

旺苍县滑坡灾害危险性分析与评价

朱吉祥, 张礼中, 周小元, 陆 琰

(中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061)

摘要: 滑坡是四川省旺苍县最主要的地质灾害之一。该区滑坡的发生主要受控于地层岩性、地形地貌以及降水等因素。以旺苍县 90 个历史滑坡点作为主要的分析评价对象, 通过构建基于信息熵的灰色评价系统, 对该区滑坡的分布规律进行分析, 并获取旺苍县滑坡危险性区划。结果表明, 旺苍县滑坡的高发区主要集中在地貌类型为构造侵蚀中山、坡度范围为 15° ~ 60° 以及年平均降水量较丰富的松散堆积物分布区。以该区 39 个不稳定斜坡作为分析评价结果的验证对象, 验证结果表明, 以基于信息熵的灰色模型获取的旺苍县滑坡危险性分析评价结果具有可信的精度。

关键词: 滑坡; 危险性评价; 信息熵; 灰色理论; 旺苍县

中图分类号: P694 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)06-1172-05

Analysis and assessment of landslide hazards in Wangcang County

ZHU Ji xiang, ZHANG Li zhong, ZHOU Xiao yuan, LU Yan

(Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: The landslide is the one of main geological disasters in Wangcang County of Sichuan Province. The occurrence of landslide in this county is primarily controlled by the factors such as lithology, topography, and precipitation. Based on 90 historical landslides in Wangcang County, a grey assessment system was developed using entropy thesis to analyze the distribution law of landslides and determine the zonation of landslide risk in Wangcang County. The results showed that the high occurrence of landslide is mainly located in the areas where the landscape type is medium mountain of tectonic erosion, the slope range is from 15° to 60° , the precipitation is rich, or the stratum is the loose deposit. Additionally, 39 unstable slopes were used to verify the assessment accuracy, which suggested that the grey system based on the entropy thesis can provide reliable landslide risk assessment.

Key words: landslide; risk assessment; entropy; grey thesis; Wangcang County

滑坡是危害人类社会经济活动最严重的自然灾害之一, 是破坏程度仅次于地震的地质灾害^[1], 因此对于滑坡的研究一直都是国内外相关学者研究的重点之一^[2-6]。旺苍县位于大巴山西脉米仓山山地与四川盆地的接合地区, 主要以山区丘陵地形为主, 由于该区的地质地理背景比较复杂, 为山地滑坡的多发区。其分布受该区的地质地貌、地层岩性、地质构造、气象水文等因素的控制, 其中对于坡度、降水的反应比较敏感。汶川地震以来, 该区的地质背景进一步恶化, 滑坡灾害愈发严峻, 因此, 研究该区滑坡灾害的危险性分布特征就尤为重要, 而获取具有较高可信度的滑坡灾害危险性区划

对于旺苍县滑坡灾害的防治工作具有非常重要的实际意义与指导价值。

1 旺苍县滑坡的形成机制分析

研究区滑坡灾害主要受控于地层岩性、地貌类型、地形特征以及降水量。在基岩地区, 地层中广泛发育层理层面、软弱夹层、不整合面与沉积间断面等原生结构面(其中以沉积岩最为典型); 以及后天由于风化、侵蚀、卸荷等因素形成的裂隙、风化软弱层等次生结构面, 该地区滑坡的发育机制主要受控于岩石地层的结构面, 形成岩质滑坡。在第四纪松

收稿日期: 2014-09-05 修回日期: 2015-04-09 网络出版时间: 2015-11-30

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20151130.2100.040.html>

基金项目: 中国地质调查局国土资源大调查项目“全国主要城市环境地质综合评价”(1212010535501); 地下水资源数据集成与服务系统建设(1212011120426)

作者简介: 朱吉祥(1987-), 男, 江西吉安人, 主要从事水文地质和工程地质调查评及信息化方面研究。E-mail: hellouzjx@126.com.

