

玉树地震滑坡影响因子敏感性分析

许冲,徐锡伟,于贵华,吴熙彦

中国地震局地质研究所活动构造与火山重点实验室,北京 100029

摘要 2010年玉树地震触发了2036处滑坡,总面积为1.194km²。采用滑坡面积百分比(LAP)与滑坡点密度(LND)两个指标对地震滑坡影响因子进行敏感性分析,这些因子包括地震因子(震中、宏观震中、地表破裂、地震动峰值加速度、同震位移),地形因子(高程、坡度、坡向、曲率、坡位、水系),地质因子(岩性、断裂),其他因子(公路、归一化植被指数)。结果表明,(1)距地表破裂越近,滑坡越易发生;除个别分级异常外,距宏观震中越近、同震位移越大,滑坡越易发生;滑坡易发程度与震中、PGA的关系不显著。(2)坡度越大,滑坡易发程度越高;滑坡的易发高程区间为<4km;易发坡向为北东、东、南东;除平坡外,坡位越低,滑坡越容易发生;距离水系越近,滑坡越易发生;曲率与滑坡对应关系表现出坡面凸凹不平的容易发生滑坡,坡面光滑的不容易发生滑坡。(3)易发地层是Q₄^{al-pl}(湖沼淤泥和泥炭沉积)、N(石英细砂岩,底部为角砾岩)、T₃kn¹(灰色长石砂岩、长石石英砂岩夹粉砂岩、板岩、灰岩);滑坡发生与断裂的关系不明显。(4)越靠近公路,滑坡越容易发生;植被覆盖越少,滑坡越易发生。

关键词 玉树地震;滑坡;影响因子;敏感性分析

中图分类号 P642

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.01.002

Susceptibility Analysis of Impact Factors of Landslides Triggered by Yushu Earthquake

XU Chong, XU Xiwei, YU Guihua, WU Xiyan

Key Laboratory of Active Tectonics and Volcano, Institute of Geology, Chinese Earthquake Administration, Beijing 100029, China

Abstract 2036 landslides were triggered by the 2010 Yushu earthquake, in a total area of 1.194km². The Landslide Area Percent (LAP) and the Landslide Number Density (LND) are selected as two indices for the susceptibility analysis of landslide impact factors. The impact factors of landslides include the earthquake impact factors such as the epicenter, the macro-epicenter, the main co-seismic surface fault-rupture, the Peak Ground Acceleration (PGA), and the co-seismic displacement; the topography impact factors such as the elevation, the slope angle, the slope aspect, the slope curvature, the slope position, and the drainages; the geology impact factors such as the lithology and the faults; and other impact factors such as the roads and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). The results show that: (1) Both LAP and LND have strong positive correlations with the distance from the main co-seismic surface fault-rupture, and also have positive correlations with the macro-epicenter and co-seismic displacement except for individual classifications, but the correlations between the landslide occurrences and the epicenter, and PGA are not clear-cut. (2) The greater the slope angle, the higher the probability of landslide occurrence; the elevation less than 4000m sees a high susceptibility to landslide occurrences; it can be found that the slopes facing NE, E, and SE see relatively higher LAP and LND values than other directions; the higher the slope position, the higher the landslide susceptibility except for flat slope; landslides have positive correlations with the distance from drainages; rough slopes are more prone to landslide occurrence than smooth slopes. (3) The stratum of Q₄^{al-pl} (Alluvium, fluvial deposits, gravel), N (Quartz sandstone, breccia), and T₃kn¹ (Feldspathic sandstone, siltstone, slate, limestone, phyllite) see concentrated landslide activities, the correlation between the landslide occurrences and the faults is not clear-cut. (4) The closer to roads and the more sparse of the vegetation, the more susceptibility to landslide occurrences.

Keywords Yushu earthquake; landslide; impact factors; susceptibility analysis

收稿日期:2011-07-15;修回日期:2011-12-08

基金项目:中国地震局地质研究所基本科研业务专项(IGCEA0905,ZGCEA1120);国家自然科学基金项目(40821160550,40974057);《科技导报》博士生创新研究资助计划项目(kjdb200902-5)

作者简介:许冲,博士后,研究方向为地震滑坡、活动构造,电子信箱:xc1111111@126.com;徐锡伟(通信作者),研究员,研究方向为活动构造与地震滑坡,电子信箱:xiweixu@vip.sina.com

0 引言

2010年4月14日,中国青海省玉树藏族自治州玉树县发生了 Ms 7.1 级地震。中国地震台网中心(CENC)测得这次地震的震中位置为 33.1°N, 96.7°E, 震源深度为 33km, 震级为 Ms 7.1 (后校正为震中位置 33.2°N, 96.6°E, 震源深度为 14km)。美国地质调查局公布的这次地震的发震时间为 4月13日 23时 49分 37秒(UTC), 震中位置(±6.6km)为 33.271°N, 96.629°E, 震源深度为 10km, 震级为 Mw 6.9 (后校正为震中位置 33.224°N, 96.666°E, 震源深度为 17km)。据青海省抗震救灾指挥部通报,截至 4月25日 17时,青海玉树 7.1 级地震已造成 2220 人死亡, 70 人失踪, 12135 人受伤, 其中重伤 1434 人。

