

地质灾害危险性区划的多态系统可靠性分析方法^{*}

李秀珍^{1,2}, 孔纪名^{1,2}, 王成华^{1,2}, 王震宇³

(1. 中国科学院山地灾害与表生过程重点实验室, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院·水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 3. 四川交通职业技术学院, 四川 成都 611130)

摘要:在对多态系统可靠性研究的基础上, 将基于矩阵分析的多态系统可靠性分析方法用于区域地质灾害的危险性评价研究, 结果表明该方法能较好地定量评价区域地质灾害的危险程度。利用多态系统的可靠性分析方法进行地质灾害危险性区划, 不仅可以得出各子区域所处的主要危险区和次主要危险区, 而且还可以得出各子区域处于不同地质灾害危险区的可靠度(即可能性大小)。该方法基本克服了目前危险性评价方法中评价指标分级和量化以及危险性程度分级的人为性和随意性, 具有分级标准统一、评价因素和评价方法相对简单、不受区域条件限制、适用性强等特点。

关键词: 地质灾害; 危险性区划; 多态系统; 可靠性分析; 矩阵分析方法

中图分类号: P642.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-811X(2009)02-0001-06

0 引言

我国是一个地质灾害发生十分频繁和灾害损失极为严重的国家。据卫星遥感资料^[1,2], 全国有崩塌、滑坡、泥石流灾害点100万处以上, 经调查证实的大型、特大型灾害7800多处。另据2005年中国地质环境公报, 我国每年由各种地质灾害(不包括地震)造成的直接经济损失约达200~300亿元。预防和减轻地质灾害最根本的、也是最行之有效的方法就是从研究区域地质灾害规律入手, 宏观上预先加以控制和防范。因此, 开展地质灾害危险性区划研究, 对减少地质灾害的发生、优化土地使用具有极其重要的实际意义和紧迫性。

地质灾害的产生和发展受地形地貌、地层岩性、降雨等多种因素的影响, 具有非常明显的随机性、不确定性和复杂性。因此, 要想用确定性的方法来准确描述地质灾害的危险性是很困难的。目前, 地质灾害危险性区划方法中, 无论是定性方法还是定量方法, 无论形式上是否严格, 各种方法无一例外都带有较大的人为性^[3-5]。因此, 常常有评价结果与地质灾害的实际情况不相吻合,

如在某些低度危险区, 也可能发生比高度危险区规模大、甚至数量多的地质灾害。此外, 地质灾害危险度分级标准目前还没有统一, 无论采用何种数值分级方法, 均存在着等级间的临界值问题^[6]。这显然不符合实际情况。

由于可靠性理论可有效地解决岩土体系统的不确定性和随机性, 在世界范围内受到岩土工程界的极大重视, 特别是在单个斜坡(或滑坡)稳定性评价等方面已取得了十分显著的成果^[7-11]。但基于可靠性理论的区域地质灾害危险性评价和研究国内外几乎还处于空白状态, 尚有大片的领域和空间需要进一步深入研究和探索。

本文在对多态系统可靠性研究的基础上, 将多态系统的可靠性分析方法用于区域地质灾害的危险性评价研究, 取得了较好的应用效果。

1 多态系统的可靠性分析方法

1.1 多态系统的基本概念

多状态系统可靠性的概念及理论主要来源于二态系统理论。

对于多态串连系统, 只有组成系统的每一个

^{*} 收稿日期: 2008-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(40802072, 50639070); 中科院“西部之光”人才培养计划项目(O8R2140140); 川西山地灾害危险性评估(110900k213)

作者简介: 李秀珍(1975-), 女, 内蒙古卓资县人, 助理研究员, 在读博士研究生, 主要研究方向: 山地灾害预测及评价。

E-mail: lixiuzhen6688@163.com

单元都是 M 状态(一般为最好状态)时,系统才是 M 状态。而对于 $M-1$ 状态一直到 0 状态(一般为最坏状态)的系统而言,只要组成系统的所有单元中有一个单元处于最坏状态,那么系统的状态就为这个单元的最坏状态^[12-14]。

对于多态并联系统,只有组成系统的每一个单元都是 0 状态时,系统才是 0 状态。而对于从 1 状态一直至 M 状态而言,只要组成系统的所有单元中有一个单元处于最好状态,那么系统的状态就为这个单元的最好状态^[12-14]。

