

文章引用: 丁永明, 黄庄志, 许晓鑫, 韩培锋, 陈代果, 谭良彪. 基于变维分形理论的日喀则市滑坡空间分布及其敏感性分析[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(6): 717-728. DOI: 10.12677/ag.2021.116067

²School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan
Email: *1349242642@qq.com

Received: May 12th, 2021; accepted: Jun. 2nd, 2021; published: Jun. 9th, 2021

Abstract

The “4.25” Nepal Ms8.1 earthquake caused serious disasters in Shigatse City, Tibet Autonomous Region of China. According to the data analysis of disaster investigation collected by Tibetan territorial departments, it is found that: There were 206 landslide hazards in 17 counties (districts) in Shigatse City. The distribution of landslide hazards was extremely uneven. Among them, East Asia, Jilong, Renbu and Dingjie counties account for 73.3%. It was found that the gradient, direction and elevation have obvious effects on the distribution of landslide hazards. Landslide hazard density was the highest in the range of 15~30 degrees, and its sensitivity coefficient value was the largest on the gradient. The gradient and the number of landslides show a first-order cumulative and variable-dimensional fractal relationship. The distribution of landslides was obviously different in each slope direction, in which the number of landslides was the largest in the southeast, while the number of landslides was the smallest in the north and southwest slopes. The relationship between slope direction and the number of landslide disasters was first-order cumulative and variable fractal. The number of landslides was the largest in the range of 3000~5000 m, accounting for 79.6% of the total. The lower the elevation, the greater the density of landslide hazards, the direction of landslides had a second-order cumulative and variable-dimensional fractal relationship with the number of landslide hazards distributed on the slope. The lower the elevation is, the greater the sensitivity coefficient of landslide is. This indicates that landslide hazards are more sensitive at this elevation. The research results can provide reference for post-disaster reconstruction and monitoring and early warning of secondary geological hazards in Shigatse City.

Keywords

“4.25” Ms8.1 Earthquake, Landslide Hazards, Space Distribution, Variable Dimension Fractal, Susceptibility

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

2015年4月25号, 尼泊尔的博克拉地区发生 Ms8.1 级地震, 震源深度 20 km, 随后多次余震发生, 其中 Ms7.0 级以上余震 3 次[1] [2] [3]。此次地震发生在印度板块与欧亚板块的陆陆碰撞带上, 地震波及尼泊尔、中国、印度、孟加拉等国, 强震导致多国产生大量的崩塌、滑坡等地质灾害, 造成严重的人员伤亡和财产损失。我国西藏自治区的日喀则市与尼泊尔相邻, 地震造成日喀则市受损严重, 当地居民的生产生活受到次生地质灾害的严重威胁。日喀则市多个县受灾, 地震触发大量的滑坡地质灾害, 日喀则市地形复杂, 影响滑坡灾害发生的因素较多, 开展震后日喀则市滑坡灾害影响因子敏感性分析及其空间分布规律对日喀则市灾后重建、土地资源利用及交通规划提供参考。地震发生后, 西藏自治区国土部门组织相关专业队伍开展地质灾害隐患排查工作, 地震触发的次生地质灾害的规模、类型及分布范围受地

形、区域位置、高程等因素影响较大[4]-[9]。开展地震后日喀则市地质灾害发育特点及分布区间调查,弄清日喀则市重灾区灾害发育特点可以为灾区防灾减灾提供有益意见和建议,从而为西藏地震灾区救援和灾后重建规划提供参考。

滑坡灾害的发生通常是由于各种影响因子诱发的,滑坡灾害的发生与外界环境相互作用,相互影响构成一个复杂的地质灾害系统。将分形理论引入区域滑坡灾害评估,为区域滑坡灾害的定量化研究提供了新思路。分形理论最早是 B. B. Mandelbrot 在上个世纪中期提出用于研究英国的海岸线长度,后来随着分形理论的发展在多个领域得到应用,其中在滑坡灾害评估中的应用还处于起步阶段。谢嘉琼等[10]基于利用分形理论。研究西藏樟木地区的滑坡灾害空间特征,指出其空间分布具有多重分形特征,研究表明滑坡灾害的空间分布在不同时段的多重分形指数谱能够较好地描述滑坡灾害分布的不确定性特征。邱海军等[11]以陕西省宁强县滑坡为例,采用变维分形方法,探讨滑坡在空间分布上的变维分形特征。王森等[12]基于 ArcGIS 技术,应用“累计和分形理论”对滑坡的敏感性进行了分析,得到各致灾因子的累计和分维值及滑坡发生对各致灾因子的敏感性。滕宏泉等[13]以长安区为研究区域,并采用网络覆盖法,对长安区滑坡崩塌地质灾害的空间分布进行了分形分维计算,揭示长安区滑坡崩塌地质灾害空间分布特性的复杂性。姜恩三等[14]通过分形理论中关联维数及其动态变化来揭示黑水河流域地质灾害的时空分布特征,并探讨了影响区内地质灾害空间分布的相关因素。以上学者利用分形理论对滑坡灾害研究取得了较好的效果,为此,本文将变维分形理论应用于日喀则市震后滑坡灾害空间分布及敏感性研究中,以期研究成果为日喀则市震后灾后重建及规划提供参考。

