

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2017.02.01

湖北恩施地区滑坡灾害成生规律

彭丽娟, 吴益平, 王 飞, 李曜男

(中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 恩施地区滑坡灾害频发, 为揭示恩施地区滑坡地质灾害成生规律, 在综合研究恩施地区基础地质和滑坡地质灾害调查统计成果的基础上, 分析滑坡灾害时空分布特征, 从影响滑坡发生与否的典型因素出发, 包括地层岩性、地质构造、地形地貌(高程、地形坡度、沟谷)、降雨、人类工程活动, 通过统计分析, 完成滑坡发育分布与各个单因素间的关系探究。基于以上研究, 结合敏感性分析模型, 针对连续变量影响因素、线状影响因素和离散变量影响因素, 分别计算单因子不同状态的敏感性系数, 并对敏感性系数相近的状态进行归类, 分析不同类型状态的敏感性差异, 完成恩施地区滑坡成生条件研究。本文研究成果可在一定程度上指导研究区滑坡防治规划。

关键词: 恩施地区; 滑坡; 成生规律; 影响因素; 敏感性系数

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2017)02-0001-09

Development regularity of landslides in Enshi area

PENG Lijuan, WU Yiping, WANG Fei, LI Yaonan

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: Landslides happen frequently in Enshi. To reveal the development regularity of landslides in this area, the spatial and temporal distribution characteristics of the landslides are analyzed, according to the basing geology investigation and landslide geology research achievements. Based on the typical landslide influencing factors including lithology, geological structure, landform (altitude, slope and valley), rainfall as well as human engineering activities, connections between landslides and every influencing factors are studied through statistical analyzing. On account of the above research, considering the susceptibility analyzing model, the susceptibility coefficients of every state of single factors can be calculated, aiming at continuous variable factors, linear factors and discrete variable factors. States with similar susceptibility coefficients are categorized together. Differences of susceptibility coefficients of diversity states are analyzed. The landslides' development condition research of Enshi area is achieved. The result of this study can be some references for landslides' prevention planning in the area.

Keywords: Enshi; landslides; development regularity; influencing factors; susceptibility coefficients

0 引言

湖北恩施地区地质灾害频繁发生, 尤以滑坡灾害

最为严重。研究滑坡灾害成生规律, 对恩施地区的防灾减灾工作具有重要的现实意义。

近年来, 有关滑坡成生规律及影响因素的研究成

收稿日期: 2016-09-27; 修订日期: 2016-11-26

基金项目: 国家自然科学基金(41572278)

第一作者: 彭丽娟(1990-), 女, 湖北巴东人, 硕士研究生, 主要从事岩土工程及工程地质相关学习及研究工作。E-mail: Plj724@sina.cn

通讯作者: 吴益平(1971-), 女, 浙江杭州人, 博士研究生, 教授, 主要从事岩土工程及工程地质相关的教学及科研工作。E-mail: ypwu@cug.edu.cn

果已较丰富。分析滑坡生成规律,通常从滑坡所处地质环境的角度出发,对滑坡的发展规律进行分析,得出滑坡的发育主要受滑坡所处的地质环境控制,包括地形地貌、地层岩性、地质构造和水文地质条件等^[1-3]。从滑坡诱发因素的角度开展滑坡发育特征的研究发现,地震作用、大气降雨及人类工程活动都会对滑坡发育产生重要影响。滑坡的发育往往是由滑坡所处地质环境和外界诱发条件共同作用的结果^[4-9]。鄂西恩施一带的区域地质背景是该地区滑坡等地质灾害时空分布、评价与预测研究的基础。

国内外学者在分析滑坡影响因素的基础上,进一步对其敏感性进行分析。目前,对敏感性分析的主要方法有单因素分析法(包括基于“JC”法、灰色关联分析法等)以及多因素分析法(滑坡确定性系数CS法、层次分析法、贡献率权重法等)。滑坡影响因素敏感性的分析对滑坡风险空间区划、滑坡灾害预测预报以及滑坡防治有重要的指导作用^[10-14]。

影响鄂西恩施地区地质灾害空间分布和生成规律的各个因素之间是相互依存又相互制约的。本研究在深入分析恩施地区3县市典型滑坡分布区滑坡地质灾害影响因素与其发育分布规律关系的基础上,完成了该区域滑坡危险性空间预测评价,揭示了研究区滑坡生成规律,为研究区滑坡防治规划提供一定的参考依据。

1 研究区地质环境概况

本文重点研究区面积约1 000 km²(图1),跨恩施市和宣恩县等县市。



图1 重点研究区位置图

Fig.1 Location of study area

恩施地区气候湿润,降水充沛。地处湖北省的鄂西南山区,总体地势西北、东南两翼高,中部低,河谷多成深峡。山脉走向、地形地貌特征严格受区域构造线控制。

恩施地区沉积盖层发育良好,除志留系上统、泥盆系下统、石炭系上统和下统缺失外,从震旦系到第四系地层均有出露,第四系零星分布,厚度不大,主要分布于河谷谷坡上。区内构造包括褶皱、断层和节理裂隙。NNE、NE向断层占绝大多数,规模大,其发育平行于褶皱轴走向,表征了区域内构造线方向。恩施地区新构造运动的总体表现为山地大面积整体隆升,地震活动及断裂活动等特征。