1.2 多态系统的可靠性分析方法

目前关于二值状态系统的可靠性研究基本成熟并且有很多成功的工程应用,但是对于比较复杂的多态元件和多态系统,计算非常繁琐,而且不便于推广应用。唐良忠等在文献[14]中提出了离散多态系统可靠性分析的矩阵分析法,该方法可以解决多态系统在工程实践中遇到的困难。该方法假设各单元(或各因素)之间在各种状态情况下都互相独立。

所谓矩阵分析法,就是根据概率论多元随机变量的条件概率分布和联合概率分布的基本定义,给定随机变量的边际分布率,任意选取某一随机变量,如果变量之间相互独立,则根据某一随机变量在其它随机变量条件下的条件分布率仍为其原来的边际分布率,利用矩阵的形式表示出系统随机变量的概率分布,最后求出系统在各个状态的可靠度。

若一个系统含有 2 个相同的 $M+1$ 态元件,则用对称矩阵表示系统的分布律为:

$$A = \begin{bmatrix} q_0^2 & q_0 q_1 & \cdots & \cdots & q_0 q_M \\ q_0 q_1 & q_1^2 & \cdots & \cdots & q_1 q_M \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & q_{m-1}^2 & q_{m-1} q_M \\ q_0 q_M & q_1 q_M & \cdots & q_{m-1} q_M & q_M^2 \end{bmatrix}。$$

A 为对称矩阵, q_0, q_1, \dots, q_M 分别为元件在状态 $0, 1, \dots, M$ 下的概率,且 $q_0 + q_1 + \dots + q_M = 1$ 。对于多态并联系统,根据其定义,由矩阵 A 有:

$$\begin{cases} R_M = 1 - (1 - q_M)^2, \\ R_{M-1} = (1 - q_M)^2 - (1 - q_{M-1} - q_M)^2, \\ R_{M-2} = (1 - q_{M-1} - q_M)^2 - (1 - q_{M-2} - q_{M-1} - q_M)^2, \\ R_0 = q_0^2。 \end{cases} \quad (1)$$

若系统由 k 个可靠性不相等的 $M+1$ 态元件组成,则系统处于各个状态的可靠度为:

$$\begin{cases} R_M = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - q_{Mi}), \\ R_{M-1} = \prod_{i=1}^k (1 - q_{Mi}) - \prod_{i=1}^k (1 - q_{(M-1)i} - q_{Mi}), \\ R_{M-2} = \prod_{i=1}^k (1 - q_{(M-1)i} - q_{Mi}) - \prod_{i=1}^k (1 - q_{(M-2)i} - q_{(M-1)i} - q_{Mi}), \\ R_0 = \prod_{i=1}^k q_{0i}, \end{cases} \quad (2)$$

式中: q_{ji} 为第 i 个元件处于第 j 种状态下的概率。

在区域地质灾害危险性评价中,产生地质灾害的地质体,其影响因素多种多样,每一种影响因素又具有多种不同的状态,地质灾害的危险程度也不仅仅只有两种状态。这决定了产生地质灾害的地质体是一个多种因素影响下的具有多种不同地质灾害危险等级的复杂的多态系统。

在实际工作中,常见的地质灾害主要以滑坡、崩塌、泥石流为主。这 3 种地质灾害的形成机理和过程虽然有所不同,但 3 种地质灾害均是在一定的基本因素和触发因素的共同作用下才会发生。如滑坡的形成,需要具备的基本条件有物质条件,即易滑地层的存在;地形和有效临空面条件以及坡体结构条件;降雨等诱发条件。崩塌的形成,也需要具备一定的物质条件,如软硬相间地层、有下覆软弱夹层(泥岩、页岩等)的厚层或巨厚层沉积岩(如砂岩)等;高陡的临空面以及具有陡倾、甚至直立软弱面的坡体结构;崩塌发生的外部条件(如降雨等)。同样,泥石流的形成也必须同时具备 3 个基本条件:陡峻的地形地貌、丰富的松散物质以及充足的水源。据此,并结合多态系统的定义,可以大致确定产生地质灾害的地质体是一个 3 因素影响下的多态并联系统。区域地质灾害危险性的可靠性评价可以按照多态并联系统的可靠性分析方法进行分析。

2 地质灾害危险性区划的多态系统可靠性分析

现以贵州省地质灾害危险性区划为例进行说明。

本次研究以县级以上行政区域为基本区划单元。贵州省共有 9 个区划单元,分别为: 4 个地级市(贵阳市、六盘水市、遵义市、安顺市)、2 个地区(毕节地区和铜仁地区)、3 个自治州(黔西南布

