

文章编号: 1008-2786-(2020)5-699-11

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000547

# 尼泊尔地震重灾区同震滑坡的分形特征及其原因分析

蒋 宁<sup>1,2,3</sup>, 苏凤环<sup>1,2\*</sup>, 徐京华<sup>4</sup>, 葛永刚<sup>1,2</sup>, 刘 智<sup>5</sup>

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041;  
3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 西南交通大学 地球科学与环境工程学院, 成都 611756; 5. 四川省地质调查院, 成都 610081)

**摘 要:** 受“4·25”尼泊尔  $M_s 8.1$  级地震影响, 中尼边境山区发生了大量滑坡灾害, 严重威胁人民生命安全及边疆经济建设。本文利用多时相遥感影像对震区滑坡进行了解译, 引入关联维数探究了同震滑坡的空间分形特征, 并结合二元 Logistic 模型和区域背景因素分析其形成原因。结果表明: (1) 本次地震诱发的 1431 处滑坡大多为新生滑坡体, 以浅层中小型为主, 在高地震烈度区和公路两侧较为发育。受低角度逆冲断层影响, 滑坡全部位于上盘, 沿地震烈度圈长轴方向呈面状分布。(2) 不同地震烈度区内的滑坡具有不同的分形特征, 滑坡关联维数随着地震烈度等级的增大而增加, 滑坡在空间上由聚集分布逐渐转变为均匀分布。(3) 不同地震烈度区内的因子权重大小不同, 其中距断层带距离因子对滑坡的影响最小, 用该因子描述低角度逆冲断层地震同震滑坡存在一定的局限性, 而坡度是对滑坡影响最大的因子。(4) 在 IX 度地震烈度区内, 各因素对滑坡的作用程度差异较小, 滑坡的发生受到多因素共同控制, 因此滑坡呈现相对均匀的分布特征; 反之, 在 VI 度地震烈度区内, 滑坡的发生主要受到单一因素控制, 所以呈现相对聚集的分布特征。本研究可为探讨同震滑坡的空间分布规律、同震滑坡的分形特征以及震后灾害管理等提供资料参考。

**关键词:** 尼泊尔地震; 同震滑坡; 分形特征; 关联维数; Logistic 模型

**中图分类号:** P694

**文献标志码:** A

2015 年 4 月 25 日 14 时 11 分, 尼泊尔境内博克拉市 (Gorkha) 发生  $M_s 8.1$  级地震, 震中 ( $28.20^\circ\text{N}$ ,  $84.70^\circ\text{E}$ ) 距我国边境仅 40 km 余, 随后该区域又发生  $M_s 7.0$  级以上强烈余震 3 次。地震会破坏山体稳定性, 从而诱发大量崩塌、滑坡等次生灾害, 使震后损失加剧, 如中尼两国交通要道 G318 聂拉木—友谊桥段 43.6 km、吉隆公路吉隆县—热索桥段 89.7 km 均受震后滑坡影响损毁严重, 国家重点开放门户

樟木口岸、吉隆口岸和日屋口岸也受到不同程度破坏<sup>[1]</sup>。因此, 对于尼泊尔重灾区震后重建和重大工程而言, 开展震后滑坡调查和空间分布特征研究具有重要意义。

近年来, 分形理论在地震和地貌领域发展迅速, 多用于解决震中或特定地貌对象的时空分布问题, 为认识地球中复杂对象的空间分布特征提供了一种科学方法<sup>[2-3]</sup>。由于山地灾害历史数据

**收稿日期** (Received date): 2018-10-24; **改回日期** (Accepted date): 2020-08-21

**基金项目** (Foundation item): 第二次青藏高原综合科学考察研究资助项目 (2019QZKK0902); 自然资源部中国地质调查局地质调查项目 (DD20190545); 四川省科技计划项目 (2019YFH0038)。[The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (STEP) (2019QZKK0902); Geological Survey Project of China Geological Survey, Ministry of Natural Resources (DD20190545); Sichuan Foundation of Excellent Scientists (2019YFH0038)]

**作者简介** (Biography): 蒋宁 (1993-), 男, 河南开封人, 博士研究生, 主要研究方向: 遥感技术与地理信息系统。[JIANG Ning (1993-), male, born in Kaifeng, Henan province, Ph. D. candidate, research on remote sensing technology and geographic information system] E-mail: jiangning@imde.ac.cn

**\* 通讯作者** (Corresponding author): 苏凤环 (1977-), 女, 山东阳谷人, 博士, 副研究员, 主要研究方向: 灾害遥感与山地灾害风险评估。[SU Fenghuan (1977-), female, born in Yanggu, Shandong province, Ph. D., associate professor, specialized in mountain hazards remote sensing and risk assessment] E-mail: fhsu@imde.ac.cn

往往不如地震数据记录完整,使得分形理论在山地灾害中的应用受到限制,研究大多处于尝试探讨阶段。二十世纪九十年代,部分国外学者先引入了分形理论来探究滑坡的空间分布问题<sup>[4-5]</sup>,初步揭示了区域滑坡的分形结构,将滑坡空间分布特征定量化。现如今,部分学者借助更加先进的观测手段,利用更加丰富的灾害数据,进行了更深入的研究,研究发现:山坡土体粒度分维可以表征泥石流的粘稀性概率<sup>[6]</sup>;多重分形指数可以表征滑坡的不确定性和随机性<sup>[7]</sup>;黄土滑坡的规模不同,分形结构也不同<sup>[8]</sup>。而同震滑坡作为一种典型事件,还没有相关的研究,同震滑坡的分形特征如何,还需进一步讨论。

滑坡是一种受多因素共同控制的复杂系统,不同因素作用方式的差异性和分布的不规则性,造成了滑坡空间分布的异质性,如何利用环境背景因素揭示滑坡的空间分布特征成为区域滑坡研究中的关键问题<sup>[9]</sup>。目前,针对滑坡与环境背景因素关系的研究大多采用地理信息统计<sup>[10]</sup>、GIS<sup>[11]</sup>和 RS<sup>[12]</sup>等方法,通过统计滑坡在每个影响因素中的分布情况来分析两者间的关系。这种单因素统计法<sup>[13-16]</sup>默认各因素之间是相互独立的,忽略了各影响因素间的交互作用。综合所有相关因素建立一个因变量(滑坡发生与否)与自变量(控制滑坡发育的各种相关因素)间的函数关系,则能更加科学地反映环境背景因素与滑坡间的关系,从而能更加科学地分析滑坡具有某种空间分布特征的原因。

