

反距离加权法在区域滑坡危险性评价中的应用

朱吉祥, 张礼中, 周小元, 梁国玲, 王 乾, 蔡子昭

(中国地质科学院 水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050803)

摘 要: 区域滑坡危险性评价是进行区域滑坡风险性研究的基础。提出了一种基于反距离加权的“黑箱”式评价方法, 该方法将滑坡作为一个系统进行分析, 各影响因素作为滑坡系统中的子系统。根据相似相近的原理, 假设已有滑坡点对周围区域的滑坡危险性存在局部性影响, 利用反距离加权法对所有滑坡点进行分析评价, 以获取研究区的滑坡危险性评价结果。同时对该方法运用于区域滑坡危险性评价的理论基础、适用范围进行分析, 并以四川省苍溪县为例, 验证了运用该方法进行区域滑坡危险性评价的可行性。

关键词: GIS; 滑坡; 危险性评价; 反距离加权法; 苍溪县

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2012)03-0136-05

中图分类号: X43

Application of Inverse Distance Weighted Method to Regional Landslide Hazards Assessment

ZHU Ji-xiang, ZHANG Li-zhong, ZHOU Xiao-yuan, LIANG Guo-ling, WANG Qian, CAI Zi-zhao

(Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang, Hebei 050803, China)

Abstract: Regional landslide hazards assessment is the basis of the research on regional landslide hazard risk. A “black box” method is proposed based on inverse distance weighted interpolation(IDW) theory considering landslide as a system and the factors as subsystems. This approach hypothesizes that existing landslides have local influences on the landslide risk to their surrounding areas according to the principle that the more closed the distance of the things is, the more similar the characters of them are; it obtains the result of regional landslide hazard assessment by analyzing all the landslides with the IDW theory; and simultaneously, it analyzes the basis of theory why the IDW theory can be applied in regional landslide hazards assessment and the scope of its application. Finally, the feasibility of IDW Interpolation theory in regional landslide hazards assessment is verified by taking Cangxi County of Sichuan Province for an example.

Keywords: GIS; landslide; hazard assessment; inverse distance weighted; Cangxi County

滑坡危险性评价的普遍思路是利用监测资料分析各种危险性评价指标对滑坡演变和发生的重要程度, 进而确定各指标在整个评价体系中的相对权重, 运用合适的模型或方法综合分析所有评价指标对滑坡的综合影响, 从而达到区划或预测的目的。这是一种典型的“白箱”式评价方法。滑坡研究是将地质、地形、地貌、植被、气象与人类活动等诸多领域的信息进行综合分析的过程, 运用这类“白箱”式的评价方法必须面临以下几个问题。

(1) 滑坡评价指标的判定。一方面, 滑坡的影响因素往往具有隐蔽性, 加大了识别滑坡影响因素的难度, 目前关于这一方面的研究还处于初步阶段^[1]; 另

一方面, 不同滑坡的影响因素必定存在差别, 这种差别在宏观上可能是次要的, 但是对于某一特定的滑坡可能具有决定性的影响, 分析区域滑坡的危险性只考虑研究区内影响滑坡最主要的因素, 不可能包括所有的这些次要的因素。在对研究区的滑坡进行危险性评价时, 考虑的因素越典型, 评价就越保守, 评价结果也就越“失真”; 而考虑的因素越多, 不仅会加大评价的难度, 而且可能会放大一些只会影响某个或某几个滑坡的次要因素对整个研究区内滑坡的影响, 给评价结果带来风险。因此对滑坡的评价指标的判定对评价结果具有重要的影响。

(2) 滑坡评价指标之间的相关性分析。滑坡的

收稿日期: 2011-08-18

修回日期: 2011-09-16

资助项目: 中国地质调查局“全国主要城市环境地质综合评价”(1212010535501); 国家 973 重点基础研究计划项目“华北平原地下水演变机制与调控”(2010CB428800)

作者简介: 朱吉祥(1987—), 男(汉族), 江西省吉安市人, 硕士研究生, 研究方向为水文地质和工程地质调查信息化。E-mail: hellozjx@126.com。
通信作者: 张礼中(1969—), 男(汉族), 四川省大竹县人, 研究员, 主要从事水工环信息工程技术和环境地质科研工作。E-mail: zhanglizhong1015@126.com。

