

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.01.10

鄂西北中部地区滑坡孕灾模式分析

陆文博^{1,2}, 晏鄂川², 王 杰², 李庆伟², 朱正虎²

- (1. 贵州省水利水电勘测设计研究院, 贵州 贵阳 550002;
2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 鄂西北地区滑坡地质灾害发育丰富。根据滑坡分布发育特征,选取 3 个非连续变量和 10 个连续变量,从不同角度揭示鄂西北地区滑坡孕灾模式。基于 3 个非连续变量的统计分析,识别出四大类孕灾模式为:孕灾模式 A(碎石土+志留系碎屑岩)、孕灾模式 B(碎石土+武当群片岩)、孕灾模式 C(岩质+顺向坡)、孕灾模式 D(岩质+顺向斜交坡)。基于 10 个连续变量的敏感性分析,识别孕灾模式,结果表明:滑坡发育前缘高程主要集中在 260~455 m 高程段,且多为体积 $1.6 \sim 2.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的小型滑坡,剖面上具有整体坡度 $14.4^\circ \sim 43.2^\circ$ 的特点,发育岩层倾角 $16^\circ \sim 28^\circ$ 。综合连续变量与非连续变量,获得区内滑坡的 12 类典型孕灾模式,为鄂西北地区滑坡区域孕灾机理研究提供参考。

关键词: 鄂西北;滑坡;分布发育特征;连续变量;孕灾模式

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)01-0060-07

Landslide pregnancy pattern of central area in northwest Hubei

LU Wenbo^{1,2}, YAN Echuan², WANG Jie², LI Qingwei², ZHU Zhenghu²

- (1. Guizhou Survey & Design Research Institute for Water Resources and Hydropower, Guiyang, Guizhou 550002, China;
2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: The landslide geological hazards happen frequently in northwest Hubei Province. According to the characteristics of landslide distribution and development, 3 discontinuous variables and 10 continuous variables are selected to reveal the landslide pregnancy mechanism in northwest Hubei Province. Based on the statistical analysis of three discontinuous variables, four types of pregnancy patterns are identified as: pregnancy pattern A (soil + bedrock (Silurian sandstone)), pregnancy pattern B (soil + bedrock (Wudang schist)), pregnancy pattern C (rock + consequent slope), and pregnancy pattern D (rock + consequent oblique-cross slope). Based on the sensitivity analysis of 10 continuous variables, identification of disaster development pattern is conducted, the results of which show that the front elevation of the landslide is mainly concentrated in the 260~455 m elevation section, and most of them are small landslides with the volume of $1.6 \times 10^4 \sim 2.8 \times 10^4 \text{ m}^3$, whose profile slope is $14.4^\circ \sim 43.2^\circ$, and the dip angle of strata is $16^\circ \sim 28^\circ$. Combined with continuous variables and discontinuous variables, 12 typical pregnancy pattern in the region are obtained, which provides a reference for the study on regional landslide pregnancy mechanism in Northwest Hubei.

Keywords: northwest Hubei; landslide; characteristics of distribution and development; continuous variables; disaster pregnancy pattern

收稿日期: 2017-04-24; 修订日期: 2017-04-26

第一作者: 陆文博(1992-),男,湖北孝昌人,硕士研究生,主要从事岩土体稳定性评价与利用方面的学习与研究工作。E-mail: lwblwb21@126.com

0 引言

一般情况,滑坡形成、发展到消亡的孕育过程,均受到多种内外因素的综合影响。内因包括地形地貌、地层岩性、地质构造、地表地下水条件等;外因包括降雨、新构造运动与地震、人类活动等。

不同区域,具有自身的地质环境特点,造成滑坡灾害分布与发育特征各不相同。区域滑坡灾害分布发育特征相关研究,主要有三方面。不同空间^[1-7]:(1)基于不同行政区的滑坡分布发育特征;(2)基于不同影响因素分区(地层岩性分区、地形地貌分区、地质构造分区、水文地质分区、人类活动分区等)的滑坡分布发育特征。不同时间^[2-4,8]:(1)基于不同年份的滑坡分布发育特征(一般分析滑坡发生与人类活动、风化作用等相关关系);(2)基于不同季节的滑坡分布发育特征(一般分析滑坡发生与降水活动、库水位升降等相关关系)。不同滑坡要素和其他^[6,9-11]:(1)基于不同滑坡要素分类(物质组成、规模、高程、坡度、斜坡结构和形态)的滑坡分布发育特征;(2)基于不同边界条件、力学性质等的滑坡分布发育特征。