依族苗族自治州、黔南布依族苗族自治州及黔东南苗族侗族自治州)。

2.1 研究区基础资料获取

通过广泛收集、整理和分析资料^[15-16], 获取了贵州省的地形地貌图、岩土体类型分布图和年平均降雨量分布(图 1~图 3)。

根据贵州省地质环境条件和地质灾害的特点, 我们确定所研究区域的地质体是一个具有 3 个元件 4 种状态的并联系统, 即影响地质灾害发生的基本因素主要有 3 个: 岩土体类型条件、地形地貌条件以及诱发灾害发生的降雨条件, 每个因素以及危险性区划结果都有 4 种状态(表 1)。

表 1 地质灾害危险性区划基本指标和区划结果的不同状态及状态编号

状态编号	地形地貌	岩土体类型	降雨	地质灾害危险性区划等级
0	大起伏山地 海拔 >2 000 m	易滑岩组 主要包括粘性土、砾石土、卵石土、砂卵石土、碎石土为主的松散堆积层; 薄层状粉砂岩、页岩、泥灰岩、凝灰岩、板岩、千枚岩、粘土岩; 薄层状含煤砂岩、砾岩以及含煤碳酸盐岩、含煤火山碎屑岩; 变质砂岩、变质粉砂岩、变质凝灰岩	丰雨区 年平均降雨量 1 400 mm 以上	极高危险区
1	中起伏山地 海拔 1 000 ~ 2 000 m	较易滑岩组 主要包括中厚层粉砂岩、页岩、泥灰岩、凝灰岩、板岩、千枚岩夹碳酸盐岩、硅质岩; 粉砂岩、页岩、泥灰岩、凝灰岩、板岩、千枚岩、粘土岩夹砂岩、砾岩	多雨区 年平均降雨量 1 200 ~ 1 400 mm	高度危险区
2	小起伏山地 海拔 500 ~ 1 000 m	偶滑岩组 主要包括厚层砂岩、砾岩夹泥岩、页岩、凝灰岩等泥质物; 厚层碳酸盐岩、硅质岩夹泥页岩	中雨区 年平均降雨量 1 000 ~ 1 200 mm	中度危险区
3	剥蚀台地、丘陵及平原 海拔 <500 m	稳定岩组 主要包括厚层砂岩、砾岩; 灰岩、白云岩、硅质岩、磷块岩以及侵入岩岩组	少雨区 年平均降雨量 1 000 mm 以下	低度危险区