2 区域滑坡时空分布特征

具有不同工程地质条件的区域,滑坡的孕育和分布差异明显。不同类型的滑坡及其分布特点受控于区域特定的地理、地质环境条件。

研究区滑坡空间分布的基本特征是:(1)点多面广,具有空间集中分布特征。虽然本区滑坡数量较多,但其空间分布并非均匀的散布在全区,而是表现出一定的空间集中性;(2)空间排布具有定向性。滑坡灾害点密集分布区,受地层和河流沟谷的控制,在空间上呈现出一定的带状分布特征,具优选展布方向,多呈NE-NNE向展布,次为NNW向群聚展布。

研究区滑坡空间分布的基本特征是:(1)区内滑坡的年际分布十分不均匀,表现出很强的群发性和不规则的周期性,这与剧烈的人类工程与降雨联合作用有密切关系;(2)滑坡月际分布具有明显的差异性,主要表现为时间的一致性。滑坡灾害多在每年雨季密集发生。在强降雨驱动下,滑坡与降雨时间几乎一致,本区滑坡灾害主要发生在6~8月份。

3 滑坡成因规律与控制 and 影响因素分析

3.1 滑坡生成与地层岩性之间的关系

滑坡生成与其所处地层岩性具有密切关系。研究区滑坡灾害点分布与地层岩性关系见图2。

通过对研究区119个滑坡进行分析,滑坡在志留系地层及三叠系巴东组地层中表现出最为明显的偏好,滑坡最为发育,占整个滑坡的71%;白垩系、泥盆系和石炭系地层中,滑坡数量占滑坡总数的13%;其它地层发育滑坡总和为16%。研究区滑坡灾害点分布与地层岩性统计结果见图3。

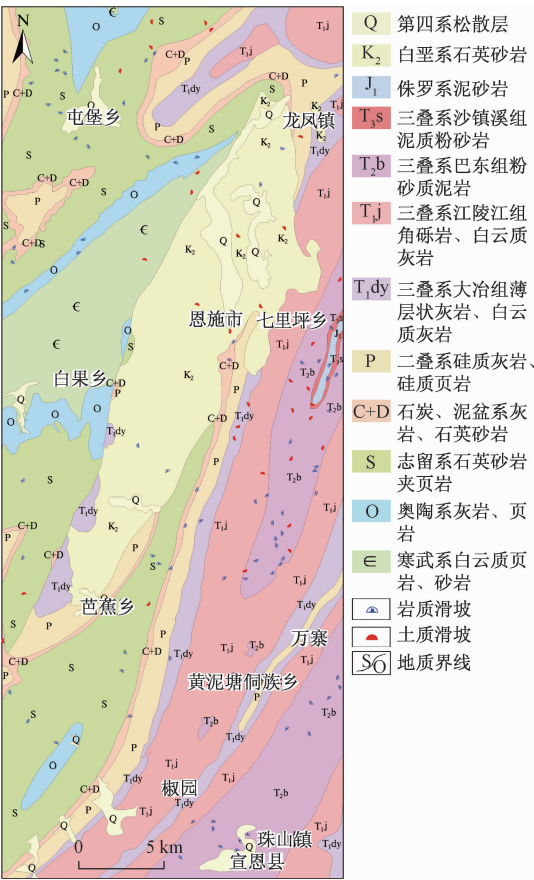


图 2 滑坡灾害分布与岩组分布图

Fig. 2 Distribution map of landslide and formation

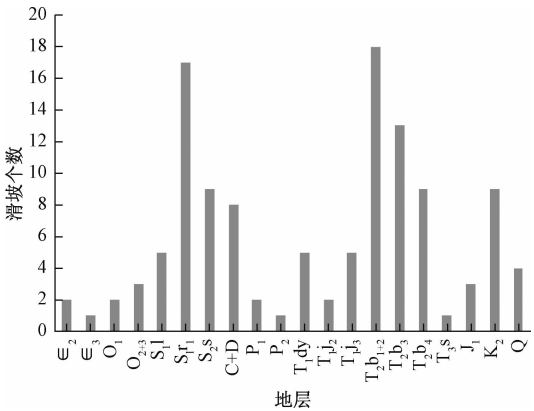


图 3 滑坡与地层关系图

Fig. 3 The relationship of landslide and formation

滑坡多发生在软岩或含有软弱面的岩层中。志留系和巴东组岩性以软弱岩为主,为易滑地层。第四系地层中滑坡灾害有增加的趋势,主要是该区人为的不合理活动导致滑坡灾害的增加。恩施地区其它地层以中厚层至厚层状灰岩为主,岩性较好,发育的滑坡地质灾害较少。

3.2 滑坡生成与地质构造之间的关系

地质构造是滑坡灾害发生的重要制约因素,其中

以断裂的作用最为明显。研究区断裂带出露宽度多在 50 m 以内,少数可达 100 m。以断层线为中心,大断层按照 250 m,小断层按照 50 m 的距离生成缓冲带,得到滑坡与断层之间的空间关系。滑坡灾害点分布与断层缓冲区关系见图 4。