发生是不同因素共同作用的结果,这种作用不是简单的累积关系,不同因素对滑坡单独作用时可能会促进滑坡的发生,但是如果组合在一起,则有可能会对滑坡发生产生抑制的效果,反之亦然。由于不同滑坡影响因素间可能存在的协同效应、拮抗效应等,如何分析滑坡评价指标之间的相关性对滑坡的影响,是滑坡危险评价的难点之一。

(3) 综合分析所有评价指标对滑坡的影响。目前常用的模型主要有以下3种:①主因决定型,②主因突出型,③加权平均型。由于滑坡的监测数据很多时候并不是这些评价模型的典型,因此数据和方法之间会存在不“兼容”的问题,必须对模型进行相应的修正。实际上,基于方法本身出发的评价模型和基于监测获得的实际数据之间先天存在一定的不“兼容”性,选取合适的评价模型的目的就是要使这种不“兼容”性降至最低,使评价方法与数据尽量耦合,从而达到评价结果反映研究区滑坡危险性区划的目的。因此如何建立评价模型,以综合分析所有评价指标对滑坡的影响,也是滑坡危险性评价的一个难点和重点。

由于滑坡形成机理与预测预报理论研究难以突破^[1-2],运用这种“白箱”式的评价方法对滑坡进行危险性评价会存在一定风险。本文提出了一种基于反距离加权法的“黑箱”式滑坡危险性评价方法。该方法通过对滑坡点的规模进行评价,然后对评价结果进行插值处理,获取研究区滑坡危险性评价结果。

1 基于反距离加权插值的滑坡危险性评价方法

1.1 反距离加权插值法

反距离加权插值法^[3-4](inverse distance weighted, IDW)是基于相似相近的原理建立的,即离滑坡点越近,所处的环境背景与滑坡点也就越相似,发生滑坡的可能性也就越大。该方法的假设已经发生的滑坡点对于周围区域的预测点均有局部性的影响,这种影响随着与滑坡点的距离的增加而减小。反距离加权法的通用公式如下:

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \quad (1)$$

式中: $Z(s_i)$ ——第*i*个位置的样本点的值; λ_i ——在第*i*个位置上的样本点的权重,并且随着距离的增加而减小; N ——样本点的数目; $\hat{Z}(s_0)$ ——在预测点第 s_0 个位置上的值,是未知的。确定权重 λ_i 的公式如下:

$$\lambda_i = d_{i0}^{-p} / \sum_{i=1}^N d_{i0}^{-p}, \quad \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad (2)$$

式中: d_{i0} ——预测点 s_0 到滑坡点 s_i 的距离,权重 λ_i 。

随预测点与滑坡点之间的距离 d_{i0} 增加的快慢用指数 p 控制; p ——估值前确定的幂指数,通常取值为 $2^{[5-7]}$ 。

1.2 应用反距离加权插值法进行评价的依据

任何研究区的地质地理环境都是一个开放的系统,其中的地层岩性、地形地貌、地质构造等滑坡的影响因素通过相互作用,形成对系统演变的综合影响,这种综合影响最极端和直观的结果就是滑坡的发生。因此通过对滑坡体进行分析,可以获取研究区内关于地质地理条件的相关信息,这类信息是针对于研究区内可能发生滑坡的危险区划。滑坡的规模,即体积、面积、位移等作为滑坡最重要的性质,其大小必然是由所处的地质地理背景决定的。传统的评价方法是通过单独分析每种滑坡的评价指标对其规模的影响,然后通过选取合适的评价模型进行综合评价,这种评价方式是基于经典的线性思维,它并没有将地质灾害作为一个开放的非线性系统进行分析,应用反距离加权插值法(IDW)进行评价是一种典型的“黑箱”式评价方法,它认为地质灾害是一个开放系统,但是它不考虑系统内部的作用机制,只考虑由这种综合作用产生的结果,滑坡的规模就是由各地质地理影响因素综合作用产生的结果。然而,地层岩性、地质构造、地形地貌在空间上都是具备一定的形态,各滑坡的影响因素在空间上一般具有渐变式的特征,例如坡度的渐变式变化,地层岩性的过渡等,因此各影响因素在局部范围内必然保持一定的相关性,通过对某一特定地区的某些地质地理特征进行分析,利用正确的渐变规律可以推测出相邻地区的一些地质地理的相关特征。这是应用反距离加权插值法(IDW)进行区域滑坡危险性评价的依据。