近年来,地震滑坡空间分布规律与因子敏感性分析是一个重要的研究方向,该方向依托单次地震事件触发滑坡,基于 GIS 平台与统计学理论找到地震滑坡的高发与易发因子区间,为地震滑坡空间分布研究提供科学方法与研究实例,为地震灾区滑坡防灾减灾提供参考。通过研究地震触发滑坡实例(如 1994 年 1 月 17 日加利福尼亚北部 Mw 6.7 级地震触发的超过 11000 处滑坡^[1-2]、1997 年 9 月 26 日 Umbria-Marche 地震滑坡^[3]、1995 年 1 月 17 日 Hyogo-ken 地震滑坡^[4]、1999 年 9 月 21 日台湾 Chi-chi 地震滑坡^[5-8]、2004 年 10 月 23 日的 Mid-Niigata 地震滑坡^[9-11]、2005 年 10 月 8 日的 Kashmir Mw 7.6 级地震滑坡^[12-13]、2008 年 5 月 12 日的汶川地震滑坡^[14-18]等)的

空间分布特征,得到对应地区的地震滑坡空间分布规律,丰富了地震滑坡研究内容,为地震滑坡的防灾减灾提供了参考。

本文在依据高分辨率遥感影像目视解译并结合现场调查方法、建立玉树地震滑坡空间分布图的基础上,采用地震滑坡面积百分比(LAP)和滑坡点密度(LND)两个指标,对玉树地震滑坡的影响因子敏感性进行分析,以期找到玉树地震滑坡的易发因子区间,为进一步的滑坡危险性评价奠定基础。

1 研究区与滑坡发育

以灾后航空相片与高分辨率遥感影像目视解译为主,辅以野外调查验证^[19]方法,建立了玉树地震滑坡数据库,库中包含了 2036 条用面要素表示的玉树地震滑坡记录^[20],可见这些滑坡主要分布在沿地表断裂带的面积约 1455.3km² 的矩形区域内(图 1)。这 2036 处滑坡总面积为 1.194km², 单体滑坡平均面积为 586.4m²。地震滑坡的发生受多个因素影响,本文以滑坡分布的这个矩形区域作为研究区,选择地震因子(震中、宏观震中、地表破裂、地震动峰值加速度(PGA)、同震位移),地形因子(高程、坡度、坡向、曲率、坡位、水系),地质因子(岩性、断裂),其他因子(公路、归一化植被指数(NDVI)),共 4 大类、15 小类影响因子,统计这些因子与滑坡空间分布的关系,采用 LAP 和 LND 两个指标对滑坡的影响因子进行敏感性统计分析,研究玉树地震滑坡的因子易发区间。

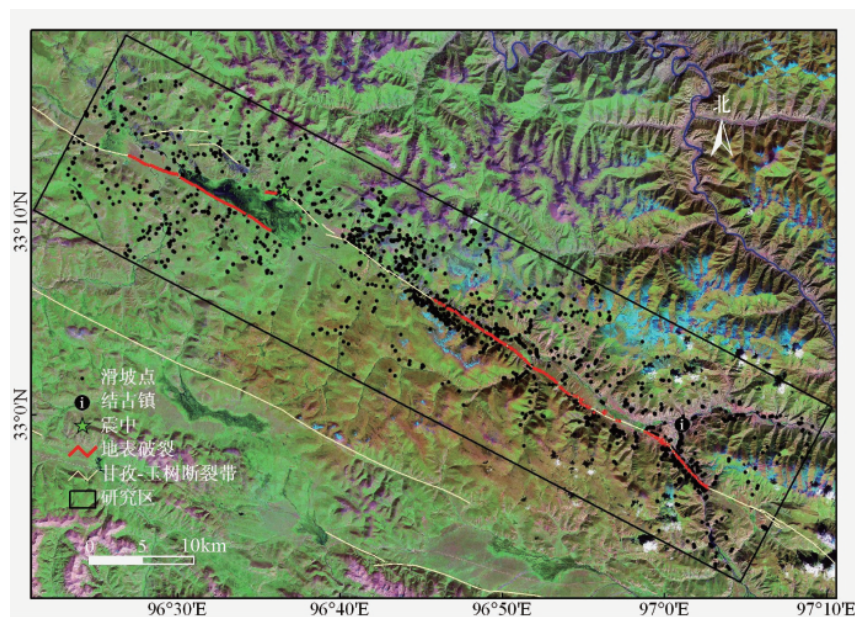


图 1 玉树地震滑坡(黑点)与地表破裂分布

Fig. 1 Distributions of landslides (black points) triggered by Yushu earthquake and main co-seismic surface fault-rupture

2 滑坡影响因子敏感性分析

2.1 地震影响因子

选取地表破裂、PGA、震中、宏观震中、同震位移这 5 类地震因子,作为影响滑坡发生的因子,针对每个因子,统计每个分级内 LAP、LND 的大小,以衡量因子内部的滑坡易发区间,

开展地震因子敏感性分析研究,所有专题图层均转为栅格文件格式,栅格大小为 5m×5m。

对震中、宏观震中、地表破裂,将滑坡与其之间的距离作为分级考虑要素,PGA 按照等值线的峰值加速度值进行分级,同震位移来自 InSAR 反演结果^[21],将同震位移按照大小进

行分级统计。研究区内距离震中最远的距离近 58km,按照 1 个间隔 2km 统计 LAP、LND 与震中距离的关系,统计结果表明并不是距离震中越近,滑坡越容易发生,滑坡最易发生的区间为距离震中 44—50km 的区域,26—30km 的区域次之(图 2(a))。从图 1 中可以看出,距离震中 44—50km 的区域恰是地表破裂带的东端,该区域为破裂转弯终止区,而且野外调查与遥感解译结果显示,该区域的斜坡上发育了多条裂隙,这表明地震在此处释放了大量的能量,所以滑坡相对密