2. 计算分析原理

2.1. 变维分形理论

1973 年,法国数学家 B. B. Mandelbrot 创建分形理论[15],它是介于一般数学和欧几里得几何秩序的混沌之间,定量刻画复杂混乱现象背后的精细结构,随后变维分形理论作为有序自然界的工具被广泛应用。分形理论主要应用于滑坡灾害主要研究滑坡灾害空间分布的不规律性,假定分形维数为常数 D ,其不随特征线度 x 的变化而变化,则该类型的分形为常维分形;若假定分形维数为常数 D ,其随特征线度 x 的变化而变化,则该类型的分形为变维分形,表达式如下:

$$D = f(x) \quad (1)$$

已有研究表明,无法用常维分形理论分析复杂的现象。付昱华等[9]提出变维分形的概念用来解决复杂的问题,从而有效解决分形维数 D 在双对数坐标系下的分形非线性为题。主要是通过对原始数据对序列经过多阶数累计和,然后建立各阶段累计和的分段分维模型,进而从中选择拟合效果最佳的分维值作为其常维分形参数。

基于变维分形原理,建立各阶累计和的分段变维分形模型。将数据点绘制于双对数坐标上,拟合成直线型,从中找出拟合度最高的那组序列数据点,从而确定最佳的累计和阶次与分维数,即可以得到变维的分形模型。

2.2. 日喀则市滑坡灾害影响因子敏感性分析

诱发滑坡灾害发生的影响因子较多,且不同地区各因子的敏感性差异较大。为分析各因素对地震诱发的日喀则市境内滑坡灾害的影响程度,分析不同诱发因素对震后日喀则市滑坡影响因子的敏感性,为此引入敏感性分析方法对震后日喀则市滑坡灾害进行分析,从而为震后日喀则市滑坡灾害分析、灾后重建及规划提供参考。采用敏感性系数 Sci 定量描述坡度、坡向、高程和距离河流的距离等对滑坡灾害的敏感性。具体计算公式如下所示[11]:

$$S_{ci} = \ln \frac{H_i}{D} = \ln \frac{N_i/A}{N/A} \quad (2)$$

式中： N_i 为第 i 类影响因子诱发滑坡灾害的个数；

A_i 为第 i 类影响因子对应的区域面积；

N 表示评估区域滑坡灾害的总个数；

A 表示研究区受灾总面积；

S_{ci} 的值越小，则表示该类型的影响因子的敏感性越低，该类影响因子越不易导致滑坡的发生。

3. 日喀则市重灾区地质环境

3.1. 日喀则地貌环境

日喀则市地形复杂多变，南北地势较高较，中间较低，平均海拔在 4000 m 以上，由高山、宽谷和湖盆组成。南边为喜马拉雅山脉贯穿其中，平均海拔在 6000 m 以上，南部属喜马拉雅山高山深谷区，其地形起伏很大，包括西南部的佩枯岗日和东南部的错玛朗山，以及二者之间的波曲深切峡谷区。东部是以多布扎湖为中心的高原湖盆地区，地形较为宽阔平坦，盆地边缘为低中山，山体坡度一般 $25^{\circ} \sim 37^{\circ}$ ；中西部主要为河谷地区，河床宽缓；雅鲁藏布江由西向东穿过，年楚河为其最大支流，由南东向北西流淌汇入雅鲁藏布江。日喀则市地貌按成因形态可分为构造侵蚀剥蚀山地地貌和河谷地貌，总体上呈山地高、谷日低的梁谷相间格局地貌。第三纪上新世以来地壳迅速而强烈的隆起和断陷，使隆起的山地长期受到剥蚀、侵蚀，断陷谷地则长时间接受外来物质的堆积[13] [14]。

3.2. 日喀则市地质

尼泊尔地震日喀则市重灾区位于西藏南部，处于冈底斯构造带和北喜马拉雅构造带之间，隶属西藏缓慢抬升区。拉轨岗日亚带介于雄如 - 勇拉断裂带(F87)与尺马墩 - 多庆错断裂带(F101)之间，西窄东宽，呈近东西向展布；定日 - 巴亚带，介于尺马墩 - 多庆错断裂带(F101)与托丹 - 尼拉断裂带(F106)之间，呈北西西向带状展布。据地震烈度划分，日喀则市处于 VI-IX 度烈度区，该地区地震峰值加速度为 0.15~0.20 g。区内新构造运动除表现为缓慢抬升外，第四系冰川活动，在两构造带之间岩块的河谷地带多级阶地显示出河流潜蚀、侵蚀作用较强烈。该地区虽处于缓慢抬升期，加之地震多发生强烈，诱发差异性抬升形成区内等特殊的第四纪地质环境，使之成为崩塌、滑坡、泥石流多发区。较强烈的地震仍可能阶段性发生，不但成为区内的一大灾害，而且还不断孕育的地质灾害，甚至形成灾害链。

3.3. 日喀则市水文气象

日喀则市位于西藏自治区南部，以喜马拉雅山脉主脊线为界，形成南北两个大的气候类型区。北部为高原亚寒带半干旱气候区。南部为山地亚热带湿润气候区，包括喜马拉雅山山脊以南樟木镇为中心的部分，印度洋暖流顺恒河流域由南向北推进，在高耸入云的喜马拉雅山脉形成的天然屏障受阻后，形成的地形雨、山地雨等使该地段降水特别集中，形成西藏少有的暴雨中心之一。降雨多集中在 6~10 月，降水量占 50%~90%，是地质灾害频繁发生时段。降水在空间上分布不均匀，东部较多，西北部降雨稀少。无霜期较短，降雪强度小。