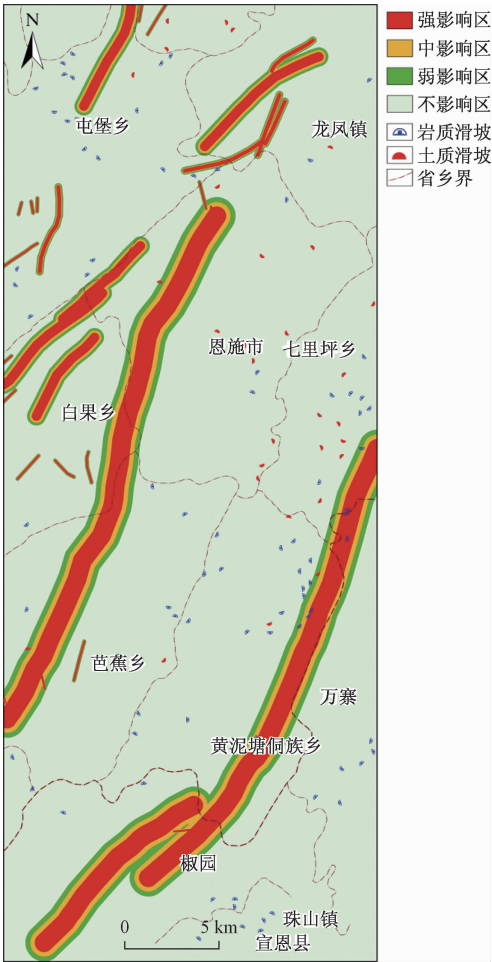


图 4 滑坡灾害分布与断层影响分布图

Fig. 4 Distribution map of landslide and influence zone of fault

研究区滑坡灾害点分布与断层距离统计结果见图 5。从图中可以看出距离断层 200 ~ 250 m 滑坡分布最多,在 350 ~ 500 m 范围内滑坡分布较多。

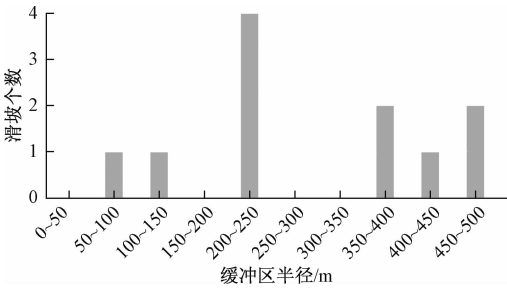


图 5 滑坡与断层距离统计关系图

Fig. 5 The relationship of landslide and influence zone of fault

分析表明,随着离断层距离的增大,滑坡灾害发生的概率表现出先上升后下降的趋势。滑坡灾害密集的区域往往是两组或多组断层相交的地段。

3.3 滑坡生成与地形地貌之间的关系

3.3.1 滑坡生成与高程的关系

区内滑坡在不同高程的分布数量有很大差异,表现出一定高程上的集中性(图6)。

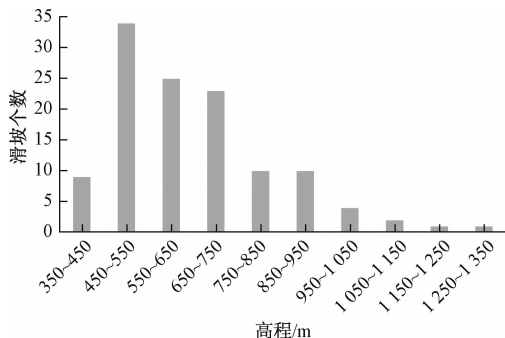


图6 滑坡与高程关系图

Fig.6 The relationship of landslide and altitude

分析得到,研究区地形高程为350~1500 m,滑坡分布最密集的高程范围在海拔450~750 m之间,占滑坡总数的68.9%,滑坡分布最密集的高程范围为恩施地区人类活动最频繁与地形坡度较陡的范围。海拔高程小于350 m的地区,由于地形起伏较小,不容易形成滑坡;海拔高程大于750 m的地区由于人类活动少且植被覆盖率大,滑坡数量亦较少。

3.3.2 滑坡生成与地形坡度的关系

地形坡度是导致滑坡发生的主要原因之一。根据研究区滑坡坡度特征和滑坡发育情况,将滑坡坡度分为区间 $\leq 10^\circ$ 、 $10^\circ \sim 15^\circ$ 、 $15^\circ \sim 20^\circ$ 、 $20^\circ \sim 25^\circ$ 、 $25^\circ \sim 30^\circ$ 、 $30^\circ \sim 35^\circ$ 、 $35^\circ \sim 40^\circ$ 、 $\geq 40^\circ$ 。

根据滑坡坡度分区,利用GIS软件中的标识功能分析得到各斜坡段滑坡个数见图7。

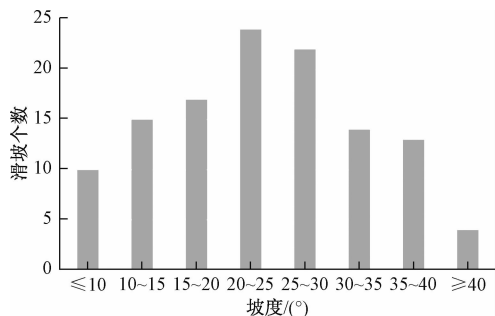


图7 滑坡与斜坡坡度关系图

Fig.7 The relationship of landslide and slope

分析得到,原始地形坡度为 $20^\circ \sim 30^\circ$ 的地区滑坡

发育较多;地形坡度为 $10^\circ \sim 20^\circ$ 与 $30^\circ \sim 40^\circ$ 之间发育的滑坡次之,在该坡度范围内主要发育古滑坡坡体,由于原始地形发生滑动后使坡度减小,该类型滑坡目前整体处于基本稳定状态。