集。而距离震中 26—30km 的区域恰是宏观震中^[22]的位置,该区的地表破裂错动量最大,地震破坏最严重,所以对应滑坡易发程度高。

对滑坡与宏观震中^[22]距离的统计结果表明,距离宏观震中 2km 内的 LAP 与 LND 值高,总体上随着与宏观震中距离的增大,滑坡的易发程度降低,而 16—20km 处出现了 1 处异常值,这个位置恰是地表破裂的东端,对应着高应力释放区(图 2(b))。

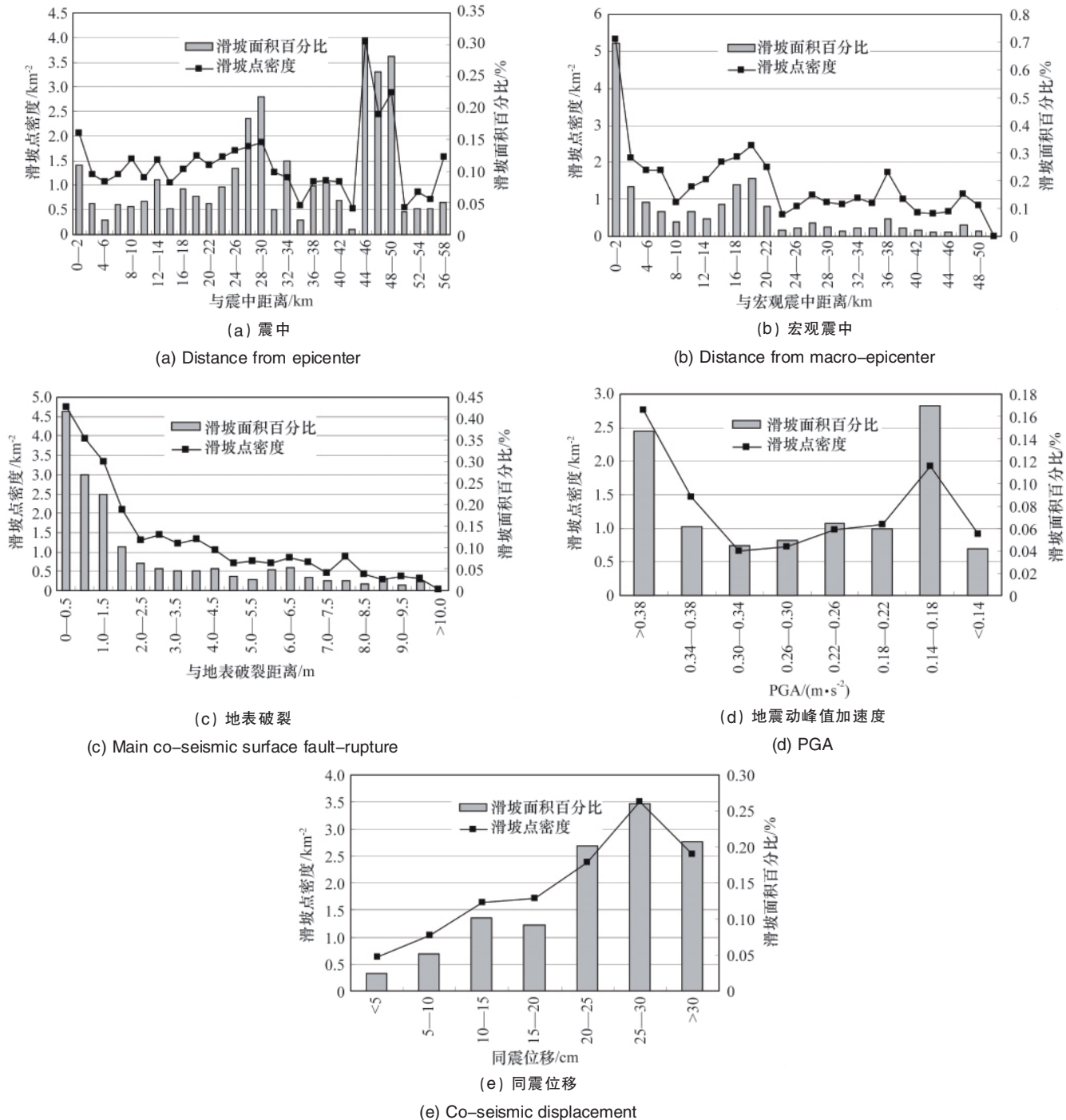


图 2 滑坡地震影响因子与 LAP、LND 的统计关系

Fig. 2 Statistical correlations between earthquake impact factors and LAP, LND

图 2(c)为地表破裂距离与 LAP、LND 的统计结果,可见地表破裂与滑坡的易发性关系密切,滑坡的易发程度随着与地表破裂距离的增大而减小,滑坡的高易发区为距地表破裂 2km 范围内。地表破裂对滑坡表现出强烈的控制作用。