本文基于多时相遥感影像,对“4·25”尼泊尔地震重灾区的同震滑坡进行了遥感解译,采用关联维数分析了同震滑坡的分形特征,并结合区域环境背景因素和二元 Logistic 回归模型,探究其分形特征的原因。成果可为区内中尼公路等重大线性工程防护预警、灾害管理及区域风险评估提供指导帮助。

## 1 研究区概况

根据尼泊尔内政部公布的地震伤亡损失情况,圈定受灾最为严重的中尼边境东部山区作为本次研究区。该区域于喜马拉雅山脉中段,地形起伏明显,高差巨大,最高和最低点海拔分别为 8848 m 和 94 m,平原和丘陵区仅占总面积的 9.3%,以高喜马

拉雅和低喜马拉雅构造单元为主,整体地形北高南低。降水方面,受西藏高原地形影响,印度季风湿润气候向北受阻,造成尼泊尔境内降水量大且分布不均的特点。根据中国国家气象局尼泊尔地区降雨资料显示,区域 80% 的降雨集中在尼泊尔雨季(6 月—9 月),在空间分布上,北部中国境内的降雨量明显低于南部尼泊尔地区,其中加德满都附近的奥卡东加站降雨最为充沛,年均降雨达 1400 mm。首都加德满都年均气温为 25 ℃,年均降雨量和雨季月均降水量分别为 1100 mm 和 330 mm。在亚欧板块和印度板块的冲击作用下区域地质结构复杂、断裂褶皱发育、地震频发,根据中国地震台网(www.ceic.ac.cn)发布的信息,在“4·25”尼泊尔地震发生后的 3 年时间里,该区域又发生地震 64 次,其中 5 级以上地震 7 次(图 1)。

区域内地层从元古界震旦纪至第四纪全新世均有出露,其中第四纪主要分布在以灰黄色泥质、砂质砾石为主的北部特提斯喜马拉雅单元和以灰色土块碎石为主的南部恒河平原,中部高喜马拉雅属于一个巨大推覆体,主要由中、高级变质岩和浅色花岗岩组成。研究区内出露出的活动断层由南至北依次为主前缘逆冲断层(MFT, Main Frontal Thrust)、主边界逆冲断层(MBT, Main Boundary Thrust)和主中央逆冲断层(MCT, Main Central Thrust),三者在地壳深部汇集于一个深部逆冲断层破裂面,最北部为藏南拆离断层(STD, Southern Tibetan Detachment)(图 2)。根据震后公布的震源机制信息表明,本次地震为低角度逆冲断层型强震,发震构造为喜马拉雅逆冲系统的底板断层——主喜马拉雅逆冲断层(MHT, Main Himalayan Thrust)<sup>[18]</sup>。

## 2 数据源与研究方法

### 2.1 数据收集与遥感解译

用于滑坡解译的遥感影像为震前 2014 年 12 月和震后 2015 年 5 月的 GF-1 WFV 数据(空间分辨率 16 m, 4 波段),选择震后 1 个月内的遥感影像可以减少尼泊尔雨季对解译结果的影响。由于部分区域受云层遮挡,同时收集了 GoogleEarth 中的多期高分辨率影像数据和 2015 年 12 月的 GF-1 数据进行补充,遥感影像范围如图 3f 所示。还包括研究区 1:5 万 DEM、1:100 万地质图、尼泊