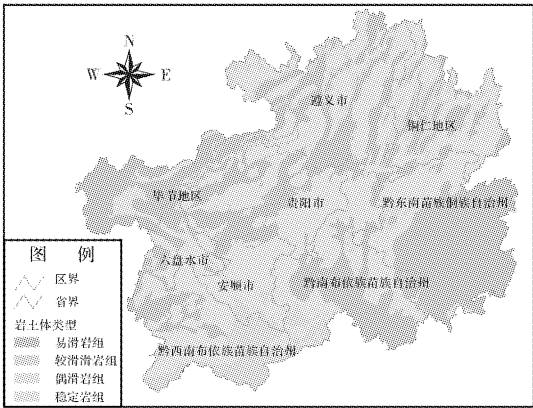


图 1 贵州省岩土体类型分布图

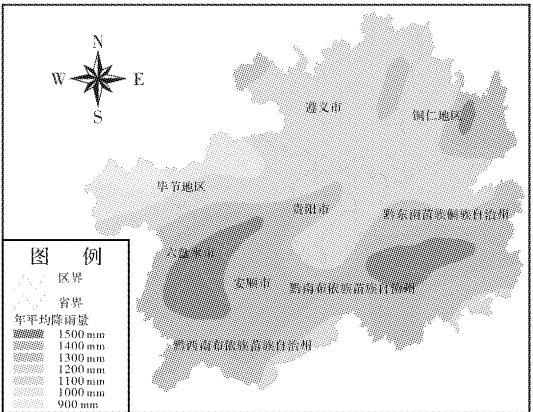


图 3 贵州省年平均降雨量分布图

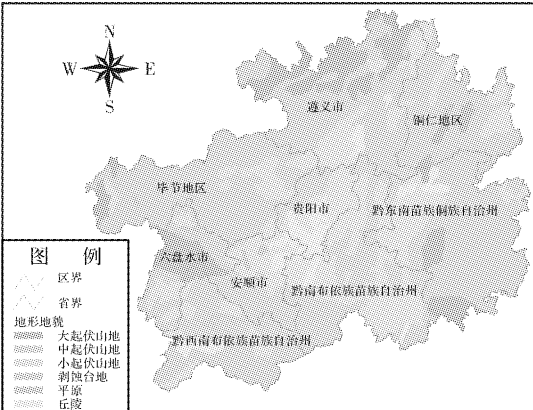


图 2 贵州省地形地貌分布图

2.2 研究区处于地质灾害不同危险等级的可靠度计算

根据前述由 k 个可靠性不相等的 $M + 1$ 态元件组成的并联系统的可靠度计算公式(2), 结合我们假定的所研究区域地质体是一个具有 3 个元件的 4 态并联系统(即 $k = 3, M = 3$), 将 $k = 3, M = 3$ 代入公式(2), 即可计算出贵州省各地区处于地质灾害不同危险等级状态下的可靠度 R , 具体计算公式为:

$$\left\{\begin{aligned} R_{\text{低危险区}} &= 1 - \prod_{i=1}^3 (1 - q_{3i}), \\ R_{\text{中危险区}} &= \prod_{i=1}^3 (1 - q_{3i}) - \prod_{i=1}^3 (1 - q_{2i} - q_{3i}), \\ R_{\text{高危险区}} &= \prod_{i=1}^3 (1 - q_{2i} - q_{3i}) - \prod_{i=1}^3 (1 - q_{1i} - q_{2i} - q_{3i}), \\ R_{\text{极高危险区}} &= \prod_{i=1}^3 q_{oi} \circ \end{aligned}\right.$$

(3)

式中： q_{oi} ， q_{1i} ， q_{2i} ， q_{3i} 分别为第*i*种影响因素分别处于0，1，2，3四种状态下的概率。 q_{oi} ， q_{1i} ， q_{2i} ， q_{3i} 概率值的确定，对于某一地区，可采用各因素处于各状态类型的面积与该地区总面积之比来表示。如岩土体类型因素，可用处于各岩组类型状态的面积与该地区总面积之比来表示；对于地貌因素，可用处于各种地貌类型状态的面积与该地区总面积之比来表示；对于降雨因素，可用年平均降雨量处于不同状态的面积与该地区总面积之比来表示。据此，由图1~图3即可统计出贵州省9个地区不同影响因素处于不同状态的状态概率值（表2）。

表2 贵州省各地区地质灾害危险性

区划基本指标处于各种不同状态的概率

地区名	状态 编号	各指标处于不同状态的状态概率		
		地形地貌	地层岩性	年平均降雨量
贵阳市	0	0	0.211 0	0
	1	0.245 5	0	0.553 7
	2	0.511 5	0.772 3	0.446 3
	3	0.243 0	0.016 7	0
六盘水市	0	0.324 7	0.701 9	0.341 7
	1	0.476 3	0	0.622 3
	2	0.187 4	0.298 1	0.036 0
	3	0.011 6	0	0
毕节地区	0	0.041 5	0.715 2	0.055 5
	1	0.915 4	0	0.158 2
	2	0.040 1	0.284 8	0.386 6
	3	0.003 0	0	0.399 7
遵义市	0	0.268 0	0.420 3	0
	1	0.562 4	0.107 2	0.099 4
	2	0.145 4	0.415 4	0.900 6
	3	0.024 2	0.057 1	0
铜仁地区	0	0.044 1	0.354 4	0.228 2
	1	0.777 8	0.368 3	0.503 8
	2	0.178 1	0.135 3	0.268 0
	3	0	0.142 0	0

续表2

安顺市	0	0	0.105 0	0.168 2
	1	0.494 0	0.100 8	0.830 3
	2	0.372 1	0.794 2	0.001 5
	3	0.133 9	0	0
黔西南布依族苗族自治州	0	0.031 9	0.105 0	0.173 1
	1	0.704 5	0.360 0	0.767 8
	2	0.160 8	0.535 0	0.059 1
	3	0.102 8	0	0
黔南布依族苗族自治州	0	0.003 4	0.385 3	0.084 1
	1	0.387 6	0.063 6	0.657 0
	2	0.593 5	0.508 0	0.258 9
	3	0.015 5	0.043 1	0
黔东南苗族侗族自治州	0	0.061 8	0.522 6	0.132 5
	1	0.529 1	0.014 7	0.580 4
	2	0.179 5	0.186 7	0.287 1
	3	0.229 6	0.276 0	0