散沉积物覆盖地区,在地下水侵蚀的条件下,滑坡体主要沿土体与基岩接触面或土体内部胶结性较差的界面滑动形成滑坡。同时由于研究区地表水系非常发育,河流对坡体底部的侵蚀冲刷,使得研究区广泛发育脆弱的前缘临空坡岸结构,使得坡体在重力的牵引下更容易形成滑坡。本研究选取旺苍县 90 个历史滑坡点作为评价对象。

2 基于信息熵的灰色模型在旺苍县滑坡危险性评价中的应用

灰色评价模型的基本思路就是从事物的内部结构与参数出发,运用概率统计的方式获取事物的演变规律^[78],基于灰色理论的评价模型在滑坡危险性区划中得到广泛的应用^[913]。由于在整个评价的过程中需要利用人为的主观判断对模型的边界条件进行耦合,具有一定的主观性与随意性。为了克服这个问题,本研究引入信息熵理论对模型进行修正。

2.1 信息熵理论

信息熵理论主要关注的是某一事件中某一特定信息出现的不确定性^[14],基于样本数据的统计分析理论,具有严密的数学和逻辑论证过程,所获得的结论是对样本数据所蕴含规律的客观公正的反映。这种方法特别适合于确定同一个指标下不同子因素的相对权重问题。它的本质还是一种数理统计方法,公式如下:

$$I(x_i, H) = -\ln \frac{p(x_i|H)}{p(x_i)} \quad (1)$$

式中: $I(x_i, H)$ 表示影响因素 x_i 对滑坡事件 H 的熵重, $I(x_i, H)$ 越大,表明影响因素 x_i 对滑坡发生的作用就越大,其权重也就越大; $p(x_i)$ 表示研究区内出现 x_i 的概率; $p(x_i|H)$ 表示研究区内滑坡事件 H 发生时出现 x_i 的概率,是一个条件概率。

2.2 模型的建立

(1) 计算各影响因素的熵值。运用公式(1)计算出各影响因素的熵值,熵值的大小反映影响因素对地质灾害的敏感性,熵值为负,表示该因素不利于滑坡的发生;熵值为正,表示该因素有助于地质灾害的发生。熵值越大,说明该因素对地质灾害的助力越大,因此根据熵值选择的评价指标具有一般性。

(2) 确定聚类白化数 d_{ij} 。在进行地质灾害危险性评价与灾害等级划分时,首先假设各剖分单元为聚类对象,以 i 表示;将熵值为正的因素作为聚类指标,以 j 表示;将不同地质灾害的危险性等级作为聚类灰数(灰类),以 k 表示。于是聚类白化数 d_{ij} 为

$$d_{ij} = \begin{cases} 1 & i \in \{1, 2, 3, \dots\}; j \in \{1^+, 2^+, 3^+, \dots\}; k \in \{\tilde{N}, \hat{0}, \check{0}, \dots\} \\ 0 & \dots \end{cases} \quad (2)$$

式中: d_{ij} 表示第 i 类聚类对象对于第 j 个聚类指标所拥有的白化数。在地质灾害危险性综合评估和灾害等级划分中, d_{ij} 则表示第 i 个参评单元的第 j 个参评要素的统计值^[16]。

(3) 确定灰类白化函数 f_j^k 。灰类白化函数按形态可以分为 Z 型函数,钟型函数与 S 型函数。

(4) 求标准聚类权 η_j^k 。聚类权 η_j^k 表征聚类指标 j 在地质灾害等级 k 中所占的权重,根据计算的熵值,对每一个聚类指标下的所有正的熵值进行求和处理,获取每一个聚类指标的综合熵值大小 λ_j^k ,再对其进行归一化处理,归一化后的值为标准聚类权 η_j^k 。

$$\eta_j^k = \frac{\lambda_j^k}{\sum_{j=1}^m \lambda_j^k} \quad j = 1, 2, 3, \dots, m \quad (3)$$

(5) 计算聚类系数,构造聚类向量。

$$\sigma_i^k = \sum_{j=1}^m f_j^k(d_{ij}) \cdot \eta_j^k \quad (4)$$

式中: σ_i^k 表示第 i 聚类对象对第 k 灰类的聚类系数。

对于任何一个剖分单元, σ_i^k 表示其在评价灾害等级 k 中所占的权重,其中某一灾害危险性评价指标的白化程度由 $f_j^k(x)$ 求得,从而构造聚类向量: $\sigma_i = (\sigma_i^1, \sigma_i^2, \sigma_i^3, \dots, \sigma_i^k)$ (k 为灰类)。

(6) 聚类分析。根据最大隶属度原则,在聚类向量 σ_i 中选择最大的 σ_i^k ,即 $\max\{\sigma_i^k\}$,将其作为判定聚类对象 i 属于灰类 k 的标准,亦即剖分单元 i 属于地质灾害危险性等级 k 的标准。