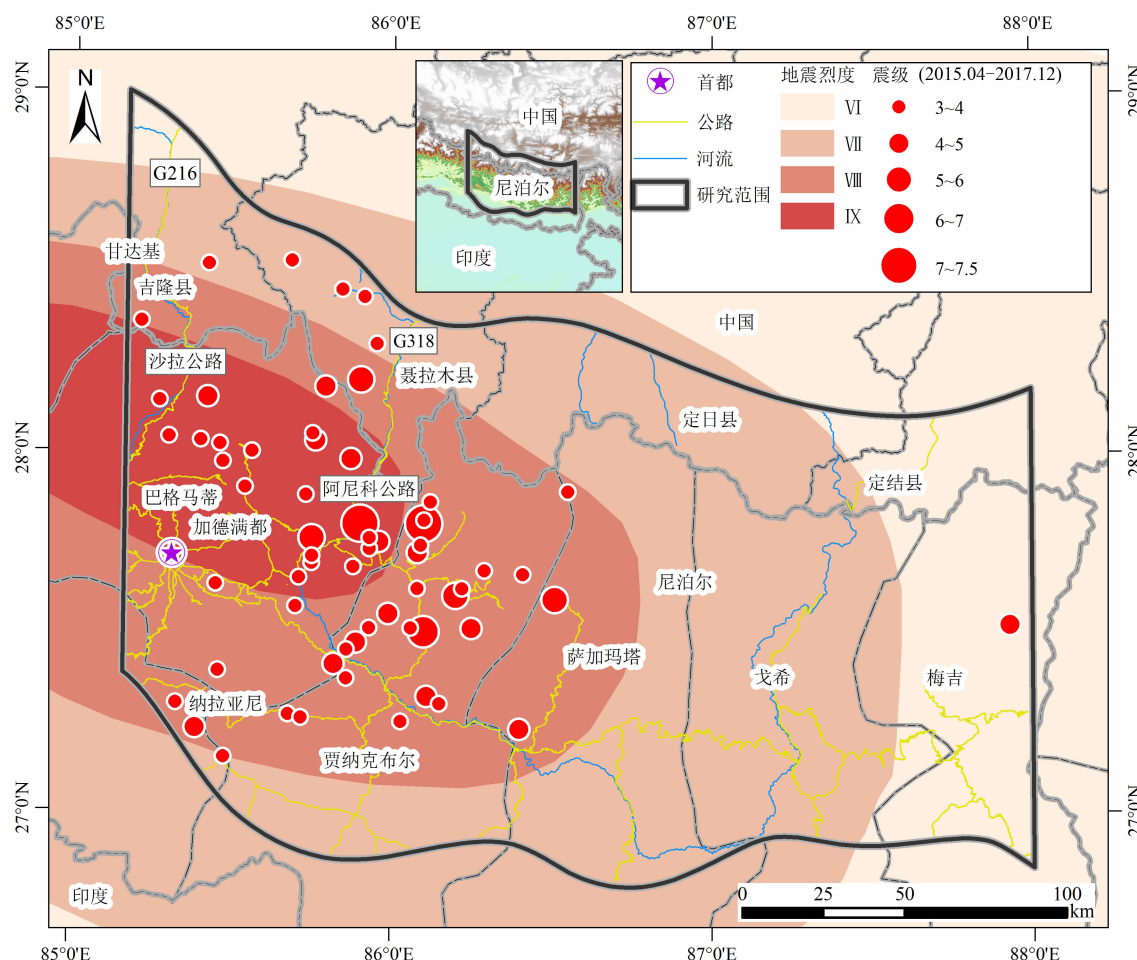


图1 研究区位置及尼泊尔地震烈度图

Fig. 1 Location of the study area and seismic intensity map of the Nepal  $M_s$  8.1 earthquake

尔地震烈度图和区域雨季(6月—9月)年均降雨量等其他资料。

本文所指的“滑坡”为广义上的滑坡,是震后各种斜坡物质在失稳状态下进行的滑动、崩落、扩散或流动等运动过程,本文的解译对象包含震后引起的崩塌、滑坡和碎屑流等多种灾害类型。解译前,需要先对遥感影像进行裁剪、大气校正、几何精校正、色彩增强等处理来提高解译精度,然后比对震前震后影像,从颜色纹理和形态特征上能较为容易地进行滑坡判识<sup>[17]</sup>。

## 2.2 核密度估计

核密度估计(Kernel Density Estimation, KDE)<sup>[19]</sup>,用于分析要素在其周围邻域中的密度。在计算时,靠近搜索中心的要素会被赋予更大权重,反之则权重较小。通过对滑坡核密度计算结果的展示,可以直观地了解滑坡的空间分布特征。计算公式如下:

$$f(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n k\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \quad (1)$$

式中, $n$ 为样本容量(个); $h$ 为带宽(km); $k$ 为核函数; $x - x_i$ 为估计要素与样本要素之间的距离(km),这里为滑坡点间的距离。

## 2.3 关联维数

关联维数是分形理论中的重要算法之一,是一种基于实验数据提取分维的方法。关联维数不同于空间分布密度等概念,可以表示个体空间分布的均匀或离散程度,能揭示区域滑坡关联程度随距离尺度的变化规律,反映个体的空间关联程度。首先建立区域滑坡点数量与空间距离尺度间的关联函数:

$$C(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j}^N H(r - d_{ij}) = \frac{1}{N^2} N(r) \quad (2)$$

式中, $C(r)$ 为关联函数; $d_{ij}$ 为灾害点 $i$ 与 $j$ 之间的欧氏距离(km); $N(r)$ 为距离标度 $r$ 下滑坡点个数

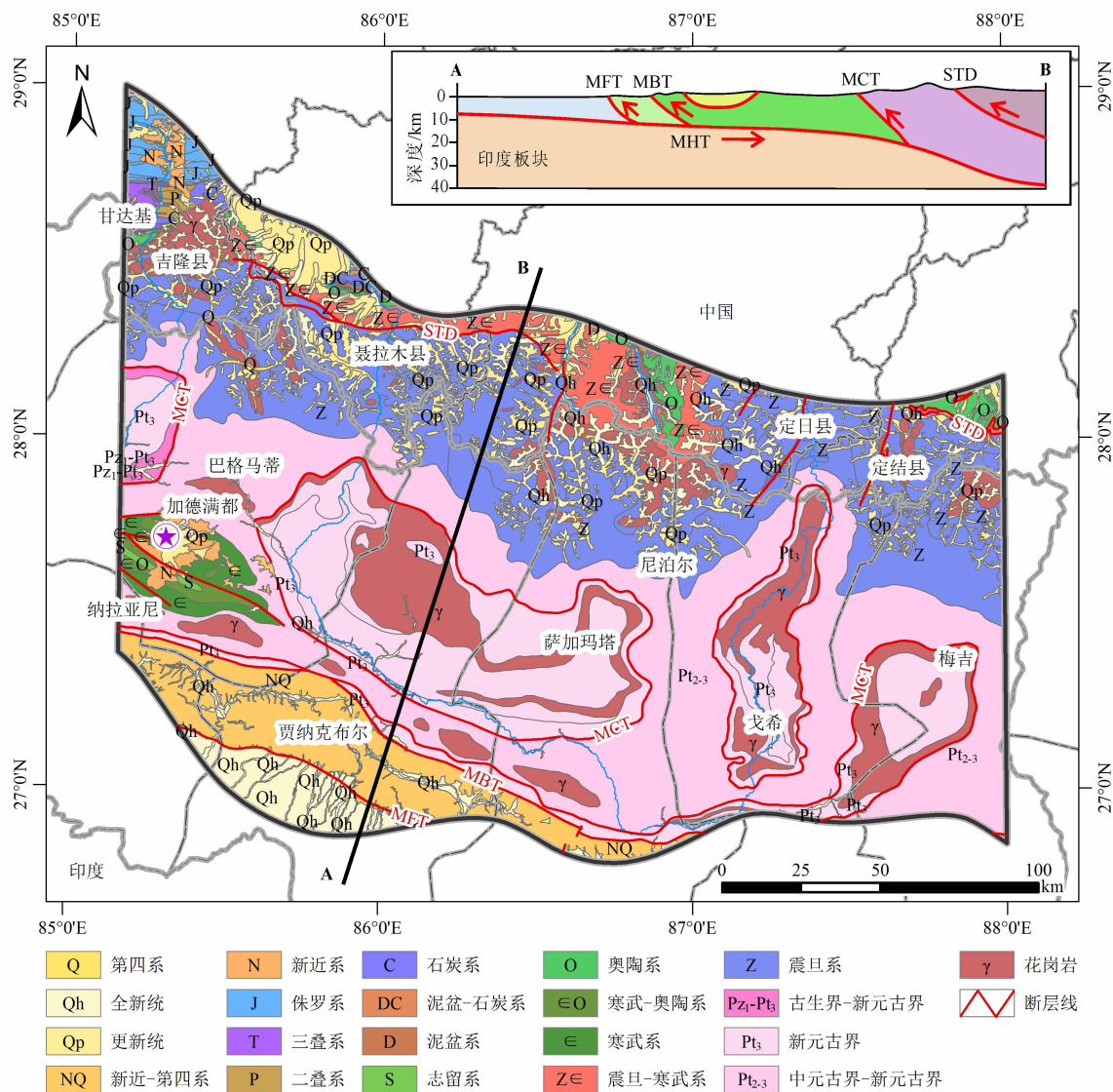


图2 研究区地质图

Fig. 2 Geological map of the study area

(个); $N$ 为研究区域所研究特定滑坡点总数(个); $r$ 为指定距离标度(km); $H(r - d_{ij})$ 为Heaviside阶跃函数,定义为:

$$H(r - d_{ij}) = \begin{cases} 1 & (d_{ij} \leq r) \\ 0 & (d_{ij} > r) \end{cases} \quad (3)$$

如果区域滑坡点系统的空间分布结构是分形的,则应具有标度不变性,即:

$$C(r) \propto r^\alpha \quad (4)$$

式中, $\alpha = D$ ,即是空间关联维数;把区域灾害的距离标度 $r$ 和空间关联函数 $C(r)$ 用于计算空间关联维数 $D$ ,公式如下:

$$\ln C(r) = A + D \ln r \quad (5)$$

式中, $A$ 为任意实数。类比前人研究<sup>[20]</sup>,关联维数作为滑坡空间分布结构的量化指标,一般介于0~2之间。其数值越小,说明滑坡空间关联性越强,空间分布越集中;其数值越大,则说明滑坡空间关联性越弱,空间分布越均匀。

2.4 二元 Logistic 回归模型

二元 Logistic 回归模型中的因变量只有两类(1和0),分别表示滑坡发生与否,自变量为控制滑坡发生的影响因子如坡度、坡向、断层、地质条件等,二元 Logistic 回归函数表达式为:

$$p = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n + c)}} \quad (6)$$

式中, $p$ 为滑坡发生概率; $\beta$ 为 Logistic 回归计算得



到的回归系数; $c$ 为 Logistic 回归计算得到的常数项; $i$ 为影响因子数量(个)。对式(6)两边取对数后得:

$$\text{Logistic}(p) = \ln[p/(1-p)] = \beta_1 x_1 + \cdots \beta_i x_i + c \quad (7)$$

### 3 结果与分析

#### 3.1 滑坡解译结果

本文基于震前震后的遥感影像,共目视解译同震滑坡 1431 处,解译结果如图 3a 所示。以 15km 为半径建立搜索区,对滑坡的空间分布进行核密度估计(图 3g),发现尼泊尔地震同震滑坡具有以下特征:

(1)滑坡在公路两侧发育。连接中尼两国的交通要道 G216、G318、沙拉公路和阿尼科公路受滑坡影响严重,大面积损毁阻断,据统计共有 386 处滑坡分布在公路两侧的山坡上,图 3c 为樟木镇友谊桥附近震后滑坡群。

(2)研究区内有些早期滑坡在本次地震中重新启动,规模扩大(图 3d,图 3e),也有些老滑坡并未受到地震影响而发生新的运动,但本次同震滑坡绝大多数还是新生滑坡体,以浅层中小型滑坡为主。

(3)地震烈度越高的区域,滑坡数量越多。随着地震烈度等级的增强,滑坡数量急剧增加,有 2/3 的滑坡分布在 IX 度地震烈度区,尤其是在 IX 度地震烈度区内的辛杜帕尔乔克地区最为密集(图 3g)。

(4)喜马拉雅俯冲带为低角度逆冲推覆构造,震源机制显示发震断层(MHT)倾角较小,地震强影响区面积较大,后续余震也显示出面状分布特征(图 1)。所以本次同震滑坡全部位于上盘,且沿地震烈度圈长轴方向呈面状分布,推测与尼泊尔地震发震断层为低角度逆冲断层(MHT)有关。

#### 3.2 滑坡空间关联性

将研究区按照地震烈度等级划分为 IX 度、VIII 度、VII 度和 VI 度 4 个区域,分别计算每个地震烈度区内的滑坡关联维数。具体操作为先利用 ArcGIS 工具箱里的 Analysis Tools/Proximity/Point Distancer 功能,得到各滑坡点之间的欧式距离,然后以 10 km 为变换步长,分别设定 10 km、20 km、30 km、40 km ……为距离标度  $r$ ,统计每个距离阈值内滑坡点数量,得到滑坡在不同地震烈度区空间关联维数双对数,最终采用最小二乘法对无标度区间点进行直线拟合,其直线斜率就是空间关联维数  $D$ ,统计结果如图 4 所示。