图 2(d)为 PGA 与 LAP、LND 的统计关系,当 $PGA \geq 0.38 m \cdot s^{-2}$ 和 $0.14 m \cdot s^{-2} \leq PGA \leq 0.18 m \cdot s^{-2}$ 时滑坡的易发程度高。这是因为当 $PGA \geq 0.38 m \cdot s^{-2}$ 时地面受到了强烈震动;将从 USGS 下载的 PGA 等值线图与滑坡分布数据对应起来,发现 $0.14 m \cdot s^{-2} \leq PGA \leq 0.18 m \cdot s^{-2}$ 的峰值区间恰对应地表破裂的东端。这一异常现象表明了地表破裂与地震动并非完全对应,并不是距离地表破裂越近,地震动越强烈,当然这也受到 PGA 监测台站稀疏以及存在一定误差的影响。如果不考虑这其中存在的 PGA 误差因素,当前的统计表明在研究区域内,地震滑坡受地震地表破裂的控制作用更强,而非地震动。

图 2(e)为基于 InSAR 的反演的同震位移^[2]与滑坡 LAP、LND 之间的对应关系。统计结果表明,LAP、LND 值基本上随着同震位移的增大而增大,1 处异常点位于同震位移最大的位置。从 InSAR 的反演结果来看,跨地表破裂的同震位移最大处并不是 LAP、LND 值最大的区域,而这一条带却是地震

滑坡的密集发生区。

2.2 地形影响因子

选取高程、坡度、坡向、曲率、坡位、与水系距离作为影响地震滑坡发生的地形因子,统计 LAP、LND 与这些因子的关系。

研究区内高程范围是 3590—5181m, 数字高程模型 (DEM)来自于 1:50000 的地形图,分辨率大小为 $5m \times 5m$ 。将高程专题图按照图 3(a)中横轴的分类标准进行分类,高程与 LAP、LND 的统计关系表明,高程 <4km 区域的 LAP 与 LND 比较大,表明该区间为滑坡易发的高程区间。一般情况下,滑坡与高程没有直接的联系,但是从地表破裂与高程的对应关系来看,这一高程区间恰好多位于地表破裂穿过的区域,因而滑坡的易发程度颇高。

图 3(b)为 LAP、LND 与坡度的统计关系,与以往的研究结果类似,坡度越大,玉树地震滑坡分级内的 LAP 与 LND 值就越大,滑坡易发程度越高。

受震中位置、地震波传播方向、断裂走向等的影响,坡向一般与地震滑坡存在着一定关系,图 3(c)表明北东、东、南东 3 个方向对应的 LAP 与 LND 值高,为玉树地震滑坡的易发坡向。从图 1 中可以看出,震中位于地表破裂的西端,主破裂由