根据区域上滑坡的分布发育规律,可分析滑坡孕灾模式,现有研究主要基于区域上的滑坡影响因素^[12-14]或滑坡的发育要素^[15-17]。由于不同区域发育的滑坡类型各有不同,所以大多学者由此出发,根据研究区的特点,选取具有代表性的滑坡影响因素或滑坡发育要素,利用以多因素为对象的模糊分析方法等,定量分析滑坡各孕育特点的规律,揭示研究区滑坡孕育模式和机理。

本文利用鄂西北中部地区南漳、保康、谷城三县 670 处滑坡调查的基础数据,详细分析滑坡分布发育的六大方面,基于连续变量敏感性分析和非连续变量总结,完成区内滑坡孕灾模式识别,为鄂西北地区滑坡发育特征和区域地质灾害孕灾机理研究提供参考。

1 滑坡分布发育特征及分类

根据最近一次南漳县、保康县、谷城县 1:50 000 地质灾害详细调查成果表明,截至 2015 年年底,区内各类地质灾害一千余处,其中以滑坡最为发育,共 670 处,崩塌 101 处,其他为地面塌陷、泥石流、不稳定斜坡等地质灾害。据搜集的研究区滑坡灾害资料情况,将滑坡分布及发育特征归纳为表 1。灾害点分布情况见图 1。

通过表 1、图 1 统计信息,可知在滑坡中,系统内

部各项要素的不同组合,构成了具有不同状态的系统。对于滑坡系统,可认为不同类型的滑坡对应不同的孕灾模式。总之,具有相近孕灾要素组合的相似滑坡系统,可归为同一类孕灾模式滑坡。

表 1 滑坡分布与发育特征统计表

Table 1 Landslide characteristics of distribution and development statistics

特征类型	滑坡分布发育特征	滑坡统计数量/处
分布特征	时间	始发年 650
		始发月 639
	高程	前缘 490
		后缘 490
	滑体	滑体性质 670
		岩层倾向 646
	滑床	岩层倾角 643
		斜坡结构 611
		地层岩性 663
发育特征	规模	长度 490
		宽度 490
		面积 670
		体积 670
	形态	平面 670
		剖面 670
		总体坡度 670
		主滑方向 669

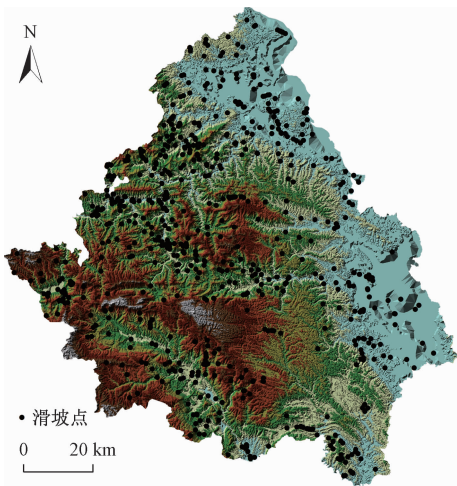


图 1 南保谷三县滑坡分布图

Fig. 1 Landslide distribution map in Nanzhang, Gucheng and Baokang County

根据不同的滑坡分布及发育特征对应的变量,将其分别归类为连续变量和非连续变量。表 1 中涂灰的变量为连续变量,其余为非连续变量。将所有连续变量分布的区间等分为 A~Y 的 25 个等间距区段(例如所有已统计滑坡的前缘高程分布在 0~1 625 m,则将其划分为 0~65 m、65~130 m、…、1 560~1 625 m 的

25 个等级)。非连续变量则直接统计分析。二者统计分析后作为孕灾模式识别的基础。

2 非连续变量孕灾模式识别

非连续变量孕灾模式识别中,主要考虑滑体性质、地层岩性(岩组)和斜坡结构三个典型变量,统计结果见图 2。区内土质滑坡最多,共 604 处,岩质滑坡 48 处,岩土混合滑坡 18 处,分别占滑坡总量的 90.1%、7.2%、2.7%。滑床地层岩组以碎屑岩组、碳酸盐岩及变质岩组为主。区内以横向坡和顺向坡最多,分别占 30.1% 和 30.0%,其次为逆向坡和顺向斜交坡,分别占 16.5% 和 15.1% 逆向斜交坡和平缓层状坡最少。