2.3 旺苍县滑坡危险性评价

根据监测资料,研究选取地层岩性、地貌类型、坡度、高程、多年平均降水量等 5 个影响因素作为评价指标进行评价。

(1) 剖分评价单元格。

利用 1:10 万的旺苍县行政区划图进行网格剖分,每个单元的面积 $0.5 \text{ km} \times 0.5 \text{ km}$,形成 18 791 个有效剖分单元。

(2) 计算评价指标的熵值。

利用公式(1),计算不同影响因子的熵值大小,其结果见表 1。

(3) 确定评价指标体系。

为了客观的选择评价指标,研究以各影响因子的总熵值大小为标准。熵值为正表明该影响因子有利于滑坡的发育,为负表明不利于滑坡的发生,依次确立评价指标的类别,各影响因子的熵值大小如表 1 所示。除高程以外,其余各影响因子的总熵值均为正,因此将除高程外的所有滑坡影响因子作为评价指标,依次为地层岩性、地貌类型、坡度、多年平均降水量。

(4) 确立评价指标的分级标准。

确定分级标准首先必须根据需要将研究区的滑坡危险性进行等级划分,本文将其划分为高危险区($\hat{0}$)、中危险区($\check{0}$)、低危险区($\check{0}$)与不危险区(\tilde{N}) 4 个危险性等级区划。分级以因子项的熵值大小为依据,熵值越大表明在该因子项下滑坡发生的概率越大,即滑坡的危险性等级越高,各因子项的熵值大小见表 1,模型评价指标的分级标准见表 2。

表 1 旺苍县滑坡危险性评价指标的熵值汇总

Tab. 1 The entropy values of indexes of landslides hazard assessment in Wangcang County

评价指标	因子类	滑坡数	面积/km ²	熵值
地层岩性	灰岩	34	1232.346	- 0.082
	泥、砂岩夹页岩	28	882.085	0.058
	砂砾岩	3	937.011	0.066
	岩浆岩	5	161.371	0.034
	页岩	15	521.432	- 0.041
	其它(第四纪松散堆积物等)	5	113.065	0.390
				总熵值: 0.425
地貌类型	构造侵蚀中山	14	854.621	- 0.604
	构造侵蚀溶蚀中山	48	1229.357	0.265
	构造剥蚀低山	26	887.897	- 0.023
	侵蚀堆积河谷平坝	2	32.126	0.731
				总熵值: 0.369
坡度(°)	< 15	0	45.833	-
	15~ 60	6	95.475	0.741
	60~ 75	5	165.313	0.010
	75~ 80	6	213.953	- 0.066
	80~ 85	26	899.290	- 0.036
	85~ 90	47	1584.136	- 0.010
				总熵值: 0.639
高程/m	< 500	3	115.098	- 0.139
	500~ 800	42	659.089	0.755
	800~ 1 000	29	580.969	0.511
	1 000~ 1 200	9	552.248	- 0.609
	1 200~ 1 500	6	694.416	- 1.243
	≥1 500	1	402.181	- 2.489
				总熵值: - 3.214
多年平均降水量/mm	< 900	10	432.661	- 0.259
	900~ 1 000	25	498.005	0.516
	1 000~ 1 100	22	690.625	0.061
	1 100~ 1 200	18	1116.62	- 0.620
	≥1200	15	266.086	0.632
				总熵值: 0.330

表 2 基于信息熵的灰色模型评价指标分级标准

Tab. 2 Grading standard of assessment indexes of grey model based on entropy

聚类指标	灰类			
	$\hat{0}$	$\hat{1}$	$\hat{2}$	$\hat{3}$
地层岩性	其它(第四纪松散堆积物等) (0.390)	泥、砂岩夹页岩; 砂砾岩 (0.062)	岩浆岩(0.034)	灰岩、页岩(0)
坡度	15°~ 60°	-	-	≤15°、≥60°
地貌类型	侵蚀堆积河谷平坝(0.731)	构造侵蚀溶蚀中山(0.265)	-	构造侵蚀中山、构造剥蚀低山(0)
多年平均降水量/mm	≥1 200	900~ 1 000	1 000~ 1 100	< 900、1 100~ - 1 200