结果显示,各地震烈度区的拟合直线相关系数

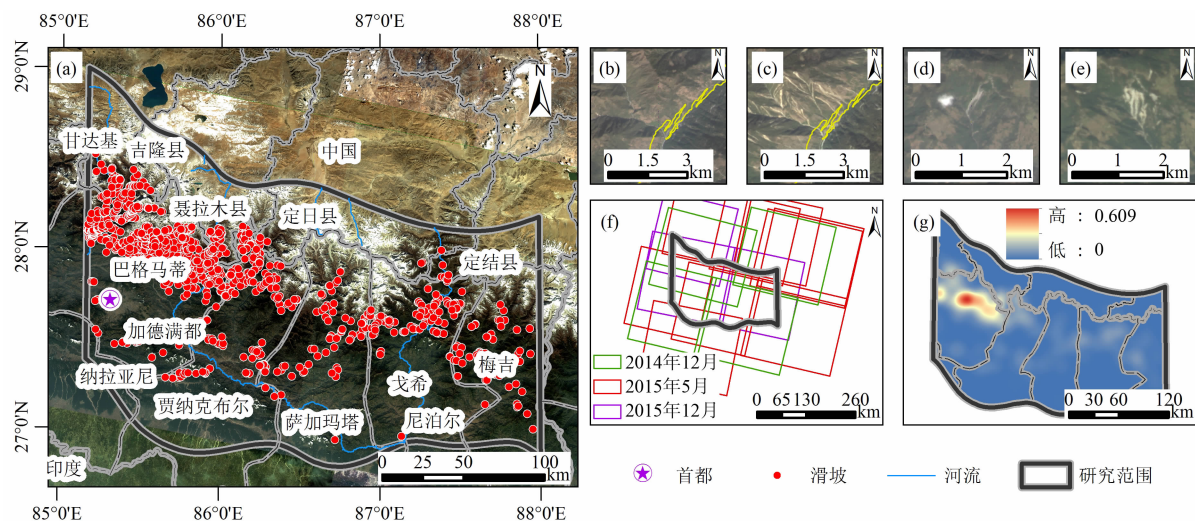


图3 尼泊尔地震同震滑坡遥感解译结果

(a) 尼泊尔地震同震滑坡分布图;(b)(c)樟木镇友谊桥附近震前影像、震后影像;  
(d)(e)早期滑坡规模扩大;(f)遥感影像覆盖图;(g)滑坡核密度

Fig. 3 Result of the co-seismic landslides by remote sensing interpretation

(a) Co-seismic landslides distribution map in the study area;(b)(c) Pre-earthquake and post-earthquake images near Friendship Bridge in Zhangmu;(d)(e) Expansion of the pre-earthquake landslide;  
(f) Remote sensing images coverage map;(g) Kernel density of the landslides

$R^2$  均较大,拟合度较好,说明尼泊尔地震同震滑坡具有一定的分形结构。本次地震同震滑坡的总关联维数相对较小为 0.736,表明就整个区域而言,尼泊尔地震同震滑坡具有空间关联度高、聚集程度大的特点,在空间上呈现出聚集的分布特征。不同地震烈度区内滑坡的关联维数不同,且随着地震烈度等级增加有一个递增的趋势,出现增维现象,说明在地震烈度越高的区域,滑坡的空间关联性越弱,在空间上由聚集分布转变为均匀分布。

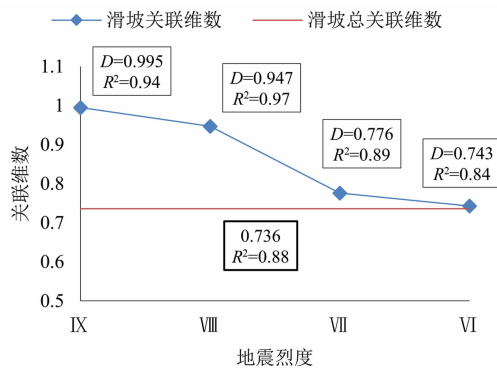


图 4 滑坡关联维数

Fig. 4 Correlation dimension of the landslides

### 3.3 滑坡灾害空间分布差异的原因

滑坡的空间分布特征是由多种环境背景因子共同决定的<sup>[21]</sup>,所以滑坡在不同地震烈度区呈现出的分布差异与区域背景因素有关。本文选择影响研究区滑坡发育的 6 个主要因素:坡度、坡向、距断层距离、年均降雨量、距道路距离和地质岩性,利用二元 Logistic 回归模型得到的标准化回归系数来分析区域滑坡分布差异的原因。

#### 3.3.1 标准化值计算

对各因子进行标准化处理可以消除量纲和数量级的影响,使其成为标准化值。本文将各分级因子中滑坡点的个数与各分级因子的面积的比值作为各分级因子的指标值。计算公式如下:

$$x_{ij} = M_{ij}/S_{ij} \quad (8)$$

式中, $x_{ij}$ 是各分级因子的指标值; $M_{ij}$ 是各分级因子中滑坡的个数; $S_{ij}$ 是各分级因子的面积; $i$ 为因子的数量; $j$ 为各因子分级的数量。然后利用归一化对 $x_{ij}$ 进行标准化处理,得到各分级因子的标准化值 $I_{ij}$ :

$$I_{ij} = x_{ij} / \sum_{j=1}^m x_{ij} \quad (9)$$

根据上式求得的各分级因子标准化值(表 1)。

#### 3.3.2 二元 Logistic 回归模型结果与分析

将标准化值赋予每个滑坡样本,利用上述方法得到各地震烈度区的 Logistic 回归方程和回归系数,各指标权重由各回归系数与回归系数总和的比得到,结果如图 5 和表 2 所示。

结果显示,不同因子在不同地震烈度区内的权重比例不同,有的因子权重随地震烈度增加呈现递增的趋势,有的呈现递减的趋势,有的变化大,有的变化小,正是这些变化使得滑坡的空间分布特征存在差异。但因子的权重顺序大多没有改变,基本是以坡度>距道路距离>年均降雨量>地质岩性>坡向>距断层距离的顺序排列。

坡度和坡向是表征山体地形特征的两个主要因子,前者是坡体重力侵蚀和滑动的主要动力来源,后者则表现为斜坡受太阳辐射的强弱,从而对水蒸发量、植被覆盖等诸多因素的影响。根据统计结果可知,在任何地震烈度区内坡度因子都占了很大的比重,在部分区域所占权重超过 0.5,说明坡度是控制尼泊尔同震滑坡发生的主要因素。随着地震烈度等级的增加,坡度所占权重有一个递减的趋势,主控因子坡度的权重有所降低。坡向所占权重整体较低,对区域内的滑坡影响程度较低,随着地震烈度等级的增加,其权重有一个缓慢增大的趋势。

受低角度断层破裂面影响,尼泊尔地震同震滑坡全部位于上盘,且在较大区域呈面状分布,这与高倾角断层地震同震滑坡滑坡受断层控制近似线状、在上下盘都有发育的特征有很大区别。权重计算结果显示,距断层距离因子的权重基本处于末位,对本次滑坡的分布影响很小,说明用距断层距离因子来描述影响面较大的低角度逆冲断层地震同震滑坡存在一定的局限性。

降雨会饱和岩体,增加容重,部分渗透水在岩土体内流动时还有可能将其中的可溶物质或小颗粒冲走,降低滑动面的抗剪强度,从而影响滑坡的发育。本文选择尼泊尔地区雨季的年均降雨量作为分析指标,以反映研究区的长期降雨情况。以往的研究中,降雨因素大多仅作为降雨型滑坡的主要考量指标,而本次结果显示,降雨因素对尼泊尔地震同震滑坡的发生有相当重要的作用,因子权重大小排在第三或第四位。