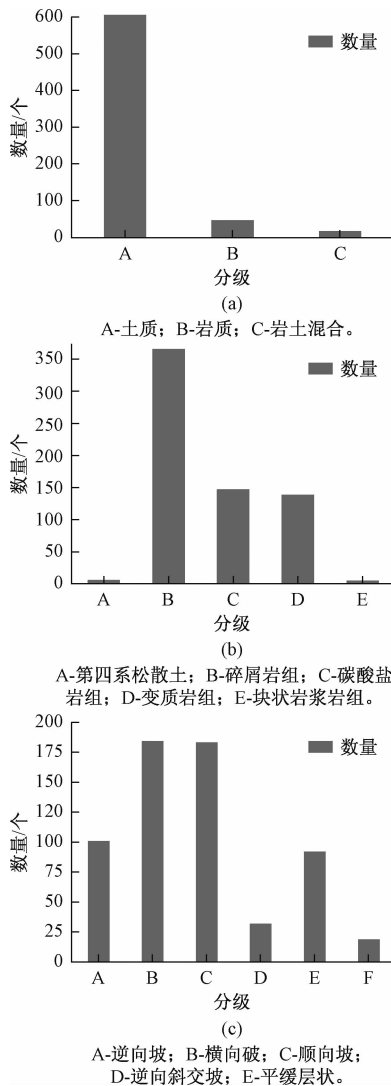


图 2 典型非连续变量统计图

Fig. 2 Typical discrete variables Statistical histogram

对于土质滑坡,志留系碎屑岩和武当群变质岩层的横向坡、顺向坡、逆向坡和顺向斜交坡,可分为 8

类。对于岩质滑坡,志留系碎屑岩层位和武当群变质岩层位岩质滑坡数量分布最多,分别占岩质滑坡总数的 22.9% 和 18.8%。研究区内岩质滑坡控滑结构面大多为碎屑岩层面和片岩片理面,以顺向坡和顺向斜交坡更易发生,故岩质滑坡典型孕灾模式可归纳为 4 类(图 3)。

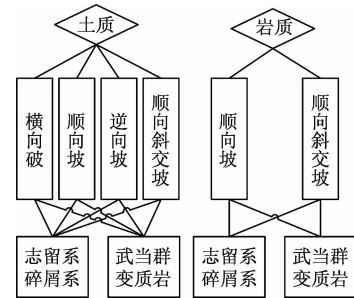


图 3 非连续变量孕灾模式分析图

Fig. 3 Pregnancy pattern analysis diagram of continuous variables

考虑到区内土质滑坡中,坡体滑床不同斜坡结构对上覆土体的稳定性影响不大,土体自身的稳定性决定了坡体是否孕育灾害或使原滑坡复活。而岩质滑坡,坡体内的结构面方向对坡体的稳定性起到巨大甚至决定性的影响。结合统计分析,以图 4 为基础,考虑滑体性质和基岩岩性归纳出孕灾模式 A、B,考虑滑体性质和斜坡结构归纳出孕灾模式 C、D,分述如下:

孕灾模式 A: 碎石土 + 志留系碎屑岩(根据不同斜坡结构可细分为 4 类);孕灾模式 B: 碎石土 + 武当群片岩(根据不同斜坡结构可细分为 4 类);孕灾模式 C: 岩质 + 顺向坡(根据滑床岩组可分为 2 类);孕灾模式 D: 岩质 + 顺向斜交坡(根据滑床岩组可分为 2 类)。

3 连续变量孕灾模式识别

3.1 识别方法

基于每个连续变量的 25 个等级(图 4),每一等级内滑坡发育的数量各不相同,可以认为每个变量的不同等级,对滑坡发生与否的贡献不同,即不同等级,对于滑坡具有不同的敏感度。对每个变量的各个等级进行敏感性分析。

图 4 中,横坐标为 A ~ Y 的 25 个不同等级编号,纵坐标为敏感性系数 S_n^m ($n = A, B, \dots, Y$):

$$S_n^m = \ln \left(\frac{\frac{a_n^m}{a_m}}{\frac{d_n^m}{d_0}} \right) \quad (1)$$