注: 在确定定性指标的分级标准时, 采用该定性指标(例如地层岩性等)的熵值大小作为分级标准。

为了消除量纲的影响, 在运用上述标准进行分析之前必须对数据进行预处理, 采用 Max Min 的方式进行。

(5) 获取标准聚类权重。

权重表征评价指标对滑坡的重要程度, 对评价结果的精度具有重要的影响, 因此权重的获取必须尽量以实际的监测资料为依据, 客观地反映每一个评价指标对滑坡演变的影响。

滑坡是在众多的影响因素的共同作用下引发的, 加权平均是获取聚类权重的理想模式, 但是由于在滑坡的演变过程当中, 存在一些对其有突出作用的非常重要的影响因素, 为了突出这些重要的影响因素, 应当对加权平均模型进行修正。修正的方式为: 只对每一个评价指标下的正熵值的因子项进行求和, 将其作为评价指标的累积熵值进行加权平均,

以获取评价指标的聚类权重。

$$\eta_j = \frac{\sum_{i=1}^n x_{ij}}{\sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^n x_{ij}} \quad (5)$$

式中： η_j 表示第 j 类聚类指标的权重； $\sum_{i=1}^n x_{ij}$ 表示第 j 类聚类指标下熵值为正的累积熵值大小； $\sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^n x_{ij}$ 表示所有聚类指标下熵值为正的累积熵值大小； x_{ij} 表示第 j 类聚类指标下第 i 个因子项的熵值。

运用公式(5)，获取各评价指标的标准聚类权重见表 3。

表 3 各评价指标的标准聚类权重

Tab. 3 Weight of each assessment index

评价指标	地层岩性	地貌类型	坡度	多年平均降水量
累积熵值	0.548	0.996	0.751	1.209
标准聚类权重	0.156	0.284	0.215	0.345

(6) 滑坡危险性区划。

运用公式(4) 获取每一个剖分单元下的聚类系数 σ_j^i ，构成聚类向量，再根据择近原则获取聚类分析结果。以第 1473 个剖分单元为例。

$$\sigma_{1473}^1 = \sum_{j=1}^4 f_j^1(d_{1473,j}) \cdot \eta_j^1 = \sum_{j=1}^4 f_j^1(d_{1473,1}) \cdot \eta_1^1 + f_2^1(d_{1473,2}) \cdot \eta_2^1 + f_3^1(d_{1473,3}) \cdot \eta_3^1 + f_4^1(d_{1473,4}) \cdot \eta_4^1 = 0.153$$

同理， $\sigma_{1473}^2 = 0.057$ ， $\sigma_{1473}^3 = 0.619$ ， $\sigma_{1473}^4 = 0.205$ ，构成聚类向量 $\sigma_{1473} = (0.153, 0.057, 0.619, 0.205)$ ，根据择近原则，第 1473 剖分单元属于 0 类，即滑坡中危险区。利用 GIS 的空间分析与数据处理功能，对所有剖分单元进行聚类确定，最终获取研究区滑坡危险性区划结果(图 1)。



图 1 旺苍县滑坡危险性区划

Fig. 1 Zonation of landslide risk in Wangcang County

(7) 结果分析。

从图 2 可以看出，滑坡高危险区主要分布在旺苍县东部边缘地区的大德乡、五权镇、金溪镇，该地区地貌类型为构造侵蚀溶蚀中山地貌类型，同时处于旺苍县降水最为丰富的地区，从上述对研究区滑坡发育的影响因素分析中可知，该地区滑坡危险性区划的高危险性主要受地貌类型与降水等影响因素的控制；东南边缘地区的苍龙乡，该地区的岩性主要为粉砂岩与泥质页岩互层，软弱的岩性与密集的岩层交互，以及充备的降水，使得该地区的地质环境非常脆弱，滑坡频繁发生；西部的双河镇、高阳镇、福庆乡等地区，这些地区的

地貌类型主要为构造侵蚀溶蚀中山，同时该地区的坡度变化非常频繁，因此控制该地区滑坡发育主要为地貌类型与坡度等影响因素。地质灾害中危险区主要分布在中西部的万家乡、盐井乡、国华镇等乡镇的局部地区，地貌类型主要以构造侵蚀中山为主，这类地貌类型对滑坡的发育较为不利；西南边区的尚武镇，地貌类型以构造侵蚀低山为主，对滑坡的发育较为不利。同时从宏观上看，该滑坡危险性分区与年平均降水量 900~ 1 000 mm 分布带在空间位置上具有较强的相关性。滑坡低危险区主要分布在研究区中部的万山乡、大两乡与双河场、高阳镇等局部区域，以及西部的燕子乡、福庆乡、万家乡等局部区域，这些地区的地貌类型主要以构造侵蚀溶蚀中山为主，但是由于该地区的岩性主要以灰岩为主，同时地形坡度大多大于 75°，该地区的地质灾害主要以塌陷、崩塌为主，滑坡较少发育。滑坡不危险区主要分布在研究区北部的干河乡、檬子乡、水磨乡、英萃镇，该地区的地貌类型主要以构造侵蚀中山为主，岩性以灰岩或岩浆岩为主，同时地形坡度大多在 75° 以上，多见崩塌、塌陷等地质灾害，滑坡不发育；南部的化龙乡、龙凤乡、普济镇、柳林乡、友坝乡等地区，虽然岩性主要以较为软弱的粉砂岩、泥岩夹泥质页岩为主，但是由于地处构造侵蚀低山，同时高程较低，往往更容易形成泥石流地质灾害，滑坡不发育。