山区道路建设多伴随坡脚开挖、废渣乱弃等现

表 1 各因子分级与标准化值  
Tab. 1 Classification and normalization of the factors

影响因子	因子分级	$N_{ij}/\text{个}$	$S_{ij}/\text{km}^2$	$x_{ij}/(\text{个} \cdot (100 \text{ km}^2)^{-1})$	$I_{ij}$
坡度	$< 10^\circ$	5	6321.560	0.079	0.002
	$10^\circ \sim 20^\circ$	49	10470.958	0.468	0.012
	$20^\circ \sim 30^\circ$	186	13680.402	1.360	0.034
	$30^\circ \sim 40^\circ$	454	9681.904	4.689	0.116
	$40^\circ \sim 50^\circ$	501	3555.769	14.090	0.347
	$> 50^\circ$	236	1186.305	19.894	0.490
坡向	平面	0	28.760	0	0
	北	6	5321.574	0.113	0.005
	东北	18	5354.285	0.336	0.014
	东	120	5354.600	2.241	0.092
	东南	392	5857.982	6.692	0.274
	南	483	5990.550	8.063	0.331
	西南	298	6114.670	4.874	0.200
	西	97	5508.925	1.761	0.072
	西北	17	5365.552	0.317	0.013
距断层距离	$< 2 \text{ km}$	230	8903.399	2.583	0.175
	$2 \sim 4 \text{ km}$	190	7667.717	2.478	0.168
	$4 \sim 6 \text{ km}$	180	6560.877	2.744	0.186
	$6 \sim 8 \text{ km}$	155	5519.750	2.808	0.190
	$> 8 \text{ km}$	676	16308.144	4.145	0.281
年均降雨量	$< 500 \text{ mm}$	48	8663.690	0.554	0.038
	$500 \sim 800 \text{ mm}$	609	8856.727	6.876	0.477
	$800 \sim 1100 \text{ mm}$	483	15934.533	3.031	0.210
	$1100 \sim 1350 \text{ mm}$	268	8264.558	3.243	0.225
	$1350 \sim 1650 \text{ mm}$	23	3240.378	0.710	0.049
距道路距离	$< 1 \text{ km}$	106	3787.287	2.799	0.177
	$1 \sim 2 \text{ km}$	83	3048.037	2.723	0.172
	$2 \sim 3 \text{ km}$	99	2766.007	3.579	0.226
	$3 \sim 4 \text{ km}$	90	2546.745	3.534	0.223
	$> 4 \text{ km}$	1053	32777.617	3.213	0.203
地质岩性	侵入岩	146	5245.870	2.783	0.349
	变质岩	1237	28754.332	4.302	0.540
	碳酸盐岩	0	978.411	0	0
	碎屑岩	11	3475.586	0.317	0.040
	松散岩类	37	6505.691	0.569	0.071

表 2 因子权重与标准差  
Tab. 2 Factor weights and standard deviations

地震烈度区	坡度	坡向	距断层距离	年均降雨量	距道路距离	地质岩性	标准差
IX度地震烈度区	0.385	0.062	0.037	0.105	0.332	0.079	0.151
VIII度地震烈度区	0.531	0.062	0.045	0.153	0.155	0.054	0.185
VII度地震烈度区	0.638	0.046	0.018	0.058	0.199	0.041	0.240
VI度地震烈度区	0.705	0.007	0.066	0.033	0.093	0.096	0.266

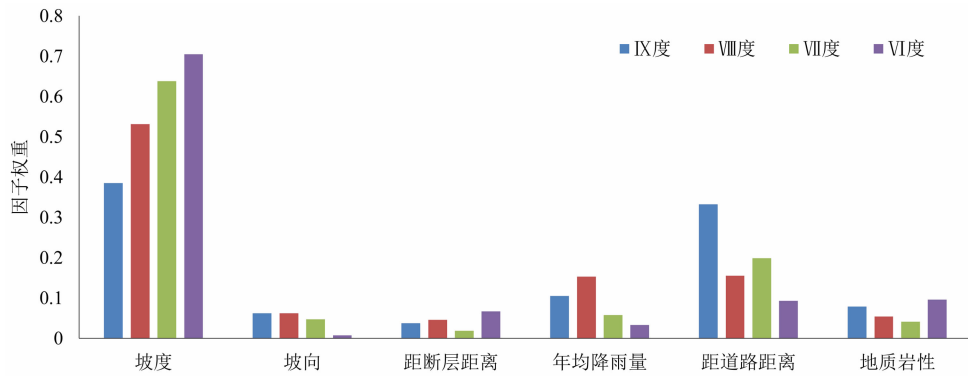


图5 不同地震烈度区因子权重

Fig. 5 Factor weights in the different seismic intensity regions

象,严重干扰山体稳定性,同时公路沿线人类活动频繁,不科学的生产活动会造成环境退化,距道路距离因子是地区工程扰动和人类社会活动的综合体现,是诱发滑坡的关键因素。结果显示,距道路距离是除了坡度以外最重要的因子,并且在IX度地震烈度区内权重值达到最大。究其原因,IX度地震烈度区位于尼泊尔首都加德满都和中国边境之间,区域内包含两个中尼边境口岸和多条连接中尼两国的交通要道,公路等级高,工程量大,形成的工程扰动更为严重;另一方面,该地区为高喜马拉雅构造单元,山高谷深,公路展布困难,修筑难度大,大多采用挖掘的方式,人为破坏了坡体的稳定性,促使震后滑坡的形成。

坡体的力学性质及稳定性与其地质岩性直接相关。表1显示本次同震滑坡大多位于元古界,以片岩、片麻岩、变粒岩、板岩和大理岩等变质岩为主,占到了滑坡总数的86.44%。叠加区域地质图,发现在浅色花岗岩与其他岩体的交界面附近也有少量滑坡分布。

标准差是离均差平方的算数平均数的平方根,可以反映一组数据的离散程度。我们计算每个地震烈度区内的因子权重标准差(表2)后发现,在地震烈度等级越高的区域,因子权重的标准差越小。说明在地震烈度越高的区域,因子权重的离散程度越低,因子对滑坡的作用程度差异越小,控制区域内滑坡发生的因素越多,因此滑坡在这些因素的有利区间均有可能发育,由于各因素在空间上的多样性,所以滑坡在高地震烈度区呈现相对均匀的分布状态,关联维数较大。反之,在低地震烈度区内,因子权重