式中: m ——变量编号 ($m = 1, 2, \dots, 10$);
 n ——某变量内等级编号 ($n = A, B, \dots, Y$);
 a_n^m ——变量 m 中等级 n 内的滑坡数量;
 a_m ——具有变量 m 的已统计滑坡总数;
 d_n^m ——变量 m 中等级 n 在网格图中的面积;
 d_0 ——网格图总面积。

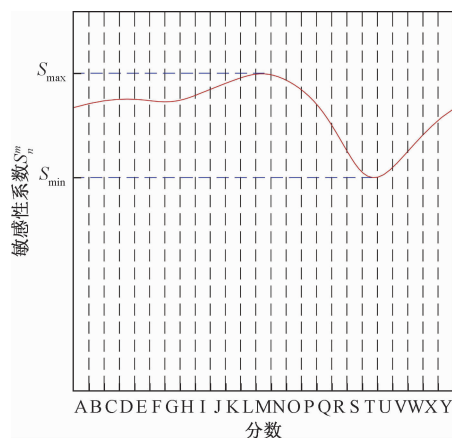


图4 连续变量分级示意图

Fig. 4 Classification diagram of discontinuous variables

计算单一变量各等级敏感性系数,并通过 ArcGIS 的平面分析功能,对每个等级(编号为 A ~ Y 的 25 个条带)赋敏感性系数值,后将其按照自然断点法分成不同等级,并以纵坐标为敏感性系数绘制敏感性系数与各等级的关系曲线见图 5。根据 10 个连续变量的敏感性分析结果,叠加其敏感性系数,获得总敏感性系数分布,进而识别连续变量孕灾模式。

3.2 单一连续变量敏感性分析

连续变量共 10 个,有前缘高程、后缘高程、岩层倾向、岩层倾角、滑坡长度、宽度、面积、体积、总体坡度和主滑方向。分别编号为 $L1$ 、 $L2$ 、 $\dots$ 、 $L10$ 。

滑坡分布的高程有滑坡前缘高程和滑坡后缘高程。统计滑坡高程分布数据,将前缘、后缘高程均划分为 $0 \sim 65 \text{ m}$ 、 $65 \sim 130 \text{ m}$ 、 $\dots$ 、 $1560 \sim 1625 \text{ m}$ 的 25 个等级。

滑坡分布的滑床,岩层倾向 $0^\circ \sim 360^\circ$ 均有分布,因此将岩层倾向划分为 $0^\circ \sim 14.4^\circ$ 、 $14.4^\circ \sim 28.8^\circ$ 、 $\dots$ 、 $345.6^\circ \sim 360^\circ$ 的 25 个等级。将岩层倾角划分为 $0^\circ \sim 3.6^\circ$ 、 $3.6^\circ \sim 7.2^\circ$ 、 $\dots$ 、 $86.4^\circ \sim 90^\circ$ 的 25 个等级。

滑坡发育规模中,将滑坡长度划分为 $0 \sim 35 \text{ m}$ 、 $35 \sim 70 \text{ m}$ 、 $\dots$ 、 $840 \sim 875 \text{ m}$ 的 25 个等级,将滑坡宽度划分为 $0 \sim 30 \text{ m}$ 、 $30 \sim 60 \text{ m}$ 、 $\dots$ 、 $720 \sim 750 \text{ m}$ 的 25 个等级。对于滑坡面积,统计发现,面积小于等于 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^2$ 的滑坡数量为 557 处,占总数的 83.1%,因此,将面积在 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^2$ 以内的滑坡作为孕灾模式识别

的对象,并将滑坡面积划分为 $0 \sim 0.1 \text{ m}^2$ 、 $0.1 \sim 0.2 \text{ m}^2$ 、 $\dots$ 、 $2.4 \sim 2.5 \text{ m}^2$ 的 25 个等级。对于滑坡体积,统计发现,小型滑坡数量为 506 处,占总数的 75.8%,因此,将面积在 $1.0 \times 10^5 \text{ m}^3$ 以内的小型滑坡作为孕灾模式识别的对象,并将滑坡面积划分为 $0^\circ \sim 0.4 \text{ m}^2$ 、 $0.4^\circ \sim 0.8 \text{ m}^2$ 、 $\dots$ 、 $9.6 \sim 10.0 \text{ m}^2$ 的 25 个等级。

