第 24 卷第 2 期 地 质 与 资 源 Vol. 24 No. 2
2015 年 4 月 GEOLOGY AND RESOURCES Apr. 2015
文章编号:1671-1947(2015)02-0152-05 中图分类号:P642.22;P694 文献标志码:A

云南省镇雄县滑坡地质灾害主要致灾因子筛选及危险性分区

余飞燕[1],吕 蒙[1],杨 军[2]
1. 昆明理工大学 国土资源学院,云南 昆明 650093;2. 云南大学 资源环境与地球科学学院,云南 昆明 650504

摘 要:综合环境地质学、自然地理学等学科的理论和方法,对野外实地调查及室内整理的数据进行数学模型计算,系统研究了镇雄县滑坡地质灾害的时空分布规律. 基于 GIS 叠加分析功能,得出镇雄县滑坡地质灾害的主要致灾因子,采用滑坡确定性系数(CF)法对滑坡地质灾害各个因子数据进行量比,并根据主要致灾因子数据与滑坡形成有利级别进行多元线性回归模型的建立,最终获得适用于镇雄县滑坡地质灾害主要致灾因子的多元线性回归模型,在此基础上对滑坡地质灾害危险性进行分区,得到各个分区的分布情况.

关键词:滑坡;多元线性回归模型;CF;致灾因子;云南省镇雄县
DOI:10.13686/j.cnki.dzyzy.2015.02.013

RISK ZONING AND DISASTER-INDUCING FACTOR SCREENING OF LANDSLIDE IN ZHENXIONG COUNTY, YUNNAN PROVINCE

YU Fei-yan[1], LYU Meng[1], YANG Jun[2]
1. *College of Land and Resources, Kunming University of Science and Technology, Kunming* 650093, *China*; 2. *College of Resource Environment and Earth Sciences, Yunnan University, Kunming* 650504, *China*

Abstract: Combining multi-disciplinary theories and methods like environgeology and physiography for field investigation and mathematical model calculation of indoor collected data, this paper systematically studies the space-time distribution regularity of the geological disaster of landslide in Zhenxiong County. Based on the GIS overlay analysis function, the major disaster-inducing factors of landslide are obtained. By quantizing each factor with certainty factor (CF) method, a multiple linear regression model with major disaster-inducing factor data and landslide-prone levels which is fit for the landslide in Zhenxiong is established. With the model, this region is zoned by the distribution of risk of landslide.

Key words: landslide; multiple linear regression model; CF; disaster-inducing factor; Zhenxiong County of Yunnan Province.

0 引言

镇雄县已发现滑坡地质灾害 111 个,属于滑坡地质灾害多发地区,滑坡频繁发生. 据报道,2012 年 7 月 21 日,镇雄县持续强降雨天气使洪水肆虐、山体滑坡、房屋垮塌,致 7 人死亡、2 人失踪、3 人受伤,直接经济损失 3.15 亿元. 2013 年 1 月 11 日镇雄县果珠乡高坡村赵家沟村民组发生严重山体滑坡事故,造成 46 人死亡,多户人家被埋. 地质灾害给镇雄县人民的生命财产带来了巨大的损失,所以对镇雄县进行滑坡地质灾害主要致灾因子筛选及其危险性分区研究十分有意义.

本文通过野外调查和室内分析,初步分析了镇雄县滑坡发育控制因素和主要影响因素,并采用滑坡确定性系数(CF)方法对滑坡地质灾害各个因子数据进行量化,消除定性数据人为主观因素的影响,实现数据均为客观的定量数据,保障分析结果的客观性. 应用多元线性回归模型计算评价区内各单元格地质灾害的发生概率,对整个镇雄县的滑坡地质灾害进行了区划.

收稿日期:2014-09-02;修回日期:2014-11-27. 编辑:李兰英.
作者简介:余飞燕(1985—),女,工程师,昆明理工大学在读硕士,矿产普查与勘探专业,通信地址:云南省昆明理工大学莲华校区,E-mail//yfy26@qq.com

1　研究区的地质环境条件

镇雄县区域构造上位于扬子准地台娄山弧形箱形褶皱区,属于滇东、滇东北新华夏系、华夏系构造体系. 区内以多字型构造较为发育,地质构造复杂,构造形迹以褶皱为主,向、背斜构造的相间排列及断裂构造的错移,致使岩体褶曲破坏严重,岩体多呈块状、碎块状,断层带附近,岩体更为破碎,呈断层角砾岩,为滑坡地质灾害的形成及发展孕育了条件.