的离散程度较高,因子对滑坡的作用程度差异较大,区域内的滑坡发育由少数主控因素影响,滑坡仅在少数主控因素的有利区间发育,所以呈现相对聚集的分布状态,关联维数较小。

## 4 结论

本文利用多时相遥感影像,对尼泊尔地震重灾区同震滑坡进行了详细调查,共解译滑坡1431处。之后引入关联维数揭示了尼泊尔地震重灾区同震滑坡的空间分布特征,利用区域环境背景因素和二元Logistic回归模型探讨了尼泊尔地震同震滑坡空间分布特征差异的原因,为解决同震滑坡空间分布问题提供了新的方向,并取得以下结论:

(1)本次地震诱发的大多为新生滑坡体,以浅层中小型滑坡为主;滑坡在公路两侧发育;地震烈度越强的区域,滑坡数量越多;受低角度逆冲断层(MHT)影响,滑坡全部位于上盘,并沿地震烈度圈长轴方向呈面状分布。

(2)不同地震烈度区内的滑坡具有不同的分形特征。随着地震烈度等级的增加,滑坡的关联维数越来越大,滑坡的空间关联性越来越弱,滑坡的空间分布特征由聚集分布逐渐转变为均匀分布。

(3)不同地震烈度区内因子的权重大小不同,但大多还是以坡度>距道路距离>年均降雨量>地质岩性>坡向>距断层距离的顺序排列。其中坡度是控制尼泊尔地震同震滑坡发生的主要因素;坡向因子影响较小,且在不同地震烈度区变化不大;距断层距离因子用于描述低角度逆冲断层地震同震滑坡



存在一定的局限性;降雨因子、距道路距离因子和地质岩性因子对同震滑坡的发生都有一定的影响,中部由变质岩与花岗岩组成的高喜马拉雅巨大推覆体是滑坡发生的主要岩层。

(4)在高地震烈度区内,各影响因素对滑坡的作用程度差异较小,滑坡的发生受多种因素共同控制,由于各因素在空间上的多样性,所以滑坡呈现相对均匀的空间分布特征,关联维数较大;反之,在地震烈度较低的区域,滑坡的发生受单一因素控制,仅在该因子的有利区间聚集发生,关联维数较小。

## 参考文献 (References)

- [1] ROBACK K, CLARK M K, WEST A J, et al. The size, distribution, and mobility of landslides caused by the 2015  $M_w$  7.8 Gorkha earthquake, Nepal [J]. *Geomorphology*, 2018 (301): 121 – 138.
- [2] 覃发超,史凯,张斌,等. 芦山地震后初期余震时间序列的分形演化特征[J]. *山地学报*, 2013, **31**(4): 489 – 494. [QIN Fachao, SHI Kai, ZHANG Bin, et al. Fractal evolution of the early aftershock sequence of Lushan earthquake [J]. *Mountain Research*, 2013, **31**(4): 489 – 494]
- [3] 苟娇娇,王飞,罗明良,等. 基于DEM的黄土高原沟谷节点分形特征研究[J]. *水土保持学报*, 2016, **30**(3): 109 – 114. [GOU Jiaojiao, WANG Fei, LUO Mingliang, et al. Fractal characteristics of Channel junctions (CJs) based on DEM [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, **30**(3): 109 – 114]
- [4] YOKOI Y, CARR J R, WATTERS R J. Fractal character of landslides [J]. *Environmental & Engineering Geoscience*, 1995, **1**(1): 75 – 81.
- [5] GOLTZ C. Multifractal and entropic properties of landslides in Japan [J]. *Geologische Rundschau*, 1996, **85**(1): 71 – 84.
- [6] 倪化勇,刘希林. 泥石流粒度分维值的初步研究[J]. *水土保持研究*, 2006, **13**(1): 89 – 91. [NI Huayong, LIU Xilin. A preliminary study on debris flow grain-size fractal dimension [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, **13**(1): 89 – 91]
- [7] 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. [XIE Jiaqiong, YI Shunmin. Study on the multifractal of the spatial distribution of landslides activities and its significances [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2000, **32**(6): 4 – 6]
- [8] 邱海军,崔鹏,王彦民,等. 基于关联维数的黄土滑坡空间分布结构及其成因分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, **34**(3): 546 – 555. [QIU Haijun, CUI Peng, WANG Yanmin, et al. Spatial distribution structure of loess landslides and cause analysis based on correlated fractal dimension [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, **34**(3): 546 – 555]
- [9] WU Caiyan, QIAO Jianping, Wang Meng. Landslides and slope aspect in the Three Gorges Reservoir Area based on GIS and information value model [J]. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 2006, **11**(4): 773 – 779.
- [10] 倪树斌,马超,杨海龙,等. 北京山区崩塌、滑坡、泥石流灾害空间分布及其敏感性分析[J]. *北京林业大学学报*, 2018, **40**(6): 81 – 91. [NI Shubin, MA Chao, YANG Hailong, et al. Spatial distribution and susceptibility analysis of avalanche, landslide and debris flow in Beijing mountain region [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2018, **40**(6): 81 – 91]
- [11] 苏凤环,崔鹏,张建强,等. 芦山地震重灾区崩塌滑坡易发性评价[J]. *山地学报*, 2013, **31**(4): 502 – 509. [SU Fenghuan, CUI Peng, ZHANG Jianqiang, et al. Rockfall and landside susceptibility assessment in Lushan earthquake region [J]. *Mountain Research*, 2013, **31**(4): 502 – 509]
- [12] 上官冬辉,赵伟,史艳梅. 尼泊尔震后Rasuwa区山地灾害遥感调查[J]. *遥感技术与应用*, 2017, **32**(1): 78 – 83. [SHANG GUAN Donghui, ZHAO Wei, SHI Yanmei. Mountain hazards investigation in rasuwa district of Nepal after the earthquake by using remote sensing [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2017, **32**(1): 78 – 83]
- [13] FAN Xuanmei, XU Qiang, WESTEN C J V, et al. Characteristics and classification of landslide dams associated with the 2008 Wenchuan earthquake [J]. *Geoenvironmental Disasters*, 2017, **4**(1): 12.
- [14] 武新宁,易俊梅,周淑丽,等. 尼泊尔 $M_s$  8.1级地震活动构造及次生地质灾害研究[J]. *水文地质工程地质*, 2017, **44**(4): 137 – 144. [WU Xinning, YI Junmei, ZHOU Shuli, et al. A study on the active faults structures and geohazards triggered by the  $M_s$  8.1 earthquake in Nepal [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2017, **44**(4): 137 – 144]
- [15] 杨志华,张永双,郭长宝,等. 基于Newmark模型的尼泊尔 $M_s$  8.1级地震滑坡危险性快速评估[J]. *地质力学学报*, 2017, **23**(1): 115 – 124. [YANG Zhihua, ZHANG Yongshuang, GUO Changbao, et al. Landslide hazard rapid assessment in the  $M_s$  8.1 Nepal earthquake-impacted area, based on Newmark model [J]. *Journal of Geomechanics*, 2017, **23**(1): 115 – 124]
- [16] 黄森旺,孔纪名,崔云,等. “4·25”尼泊尔 $M_s$  8.1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. [HUANG Senwang, KONG Jiming, CUI Yun, et al. Disasterous spatial distribution and danger zonation of secondary geological disaster in Xizhang after “4·25”  $M_s$  8.1 Nepal earthquake [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2017, **26**(1): 80 – 88]