4. 喀则市地震灾区受灾概况

4.1. 日喀则市灾害数据获取及基本分析

“4·25”尼泊尔 Ms8.1 级地震发生导致尼泊尔相邻的日喀则市部分地区受灾，其中距离尼泊尔较近

的定日县、定结县、吉隆县和聂拉木县受灾较严重，为日喀则重灾区。基于震后西藏自治区国土部门组织的地质灾害隐患排查统计发现震后日喀则市共计发现滑坡灾害 206 个，具体见图 1 所示。

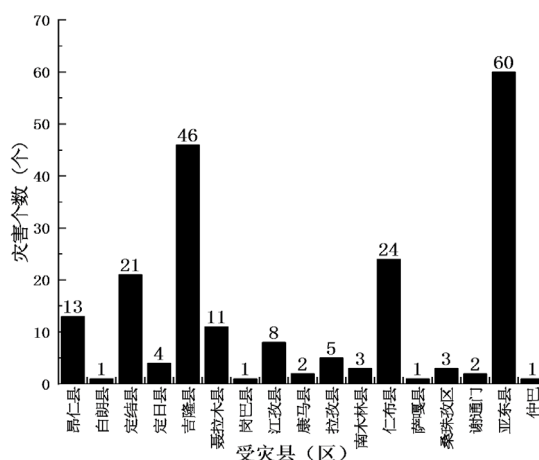


Figure 1. Statistics of landslide disasters in the counties (districts) of Kaze city

图 1. 日喀则市各县(区)滑坡灾害数量统计图

从图 1 可知，尼泊尔地震造成日喀则市全境 18 个县(区)中的 17 个县(区)发生滑坡灾害，地震诱发的滑坡灾害在这 17 个县(区)内分布极端不均匀，其中亚东县、吉隆县、仁布县和定结县数量较多，占比达到 73.3%，其他大部分县(区)滑坡灾害数量极少。

4.2. 震后日喀则市滑坡灾害造成的直接经济损失统计分析

“4·25”尼泊尔 Ms8.1 级地震诱发的滑坡灾害导致大量的公路中段、桥梁损坏、建筑物倒塌等，给日喀则市造成严重的经济损失。根据震后灾害隐患的排查汇总资料统计，地震引起的滑坡灾害共计造成日喀则市直接经济损失达到 121,258.3 万元，各县(区)直接经济损失情况统计见图 2 所示。

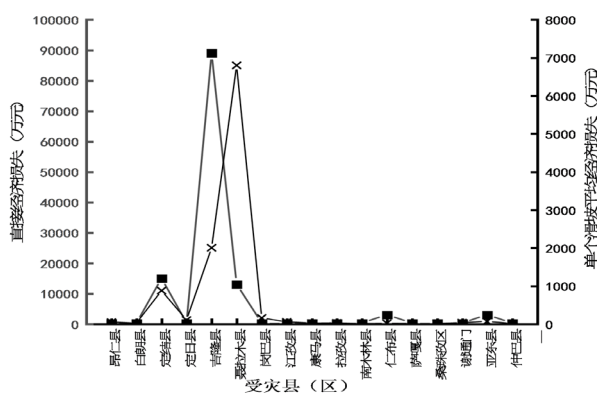


Figure 2. The direct economic loss curve caused by landslide disasters in the counties (districts)

图 2. 各县(区)滑坡灾害造成的直接经济损失曲线

由图 2 可知，震后滑坡灾害给日喀则市各县(区)造成巨大的经济损失，但是各县(区)直接经济损失差异较大，其中吉隆县的经济损失最大，占比达到 72.93%，其次为定结县，其他县(区)直接经济损失较小。为分析各县(区)滑坡灾害的影响程度，分别计算各县(区)单个滑坡灾害造成的平均直接经济损失，从图 2 可知，聂拉木县的单个滑坡灾害的直接经济损失最大，说明聂拉木县内的滑坡灾害影响程度较严重。主要原因是

由于聂拉木县的樟木镇有日喀则市的唯一对外通商口岸，人口及建筑较密集，各种大型基础设施较完备，在此次地震中樟木镇受灾较严重，导致财产损失较大。在震后重建和震后原有建筑物加固及灾害治理与监测方面，重点关注樟木镇镇的受灾情况。

5. 日喀则市震后滑坡空间分布与影响因子的变维分形研究

基于研究区的 DEM 图与滑坡灾害隐患的排查数据，基于分形原理，采用分段变维计算方法，基于累计变换和次数和分维值两个分形学指标，对日喀则市震后滑坡灾害的坡度、坡向、高程和距离河流的距离等与滑坡灾害隐患点的空间分布规律进行定量分析。

5.1. 日喀则市滑坡灾害空间分布与坡度的变维分形关系

日喀则市地形起伏较大，坡度因子对于震后滑坡灾害的空间分布具有重要的影响，为了弄清震后滑坡在不同坡度上的分布规律，将日喀则市坡度划分成 6 组，每组包含下限值，分别划分成 0°~15°、15°~30°、30°~45°、45°~60°、60°~75°和 75°~90°。震后滑坡在不同坡度上的空间分布如图 3 所示，不同坡度上的滑坡灾害数量分布统计见表 1 所示。