区内地层出露较齐全,除第三系、泥盆系地层外,其他地层均有出露,尤以二叠系、三叠系较为发育,且上二叠统峨眉山玄武岩分布广泛. 各时代地层之间均呈整合或假整合接触,其主要岩性为浅海相碳酸盐岩、碎屑岩,其次是滨海相、海陆相交互相的砂岩、泥岩、页岩和含煤建造. 第四系沉积类型单一，山间小盆谷堆积. 偶见河流阶地,厚度小. 地层岩性岩相的特殊分布,以及二叠系、三叠系地层中以软岩、软硬相间岩 (岩组) 为主,在地形陡峭地段易形成滑坡、崩塌等地质灾害.

研究区以构造侵蚀峡谷中—高山地形地貌为主,水资源较为发育,县内大小河流共有 21 条,径流长度超过 10 km 的河流共 17 条,另有遍布全县的大小冲沟不计其数,地表河流、冲沟支流天然落差较大,河流河床陡险多石,河水流量受控于降水量的时空分布明显,丰、枯季节各河流水流量变化较大,洪峰流量亦大小不一.

同时,镇雄县干湿季明显,冬天较长,气温相差大,气温的急剧变化加速了岩体的风化，岩土体力学性质降低,为滑坡地质灾害发生提供了条件. 镇雄县降雨时空分布不均,降雨主要集中在每年的 6~8 月份. 干季,岩体干燥,风化强烈. 雨季降雨时间长,软化土体,抗剪强度急剧降低. 暴雨、持续强降雨,松散土体处于饱和状态,形成强烈的地表径流,冲刷和淘蚀斜坡脚,容易诱发老滑坡复活,新滑坡随之产生.

2　研究方法

本文所采取的数据量化及分析方法为滑坡确定性系数 (CF) 分析方法[1-3]. 该方法是一种结合确定性系数 (CF) 来分析影响滑坡发生的各个因素敏感性的方法. 滑坡确定性系数 (CF) 分析方法为一个概率函数,最早由 E.H. Shortliffe 和 B.G. Buchanan[4] 提出,由 D. Heckerman[5] 进行完善改进,具体表示为：

$$CF=\begin{cases}\dfrac{PP_a-PP_s}{PP_a(1-PP)} & (PP_a\geqslant PP)\\ \dfrac{PP_a-PP_s}{PP_s(1-PP_a)} & (PP_a<PP)\end{cases} \tag{1}$$

式中：PP_a 为因子分级 a 中发生滑坡的条件概率,可表示 a 单元中的滑坡面积百分比值；PP_s 为事件在整个研究区中发生的先验概率，表示为整个研究区的滑坡面积百分比值.

通过式 (1) 的函数转化,CF 为 [-1,1]. 正值代表事件发生确定性的增长,即滑坡变形失稳的确定性高；负值代表确定性的降低,表示滑坡变形失稳的确定性低；接近于 0 值,代表先验概率与条件概率十分接近,事件发生的确定性不能进行确定.

计算出每一数据层的 CF 后，需要将不同数据层的 CF 进行合并. 假定要合并的两数据层的 CF 值分别为 x 和 y,合并得到的结果为 Z,合并的公式如下：

$$Z=\begin{cases}x+y-xy & x,y>0\\ \dfrac{x+y}{1-\min(|x|,|y|)} & xy<0\\ x+y+xy & x,y<0\end{cases} \tag{2}$$

每个因子数据层的 CF 计算及合并均在 ArcGIS 软件中进行. 按一定的规则对合并后得到的 Z 值进行重新划分,得到滑坡形成条件分区结果. 通过对比已有滑坡数据，可确定每一种致灾因子对滑坡发生的影响程度,从而确定滑坡主要致灾因子.

3　滑坡主要致灾因子的筛选

3.1　滑坡地质灾害影响因子敏感性分析

滑坡灾害是各种内外影响因素综合作用的产物,涉及地形地貌、地质环境,以及水文动力等方面,滑坡灾害影响因素的选取是危险性研究的基础. 根据镇雄县具体情况以及资料收集情况,选择了高程、坡度、起伏度、岩性 (岩组) 等 8 个因子来进行致灾因子敏感性分析.