滑坡发育形态中,将滑坡总体坡度划分为 $0^\circ \sim 3.6^\circ$ 、 $3.6^\circ \sim 7.2^\circ$ 、 $\dots$ 、 $86.4^\circ \sim 90^\circ$ 的 25 个等级,将滑坡主滑方向划分为 $0^\circ \sim 14.4^\circ$ 、 $14.4^\circ \sim 28.8^\circ$ 、 $\dots$ 、 $345.6^\circ \sim 360^\circ$ 的 25 个等级。

将以上单一连续变量分为 25 个等级后,分别统计各个等级中滑坡的数量,利用式(1)进行敏感性分析,获得单一变量敏感性分析结果(图 5(a) ~ (f))。根据敏感性分析结果,对于滑坡前缘高程, B ~ K 区间敏感性系数最高;对于滑坡后缘高程, C、E、F、H、J 区间敏感性系数最高;对于滑坡发育岩层倾向, B、C 区间敏感性系数最高;对于滑坡发育岩层倾角, E ~ J 和 L 区间敏感性系数最高;对于滑坡发育长度, A ~ C 区间敏感性系数最高;对于滑坡发育宽度, A ~ D 区间敏感性系数最高;对于滑坡发育面积, A ~ C 区间敏感性系数最高;对于滑坡发育体积, A ~ C 区间敏感性系数最高;对于滑坡发育总体坡度, E ~ J 区间敏感性系数最高;对于滑坡主滑方向, B、C、E、G、U 区间敏感性系数最高。敏感性系数高,说明区间内滑坡发育水平高于其他区间滑坡发育水平。

3.3 连续变量孕灾模式识别

基于以上 10 个连续变量,对其进行连续变量孕灾模式识别。考虑到 10 个变量之间可能存在的相关性,合适选择变量,可以提高识别过程的可靠性。对于滑坡发育规模,选择一个滑坡发育体积;对于滑坡形态,选择总体坡度和主滑方向;对于滑坡发育高程,仅选择前缘高程;对于滑床,选择岩层倾向和倾角。共选取 6 个独立变量:滑坡发育体积、滑坡发育总体坡度、滑坡主滑方向、滑坡前缘高程、滑坡发育地层倾向、滑坡发育地层倾角,变量编号分别为 $L1$ 、 $L3$ 、 $L4$ 、 $L8$ 、 $L9$ 、 $L10$ 。

通过 6 个变量敏感性系数叠加,得到连续变量敏感性累计分析结果,见图 5(k)。叠加后, E ~ G 的三个区间是敏感性系数最高区间,其次为其前侧的 B ~ D 三个区间和后侧的 H ~ J 三个区间。结合 10 个单一变量的独立分析,已知已选的 6 个变量中, $L3$ 、 $L10$ 两个变量敏感性系数相对平均,图 5(c) 和 (j) 中敏感性系数曲线波动相对其他变量也更小。因此,在 $0^\circ \sim 360^\circ$