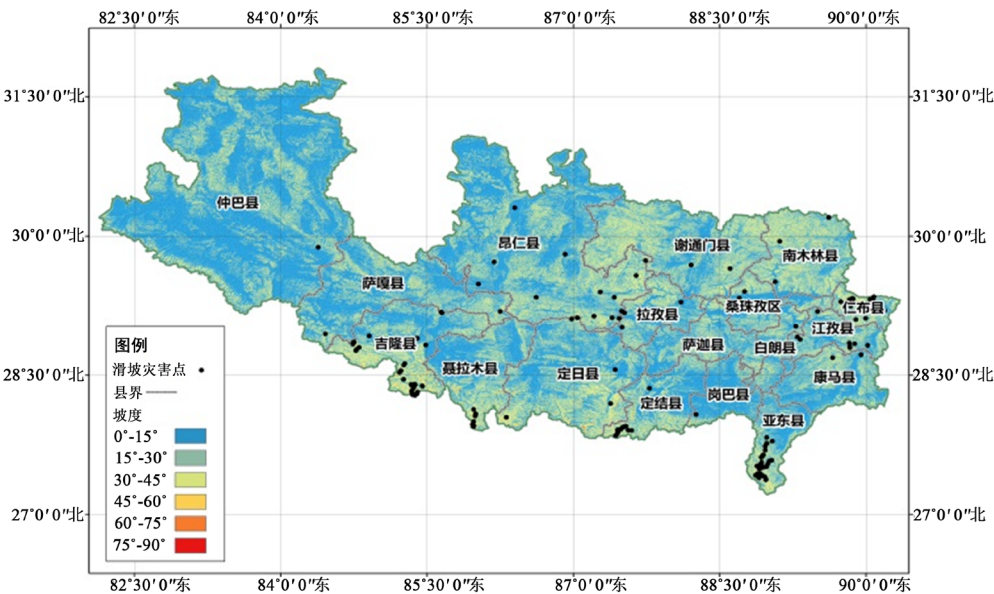


Figure 3. Spatial distribution of landslide hazards on different gradients
图 3. 滑坡灾害在不同坡度上的空间分布图

Table 1. Statistical table of gradients distribution of landslide disaster points in Shigaze city after the earthquake
表 1. 震后日喀则市滑坡灾害点坡度分布统计表

系列号	坡度/(°)	分区面积/(km ²)	面积百分比/(%)	灾害数/(个)	所占百分比/(%)	密度/([*] 10 ⁻⁶ 个/km ²)
1	0~15	92,530.8	51.38	67	32.5	724.08
2	15~30	62,924.0	34.94	88	42.7	1398.5
3	30~45	22,174.9	12.31	40	19.4	8.8
4	45~60	2298.9	1.28	9	4.4	1.9.0
5	60~75	165.8	0.09	2	0.97	58.6
6	75~90	12.95	0.01	0	0.0	0

从图3和表1可知,震后日喀则市境内滑坡灾害分布在不同坡度上。将坡度分成不同的组,利用GIS软件提取相关数据,得到不同坡度组上的滑坡灾害数量及其对应的区域面积,计算得到不同坡度上的滑坡灾害密度。由于75°~90°坡度范围没有滑坡灾害发生,故不分析该坡度。由表1可知滑坡灾害密度在15°~30°范围内密度最大,其次是0°~15°,其他坡度上的滑坡灾害密度极低。基于分形原理,以不同坡度上分布的滑坡数量 $N(r)$ 及该坡度对应的序列号 r 为双对数坐标分别得到如图4所示,为了计算其变维分形维数,利用变维分形方法对其进行一阶累计和分维变换后呈现较好的线性关系。为分析坡度影响因子的敏感性,利用公式(3)计算得到敏感性系数 S_{ci} 值如图5所示。

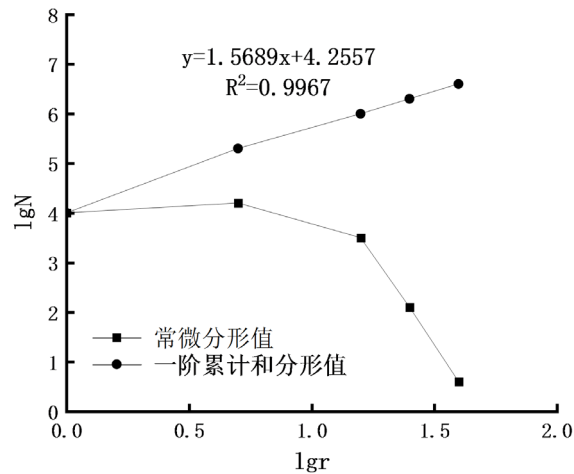


Figure 4. Segmental variable dimension sequence diagram of landslide distribution with different gradients
图4. 滑坡分布不同坡度的分段变维序列图