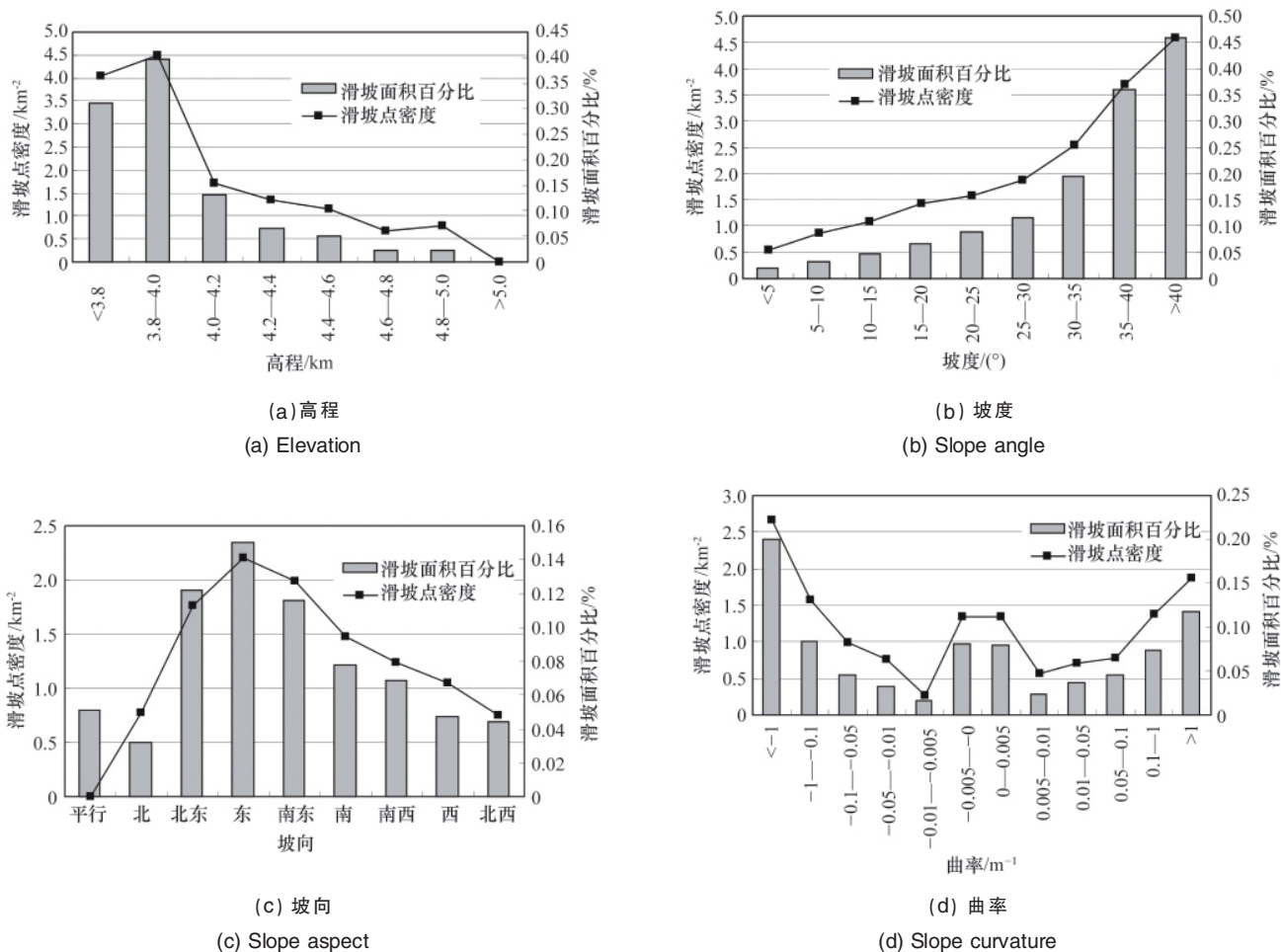


图 3 地震滑坡地形影响因子与 LAP、LND 的统计关系

Fig. 3 Statistical correlations between topography impact factors and LAP, LND

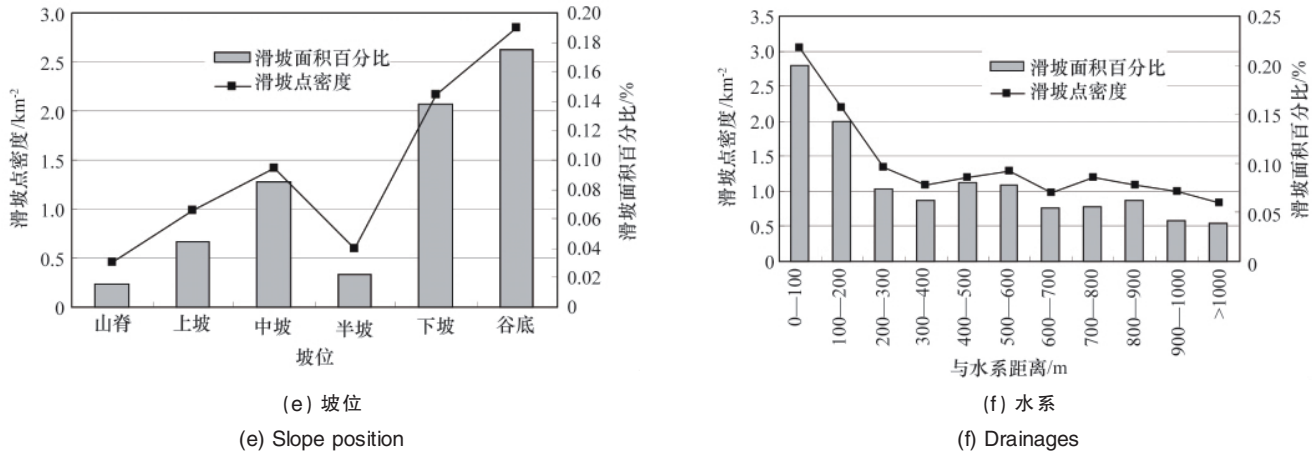


图3 地震滑坡地形影响因子与LAP、LND的统计关系(续)

Fig. 3 Statistical correlations between topography impact factors and LAP, LND (continued)

北西西南向东南传播,这与滑坡的易发坡向是北东、东、南东基本一致。此外,平坦地区也发生了一些滑坡,这是因为一些滑坡堆积物堆到了坡脚平坦的位置。

曲率与地震滑坡分布的统计关系表明,斜坡曲率极大值、极小值或接近0值处为地震滑坡的易发区,这表明凸凹坡,即坡面粗糙的斜坡比光滑平坦的斜坡容易发生滑坡(图3(d))。

坡位与LAP、LND的统计关系表明,除了平坡的LAP、LND值较低外,从山脊到谷底,斜坡的易发程度逐渐变高(图

3(e))。

LAP、LND与水系距离的统计结果表明,总体上距离水系越近,滑坡易发性越强,这是因为距离水系近的斜坡多为风化坡积物,较容易滑动,这与图3(e)中下坡、谷底容易发生滑坡的研究结果相对应(图3(f))。