1.3 应用反距离加权插值法进行评价的可行性分析

滑坡危险性评价一般是基于以下假设^[8-9]: (1) 过去对未来有指示作用,过去曾经发生过滑坡的地区未来也有可能发生滑坡,即基于历史和现实资料预测未来滑坡的演变过程。(2) 具有与曾经发生滑坡地区相似的地形、地质及地貌因素的地区未来也有可能发生滑坡。(3) 导致滑坡发生的基本要素能够有效识别。风险的构成要素能够有效识别、表达或量化,风险评估中的易发程度、危险性和风险都可以用定性与定量方法来表征和描述。

因此,在评价一个地区的滑坡的危险性时,都是通过分析已经发生的滑坡的背景条件,对长期的监测数据进行统计,辨别出滑坡发生时所具备的一般性条件或因素,并认为滑坡发生是这些条件和因素共同作用的结果,缺少其中的任何一个条件或因素滑坡均不

会发生,但是各条件和因素是如何作用的,并且最后是如何对滑坡的发生产生影响的,实际的研究是很难清楚地把握的。因此通过对那些基于历史数据获得的因素和条件进行的滑坡危险性评价,反而会混淆这些数据本身所蕴含的滑坡的分布规律。

在这种情况下,可以采取一种“直接”方式进行评价,既然滑坡危险性的分布规律已经蕴含在监测数据当中,完全可以直接对这些数据进行分析,利用反距离插值法对滑坡的危险性进行分析就是基于这样的思想。(1) 滑坡的发生是由一系列的影响因素和条件共同作用的结果,缺少任何一个因素或条件,滑坡的都不可能发生。(2) 这种作用的方式是非线性的,评价模型的建立只是对这种非线性的作用方式进行拟合。(3) 滑坡危险性的分布规律蕴含在监测数据当中,对其的危险性评价只是对这种分布规律进行有效的挖掘。

利用反距离插值法进行滑坡危险性评价不单独地对每个影响因素进行分析,而是直接对所有影响因素共同对滑坡的演变和发生的综合影响进行评价,这个综合影响就是规模指数,具体的评价步骤如下:

(1) 对每一个已经发生的滑坡的规模进行量化评价,评价的结果称为规模指数(A)。以滑坡的面积(S)、体积(V)和位移(L)作为评价指标,首先分别对各指标进行标准化处理,再利用式(3)获取规模指数:

$$A = \sqrt{S'^2 + V'^2 + L'^2} \quad (3)$$

式中: S' 、 V' 、 L' ——标准化后的面积、体积与位移。

(2) 对规模指数 A 进行标准化处理,本文采用 Max—Min 的形式进行。

(3) 运用反距离加权法对标准化后规模指数 A 进行插值分析,获取研究区滑坡危险性评价结果。

(4) 对评价结果进行有效性验证。

2 应用举例

2.1 研究区概况

苍溪县位于四川省盆地北部,东经 $105^{\circ}43'30''$ — $106^{\circ}27'56''$,北纬 $31^{\circ}37'3''$ — $32^{\circ}10'18''$,面积 $2\,331\text{ km}^2$ 。区内总体地势北高南低,最高点为北部九龙山主峰,高程 $1\,377.5\text{ m}$,最低点为嘉陵江的出口八庙乡涧溪口,海拔 353 m ,高差 $1\,024.2\text{ m}$;区内地貌以低山地貌为主,为川北低山深丘地貌。苍溪县属亚热带湿润性季风气候区,雨量充沛。根据苍溪县气象站观测资料,年均降雨量 $1\,046.7\text{ mm}$,年降雨量随海拔增加而增加,北部山区地势较高,年平均降雨量在 $1\,100\sim 1\,300\text{ mm}$,东部低山区多在 $900\sim 1\,200\text{ mm}$,西南部深丘地区在 $800\sim 1\,100\text{ mm}$ 。苍溪县河流属