结果表明, $10^\circ \sim 15^\circ$ 和 $15^\circ \sim 20^\circ$, $20^\circ \sim 25^\circ$ 和 $25^\circ \sim 30^\circ$ 以及 $30^\circ \sim 35^\circ$ 和 $35^\circ \sim 40^\circ$ 两两区间之间滑坡个数相差不大,初步将上述区间两两组合,利用GIS软件重分类得到分布图图8。

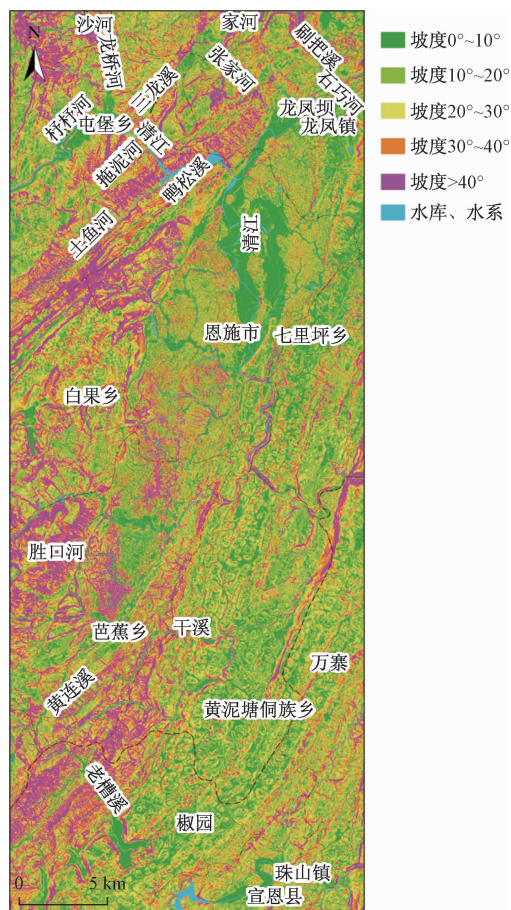


图8 滑坡灾害分布与坡度分布图

Fig.8 Distribution map of landslide and slope

研究区滑坡主要发育在 $10^\circ \sim 35^\circ$ 坡度范围内。滑坡规模越大,其分布的斜坡坡度区间越狭小,反之,规模越小的滑坡,其分布的斜坡坡度区间越大。本区大型和巨型滑坡集中分布在 $15^\circ \sim 40^\circ$ 范围内,滑坡发育的规模越小,滑坡所处的坡度区间上限值越大。

3.3.3 滑坡生成与沟谷的关系

沟谷地貌其地形切割大,坡度较陡,边坡稳定性差,常常发育滑坡地质灾害(图9)。

分析表明,研究区87.8%的滑坡沿沟谷分布,且NE-NNE向延伸的纵谷两侧滑坡灾害数量多于NW-NNW向延伸的横谷。原因在于NE-NNE向构造是本区

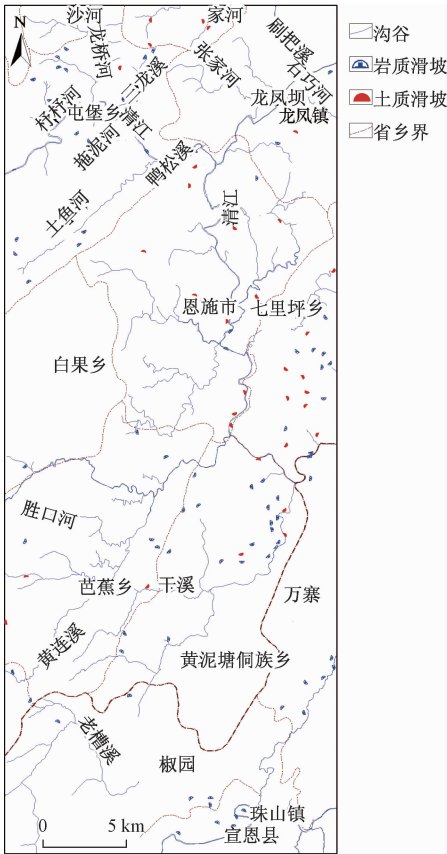


图 9 滑坡分布与冲沟分布图

Fig. 9 Distribution map of landslide and valley

的主体构造,此方向的纵向裂隙比 NW-NNW 向横向断裂更为发育,破碎的断裂带易于为流水侵蚀形成沟谷。

沟谷对滑坡空间分布控制的另一个表现为,当沟谷纵向穿越易滑地层时,沟谷两侧滑坡数量陡然增多,且表现出一定的空间展布优选方向,显示出明显的地貌-地层叠加效应。

3.4 滑坡生成与降雨之间的关系

本研究在分析多年降雨量、滑坡的发生时间及规模的基础上,探究降雨类型对鄂西恩施地区滑坡生成规律。本研究把恩施地区的降雨类型分为以下五类:

A:滑坡发生前期无连阴雨当日有大雨或暴雨,即滑坡发生时,前期无 4~5 天的连阴雨,而在滑坡发生当日有大于或等于 25 mm 的降雨;

B:滑坡发生前期有连阴雨当日无大雨或暴雨,即滑坡发生前期有 4~5 天的连阴雨,而在滑坡发生当日无大于或等于 25 mm 的降雨;

C:滑坡发生前期有连阴雨且当日有大雨或暴雨,即在滑坡发生时,不仅前期有 4~5 天的连阴雨,而且当日有大于或等于 25 mm 的降雨;