2.3 地质影响因子

选择地层岩性与断裂进行地质影响因子的敏感性分析。地层岩性与断裂均来自修改的1:200000地质图,通过与断裂的距离来表征断裂对滑坡的影响(图4)。

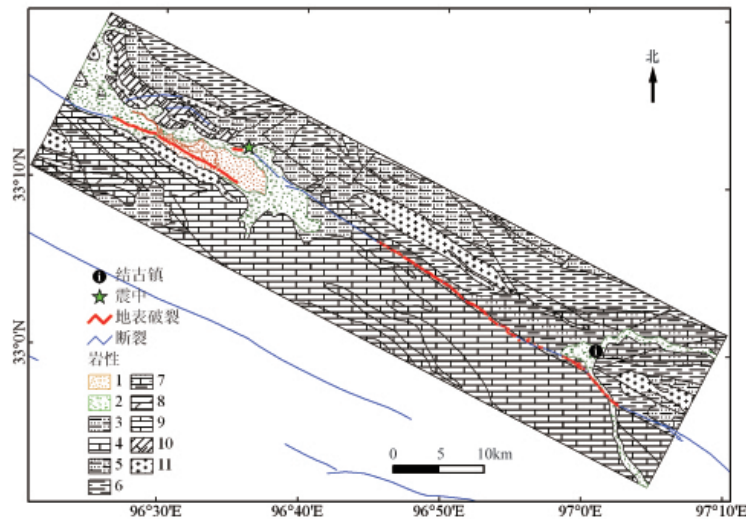


图4 研究区地层岩性图

Fig. 4 Geological map of the study area

注:1— Q_4^h ,湖沼淤泥、泥炭沉积;2— Q_4^{al} ,冲积、洪积砾石层;3—N,石英细砂岩,底部为角砾岩;4— T_3bt ,石英砂岩、粉砂岩、灰岩夹板岩;5— T_3kn^3 ,石英砂岩、长石石英砂岩夹千枚状板岩、炭质板岩;6— T_3kn^2 ,绿泥、绿帘阳起片岩,斜长、钠长角闪片岩,变安山岩、玄武岩、火山角砾岩夹大理岩;7— T_3kn^1 ,灰色长石砂岩、长石石英砂岩夹粉砂岩、板岩、灰岩;8— T_2jl^2 ,灰白色块层状灰岩夹白云岩;9— T_2jl^1 ,钙质凝灰质板岩、硬砂质长石石英砂岩夹灰岩;10—C-P,灰色长石石英砂岩、含砾不等粒砂岩、石英砂岩互层,夹板岩及灰岩透镜;11—花岗岩、石英闪长岩、辉绿岩。

Notes: 1, Q_4^h , Alluvium, fluvial deposits, gravel; 2, Q_4^{al} , Lake silt, peat deposits; 3, N, Quartz sandstone, breccia; 4, T_3bt , Limestone, quartz sandstone, siltstone, coarse sandstone, slate; 5, T_3kn^3 , Quartz sandstone, siltstone, slate, mica schist; 6, T_3kn^2 , Limestone, amphibolite schist, marble, metamorphic conglomerate; 7, T_3kn^1 , Feldspathic sandstone, siltstone, slate, limestone, phyllite; 8, T_2jl^2 , Limestone; 9, T_2jl^1 , Slate, limestone, siltstone, quartz sandstone, conglomerate; 10, C-P, Quartz sandstone, sandstone; 11, Quartz diorite, granite, diabase.

图 5(a)为地层岩性与 LAP、LND 之间的统计关系,表明 Q_4 、 N 、 T_3kn^1 为地震滑坡的易发地层岩性。

距断裂距离对滑坡的影响不明显(图 5(b)),这表明研究区内决定滑坡的断层因素仅是发震断层(地表破裂),而不是其他的断裂。

2.4 公路与 NDVI

除了地震、地质、地形影响因子外,公路与 NDVI 也对地

震滑坡的发生有着一定的影响。距离公路越近,滑坡的易发程度越高(图 6(a))。野外调查还发现多处因公路建设削坡而发生的地震滑坡,造成了堆积物堵塞部分公路。

滑坡随着 NDVI 值的减少而减少, 这表明玉树地震区植被稀疏的地方容易发生滑坡(图 6(b))。NDVI 值小于 0 的区域代表冰雪、水域等,因此该分级内 LAP 与 LND 值较低,滑坡的易发程度低。

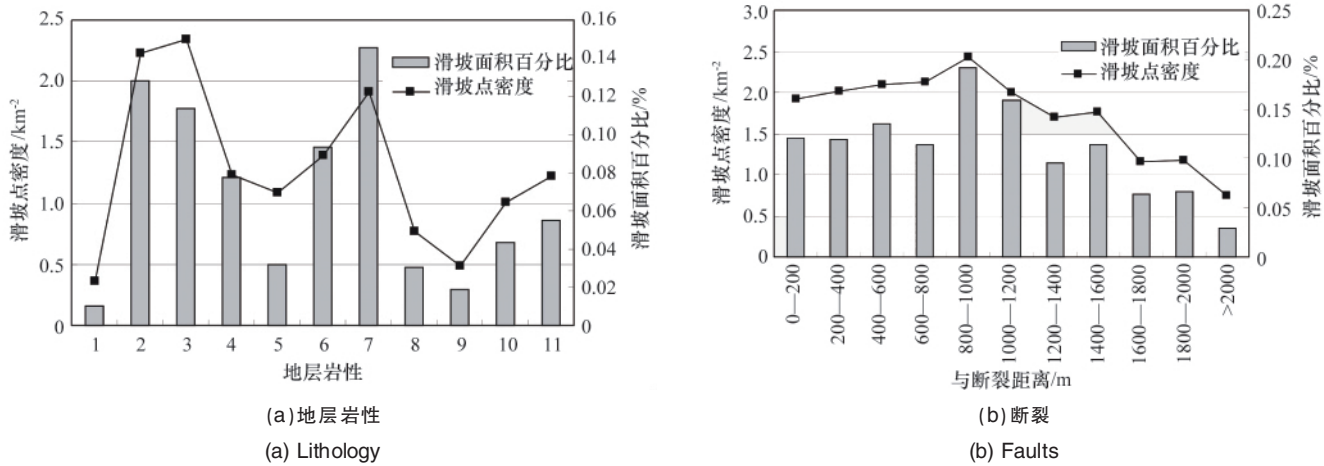


图 5 地震滑坡地质影响因子与 LAP、LND 的统计关系
Fig. 5 Statistical correlations between geology impact factors and LAP, LND