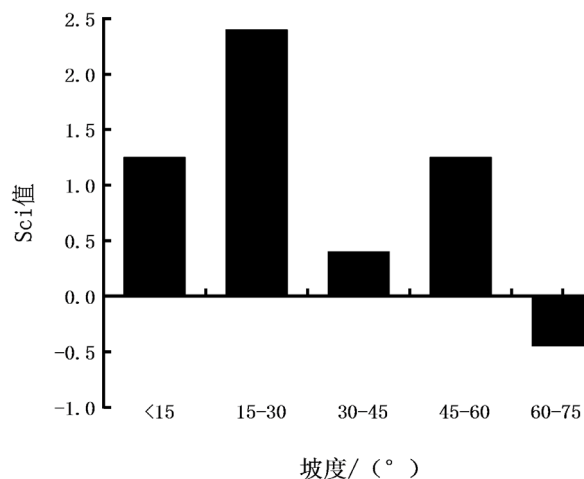


Figure 5. Histogram of landslide sensitivity coefficient on different gradients
图5. 不同坡度上滑坡敏感性系数直方图

由图4可知,分形维数值本是变化值,对其进行变维分形处理,得到一阶累计和分形值,对其拟合发现其近似直线值,说明滑坡的坡度与其在该坡度上分布的滑坡数量呈一阶累计和变维分形关系,其分维值 $D = 1.5689$, $R^2 = 0.9967$ 。图5给出不同坡度对滑坡灾害的敏感性系数,由图5可知,滑坡灾害在15°~30°坡度上敏感性系数值最大,说明滑坡灾害在该坡度上最易发生滑坡,而<15°和45°~60°坡度上居其次,在60°~75°上敏感性系数为负数,说明滑坡灾害不易发生。

5.2. 日喀则市滑坡灾害空间分布与坡向的变维分形关系

坡体的坡向是影响滑坡灾害发生的一个重要因素，他可能引起局部小气候参数的变化，如降雨强度、土壤湿度计风化程度等，而这些可能引起斜坡的堆积体物理力学性质。为分析震后滑坡在不同坡向上的分布规律及敏感性，将日喀则市坡向划分成 9 组，其中坡向为平面组无滑坡灾害，故不需要分析。剩余 8 组坡向分别为北坡(N)、东北坡(NE)、东坡(E)、东南坡(SE)、南坡(S)、西南坡(SW)、西坡(W)、西北坡(NW)。日喀则市震后滑坡灾害在不同坡向上的空间分布见图 6 所示，利用 GIS 软件统计不同坡向上滑坡灾害的数量及其对应的面积，得到统计结果如表 2 所示。

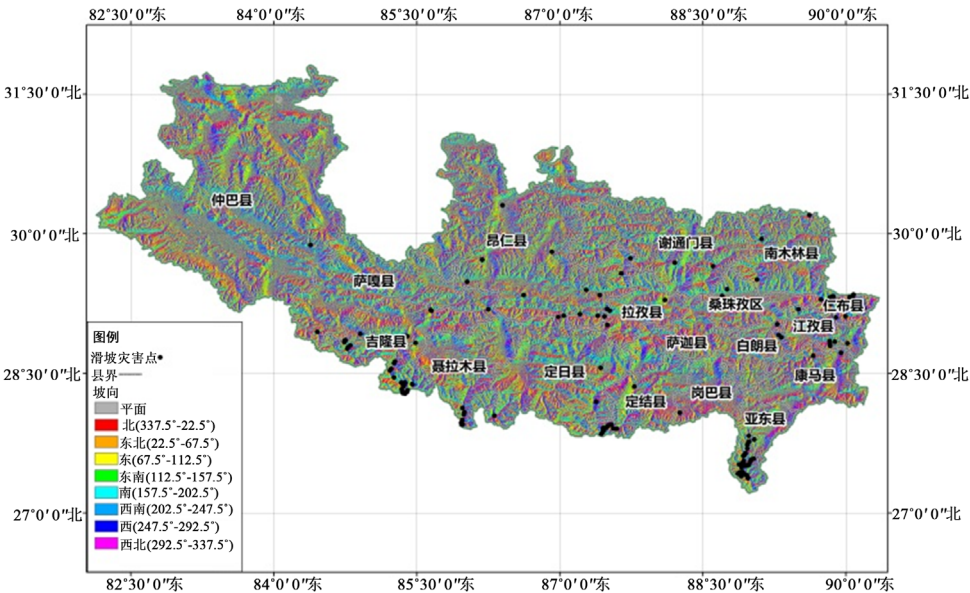


Figure 6. Spatial distribution map of landslide disasters on different slope directions
图 6. 滑坡灾害在不同坡向上的空间分布图

Table 2. Statistical table of slope direction distribution of landslide disasters in Shigaze city after the earthquake
表 2. 震后日喀则市滑坡灾害点坡向分布统计表

系列号	坡向/(°)	分区面积/(km ²)	面积百分比/(%)	灾害数/(个)	所占百分比/(%)	密度/([*] 10 ⁻³ 个/km ²)
1	N	22,681.70	12.59	13	6.31	0.57
2	NE	24,565.30	13.64	24	11.7	0.977
3	E	22,358.10	12.41	30	14.6	1.34
4	SE	21,574.90	11.98	37	18.0	1.72
5	S	20,700.50	11.49	34	16.5	1.64
6	SW	23,278.20	12.92	13	6.3	0.558
7	W	22,222.80	12.34	30	14.5	1.35
8	NW	22,456.90	12.47	25	12.1	1.11