长江流域嘉陵江水系,县境嘉陵江、东河为主要河流,有插江、深沟河、严家河等 12 条较大支流九曲回肠结成河网,水系非常发育。苍溪县境在大地构造单元上属扬子准台之川中台坳。从地质力学观点看,苍溪属新华夏系第三沉降带四川盆地之川西褶皱带和米仓山褶皱带,区内构造应力较弱,主要由宽缓的背斜和向斜构成,断层不发育,区内岩性主要以砂岩为主,只在局部区域分布少量的泥岩,岩性比较单一,砂岩约占全县面积的 98%(图 1)。

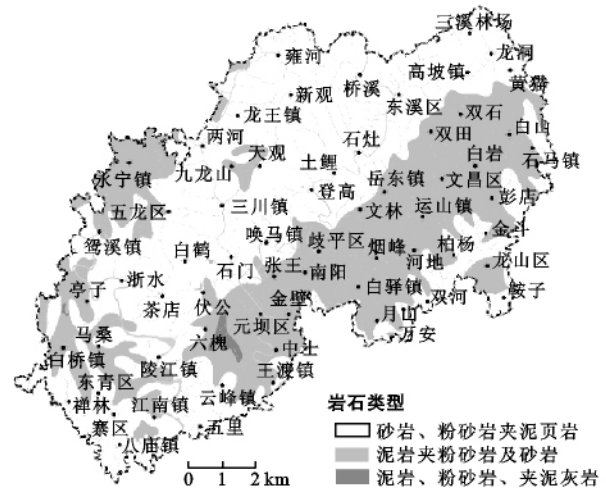


图 1 苍溪县主要地层岩性与水系分布

2.2 反距离加权法在苍溪县滑坡危险性中的应用

2.2.1 试验滑坡点和验证点的选取 本次试验选取其中的 235 个滑坡作为试验对象,余下的 98 个滑坡作为对试验结果的验证对象。为了使本次的试验结果更具代表性,本文首先对研究区进行网格化,然后在每个网格当中按照大约 2:1 比例随机选取试验对象和验证对象。

2.2.2 滑坡规模指数 滑坡发生的规模由滑坡本身的体积、面积与位移表征,利用公式(3)获取滑坡规模指数,由于滑坡发生的规模是由所处的地质与环境背景决定,因此滑坡规模指数的大小反映了滑坡发生所处的地质环境背景的脆弱程度。限于篇幅的原因,本文只列举了其中的 20 个,部分滑坡监测数据及其规模指数如表 1 所示。

2.2.3 反距离加权法获取研究区滑坡危险性评价结果 运用反距离加权法对规模指数进行插值处理,可以获取研究区的滑坡危险性区划成果,评价结果如图 2 所示。苍溪县地层以软弱的砂岩为主,这就决定了滑坡在该区域内多发性和均匀性的分布特点,虽然局部分布着更加软弱的泥岩和页岩,但并不能改变滑坡在该区域的发育特点,因此,研究区内的岩性不能决

定滑坡在该区域内危险性等级的差别,但却从整体上提高了研究区内滑坡的危险程度。从苍溪县滑坡危险性区划图中可以看出,滑坡在研究区中部的危险性要明显高于周围地区,决定这一分布特点最主要的原因是河流在该区域内沿东北至西南方向非常发育。由于研究区内降水比较丰富,使得河流对流经的基岩冲刷非常严重,造成了该区域内的山体非常陡峭,在

山底部甚至会出现前缘凌空的现象,山体由于自身的重力,在外界诱发因素下极易产生滑坡。虽然水系的存在会降低评价结果的精度,但是由于在该区域内发生的滑坡相对更加密集一些,监测获得的数据也相对丰富一些,因此体现的滑坡危险性分区信息也就更加细致,水系对滑坡危险性分区的影响得以体现在最后的评价结果当中。