3.1.1　高程

镇雄县地处乌蒙山脉北缘斜坡山地，处于金沙江南岸,总体地势西南高、东北低,全县最低高程 520 m,最高高程 2416 m，县境内最大高差达 1896 m. 本文将高程因子分为小于 700 m、700~1200 m、1200~1700 m、1700~2200 m 以及大于 2200 m 等 5 类. 通过 (1) 式得到的 CF 值可知高程因子中 700~1200 m 滑坡易发性高.

3.1.2　坡度

在平缓地带,滑坡是很难形成的. 斜坡失稳形成滑坡一般发生在小于 60°的地带,超过 60°,斜坡失稳一般以崩塌的形式出现. 镇雄县属于山区，坡度变化明显,高坡度地区主要集中在镇雄县中东部地区,坡度高

达 50°，中部及中西部相对平缓. 本文将坡度因子分为 4 类，通过 (1) 式得到坡度分级及 CF 值 (见表 1) . 由表 1 可知坡度因子 5~15°滑坡易发性高.

表 1 坡度分级及 CF 值

Table 1 Slope grading and CF values

坡度/°	分级面积/km²	滑坡面积/km²	PP_a	PP_s	CF
<5	1265.24	4.36	0.003	0.004	−0.204
5~15	848.71	7.48	0.009	0.004	0.511
15~25	887.19	3.00	0.003	0.004	−0.220
25~35	488.16	0.74	0.002	0.004	−0.648
>35	210.74	0.43	0.002	0.004	−0.534

3.1.3 起伏度

起伏度为特定区域内 (30 m × 30 m 栅格单元内) 的相对高差. 本文为了方便后期数据分析，引入起伏度的概念对地形变化进行量化. 镇雄县境内山高坡陡，沟谷纵横，主要为山区，面积占县域总面积的 46%. 本文将起伏度因子分为 5 类. 起伏度分级及 CF 值见表 2. 由表 2 可知起伏度因子中 30~200 m 滑坡易发性高.

表 2 起伏度分级及 CF 值

Table 2 Grading of relief amplitude and CF values

起伏度因子/m	分级面积/km²	滑坡面积/km²	PP_a	PP_s	CF
0~30	90.13	0	0.003	0.004	−0.204
30~200	1884.21	10.75	0.009	0.004	0.511
200~500	1686.05	5.19	0.003	0.004	−0.220
500~700	40.33	0.06	0.002	0.004	−0.648

3.1.4 岩性 (岩组)

镇雄县岩体总体以沉积岩为主，主要岩性为碳酸盐岩、碎屑岩，第四系沉积类型单一，为山间小盆谷堆积、偶见河流阶地，厚度小. 本文将岩性因子分为坚硬岩组、半坚硬岩组、软弱岩组、松散岩岩组等 4 类. 通过 (1) 式得到的中半坚硬岩组滑坡易发性高，CF 值为 0.681.

3.1.5 坡向

有学者研究认为，斜坡的朝向可能也与滑坡的易发性程度有关，但要因地区而异. 本文根据斜坡朝向将坡向因子分为东、西、南、北与平地等 5 个二级因子. 其中北朝向指角度在 0~45°与 315~360°范围内，东朝向为坡向角度在 45~135°范围内，南朝向为坡向角度在 135~225°范围内，西朝向为坡向角度在 225~315°范围内. 通过 CF 分析得到坡向南区段滑坡易发性高.

3.1.6 与水系距离

总体上，镇雄县水资源发育，地表河流天然落差较大，河流河床陡险多石，河流两侧边坡前缘常年受水浸润，土体之间的摩擦力减小，土体的抗滑力下降，引发了大量滑坡. 本文将镇雄县与主要水系的距离因子划分为与水系距离小于 200、200~400、400~600 m 以及大于 600 m 4 级. 通过 (1) 式的函数转化得到每个区段的 CF 值，通过 CF 分析得到距离水系 200~400 m 区段是滑坡易区域.

3.1.7 与道路距离

在道路的修建和运营过程，对于斜坡土体有一个扰动作用，可能破坏土体的平衡，尤其是在土体处于极限平衡状态时. 故本文将公路基础建设作为滑坡的一个诱发因子. 本文取镇雄县主要道路为研究对象，与道路距离因子分为小于 500、500~1000、1000~1500 m 以及大于 1500 m 4 级. 通过 CF 分析，与道路距离在小于 500 m 区段滑坡易发性高，即敏感性高.