D:滑坡发生前期有大雨或暴雨无连阴雨当日无

雨,即在滑坡发生前五天内没有 4~5 天的连阴雨但是有至少一次大于或等于 25 mm 的降雨,而在滑坡发生当日无雨;

E:滑坡发生前期无大雨或暴雨无连阴雨且当日无雨,即在滑坡发生前五天内没有 4~5 天的连阴雨也没有一次性大于或等于 25 mm 的降雨,且在滑坡发生当日无雨。

不同的降雨类型引起的滑坡数量不同,数量关系见图 10。

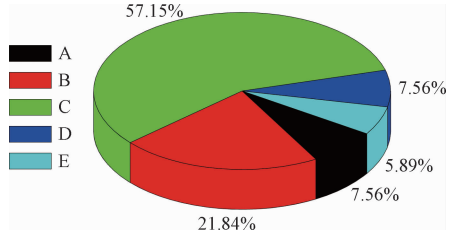


图 10 不同降雨类型引起的滑坡占总样本的比例

Fig. 10 Landslides caused by different rainfall patterns in proportion to the total sample

(1)A 类滑坡有 9 处,占样本的 7.56%。A 类滑坡主要是当发生强降雨时,雨水迅速渗入滑坡体内,使得滑体地下水位迅速上升,滑坡土体在短时间内达到饱和。坡体的岩性主要为灰岩夹页岩,整体渗透性较差,降雨使滑体自重增大,同时岩土体孔隙水压力上升,降低了斜坡物质的抗滑力,使得该滑坡稳定性降低,最终滑动。如龙凤老煤场滑坡(图 11)。

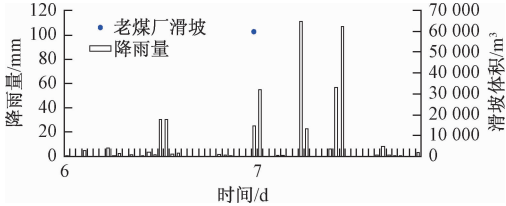


图 11 恩施 1977 年 6、7 月降雨量与老煤场滑坡关系图

Fig. 11 The relationship between rainfall and the Old Coal Plant in Enshi area in June and July, 1977

(2)B 类滑坡有 26 处,占样本的 21.84%,是较常见的类型。B 类滑坡主要出露基岩为志留系灰绿色中厚层砂岩、粉砂岩和页岩,岩性软弱易风化,各种裂隙十分发育,破碎程度高,整体性差,大气降雨入渗致使滑带、滑体在地下水的浸泡中软化。滑体中静水压力增大,滑体重量增加,滑坡体软弱层抗滑力降低。滑坡的滑动时间与降雨时间相比存在一定的滞后性,这是由于地下水位的波动一般滞后于降雨过程 0.5~1 天,因此滑坡发生当日虽然没有暴雨,但之前的连阴雨同

Fig. 12 The relationship between rainfall and the Baozha Landslide in Enshi area in July, 1960

(3) C 类是最为常见的滑坡类型,共 68 处,占样本的 57.14%。影响 C 类滑坡稳定性的主要因素为大气降雨,该类滑坡滑移前,不仅前期有 4~5 天的连阴雨,而且当日有大于或等于 25 mm 的降雨。坡体岩性软弱,滑坡发生滑移之前连续降雨使坡体中地下水位抬高,土体经浸泡软化,而滑坡发生当日的大暴雨为滑坡的滑移起了推动作用,增大了坡体自重,加速了坡体的滑动。屯堡杨家山滑坡为 C 类滑坡中的代表(图 13)。

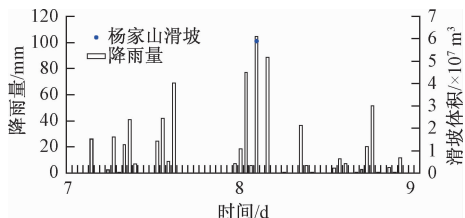


Fig.13 The relationship between rainfall and the Yangjiashan Landslide in Enshi area in July and August, 1996

(4) D类滑坡有9处,占了样本的7.56%,且主要集中在万寨地区,万寨地区出露的主要地层为三叠系巴东组砂岩,在暴雨情况下,降雨直接冲刷坡体表面,下部砂岩不透水使降雨停留在上部松散土层,松散土层饱和,滑坡发生。

分析可知:(1)降雨是影响鄂西恩施地区滑坡的主要因素,由降雨引发的滑坡占了样本的 94.11%。(2)不同的降雨类型诱发滑坡的机理有所不同,在有连续阴雨情况下,坡内应力状态发生改变,滑坡土体软化,大量滑坡发生滑动,暴雨对滑坡则主要起了冲刷下蚀进而改变前缘边界条件的作用,而在连阴雨加暴雨的情况下,滑坡更易发生大面积滑动。(3)C 类降雨类型最容易导致滑坡;其次是 B 类降雨类型;相对于以上两种情况,A 类及 D 类降雨类型引起的滑坡较少,最少情况为 E 类降雨类型。