表 1 部分滑坡监测数据及其规模指数

滑坡编号	面积/m ²	体积/m ³	位移/m	标准化位移	标准化面积	标准化体积	规模指数
1	19 500	293 000	15.0	0.189 2	0.020 6	0.022 1	0.191 6
2	2 450	14 700	6.0	0.027 0	0.001 7	0.000 7	0.027 0
3	24 000	240 000	10.0	0.099 1	0.025 6	0.018 0	0.103 9
4	12 500	125 000	10.0	0.099 1	0.012 8	0.009 2	0.100 3
5	127 500	114 750	8.5	0.072 1	0.140 8	0.008 4	0.158 3
6	15 000	150 000	10.0	0.099 1	0.015 6	0.011 1	0.100 9
7	45 000	450 000	10.0	0.099 1	0.049 0	0.034 2	0.115 7
8	165 000	2 475 000	15.0	0.189 1	0.182 5	0.190 0	0.324 3
9	24 000	480 000	20.0	0.279 3	0.025 6	0.036 5	0.282 8
10	5 250	31 500	6.0	0.027 0	0.004 8	0.002 0	0.027 5
11	360 000	5 400 000	15.0	0.606 3	0.189 2	0.399 4	0.415 1
12	5 400	27 000	5.5	0.018 0	0.004 9	0.001 6	0.018 8
13	240 000	7 200 000	30.0	0.459 5	0.265 9	0.553 6	0.767 0
14	18 000	180 000	8.0	0.063 1	0.019 0	0.013 4	0.067 2
15	29 400	588 000	20.0	0.279 3	0.031 6	0.044 8	0.284 6
16	4 750	23 750	6.0	0.027 0	0.004 2	0.001 4	0.027 4
17	4 750	23 750	5.5	0.018 0	0.004 2	0.001 4	0.018 6
18	2 600	20 800	6.5	0.036 0	0.001 8	0.001 1	0.036 1
19	2 400	14 400	4.5	0.000 0	0.001 6	0.000 6	0.001 7
20	5 950	59 500	7.5	0.054 1	0.005 6	0.004 1	0.054 5

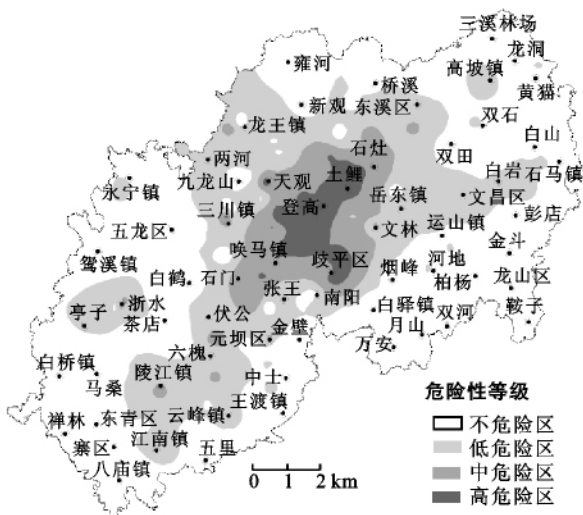


图 2 苍溪县滑坡危险性等级分区

2.3 结果的正确性检验

为了验证上述结果的正确性,本次试验随机选取研究区内 98 个滑坡作为验证对象,其分布如图 2 所

示。利用信息熵法作为对本次试验结果的验证规则,信息熵理论是 Claude E. Shannon 于 1948 年提出的,主要是指在某一事件中某一特定信息出现的概率。因此它在本质上还是一种数理统计方法,公式如下:

$$S_H = -K \sum_{i=1}^m P_i \log_a P_i \quad (4)$$

式中: S_H ——某一特定信息 i 的熵值, S_H 越大,表明该信息 i 对事件的影响越不明显; m ——事件中所有的信息的数量; P_i ——信息 i 在事件中出现的概率; K ——常数。滑坡危险性评价一般采用如下表达式:

$$I(x_i, H) = \ln \frac{p(x_i | H)}{p(x_i)} \quad (5)$$

式中: $I(x_i, H)$ ——危险性等级 x_i 为滑坡事件 H 提供的信息量, $I(x_i, H)$ 越大,表明危险性等级 x_i 对滑坡发生的贡献就越大,即在该等级范围内发生滑坡的概率越大; $p(x_i)$ ——研究区内出现危险性等级 x_i 的概率; $p(x_i | H)$ ——研究区内滑坡事件 H 发生在危险性等级 x_i 中的概率,是一个条件概率。

信息熵理论是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,所获的结论是对样本数据所蕴含规律的客观公正的反应。利用公式(4),最终获取各危险性等级下滑坡的信息熵值大小(详见表 2)。

表 2 不同滑坡危险性等级熵值统计

危险性等级	高危险区	中危险区	低危险区	不危险区
滑坡个数	10	17	26	45
面积/km ²	78.54	197.77	720.88	1 337.04
熵值	1.109 5	0.716 6	-0.151 9	-0.221 1