3.1.8 降雨

众所周知，降雨是引发滑坡发生的最为普遍的因素之一，特别是暴雨和绵绵细雨的危害更大. 根据对镇雄县滑坡的调查研究发现，全县共有滑坡地质灾害 111 处，发育中型滑坡 52 个，小型滑坡 37 个，大型滑坡 22 个. 这些滑坡全部具备了滑坡发生的必要条件，其出发因素绝大多数是降雨. 镇雄县降雨量时间分配极不均匀，主要集中在 6~8 月，占全年总量的 76%，境内多年平均降雨量为 923.6 mm. 本文根据年暴雨天数划分了 4 类 小于 1 天、1~2 天、2~3 天及大于 3 天. 通过 CF 分析，年暴雨天数在大于 3 天区段滑坡易发性高.

3.2 主要致灾因子的筛选

基于上述对于选取的各个致灾因子的敏感性分析，根据公式 (2) 对各个数据层进行合并，合并字段为 CF 值. 首先将其中 2 个因子数据层进行合并形成新的数据层，再将另外一个因子数据层与新的数据层合并，直到所有数据层均合并为止. 为了使合并结果便于解释，将合并图层的 CF 字段值进行分级，分为 3 级. 划分的标准与相应级别的意义如表 3 所示.

表 3 CF 级别划分

Table 3 Level grading of CF values

级别	CF 值范围	描述	滑坡形成条件分区
1	[−1，−0.05]	基本不可能有滑坡发生	低危险区
2	[−0.05，0.05]	滑坡发生的可能性不易确定	不确定区
3	[0.05，1]	滑坡发生的可能较大	危险区

通过对滑坡主要致灾因子的分析，得出岩性 (岩组)、坡度、坡向、起伏度、与水系距离、与道路距离、降

雨量等因子能作为影响镇雄县滑坡发育的主要因子.

4　滑坡危险性分区结果及其评价

4.1　回归模型的建立

统计学中回归的含义是指：变量之间定量的依存关系[6-10].

标准的线性回归方程[11-14]如下：

$$Y=\alpha+\beta_1 x_1+\cdots\beta_i x_i+\cdots\cdots+\beta_m x_n \quad (3)$$

将回归原理用于滑坡形成条件分析中，β_i 表示各致实因子回归系数；x_i 表示各致灾因子指标值，取值范围 [-1，1]. 因变量 Y 就是滑坡形成条件有利级别，取值范围[1，6].

随机选取局部区域栅格单元 (本文随机选取 200 个栅格作为样本数据)，采用各因子数据类 CF 值作为回归模型的自变量，滑坡形成条件有利级别作为因变量，将数据导入 SPSS 统计分析软件，进行多元线性回归分析，得到镇雄县滑坡地质灾害主要因子的回归模型，如表 4.

表 4　滑坡地质灾害主要因子回归分析表

Table 4　Regression analysis of major factors of landslide disaster

模型	回归系数	标准误差	标准系数	显著性水平
常量	3.176	0.078		0.000
岩性 CF	1.843	0.123	0.570	0.000
坡度 CF	1.133	0.208	0.211	0.000
坡向 CF	1.457	0.176	0.310	0.000
水系 CF	1.360	0.220	0.230	0.000
道路 CF	1.083	0.154	0.262	0.000
起伏度 CF	0.995	0.239	0.161	0.000
降雨	1.121	0.201	0.266	0.000

将最终统计量带入 (3) 得出：$Y=3.176+1.843\times x_1+\cdots+1.121\times x_7$

式中：x_1，x_2，x_3……x_7，分别代表岩性 (岩组)、坡度、坡向、与水系距离、与道路距离、起伏度及降雨等致灾因子的 CF 值.

表 4 中显著性水平 sig.均接近于零，说明自变量对因变量均有显著影响.

4.2　回归模型的检验

根据所得回归模型，进行主要致灾因子图层叠加分析，得到最终滑坡地质灾害危险度分区结果 (如图 1 所示). 分别统计各分区覆盖的区域面积，结果如表 5 所示.