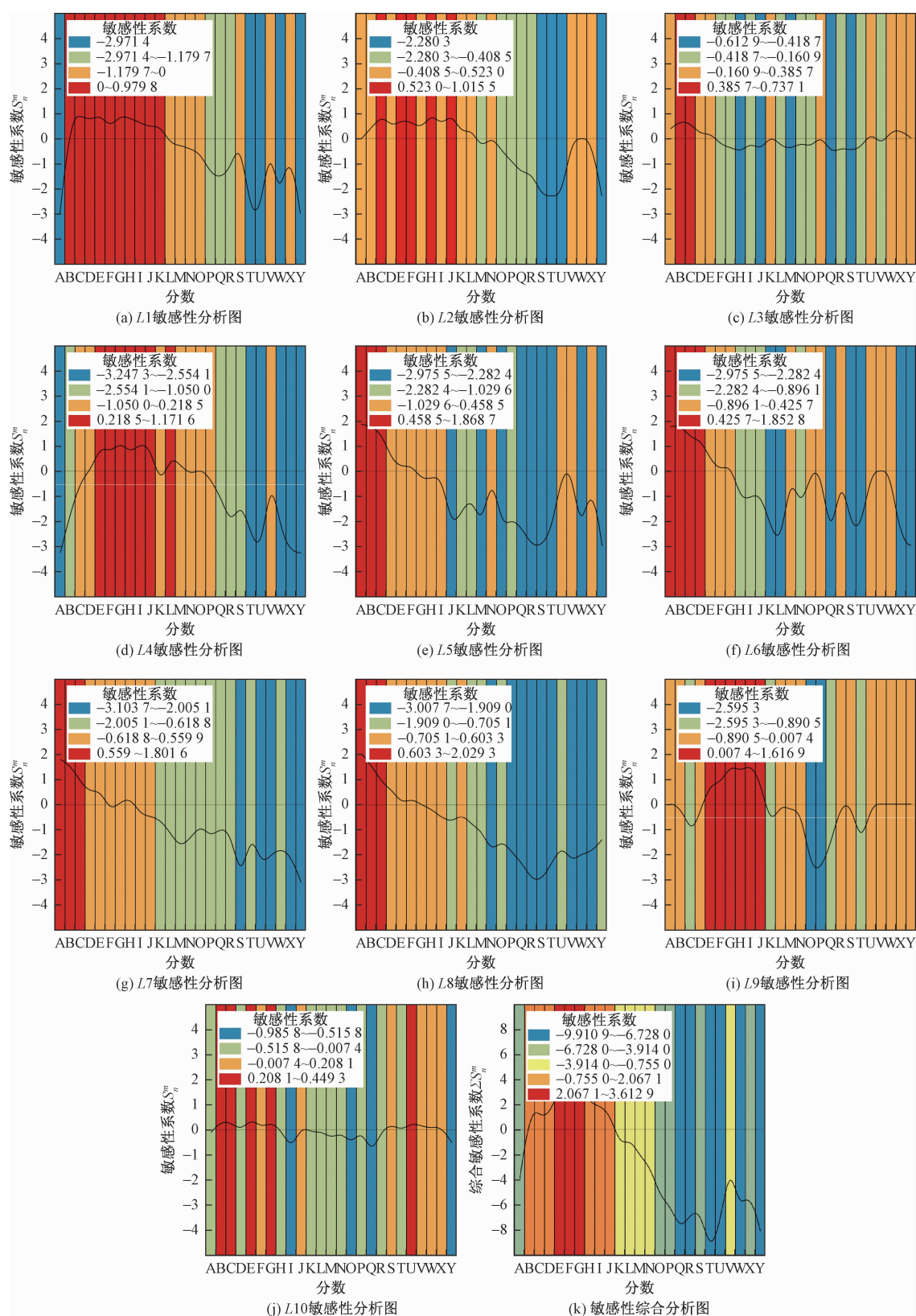


图5 连续变量敏感性分析结果图

Fig. 5 Sensitivity analysis result of continuous variables

的各个方向上,滑坡主滑方向并未在某些区间明显集中,相对分散,同样滑坡发育地层的岩层倾向,在 0 ~ 360°的各个方向上并未在某些区间明显集中,相对分散。

以上分析,说明 $L1$ 、 $L4$ 、 $L8$ 、 $L9$ 四个变量是控制连续变量孕灾模式的关键变量,分别为滑坡发育体积、滑坡发育整体坡度、滑坡前缘高程、滑坡发育地层倾角。四个变量的 E ~ G 区间与实际变量值对照见表 2。

表 2 连续变量孕灾模式识别结果表

Table 2 Pregnancy pattern identification result based on continuous variables

区间编号	$L1/m$	$L4/(^{\circ})$	$L8/(\times 10^4 m^3)$	$L9/(^{\circ})$
E	260 ~ 325	16 ~ 20	1.6 ~ 2.0	14.4 ~ 18
F	325 ~ 390	20 ~ 24	2.0 ~ 2.4	18 ~ 21.6
G	390 ~ 455	24 ~ 28	2.4 ~ 2.8	21.6 ~ 43.2
平均值	357.5	22	2.2	28.8

由此总结连续变量典型孕灾模式为:研究区内,滑坡发育前缘高程主要集中在平均高程 357.5 m 的 260 ~ 455 m 高程段,且多为体积 $1.6 \sim 2.8 \times 10^4 m^3$,

平均 $2.2 \times 10^4 m^3$ 的小型滑坡,其剖面上具有整体坡度 $14.4^{\circ} \sim 43.2^{\circ}$,平均 28.8° 的特点,发育岩层倾角 $16^{\circ} \sim 28^{\circ}$,平均 22° 。