- [17] 刘亚岚, 许清, 郑泽忠, 等. 典型地震次生地质灾害多光谱遥感影像特征图谱研究[J]. 遥感技术与应用, 2015, **30**(1): 18 – 24. [LIU Yalan, XU Qing, ZHENG Zezhong, et al. Study on characteristic chart of multi-spectral remote sensing image for typical earthquake secondary geological disasters [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, **30**(1): 18 – 24]
- [18] 杨晓平, 吴果, 陈立春, 等. 青藏高原南缘 2015 年尼泊尔  $M_w$  7.8 地震发震构造[J]. 地球物理学报, 2016, **59**(7): 2528 – 2538. [YANG Xiaoping, WU Guo, CHEN Lichun, et al. The seismogenic structure of the April 25, 2015  $M_w$  7.8 Nepal earthquake in the southern margin of Qinghai – Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, **59**(7): 2528 – 2538]
- [19] SILVERMAN B. Density estimation for statistics and data analysis [M]. London: Chapman and Hall, 1986: 4 – 6.
- [20] 刘继生, 陈彦光. 城镇体系等级结构的分形维数及其测算方法[J]. 地理研究, 1998, **17**(1): 82 – 89. [LIU Jisheng, CHEN Yanguang. Fractal dimensions of spatial structure of an urban system and the methods of their determination [J]. Geographical Research, 1998, **17**(1): 82 – 89]
- [21] 刘希林, 苏鹏程. 南水北调西线工程泥石流灾害及危险区划[J]. 地学前缘, 2007, **14**(6): 188 – 196. [LIU Xilin, SU Pengcheng. Debris flows and zonation based on debris flow hazards in the area of the West-line Project of the South-to-North water diversion project in China [J]. Earth Science Frontiers, 2007, **14**(6): 188 – 196]

## Fractal Characteristics and Causes of Co-seismic Landslides in the Nepal Earthquake Extremely Stricken Areas

JIANG Ning<sup>1,2,3</sup>, SU Fenghuan<sup>1,2\*</sup>, XU Jinghua<sup>4</sup>, GE Yonggang<sup>1,2</sup>, LIU Zhi<sup>5</sup>

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chengdu 610041, China; 2. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 5. Sichuan Institute of Geological Survey, Chengdu 610081, China)

**Abstract:** A large number of landslides have occurred in the mountainous areas along the border between China and Nepal, which were induced by the “4.25” Nepal  $M_s$  8.1 earthquake. These landslides led to heavy casualties and damaged the economic infrastructure of the border areas. Multi-temporal remote sensing images were used to interpret and investigate the landslides in the seismic area. A correlation fractal dimension was introduced to explore the spatial fractal characteristics of the co-seismic landslides. Moreover, the causes of these characteristics were analyzed by combining the binary logistic model and regional background factors. The results showed that most of the 1431 co-seismic landslides were neogenic landslides. They were mainly small and medium shallow landslides, and they were relatively developed on both sides of the highway and high seismic intensity areas. Under the influence of the low-angle thrust fault, all the landslides were located on the upper plate and distributed along the long axis of seismic intensity circle with a plane shape. The correlation fractal dimension increased with increases in seismic intensity, and the spatial distribution of the landslides changed gradually from aggregation to uniformity. The weights of factors were found to differ for areas with different seismic intensity. The distance from the fault had the least influence and had notable limitations regarding describing the landslides induced by low-angle thrust fault earthquakes. However, the slope had the greatest influence on the landslides. In the IX seismic intensity area, the difference of each factor on the landslides was small, and the landslides in this area were

affected by many factors, then they presented a relatively uniform characteristic. In contrast, in the VI seismic intensity area, the landslides were mainly affected by a single factor, and it presented a relatively aggregated characteristic. The study can provide references for the spatial distribution of co-seismic landslides, the fractal characteristics of earthquake-induced landslides, and post-earthquake disaster management.

**Key words:** Nepal earthquake; co-seismic landslide; fractal characteristic; correlation dimension; logistic model

---

## 拉萨风砂的起源证据——扎囊黄土古土壤剖面

(张信宝 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所)

西藏雅鲁藏布江及其主要支流拉萨河和年楚河河谷地带风沙地貌发育,风沙灾害严重。河谷两岸的沙坡和滩、台地的沙丘、沙地,如同“疥疮”,不但大刹风景,而且严重影响西藏社会经济的发展。

扎囊黄土古土壤剖面位于雅鲁藏布江宽谷段(E91.343627, N29.251134)。现场考察发现,剖面中无风沙夹层,结合考古研究成果,推测历史时期以来人类活动破坏环境可能是“一江两河”河谷地区的风沙灾害的主因,史前时期可能没有或极少风沙灾害。

详见本期《对西藏“一江两河”河谷地区风沙灾害的一些粗浅认识和治理工作建议》一文。