由上表可以看出，已发的滑坡主要集中在高危险区域，而历史上很少发生滑坡的地区滑坡分布相对稀疏. 这一结果表明所建模型分区符合历史上滑坡分布现状. 因此，所建镇雄县滑坡地质灾害主要致灾因子多元线性回归模型合理、有效.

表 5　危险性分区统计表

Table 5　Statistics of risk zoning

级别	分区	分区面积/km²	分区占研究区总面积/%	分区中滑坡的面积/km²	分区中滑坡占整个滑坡面积的比例/%
1	低危险区	1639.66	44.31	1.16	7.22
2	不确定区	786.05	21.24	1.36	8.51
3	高危险区	1014.84	27.43	13.49	84.27

高危险区主要分布在镇雄县县城、泼机镇、牛场镇、罗坎镇、塘房镇等乡镇 (图 1). 区内主要岩性为粉砂岩、细砂岩、泥岩、页岩夹灰岩，其特点是滑坡地质灾害发育集中，活动频繁、稳定性差. 区内现状滑坡地质灾害发育 59 个.

不确定区主要分布在镇以古乡、花山乡、以勒镇、牛场镇、场坝镇. 区内主要岩性为块状灰岩、生物灰岩、假鲕状灰岩、厚层状灰岩，局部夹鲕状灰岩，生物灰岩. 区内现状滑坡地质灾害发育 22 个.

低危险区主要分布在镇五德镇、罗坎镇、以勒镇、场坝镇. 区内主要岩性为灰岩、灰质白云岩、泥质灰岩、灰、青灰色灰岩. 区内现状滑坡地质灾害发育 30 个.

5　结论

根据镇雄县滑坡地质灾害成灾条件研究，本文得出以下结论.

1) 分析得出所选各个致灾因子的敏感区段，高程：700~1200 m；坡度：5~15°；起伏度：30~200 m；岩性 (岩组)：半坚硬岩组；坡向：南；与水系距离：200~400 m；与道路距离：小于 500 m；降雨：暴雨大于 3 天.

2) 根据滑坡地质灾害确定性系数 CF 值，确定了每个因子数据类的主要程度，之后采用各图层依次叠加分析，得到岩性 (岩组)、坡度、坡向、起伏度、与水系距离、与道路距离等 6 个致灾因子为镇雄县滑坡地质灾害的主要致灾因子.

3) 根据筛选出的主要致灾因子进行多元线性回归分析得出其多元线性回归模型，并叠加已发滑坡数据对多元线性回归模型进行检验，所能解释的滑坡面积占总滑坡面积的 84.27%，检验结果较好.

参考文献：

[1] 许冲，戴福初，姚鑫，等. 基于 GIS 的汶川地震滑坡灾害影响因子 [J].