(8) 结果验证。

为了评价结果的正确性，本次试验选取了研究区内 39 个不稳定斜坡进行分析，不稳定斜坡作为滑坡的孕体，在外力或长期的自然演变过程当中形成滑坡的可能性非常大，因此选取不稳定斜坡作为在一致的影响因素下未来可能发生的滑坡进行统计，然后运用信息熵理论进行分析，结果见表 4。

表 4 不稳定斜坡在滑坡危险性区划中的统计

Tab. 4 Statistics of unstable slopes in each of the landslide risk zones

滑坡易发性区划	滑坡不危险分区	滑坡低危险分区	滑坡中危险分区	滑坡高危险分区
不稳定斜坡个数	9	13	5	12
危险分区面积/km ²	1 327.004	822.340	253.709	600.948
不稳定斜坡的熵值	- 0.541	0.305	0.526	0.539

根据熵值理论，在一次事件当中某一个因素的熵值越大，表明该因素对事件的贡献越大，因此在预测相同的事件发生之时，如果该因素越大，表明事件发生的可能性也就越大。不稳定斜坡作为未来可能发生的滑坡，在滑坡高危险分区的熵重最大，为 0.539，说明在该危险分区未来发生滑坡的可能性最大，其次依次为滑坡中危险分区、滑坡低危险分区和滑坡不危险分区，完全符合模型的试验结果，因此可以说基于信息熵理论的灰色评价模型在滑坡危险性评价中的正确性和可行性。

3 结论

(1) 斜坡作为滑坡的孕体，其演变方向却并不一定朝滑坡发展，例如，如果坡度足够，斜坡可能直接发生崩塌灾害；如果降水充沛，同时斜坡为松散物堆积，斜坡可能发生泥石流灾害。特别是对于地质条件比较复杂的地区，不同的影响因素组合可能产生的不一定是滑坡灾害。旺苍县滑坡灾害

主要受控于该区的地质岩性、地貌类型、坡度以及多年平均降水量分布,与区的高程分布、坡向分布特征相关性不大,其中对于坡度与降水量的变化响应比较敏感。

(2) 旺苍县滑坡危险性区划结果表明,该区滑坡发生的最佳坡度范围为 $15^{\circ} \sim 60^{\circ}$,在该坡度范围内,不仅可以积累充足的物质源,同时又具有引发坡体滑动的势能基础,而低于该坡度范围,则主要以泥石流灾害为主,高于该坡度则主要以崩塌灾害为主。同时该坡度范围内的地貌类型主要构造侵蚀溶蚀中山为主,植被相对发育,不仅可以储存高海拔地区崩塌下来的岩土体,以及在构造侵蚀中山随流水冲蚀而来的风化堆积物,同时该地貌类型下地层自身的分化作用也比较明显,导致该地貌类型是研究区第四纪松散堆积物分布最丰富的地区之一。因此,旺苍县滑坡区划的高危险区主要分布在坡度范围为 $15^{\circ} \sim 60^{\circ}$,地貌类型的构造侵蚀溶蚀中山的降水量比较丰富的地区。由于该坡度范围在研究区内面积较小,同时又是人类活动最主要的区域,因此,对于滑坡的危险性防治具有较大的指导意义。

(3) 以旺苍县 90 个历史滑坡点作为主要的分析评价对象,采用基于信息熵的灰色模型对研究区滑坡的危险性进行分析评价,并获取危险性区划结果。不仅保证了模型的分析结果更具客观性、公正性,而且较好保留了个评价因子的空间分布特征,使得分析结果具有更高的精度。

参考文献(References):