4 孕灾模式综合识别

综合非连续变量孕灾模式与连续变量孕灾模式,结合图 4 和表 2 的分析结果,获得区内滑坡典型孕灾模式剖面示意图(图 6),每种典型模式的基本特征均已表示在图 6 中。

图 6 中 12 种典型孕灾模式,均属于图 3 中基于统计构建的四大类孕灾模式,其分属关系见表 3。

表 3 孕灾模式大类与典型孕灾模式分属关系

Table 3 Relationship chart between pregnancy pattern types and typical patterns

孕灾模式大类	典型孕灾模式
孕灾模式 A	孕灾模式(a)、(c)、(e)、(g)
孕灾模式 B	孕灾模式(b)、(d)、(f)、(h)
孕灾模式 C	孕灾模式(i)、(k)
孕灾模式 D	孕灾模式(j)、(l)

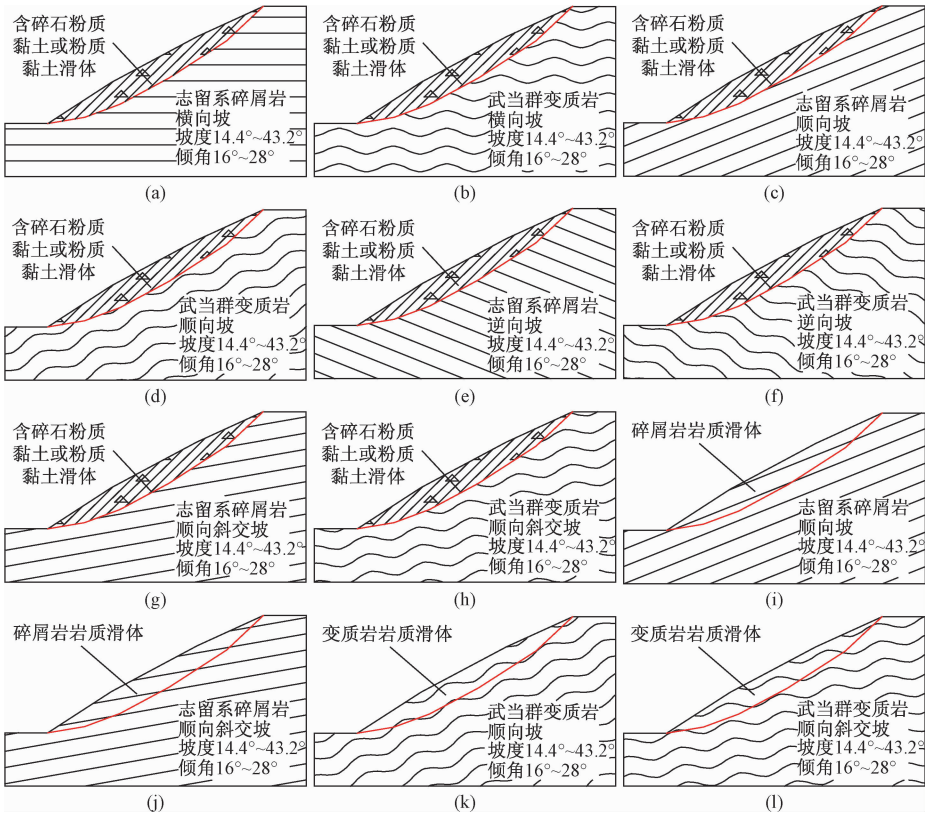


图 6 研究区滑坡典型孕灾模式剖面示意图

Fig. 6 Profile diagrams of typical landslide pregnancy patterns in the area

5 结论

统计分析鄂西北南保谷三县的 670 处滑坡灾害的分布与发育特征,通过连续变量和非连续变量,综合识别区内滑坡孕灾模式,并得到如下结论:

(1) 区内土质滑坡最多,占总数的 90.1%,其次为岩质滑坡,岩土混合滑坡最少。滑坡发育滑床,岩层倾向分布和倾角分布在区内较平均,斜坡结构以顺向坡、横向坡居多,其次为逆向坡和顺向斜交坡。碎屑岩组地层中滑坡发育最多。