从图 6 和表 2 可知，震后滑坡灾害分布在不同坡向上。将日喀则市划分成不同的坡向组，利用 GIS 软件提取数据，分别得到不同坡向组上的滑坡灾害数量及其对应的区域面积。由表 2 可知滑坡灾害在各坡向上都有分布，其中在东南方向上数量最多，其次是南坡向上，而在北坡和西南坡滑坡数量最少。而

单位面积上的滑坡灾害数量则是东南坡和南坡上最大，北坡和西南坡上最小。基于分形原理，将不同坡向上的滑坡数 $N(r)$ 及该坡向对应的序列号 r 绘制双对数坐标得到如图 4 所示，利用变维分形方法对其进行一阶累计和分维变换后呈现较好的线性关系。为分析坡向因子的敏感性系数，利用公式(3)计算得到敏感性系数 S_{ci} 值如图 7 所示。

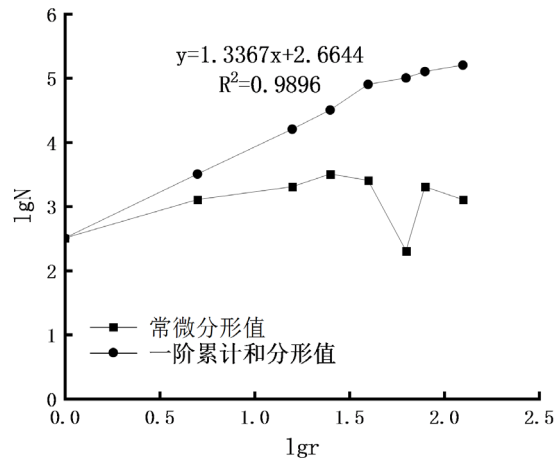


Figure 7. Segmented variable dimension sequence diagram of landslide distribution with different slope directions
图 7. 滑坡分布不同坡向的分段变维序列图

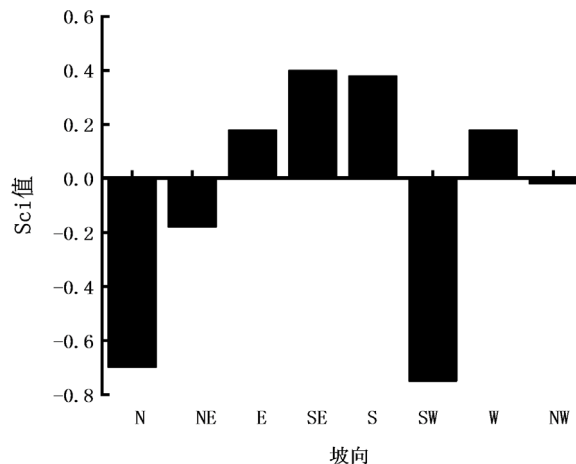


Figure 8. Histogram of landslide sensitivity coefficient on different slope directions
图 8. 不同坡向上滑坡敏感性系数直方图

由图 7 可知，常维分形值在不断变化，为使其呈现线性变化，对其进行变维分形处理，得到一阶累计和分形值，拟合后呈现近似直线，说明滑坡的坡向与其在该坡向上分布的滑坡灾害数量呈一阶累计和变维分形关系，对应的分维值 $D = 1.3367$ ， $R^2 = 0.9896$ 。图 8 给出不同坡向对滑坡灾害的敏感性系数，由图 8 可知，滑坡灾害在东南坡和南坡方向上敏感性系数值较大，说明在该坡向上易发生滑坡灾害，而在北坡、西南坡、东北坡和西北坡上敏感性系数值为负数，说明不利于滑坡灾害的发生，且在北坡和西南坡上负值较大，说明滑坡灾害较难发生在该坡向上。敏感性系数分析结果与各坡向上的滑坡灾害密度相一致。

5.3. 日喀则市滑坡灾害空间分布与高程的变维分形关系

众多研究表明，高程是影响滑坡灾害发生的重要因素。主要原因是高程影响汇水面积，另外不同高

程上的植被类型和覆盖率差异较大,使得滑坡灾害的高程上分布差异较大。为研究日喀则市震后不同高程上的滑坡灾害数量分布差异,将境内高程划分成7组,分别是<1000 m、1000~2000 m、2000~3000 m、3000~4000 m、4000~5000 m、5000~6000 m、>6000 m,其中每组包含下限值,不包含上限值。日喀则市震后滑坡灾害在不同高程上的空间分布见图9所示,利用GIS软件统计不同坡向上滑坡灾害的数量及其对应的面积,得到统计结果如表3所示。