在表 2 中,熵值由大到小依次是高危险区、中危险区、低危险区和不危险区,说明滑坡发生的概率:高危险区>中危险区>低危险区>不危险区。进一步分析发现,在不、低危险区的熵值为负,表明在该危险性等级区域内的地质环境不利于滑坡的发生;在中、高危险区的熵值为正,表明处于该危险性等级的地区各种自然地理条件利于滑坡的发生,进而验证了本次试验结果的正确性。

3 讨论

(1) 反距离加权法的精度很大程度上得益于样本数据的数量和精度,但是由于伴生的滑坡往往在规模上要远小于主滑坡,如果不对其进行处理,可能会产生局部的“圈闭”现象,因此在评价的时候,对这些伴生的滑坡应当采取舍去或是将其作为主滑坡的一部分进行处理,本文选择了第 2 种处理方式。

(2) 在运用反距离加权法时,要求样本点应尽可能均匀分布在研究区域内^[10],但已经发生的滑坡点的位置是固定的,受不同影响因素的不均质性的影响,可能使得滑坡在空间区域上分布不均匀。研究发现,反距离加权法比较适合滑坡影响因素在空间上变化缓慢的情形,比如岩性、植被、地形和降水等。但是,如果存在空间变化十分剧烈的因素对滑坡有显著影响,例如断层、水系等,利用反距离加权法进行评价,其结果的精度会有所降低。

4 结论

(1) 滑坡是一个开放的系统,是各种地质地理影响因素综合作用的结果。由于各影响因素在空间上具有一定的形态,同时一般具备渐变性的变化特征,通过分析某一特定地区的滑坡影响因素综合作用的表现特征,即滑坡的规模,可以获取相邻地区的滑坡

影响因素的综合作用水平,这是利用反距离加权法(IDW)进行区域滑坡危险性评价的依据。反距离加权法是一种基于相似相近原理的插值方法,它不对插值对象的获取进行分析,只对对象进行插值处理,因此是一种典型的“黑箱”型评价方法。

(2) 滑坡的规模是滑坡最重要的特征之一,由滑坡的各种影响因素共同决定,因此通过分析滑坡的规模可以获取当地控制滑坡发育的综合地质地理特征。本文选取了滑坡的体积、面积与位移作为其规模的度量指标,在获取滑坡的规模之后,将其作为反距离加权法(IDW)的插值对象,由滑坡的规模实质上是由于研究区的地质地理背景决定,滑坡的规模表征当地的滑坡发育的脆弱性程度,对滑坡的规模进行插值,实质上是对这种引发滑坡的地质地理背景的脆弱性程度进行插值。因此利用反距离加权法(IDW)进行插值的结果是研究区滑坡的危险性区划。

[参 考 文 献]

- [1] 吴树仁,周平根,雷伟志,等. 滑坡防治领域重大科技问题讨论[J]. 地质力学学报,2004,10(1):1-6.
- [2] 黄润秋. 中国西部地区典型岩质滑坡机理研究[J]. 第四纪研究,2003(6):640-647.
- [3] 赵其国,史学正. 土壤资源概论[M]. 北京:科学出版社,2007:100-190.
- [4] 汤国安,杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京:科学出版社,2006:266-397.
- [5] 姚永慧,潘志强,孙英君,等. ArcGIS 地统计分析实用指南[M]. 北京:ArcInfo 中国技术咨询与培训中心,2002:310-330.
- [6] 张传庆,周辉,冯夏庭,等. 局域地应力场获取的插值平衡方法[J]. 岩土力学,2008,29(8):2016-2024.
- [7] 施建刚,李俊明. 数字地价模型建立过程中的插值方法研究:以上海内环线地区为例[J]. 土木工程学报,2007,40(1):90-94.
- [8] Australian Geomechanics Society. Landslide risk management [M]. Australian Geomechanics, 2007,42(1):13-36.
- [9] Varnes D J. Landslide hazard zonation: A review of principles and practice[C]//International Association of Engineering Geology Commission on Landslides and Other mass Movements on Slopes. Int. Assoc. Eng. Geol., UNESCO Natural Hazards Series, 1984.
- [10] 韦玉春,陈锁忠. 地理建模原理与方法[M]. 北京:科学出版社,2005:320-359.