(2) 基于 3 个非连续变量(滑体性质、地层岩性、斜坡结构),识别了区内 12 种、四大类孕灾模式分别为:孕灾模式 A(土质+基岩为志留系碎屑岩)、孕灾模式 B(土质+基岩为武当群片岩)、孕灾模式 C(岩质+顺向坡)、孕灾模式 D(岩质+顺向斜交坡)。

(3) 基于 10 个连续变量及其敏感性分析,构建区内连续变量孕灾模式为:研究区内,滑坡发育前缘高程主要集中在平均高程 357.5 m 的 260~455 m 高程段,且多为体积 $1.6 \sim 2.8 \times 10^4 \text{ m}^3$,平均 $2.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的小型滑坡,其剖面上具有整体坡度 $14.4^\circ \sim 43.2^\circ$,平均 28.8° 的特点,发育岩层倾角 $16^\circ \sim 28^\circ$,平均 22° 。

(4) 综合考虑非连续变量及连续变量,完成综合孕灾模式识别,最终获得区内滑坡的 12 种典型孕灾模式,其中土质滑坡 8 类,岩质滑坡 4 类,分属四大类孕灾模式。孕灾模式研究结果为鄂西北地区滑坡发育特征和孕灾机理提供一定参考。

参考文献:

- [1] 向喜琼. 区域滑坡地质灾害危险性评价与风险管理 [D]. 成都:成都理工大学, 2005.
XIANG Xiqiong. Regional landslide hazard assessment and risk management [D]. Chengdu University of Technology, Chengdu, 2005.
- [2] 马文瀚. 湖南省地质灾害孕灾机理及综合防治研究 [D]. 长沙:中南大学, 2012.
MA Wenhan. Research on geologic hazards mechanism and comprehensive prevention disaster in Hunan Province [D]. Central South University, 2012.
- [3] 熊伟. 秦巴山区软弱变质岩浅表层滑坡成因机理研究 [D]. 长安大学, 2012.
XIONG Wei. Study on the cause mechanism of shallow landslide of weak metamorphic in the Qin-ba Mountain Region [D]. Chang'an University, 2012.
- [4] 乌云飞. 秦巴山区土石混合体滑坡变形破坏机理研究 [D]. 长安大学, 2012.
WU Yunfei. Study on deformation and failure mechanism of landslide of the soil-rock mixture in the Qin-ba Mountain Region [D]. Chang'an University, 2012.
- [5] 彭令. 三峡库区滑坡灾害风险评估研究 [D]. 中国地质大学, 2013.
PENG Ling. Landslide risk assessment in the Three Gorges Reservoir [D]. China University of Geosciences, 2013.
- [6] 周福军. 日冕水电站库区滑坡稳定性早期智能判别及危害模糊综合预测研究 [D]. 吉林大学, 2013.
ZHOU Fujun. Early intelligence identification methods of stability and fuzzy synthetic prediction of hazard for landslides in Rimian Hydropower Station Reservoir [D]. Jilin University, 2013.
- [7] 薛开放. 基于地理信息系统技术(GIS)的滑坡空间分布的分形特征研究 [D]. 大连理工大学, 2005.
XUE Kaifang. Fractal characters of spatial distribution of landslides based GIS [D]. Dalian University of Technology, 2005.
- [8] 尚永升. 基于 GIS 的温州市地质灾害危险性评价研究 [D]. 长安大学, 2007.
SHANG Yongsheng. Study on the dangerous assessment of the geological hazards of Wenzhou [D]. Chang'an University, 2007.
- [9] 尹春荣. 基于 GIS 的滑坡地质灾害危险性分区与预测 [D]. 北京工业大学, 2008.
YIN Chunrong. Landslide risk zoning and prediction based on GIS [D]. Beijing University of Technology, 2008.
- [10] 汤罗圣. 三峡库区堆积层滑坡稳定性与预测预报研究 [D]. 中国地质大学, 2013.
TANG Luosheng. Research on stability and prediction for the colluvial landslide in the Three Gorges Reservoir [D]. China University of Geosciences, 2013.
- [11] 盖海龙. 西安市长安区滑坡崩塌灾害孕育规律及易发性分区评价研究 [D]. 西北大学, 2015.
GAI Hailong. Development and susceptibility zoning of landslides and collapses in Changan District in Xi'an [D]. Northwest University, 2015.
- [12] 杨天亮. 基于 GIS 的陕南公路地质灾害数据库建立及危险性评价研究 [D]. 长安大学, 2005.

(下转第 71 页)