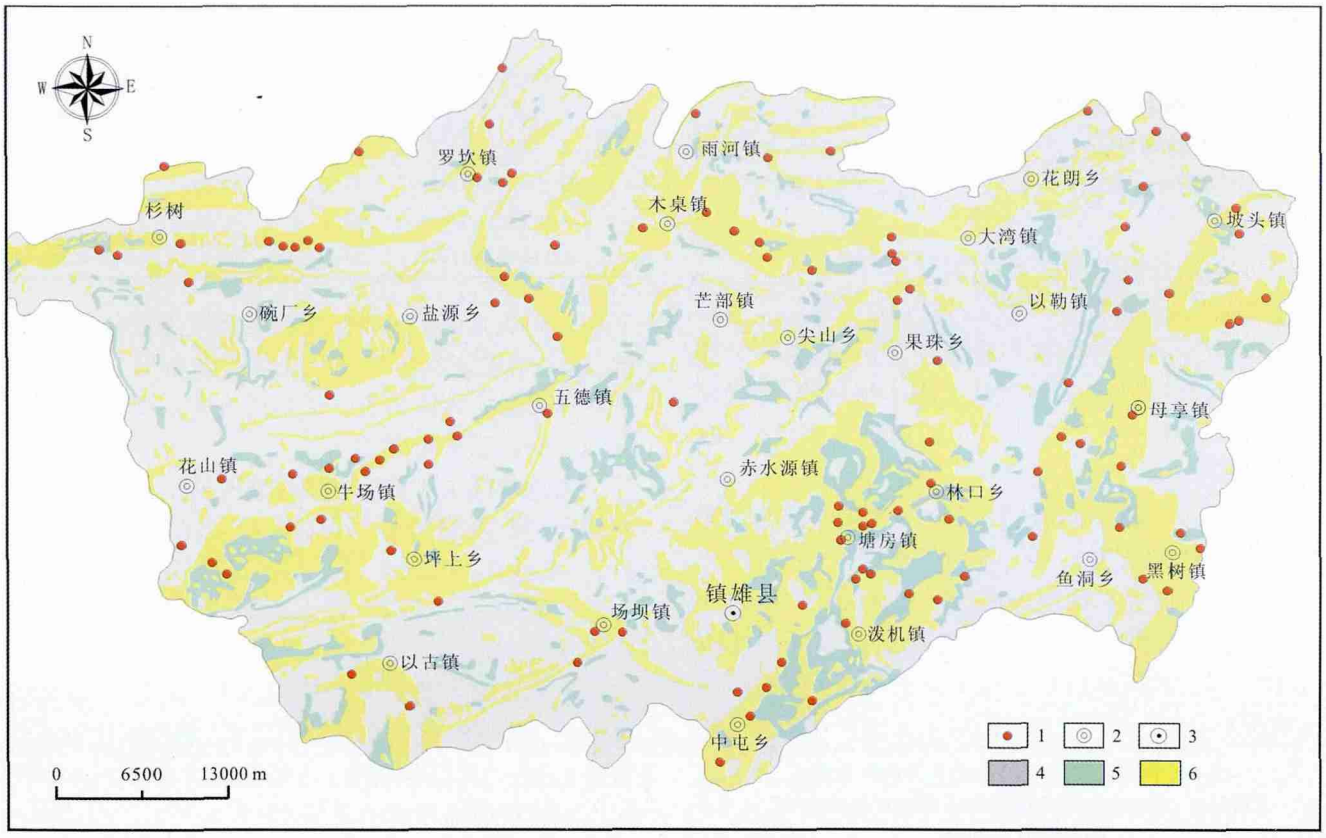

图 1 镇雄县滑坡地质灾害分区图

Fig. 1 Zonation map of geological landslide disaster in Zhenxiong County

1—滑坡点 (landslide site);2—乡镇 (village and town);3—县行政中心 (county);4—低危险区 (low danger zone);5—不确定区 (uncertain region);6—高危险区 (high danger zone)

岩石力学与工程学报, 2010, 29 (5) : 2972—2981.

[2] 兰恒星,伍法权,王思敬. 基于 GIS 的滑坡 CF 多元回归模型及其应用 [J] . 山地学报, 2002, 20 (6) : 732—737.

[3] 兰恒星,王苓涓,周成虎. 云南小江流域滑坡关键影响因子研究 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14 (1) : 100—106.

[4] 徐锡伟,闻学泽,叶建青. 汶川 Ms8.0 地震地表破裂带及其发震构造 [J] . 地震地质, 2008, 4 (3) : 10—15.

[5] 张培震,徐锡伟,闻学泽. 2008 年汶川 8.0 级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因 [J] . 地球物理, 2008, 4 (3) : 120—125.

[6] 顾晓安. 社会经济统计学:原理与应用案例 [M] . 上海 :立信会计出版社, 2006: 155—157.

[7] 何春雄. 应用数理统计基础 [M] . 广州 :华南理工大学出版社, 2006: 211—242.

[8] 周皓. 统计基础和 SPSS 入门与提高 [M] . 北京 :清华大学出版社, 2004: 245—253.

[9] 周爽. 社会统计分析 :SPSS 应用教程 [M] . 北京 :清华大学出版社, 2006: 189—231.

[10] 龚有容. 应用统计学 [M] . 上海 :立信会计出版社, 2006: 246—267.

[11] 李雪平. 基于 GIS 的区域斜坡稳定性评价 Logistic 回归模型研究 [D] . 武汉 :中国地质大学, 2005: 76—78.

[12] 王志旺,廖勇龙,李端有. 基于逻辑回归法的滑坡危险度区划研究 [J] . 地下空间与工程学报, 2006, 2 (8) : 1451—1454.

[13] 王卫东,钟晨. 基于 GIS 的 Logistic 回归模型在地质灾害危险性区划中的应用 [J] . 工程勘察, 2009 (1) : 5—10.

[14] 王征征. MAPGIS 和 SPSS 的区域型滑坡危险性区划 [D] . 北京 :中国地质大学, 2006: 62—73.