恩施地区滑坡地质灾害受人类经济工程活动影响明显。人类活动对滑坡的影响主要包括农田灌溉、修建水库、爆破、机械振动、切坡、加载、植被破坏和矿产开采等(图 14)。

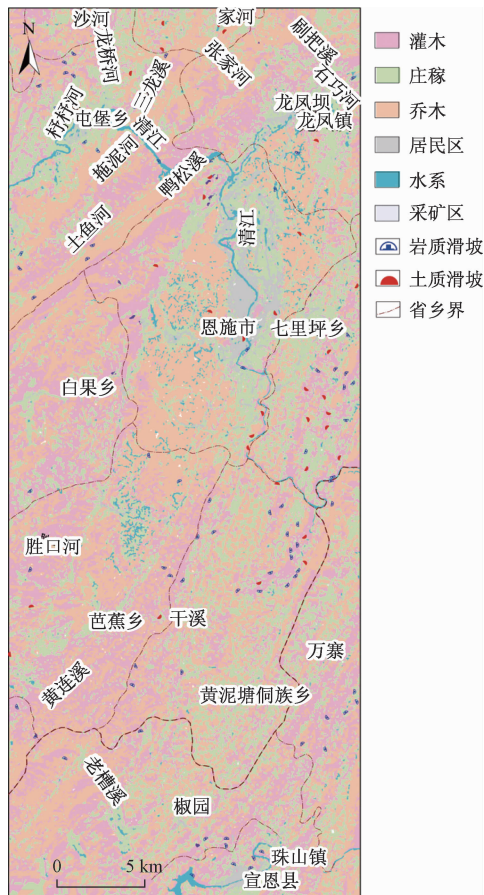


Fig.14 Distribution map of landslide and land-use type

研究区内促进滑坡地质灾害的人类经济工程活动主要为修路和建房切坡,其次为矿业开采及早期的毁林开垦和兴建水利水电工程。

分析得到,部分滑坡由于受水系、构造控制,与公路的相关性较小,除此之外大部分滑坡都沿公路两侧分布。318、209 国道线附近,较为频繁的人类工程活动扰动了当地的地质环境,加之该区域原始山体稳定性较差,故该区段为恩施地区滑坡重灾区(图 15)。



图 15 研究区滑坡点分布与道路分布图
Fig. 15 Distribution map of landslide and road

4 滑坡控制和影响因素敏感性分析

恩施地区的滑坡灾害发育特征受地形地貌、岩土类型、地质结构控制,受土地利用情况、人类工程活动、降雨等因素影响。其中对恩施地区滑坡灾害分布控制和影响最大的是岩土类型、地形坡度、坡体结构及人类工程活动强度。

斜坡坡度、地面高程是连续变量,公路及沟谷均属于线状因素,其他影响因素则是离散变量。对影响因素进行敏感度分析,以确定各影响因素状态划分。其公式如下:

$$SC_i = \ln \left(\frac{\frac{N_i}{A_i}}{\frac{N}{A}} \right) \tag{1}$$

式中: N_i ——滑坡灾害在某类因子第 i 区段(类型)中的个数;
 A_i ——某类因子第 i 区段的面积/ km^2 ;
 N ——研究区内滑坡灾害总数;
 A ——研究区总面积/ km^2 。

4.1 连续变量的敏感性分析

以地形等高线图为基础,等高线每 100 m 提取高程点数据,形成 TIN 模型。根据 TIN 模型分为 9 个坡度分级区间: $0^\circ \sim 10^\circ$ 、 $10^\circ \sim 15^\circ$ 、 $15^\circ \sim 20^\circ$ 、 $20^\circ \sim 25^\circ$ 、 $25^\circ \sim 30^\circ$ 、 $30^\circ \sim 35^\circ$ 、 $35^\circ \sim 40^\circ$ 、 $40^\circ \sim 90^\circ$ 。滑坡灾害与地形坡度敏感性系数 SC 的计算结果见表 1。

表 1 滑坡灾害坡度敏感性系数
Table 1 The sensitive coefficient of slope

坡度/(°)	滑坡个数	面积	N_i/A_i	N/A	SC
0 ~ 10	10	116.30	0.086 0	0.119	-0.32
10 ~ 15	15	98.66	0.152 0		0.25
15 ~ 20	17	100.16	0.169 7		0.36
20 ~ 25	24	76.83	0.312 4		0.97
25 ~ 30	22	85.17	0.258 3		0.78
30 ~ 35	14	95.84	0.146 1		0.21
35 ~ 40	13	89.88	0.144 6		0.20
40 ~ 90	4	337.16	0.011 9		-2.31

敏感性系数值的大小表征了滑坡在该区域发生的可能性。根据坡度敏感性系数结果, $20^\circ \sim 25^\circ$ 及 $25^\circ \sim 30^\circ$ 坡度范围敏感性系数相应较高,表征该坡度范围内滑坡发生的几率较大。而坡度 $0^\circ \sim 10^\circ$ 、 $40^\circ \sim 90^\circ$ 范围内的斜坡地带,敏感性系数相对较低,不易发生滑坡。

根据敏感性系数值的差异性,将斜坡坡度分成五种状态: $0^\circ \sim 10^\circ$ 、 $10^\circ \sim 20^\circ$ 、 $20^\circ \sim 30^\circ$ 、 $30^\circ \sim 40^\circ$ 和 $40^\circ \sim 90^\circ$ 。这一结果与 3.3.2 中初步划分结果吻合。