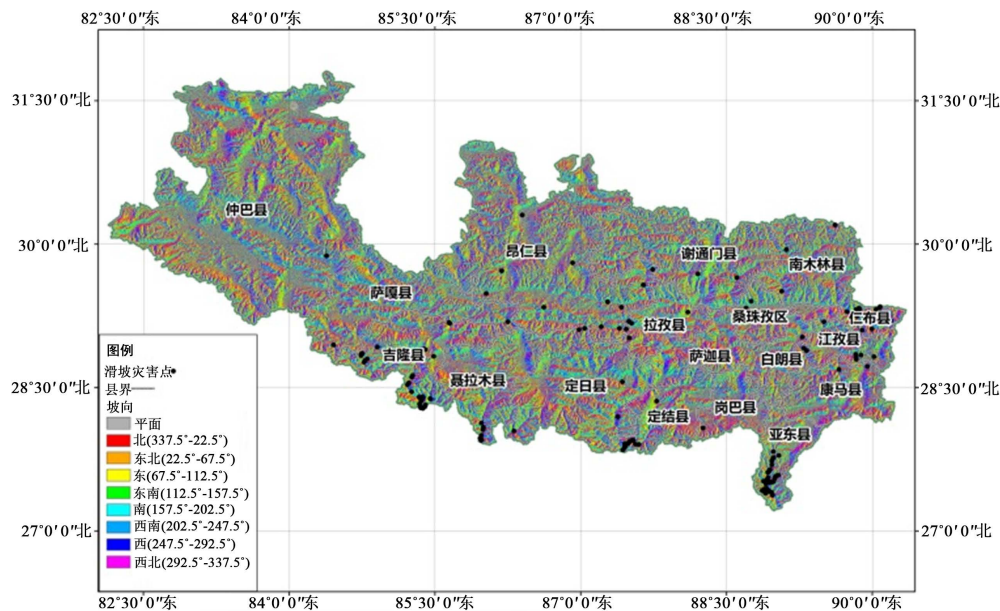


Figure 9. Spatial distribution map of landslide disasters on different elevations
图9. 滑坡灾害在不同高程上的空间分布图

Table 3. Statistical table of elevations distribution of landslide disasters in Shigaze city after the earthquake
表3. 震后日喀则市滑坡灾害点高程分布统计表

系列号	高度/(m)	分区面积/(km ²)	面积百分比/(%)	灾害数/(个)	所占百分比(%)	密度/($\times 10^{-3}$ 个/km ²)
1	<1000	0.43	0.00	1	0.49	2344.12
2	1000~2000	8.11	0.00	4	1.94	493.17
3	2000~3000	244.44	0.14	28	13.59	114.55
4	3000~4000	4489.89	2.49	87	42.23	19.38
5	4000~5000	89,159.90	49.50	77	37.38	0.86
6	5000~6000	84,088.20	46.69	8	3.88	0.10
7	>6000	2116.32	1.17	1	0.48	0.47

从图9和表3可知,震后滑坡灾害在不同高程上分布差异较大。根据统计表3可知滑坡灾害在各坡向上都有分布,其中在高程3000~5000 m范围内滑坡数量分布最多,占总量的79.6%。而滑坡灾害密度则与滑坡数量显示出不一样的规律,高程越低,其滑坡灾害密度越大,并且灾害密度差异较大。利用变维分形理论,将不同高程上的滑坡数 $N(r)$ 及该高程对应的序列号 r 绘制双对数坐标得到如图10所示,为分析高程因子对滑坡灾害的敏感性系数,利用公式(3)计算得到敏感性系数 S_{ci} 值如图11所示。

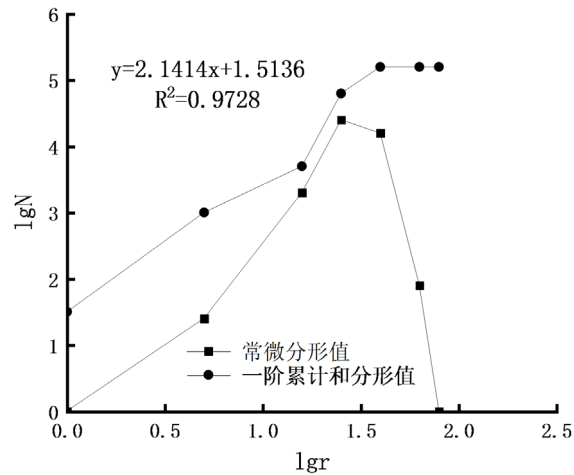


Figure 10. Segmented variable dimension sequence diagram of landslide distribution with different elevations
图 10. 滑坡分布不同高程的分段变维序列图

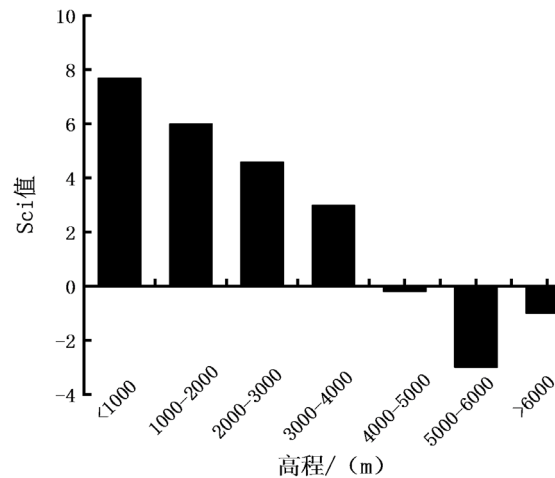


Figure 11. Histogram of landslide sensitivity coefficient on different elevations
图 11. 不同高程上滑坡敏感性系数直方图

由图 10 可知, 常维分形值在不断变化, 为使其呈现线性变化, 对其进行二阶变维分形处理, 得到二阶累计和分形值, 拟合后呈现近似直线, 说明滑坡的坡向与其在该坡向上分布的滑坡灾害数量呈二阶累计和变维分形关系, 对应的分维值 $D = 2.1414$, $R^2 = 0.9728$ 。图 11 给出不同高程对滑坡灾害的敏感性系数, 由图 11 可知, 不同高程对滑坡灾害的敏感性各异, 其中, 高程越低, 滑坡在该高程上敏感性系数值越大, 说明滑坡灾害在该高程上越敏感。