- [1] 汪华斌,李江风,吴树仁. 滑坡灾害系统非线性研究进展[J]. 地球科学进展, 2000, 15(3): 271-276. (WANG Huabin, LI Jiangfeng, WU Shuren. Progress in nonlinear study on landslide hazard system[J]. Advance in earth science, 2000, 15(3): 271-276. (in Chinese))
- [2] Metternicht G, Hurni L, Gogu R. Remote sensing of landslides: Analysis of the potential contribution to geospatial systems for hazard assessment in mountainous environments[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 98: 284-303.
- [3] Van Westen CJ, Van Asch TWJ, Soeters R. Landslide hazard and risk zonation why is it still so difficult[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2005, 65: 167-184.
- [4] 石菊松,石玲,吴树仁,等. 滑坡风险评估实践中的难点与对策[J]. 地质通报, 2009, 28(8): 1020-1030. (SHI Jiesong, SHI Ling, WU Shuren, et al. Difficulties and countermeasures in the practice of landslide risk assessment[J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(8): 1020-1030. (in Chinese))
- [5] Carrara A, Pike R J. GIS technology and models for assessing landslide hazard and risk[J]. Geomorphology, 2008, 94(3/4): 257-260.
- [6] Chacón J, Irigaray C, Fernández T, et al. Engineering geology maps: landslides and geographical information systems[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2006, 65: 341-411.
- [7] 刘明贵,杨永波. 边坡位移预测组合灰色神经网络方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(2): 74-78. (LIU Minggui, YANG Yongbo. Application of composite gray neural network method for prediction of slope displacement[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2006, 17(2): 74-78. (in Chinese))
- [8] 马文涛. 基于灰色最小二乘支持向量机的边坡位移预测[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1670-1674. (MA Weirao. Forecasting slope displacements based on grey least square support vector machines[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1670-1674. (in Chinese))
- [9] 徐峰,汪洋,杜娟,等. 基于时间序列分析的滑坡位移预测模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 746-750. (XU Feng, WANG Yang, TU Juan, et al. Study of displacement prediction model of landslide based on time series analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(4): 746-750. (in Chinese))
- [10] 俞政. 灰色模型在忠武输气管道沿线滑坡预警预报中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2011, 8(5): 622-626. (YU Zheng. Application of grey model's prediction of landslide along Zhongwu Gas transmission pipeline[J]. Chinese Journal of engineering geophysics, 2011, 8(5): 622-626. (in Chinese))
- [11] 王朝阳,许强,范宣梅,等. 灰色新陈代谢 GM(1,1) 模型在滑坡变形预测中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(2): 108-111. (WANG Zhaoyang, XU Qiang, FAN Xuamei, et al. Application of renewal gray GM(1,1) model to prediction of landslide deformation with two case studies[J]. Hydrogeology & engineering Geology, 2009, 36(2): 108-111. (in Chinese))
- [12] 姜刚,康艳霞,杨志强,等. 灰色理论模型在矿区滑坡变形预测中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2011, 39(3): 49-51. (JIANG Gang, KANG Yanxia, YANG Zhiqiang, et al. Application of gray model to landslide deformation forecast in mining areas[J]. Coal Geology & Exploration, 2011, 39(3): 49-51. (in Chinese))
- [13] 王冬,黄鑫,王明东,等. 灰色 GM(2,1) 模型在滑坡变形预测中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(3): 121-125. (WANG Dong, HUANG Xin, WANG Mingdong, et al. Application of gray GM(2,1) model to prediction of landslide deformation[J]. Hydrogeology & engineering Geology, 2013, 40(3): 121-125. (in Chinese))
- [14] 马建华. 系统科学及其在地理学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003. (MA Jianhua. Systems science and its applications in Geography[M]. Beijing, Science Press, 2003. (in Chinese))
- [15] 桑燕芳,王栋,吴吉春,等. 水文序列分析中基于信息熵理论的消噪方法[J]. 水利学报, 2009, 40(8): 919-926. (SANG Yanfang, WANG Dong, WU Jichun, et al. Information entropy theory based noise reduction method for hydrologic series data analysis[J]. Shui Li Xue Bao, 2009, 40(8): 919-926. (in Chinese))
- [16] 张丽,李广杰,周志广,等. 基于灰色聚类的区域地质灾害危险性分区评价[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(1): 0164-0168. (ZHANG Li, LI Guangjie, ZHOU Zhiguang, et al. Grey clustering method based zoning assessment of regional geological disaster[J]. Journal of Natural disasters, 2009, 18(1): 164-168. (in Chinese))