distribution patterns of landslides triggered by Jiuzhaigou earthquake in Sichuan on August 8th, 2017 and their susceptibility assessment [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(4): 1151~1164. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 王佳运,张成航,高波,等.玉树震区地质灾害分布规律与发育特征 [J].工程地质学报, 2013, 21(4): 508~515. [WANG Jiayun, ZHANG Chenghang, GAO Bo, et al. Distribution regularity and development characteristics of geohazards in Yushu earthquake area [J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(4): 508~515. (in Chinese with English abstract)]

- [5] 殷志强, 赵无忌, 褚宏亮, 等. “4·20”芦山地震诱发地质灾害基本特征及与“5·12”汶川地震对比分析 [J]. 地质学报, 2014, 88(6): 1145–1156. [YIN Zhiqiang, ZHAO Wuji, CHU Hongliang, et al. Basic characteristics of geohazards induced by Lushan earthquake and compare to them of Wenchuan earthquake [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(6): 1145–1156. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 殷志强, 徐永强, 陈红旗, 等. 2014年云南鲁甸地震触发地质灾害发育分布规律及与景谷、盈江地震对比研究 [J]. 地质学报, 2016, 90(6): 1086–1097. [YIN Zhiqiang, XU Yongqiang, CHEN Hongqi, et al. The development and distribution characteristics of geohazards induced by August 3, 2014 Ludian earthquake and comparison with Jinggu and Yingjiang earthquakes [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(6): 1086–1097. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 陈成, 胡凯衡. 汶川、芦山和鲁甸地震滑坡分布规律对比研究 [J]. 工程地质学报, 2017, 25(3): 806–814. [CHEN Cheng, HU Kaiheng. Comparison of distribution of landslides triggered by Wenchuan, Lushan, and Ludian earthquakes [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(3): 806–814. (in Chinese with English abstract)]
- [8] FAN X M, GIANVITO SCARINGI, XU Q, et al. Coseismic landslides triggered by the 8th August 2017 Ms 7.0 Jiuzhaigou earthquake (Sichuan, China): factors controlling their spatial distribution and implications for the seismogenic blind fault identification [J]. *Landslides*, 2018, 15: 967–983.
- [9] 程强. 汶川强震区公路沿线地震崩滑灾害发育规律研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(9): 1747–1760. [CHENG Qiang. Research on development rules of seismic landslide and collapse along highways in highly seismic region of Wenchuan earthquake [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(9): 1747–1760. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 程强, 胡朝旭, 杨绪波. 九寨沟地震区公路沿线地质灾害发育规律及防治对策 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(4): 114–120. [CHENG Qiang, HU Chaoxu, YANG Xubo. Developmental regularity and preventive countermeasures of geological hazards along the highway in Jiuzhaigou earthquake area [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2018, 29(4): 114–120. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 梁靖, 裴向军, 温勇, 等. 2017年九寨沟地震地质灾害发育分布规律研究 [J]. 自然灾害学报, 2019, 28(5): 181–188. [LIANG Jing, PEI Xiangjun, WEN Yong, et al. Research on development and distribution rules of geohazards in Jiuzhaigou earthquake in 2017 [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2019, 28(5): 181–188. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 王绚, 范宣梅, 陈怡, 等. 九寨沟震后地质灾害分布特征与活动性预测 [J]. 人民长江, 2020, 51(9): 114–121. [WANG Xuan, FAN Xuanmei, CHEN Yi, et al. Distribution characteristics and activity prediction of geological disasters in Jiuzhaigou Valley after “2017.08.08” earthquake [J]. *Yangtze River*, 2020, 51(9): 114–121. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 高会会, 裴向军, 崔圣华, 等. 汶川震区震后地质灾害发育分布及演化特征统计分析 [J]. 长江科学院院报, 2019, 36(8): 73–80. [GAO Huihui, PEI Xiangjun, CUI Shenghua, et al. Geological hazards after earthquake in Wenchuan earthquake area: distribution and evolvement features [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019, 36(8): 73–80. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 李明威, 唐川, 陈明, 等. 汶川震区北川县泥石流流域崩滑体时空演变特征 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(3): 182–190. [LI Mingwei, TANG Chuan, CHEN Ming, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of landslides in debris flow catchment in Beichuan County in the Wenchuan earthquake zone [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(3): 182–190. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 陈冠, 孟兴民, 乔良, 等. “7·22”岷县漳县地震地质灾害分布、特征及与影响因子间关系分析 [J]. 工程地质学报, 2013, 21(5): 750–760. [CHEN Guan, MENG Xingmin, QIAO Liang, et al. Distribution, characteristics, and associated influencial factors of the geohazards induced by Minxian-Zhangxian earthquake on 22 July, 2013, Gansu, China [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2013, 21(5): 750–760. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 习朝辉. 强震区地质灾害多源信息识别及发育分布特征研究—以叠溪松坪沟为例 [D]. 成都: 成都理工大学, 2019. [XI Zhaozhui. Recognition and development of geological disasters based on multi-source information in meizoseismal areas—Take DieXi Songpinggou as an example [D]. Chengdu: Chengdu University Tecchnology, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 张世殊, 裴向军, 张雄, 等. 强震区泥石流坡面物源发育规律与侵蚀坡度效应研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊2): 4139–4147. [ZHANG Shishu, PEI Xiangjun, ZHANG Xiong, et al. Source development and slope gradient effect of debris flow source in earthquake zone [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(Sup2): 4139–4147. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 郭沉稳, 姚令侃, 段书苏, 等. 汶川、芦山、尼泊尔地震触发崩塌滑坡分布规律 [J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(1): 71–77. [GUO Chenwen, YAO Lingkan, DUAN Shusu, et al. Distribution regularities of landslides induced by Wenchuan earthquake, Lushan earthquake and Nepal earthquake [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2016, 51(1): 71–77. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 许冲, 田颖颖, 马思远, 等. 1920年海原8.5级地震高烈度区滑坡编录与分布规律 [J]. 工程地质学报, 2018, 26(5): 1188–1195. [XU Chong, TIAN Yingying, MA Siyuan, et al. Inventory and spatial distribution of landslides in high intensity areas of 1920 Haiyuan (China) 8.5 earthquake [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(5): 1188–1195. (in Chinese with English abstract)]