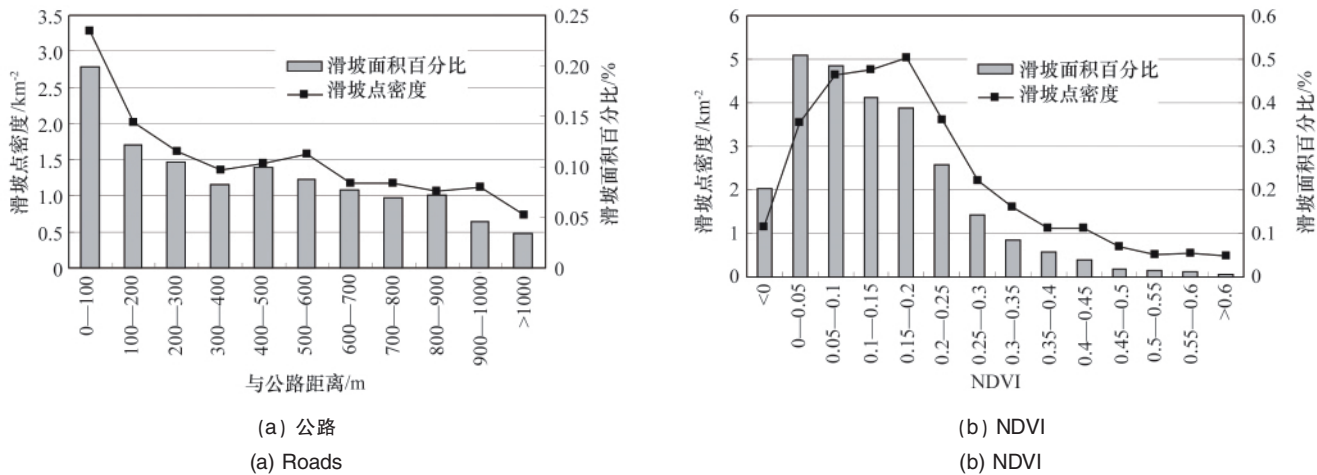


图 6 地震滑坡其他影响因子与 LAP、LND 的统计关系
Fig. 6 Statistical correlations between other impact factors and LAP, LND

3 讨论

本文选择了 4 大类、15 小类影响地震滑坡发生的因子作为敏感性分析对象,研究了这些因子内部哪些分级容易导致滑坡,这一工作属于滑坡的相对统计,结果为地震滑坡的“易发区间”,其研究对象与研究重点为地震滑坡影响因子的易发性或者敏感性,是地震滑坡易发性评价及预测研究的基础,与滑坡的绝对统计意义^[20]不同。绝对统计研究的对象与重点为滑坡发生的绝对比例与“多发区间”。有的因子对二者表现出相同的趋势,如滑坡与地表破裂的关系,这是因为距离地表破裂不同距离的分级面积差不多。也有一些因子对两者表现出截然不同的趋势,如关于坡度与滑坡发生关系的统

计,滑坡多发生在 25° — 40° 级别内^[20],但是该级别并非滑坡的易发区间,滑坡的易发性随着坡度的增加而增加,易发坡度区间为 $>35^{\circ}$ 。

本研究侧重于滑坡影响因子内部的统计,得到每个因子内部的滑坡易发级别,而对于影响因子之间对滑坡的影响作用大小并没有涉及,但是从本研究中依然可以看出一些影响因子对滑坡空间分布控制作用的大小。如地表破裂、坡度、宏观震中、水系、公路等因子对滑坡的控制作用强烈,而震中、断裂、PGA 等对地震滑坡没有明确的控制作用。这一现象引出了一个值得讨论的问题,为何在玉树地震滑坡中 PGA 对滑坡控制作用不明显。试分析如下:地震通过 3 种作用对地震

滑坡产生影响,这3种作用是地震动、位移和形变。地震动可以用PGA来表征,同震位移可以用基于InSAR反演的结果来表征,同震形变用与地表破裂的距离来衡量。其中,与滑坡关系最密切的是同震形变即地表破裂,形变大的区域内的斜坡坡体结果遭到破坏,所以在经历较小震动甚至在结合自身重力的情况下就会发生滑动;而在远地表破裂的无变形或小变形区域,因其结构完整,即使经历了震动,也较难发生滑坡。采用InSAR结果得到的同震位移因受到地表破裂的影响,也表现出了一定的对滑坡分布的控制,但是其最大位移分级并不对应着LAP、LND的最大值,这说明了同震位移对滑坡的影响作用较同震形变小。

4 结论

本文通过LAP和LND分析了滑坡影响因子的内部敏感性,主要得到以下结论。

(1) 距地表破裂越近,滑坡越易发生;除个别分级异常外,距宏观震中越近、同震位移越大,滑坡越易发生;而滑坡易发程度与震中、PGA的关系不显著。

(2) 坡度越大,滑坡易发程度越高;滑坡的易发高程区间为<4km;易发坡向为北东、东、南东;除平坡外,坡位越低,滑坡越容易发生;距离水系越近,滑坡越易发生;曲率与滑坡对应关系表现出坡面凹凸不平的容易发生滑坡,坡面光滑的不容易发生滑坡。

(3) 易发地层是 Q_4^{pl} 、 N 、 T_3kn^1 ;滑坡发生与断裂的关系不明显。

(4) 越靠近公路,滑坡越容易发生;植被覆盖越少,滑坡越易发生。

(5) LAP、LND与多个因子的统计关系表明,两者表现出了几乎相同的变化趋势,这表明基于滑坡面数据或点数据进行的统计结果均是科学的。而LAP、LND均是因子内部级别敏感性的衡量,关于不同影响因子之间的影响作用大小还需要开展更多的研究。

参考文献 (References)