6. 结论

利用变维分形理论, 分析西藏自治区国土部门组织的灾害排查汇总表数据, 研究发现尼泊尔地震触发日喀则市滑坡灾害呈现如下特点:

1) “4·25” 尼泊尔地震给日喀则市各县市造成严重灾害, 但分布极不均匀, 其中亚东县、吉隆县、仁布县和定结县数量较多, 占比达到 73.3%, 其他大部分县(区)滑坡灾害数量极少。震后滑坡灾害造成经济损失差异较大, 其中吉隆县的经济损失最大, 占比达到 72.93%, 聂拉木县的单个滑坡灾害的直接经济损失最大, 在震后重建和震后原有建筑物加固及灾害治理与监测方面, 重点关注樟木镇的受灾情况。

2) 滑坡灾害密度在 $15^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 范围内密度最大, 其次是 $0^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 。滑坡的坡度与其在该坡度上分布的滑坡数量呈一阶累计和变维分形关系, 其分维值 $D = 1.5689$, $R^2 = 0.9967$ 。研究发现滑坡灾害在 $15^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 坡度上敏感性系数值最大, 而 $<15^{\circ}$ 和 $45^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 坡度上居其次, 在 $60^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 上敏感性系数为负数, 说明滑坡灾害不易发生。

3) 滑坡在各坡向上分布明显不同, 其中在东南方向上数量最多, 其次是南坡向上, 而在北坡和西南坡滑坡数量最少。滑坡的坡向与其在该坡向上分布的滑坡灾害数量呈一阶累计和变维分形关系, 对应的分维值 $D = 1.3367$, $R^2 = 0.9896$ 。滑坡灾害在东南坡和南坡方向上敏感性系数值较大, 说明在该坡向上易发生滑坡灾害, 而在北坡、西南坡、东北坡和西北坡上敏感性系数值为负数, 说明不利于滑坡灾害的发生, 敏感性系数分析结果与各坡向上的滑坡灾害密度相一致。

4) 震后滑坡灾害在不同高程上分布差异较大, 其中在高程 3000~5000 m 范围内滑坡数量分布最多, 占总量的 79.6%。而滑坡灾害密度则与滑坡数量显示出不一样的规律, 高程越低, 其滑坡灾害密度越大, 并且灾害密度差异较大。滑坡的坡向与其在该坡向上分布的滑坡灾害数量呈二阶累计和变维分形关系, 对应的分维值 $D = 2.1414$, $R^2 = 0.9728$ 。不同高程对滑坡灾害的敏感性各异, 其中, 高程越低, 滑坡在该高程上敏感性系数值越大, 说明滑坡灾害在该高程上越敏感。

参考文献

- [1] 张贝, 程惠红, 石耀霖. 2015 年 4 月 25 日尼泊尔 Ms8.1 大地震的同震效应[J]. 地球物理学报, 2015, 58(5): 1794-1803.
- [2] 胡桂胜, 陈宁生, 苏鹏程, 等. 西藏聂拉木县“4·25”尼泊尔地震次生山地灾害与防灾减灾对策[J]. 自然灾害学报, 2016, 25(4): 70-76.
- [3] 付广裕, 高尚华, 张国庆, 等. 2015 年尼泊尔 Ms8.1 地震的地壳重力均衡背景与地表形变响应特征[J]. 地球物理学报, 2015, 58(6): 1900-1908.
- [4] 黄森旺, 孔纪名, 崔云, 等. “4·25”尼泊尔 Ms8.1 地震西藏重灾区次生地质灾害空间分布规律与危险性分区[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(1): 80-88.
- [5] 彭瑛, 刘文婷, 张志, 等. 基于遥感调查的汶川地震极重灾区次生地质灾害分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(1): 107.
- [6] 张立海, 张业成, 刘向东. 中国地震次生地质灾害分布及地市级危险性区划研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(3): 365-369.
- [7] 韩培锋, 田述军, 樊晓一, 等. 芦山地震触发次生灾害特点统计分析及预测[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(1): 120-126.
- [8] 谢和平, 邓建辉, 李碧雄. 四川芦山地震灾害调查与灾后重建的相关问题分析[J]. 地球科学与环境学报, 2013, 35(2): 1-7.
- [9] 王运生, 全清, 罗永红, 等. 四川芦山 Ms7.0 级地震的地质环境影响分析[J]. 地球科学与环境学报, 2013, 35(2): 92-98.
- [10] 谢嘉琼, 易顺民. 滑坡活动空间分布的多重分形特征及其预测意义[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2000, 32(6): 4-6.
- [11] 邱海军, 曹明明, 刘闻, 等. 区域滑坡空间分布的变维分形特征研究[J]. 现代地质, 2014, 28(2): 443-448.
- [12] 王森, 许强, 罗博宇, 等. 基于分形理论的南江县滑坡敏感性分析与易发性评价[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(3): 119-126.
- [13] 滕宏泉, 谢婉丽, 盖海龙, 等. 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, 2016, 27(1): 44-50.
- [14] 姜恩三, 任光明, 王文坡, 等. 基于关联维数的地质灾害空间分布特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(1): 113-118.
- [15] 张彦, 林德宏. 系统自组织概论[M]. 南京: 南京大学出版社, 1990: 76-87.