4.2 线状影响因素的敏感性分析

公路和冲沟属于线状因素。运用 GIS 缓冲区分析功能,按照 100 m 的间距缓冲区进行统计,得到滑坡灾害与水系影响距离 SC 值(表 2)。

通过分析沟谷影响距敏感性系数得到,在 0 ~ 400 m 范围内,滑坡发生最多,属密集区。同一状态下,滑坡发育程度相差不大;不同状态下,滑坡发育程度相差较大。滑坡多分布在距沟谷 400 m 范围内,在 400 m 外相对较少,因而沟谷影响半径为 400 m。这主要是由于沟谷地貌其地形切割大,坡度较陡,边坡稳定性差,有利于滑坡地质灾害的发育。

表 2 滑坡灾害沟谷影响距敏感性系数

Table 2 The sensitive coefficient of the buffer strip of valley

距离/m	滑坡个数	面积	N_i/A_i	N/A	SC
0 ~ 100	11	18.26	0.602 3	0.119	1.62
100 ~ 200	19	32.98	0.576 1		1.58
200 ~ 300	14	47.44	0.295 1		0.91
300 ~ 400	23	62.21	0.369 7		1.13
400 ~ 500	17	76.09	0.223 4		0.63
500 ~ 600	10	90.65	0.110 3	-0.08	-0.08
600 ~ 700	8	104.16	0.076 8		-0.44
> 700	17	568.21	0.029 9		-1.38

滑坡灾害与公路影响距离 SC 值见表 3。

表 3 滑坡灾害公路影响距敏感性系数

Table 3 The sensitive coefficient of the buffer strip of road

距离/m	滑坡个数	面积	N_i/A_i	N/A	SC
0 ~ 100	16	41.01	0.390 1	0.119	1.19
100 ~ 200	15	64.29	0.233 3		0.67
200 ~ 300	16	91.14	0.175 6		0.39
300 ~ 400	11	119.26	0.092 2		-0.25
400 ~ 500	21	142.63	0.147 2		0.21
500 ~ 600	11	169.85	0.064 8	-0.61	-0.61
600 ~ 700	21	157.95	0.133 0		0.11
> 700	8	213.87	0.037 4		-1.16

通过分析公路影响距敏感性系数,可将公路影响距分成三种状态:0 ~ 300 m(密集区)、300 ~ 700 m(较密集区)及大于 700 m(不密集区)。在公路影响半径 300 m 范围内,频繁的人类工程活动扰动了当地的地质环境,诱发了滑坡的发生。

4.3 离散变量的敏感性分析

地层岩性及人类工程活动中土地利用类型都属离散变量,据公式 1 可得地层岩组敏感性分析见表 4。

表 4 滑坡灾害地层岩组敏感性系数

Table 4 The sensitive coefficient of formation

岩性	滑坡个数	面积/km ²	N_i/A_i	N/A	SC
ε	3	72.01	0.041 7	0.119	-1.05
O	5	43.70	0.114 4		-0.04
S	31	223.90	0.138 5		0.15
C + D	8	36.31	0.220 3		0.62
P	3	86.65	0.034 6		-1.23
T ₁ dy	5	74.54	0.067 1		-0.57
T ₁ j	7	181.98	0.038 5		-1.13
T ₂ b	40	105.10	0.380 6		1.16
T ₃ s	1	2.18	0.458 6		1.35
J	3	2.00	1.499 5		2.53
K	9	137.45	0.065 5	-0.60	-0.60
Q	4	34.18	0.117 0		-0.02

根据滑坡灾害岩性敏感性系数值分析,可将岩性分为 5 个岩组:块状硬岩组(T₃s)、层状硬岩组(ε、P、T₁j、J)、层状硬岩夹软弱岩组(C + D、T₁dy、O、K)、层状软弱

岩组(S、T₂b)及松散体(Q)。其中,硬质岩组中滑坡发育程度较低,尤以块状硬质岩组最为明显。而层状软弱岩组中滑坡发育程度高,该岩组是滑坡发育的有利岩组。同理可得土地利用类型敏感性系数值(表 5)。

表 5 滑坡灾害土地利用类型敏感性系数

Table 5 The sensitive coefficient of land-use type

土地类型	滑坡个数	面积/km ²	N_i/A_i	N/A	SC
采矿区	0	0.36	0	0.119	-
灌木	34	308.03	0.110 4		-0.08
乔木	42	388.90	0.108 0		-0.10
水系	3	17.15	0.174 9		0.39
居民区	7	33.42	0.209 5		0.57
庄稼	33	252.13	0.130 9	0.10	0.10

分析得到,植被区(乔木、灌木)敏感性系数均相对较小,由于植被覆盖,滑坡发育程度减小,这与实际是符合的。而庄稼区由于人类开垦降低土体稳定性,故较植被区敏感性系数更高,更容易发生滑坡。而居民区则由于人类工程活动的影响大大增加了滑坡发生的概率,敏感性系数最高。水系的冲刷也在一定范围内增大了滑坡发生的概率。

5 结论

通过对恩施地区滑坡灾害地质资料的分析和统计,选择典型滑坡分布区研究滑坡地质灾害影响因素与其发育分布规律关系,并进一步利用层次分析法完成了该区域滑坡危险性空间预测评价。本次研究主要结论如下:

(1)研究区滑坡空间分布点多面广,集中分布。在空间上呈现出一定的带状分布特征,多呈 NE-NNE 向展布,次为 NNW 向群聚展布。区内滑坡年际分布十分不均匀,月际分布具有明显的差异性,多在每年雨季密集发生。