- [1] Harp E L, Jibson R W. Landslides triggered by the 1994 Northridge, California, Earthquake [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1996, 86(1B): S319-S332.
- [2] Parise M, Jibson R W. A seismic landslide susceptibility rating of geologic units based on analysis of characteristics of landslides triggered by the 17 January, 1994 Northridge, California earthquake [J]. *Engineering Geology*, 2000, 58(3-4): 251-270.
- [3] Marzorati S, Luzi L, Amicis M D. Rock falls induced by earthquakes: A statistical approach[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2002, 22(7): 565-577.
- [4] Fukuoka H, Sassa K, Scarascia-Mugnozza G. Distribution of landslides triggered by the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake and long runout mechanism of the Takarazuka golf course landslide[J]. *Journal of Physics of the Earth*, 1997, 45(2): 83-90.
- [5] Khazai B, Sitar N. Evaluation of factors controlling earthquake-induced landslides caused by Chi-Chi earthquake and comparison with the Northridge and Loma Prieta events[J]. *Engineering Geology*, 2004, 71(1-

- 2): 79-95.
- [6] Wang W N, Wu H L, Nakamura H, et al. Mass movements caused by recent tectonic activity: The 1999 Chi-Chi earthquake in central Taiwan [J]. *The Island Arc*, 2003, 12(4): 325-334.
- [7] Lin M L, Tung C C. A GIS-based potential analysis of the landslides induced by the Chi-Chi earthquake [J]. *Engineering Geology*, 2004, 71(1-2): 63-77.
- [8] Lee C T, Huang C C, Lee J F, et al. Statistical approach to earthquake-induced landslide susceptibility[J]. *Engineering Geology*, 2008, 100(1-2): 43-58.
- [9] Yamagishi H, Iwahashi J. Comparison between the two triggered landslides in Mid-Niigata, Japan by July 13 heavy rainfall and October 23 intensive earthquakes in 2004[J]. *Landslides*, 2007, 4(4): 389-397.
- [10] Chigira M, Yagi H. Geological and geomorphological characteristics of landslides triggered by the 2004 Mid Niigata prefecture earthquake in Japan[J]. *Engineering Geology*, 2006, 82(4): 202-221.
- [11] Sato H P, Sekiguchi T, Kojiro R, et al. Overlaying landslides distribution on the earthquake source, geological and topographical data: the Mid Niigata prefecture earthquake in 2004, Japan [J]. *Landslides*, 2005, 2(2): 143-152.
- [12] Sato H P, Hasegawa H, Fujiwara S, et al. Interpretation of landslide distribution triggered by the 2005 Northern Pakistan earthquake using SPOT 5 imagery[J]. *Landslides*, 2007, 4(2): 113-122.
- [13] Owen L A, Kamp U, Khattak G A, et al. Landslides triggered by the 8 October 2005 Kashmir earthquake [J]. *Geomorphology*, 2008, 94 (1-2): 1-9.
- [14] 许冲,戴福初,陈剑,等.汶川Ms8.0地震重灾区次生地质灾害遥感精细解译[J]. *遥感学报*, 2009, 13(4): 745-762.
Xu Chong, Dai Fuchu, Chen Jian, et al. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(4): 745-762.
- [15] 许冲,戴福初,姚鑫.汶川地震诱发滑坡灾害数量与面积 [J]. *科技导报*, 2009, 27(11): 79-81.
Xu Chong, Dai Fuchu, Yao Xin. *Science & Technology Review*, 2009, 27(11): 79-81.
- [16] 许冲,戴福初,徐锡伟.汶川地震滑坡灾害研究综述 [J]. *地质论评*, 2010, 56(6): 860-874.
Xu Chong, Dai Fuchu, Xu Xiwei. *Geological Review*, 2010, 56(6): 860-874.
- [17] 许冲,戴福初,肖建章.“5.12”汶川地震诱发滑坡特征参数统计分析 [J]. *自然灾害学报*, 2011, 20(4): 147-153.
Xu Chong, Dai Fuchu, Xiao Jianzhang. *Journal of Natural Disasters*, 2011, 20(4): 147-153.
- [18] 许冲,戴福初,姚鑫,等.基于GIS的汶川地震滑坡灾害影响因子确定性系数分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(S1): 2972-2981.
Xu Chong, Dai Fuchu, Yao Xin, et al. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(S1): 2972-2981.
- [19] 许冲,徐锡伟,于贵华.2010年玉树地震滑坡特征与分布调查 [J]. *地震地质*, 2012, 33(1): 待刊.
Xu Chong, Xu Xiwei, Yu Guihua. *Seismology and Geology*, 2012, 33(1): in press.
- [20] 许冲,徐锡伟,戴福初,等.2010年4月14日玉树地震滑坡空间分布与控制变量分析[J]. *工程地质学报*, 2011, 19(4): 505-510.
Xu Chong, Xu Xiwei, Dai Fuchu, et al. *Journal of Engineering Geology*, 2011, 19(4): 505-510.
- [21] 姚鑫,张永双,杨农,等.玉树地震地表变形InSAR观测及初步分析 [J]. *地质力学学报*, 2010, 16(2): 129-136.
Yao Xin, Zhang Yongshuang, Yang Nong, et al. *Journal of Geomechanics*, 2010, 16(2): 129-136.
- [22] 马寅生,张永双,胡道功,等.玉树地震地表破裂与宏观震中[J]. *地质力学学报*, 2010, 16(2): 115-128.
Ma Yinsheng, Zhang Yongshuang, Hu Daogong, et al. *Journal of Geomechanics*, 2010, 16(2): 115-128. (责任编辑 孙秀云,代丽)