(2)层状软弱岩组志留系及三叠系巴东组地层是滑坡发生的主要分布地层;第四系地层中滑坡灾害有增加的趋势。滑坡灾害主要集中在中、低山坡度较缓的斜坡地带,而中山槽谷及山间平地分布较少;本区高、中山槽谷一般不易发生滑坡灾害,与其岩性条件有着密切的关系。

(3)滑坡灾害与断裂在空间上具有一定空间相关性,滑坡发育一般离断层有一定距离。随着离断层距离的增大,滑坡灾害发生的概率表现出先上升后下降的趋势。

(4)降雨是诱发本区滑坡最主要的因素,所形成的滑坡规模大、分布广;其次因道路和切坡所诱发的滑坡呈线状或点状分布。

(5)根据敏感性系数分析,滑坡发生概率较大的区段分别是坡度范围 20° ~ 30°、沟谷影响距离在

400 m范围内、公路影响距离在300 m范围内、层状软弱岩组志留系与三叠系巴东组地层以及人类工程活动较大的区域范围内,定量上验证了本文对恩施地区滑坡生成规律与影响因素的影响的分析,同时为恩施地区滑坡空间危险性预测的实现提供了一定的依据。

参考文献:

- [1] 薛凯喜,胡艳香,邹玉亮,等. 近十年中国地质灾害时空发育规律分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2016,27(3):90-97.
XUE Kaixi, HU Yanxiang, ZOU Yuliang, et al. Temporal-spatial distribution discipline of geological disaster in China in recent ten years [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016,27(3):90-97.
- [2] 李永红,刘海南,范立民,等. 陕西榆神府生态环境脆弱区地质灾害分布规律[J]. 中国地质灾害与防治学报,2016,27(3):116-121.
LI Yonghong, LIU Hainan, FAN Limin, et al. Distribution of geological hazards in Yushenfu ecological environment fragile area [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016,27(3):116-121.
- [3] 祁生文,许强,刘春玲,等. 汶川地震极重灾区地质背景及次生斜坡灾害空间发育规律[J]. 工程地质学报,2009,17(1):39-49.
QI Shengwen, XU Qiang, LIU Chunling, et al. Slope instabilities in the severest disaster areas of 5.12 Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2009,17(1):39-49.
- [4] 张茂省,李同录. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究[J]. 工程地质学报,2011,19(4):530-540.
ZHANG Maosheng, LI Tonglu. Triggering factors and forming mechanism of loess landslides [J]. Journal of Engineering Geology, 2011,19(4):530-540.
- [5] 王洁. 奉节县新址主城区复杂地质体成因机制研究及稳定性评价[D]. 成都理工大学,2011.
WANG Jie. Formation mechanism study and stability evaluation of the complex geology in new main site of Fengjie County [D]. Chengdu University of Technology, 2011.
- [6] Jemec M, Komac M. Rainfall patterns for shallow landsliding in perialpine Slovenia [J]. Natural Hazards, 2013, 67(3): 1011-1023.
- [7] 黄润秋. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报,2007,25(3):433-454.
HUANG Runqiu. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since 20th century [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007,25(3):433-454.
- [8] 王鼎,王兰民. 河谷地区黄土地震滑坡特征与影响因素分析[J]. 岩土工程学报,2013,35(S1):434-438.
WANG Nai, WANG Lanmin. Characteristics and influencing factors of seismic loess slopes in valley areas [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013,35(S1):434-438.
- [9] 易武,黄鹏程. 湖北省杉树槽滑坡成因机制分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2016,35(3):1-6.
YI Wu, HUANG Pengcheng. Formation mechanism of Shashucao landslide in Hubei Province [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2016,35(3):1-6.
- [10] 许冲,徐锡伟,于贵华,等. 玉树地震滑坡影响因子敏感性分析[J]. 科技导报,2012,30(1):18-24.
XU Chong, XU Xiwei, YU Guihua, et al. Susceptibility analysis of impact factors of landslides triggered by Yushu earthquake [J]. Science & Technology Review, 2012,30(1):18-24.
- [11] 吴森,李虎杰,陈国辉,等. 基于贡献率权重法的区域滑坡影响因子敏感性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2016,27(1):26-31.
WU Sen, LI Hujie, CHEN Guohui, et al. Regional landslides influence factors sensitivity analysis based on contributing weight method [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016,27(1):26-31.
- [12] 张艳博,张国锋,田宝柱,等. 露天煤矿边坡稳态影响因子敏感性分析及滑坡控制对策[J]. 煤炭工程,2011,43(5):105-107+110.
ZHANG Yanbo, ZHANG Guofeng, TIAN Baozhu, et al. Sensitivity analysis on static influence factor of open mine slope and landslide control measures [J]. Coal Engineering, 2011,43(5):105-107+110.
- [13] 杨德宏,范文. 基于ArcGIS的地质灾害易发性分区评价——以旬阳县为例[J]. 中国地质灾害与防治学报,2015,26(4):82-86+93.
YANG Dehong, FAN Wen. Zoning of probable occurrence level of geological disasters based on ArcGIS—a case of Xunyang [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015,26(4):82-86+93.
- [14] 吴益平,张秋霞,唐辉明,等. 基于有效降雨强度的滑坡灾害危险性预警[J]. 地球科学(中国地质大学学报),2014,39(7):889-895.
WU Yiping, ZHANG Qiuxia, TANG Huiming, et al. Landslide hazard warning based on effective rainfall intensity [J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2014,39(7):889-895.