根据公式(3)即可计算出各地区地质灾害处于不同危险性等级的可靠度。某地区处于某种地质灾害危险等级的可靠度越大，说明该地区处于该危险等级的可能性越大。根据各地区处于不同危险等级的可靠度的大小，即可知各地区处于不同地质灾害危险等级的可靠度大小，以及各地区所处的主要危险区和次主要危险区，具体计算结果见表3。

表3 贵州省各地区处于地质灾害不同危险性等级的可靠度

地区名	贵州省各地区处于不同危险等级的可靠度/%				各地区所处的主要危险区	各地区所处的次主要危险区
	极高危险区	高度危险区	中度危险区	低度危险区		
贵阳市	0	2.87	71.57	25.56	中度	低度
六盘水市	7.79	46.41	44.64	1.16	高度	中度
毕节地区	0.16	14.46	45.23	40.14	中度	低度
遵义市	0	4.35	87.66	7.98	中度	低度
铜仁地区	0.36	43.12	42.32	14.20	高度	中度
安顺市	0	10.15	76.46	13.39	中度	低度
黔西南布依族苗族自治州	0.06	32.17	57.49	10.28	中度	低度
黔南布依族苗族自治州	0.01	13.00	81.20	5.79	中度	高度
黔东南苗族侗族自治州	0.43	22.20	33.15	44.23	低度	中度

2.3 评价结果分析

由表3可知，贵州省各地区基本上均有处于不同地质灾害危险区的可能性，只不过处于不同危险区的可靠度(即可能性大小)有所不同而已。根据计算结果，贵州省各地区所处的主要危险区分别为：六盘水市(可靠度为46.41%)、铜仁地区

(可靠度为 43.12%) 主要处于地质灾害高度危险区; 贵阳市(可靠度为 71.57%)、毕节地区(可靠度为 45.23%)、遵义市(可靠度为 87.66%)、安顺市(可靠度为 76.46%)、黔西南布依族苗族自治州(可靠度为 57.49%)及黔南布依族苗族自治州(可靠度为 81.20%)主要处于地质灾害中度危险区; 黔东南苗族侗族自治州(可靠度为 44.23%)主要处于地质灾害低度危险区。由此也可看出, 即使处于同一危险区的不同地区, 其可靠度大小也有明显不同, 反映了不同地区处于同一危险区的可能性大小有所不同。同理, 也可由表 3 清楚地看出贵州省各地区所处的次主要危险区。

上述结果与野外调查得出的结果大致相当。通过与贵州省已有的地质灾害分布图(图 4), 对比也可看出, 已有地质灾害在危险性高的区域(如六盘水市、铜仁地区)内分布密度较大, 在中度危险区(如安顺市、黔南布依族苗族自治州等)和低度危险区(如黔东南苗族侗族自治州)内地质灾害的分布密度相对较小。

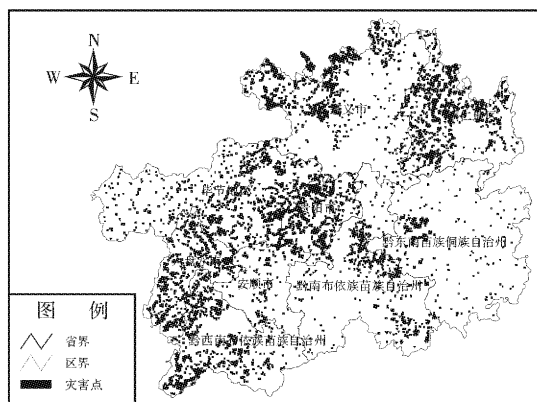


图 4 贵州省已有地质灾害分布图

3 结论

地质灾害的产生和发展受地形地貌、地层岩性、降雨等多种复杂因素的控制和影响; 同时, 产生地质灾害的地质体往往具有非常明显的随机性、不确定性和复杂性。因此, 用确定性的危险性区划方法来描述地质灾害的这种随机性、不确定性和复杂性是非常困难的。

本文将多态系统的可靠性分析方法用于地质灾害危险性区划研究, 取得了较好的效果。利用多态系统的可靠性分析方进行地质灾害危险性区划, 不仅可以得出各子区域所处的主要危险区和次主要危险区, 而且还可以知道各子区域处于不

同地质灾害危险区的可靠度。同时, 该方法基本克服了目前危险性评价方法中评价指标分级和量化以及危险性程度分级的人为性和随意性, 具有分级标准统一、评价因素和评价方法相对简单、不受区域条件限制、适用性强等特点。

值得注意的是, 本文主要从崩滑流灾害的发生一般必须具备三个基本条件出发, 只考虑了影响地质灾害发生的三个主要因素, 即地形地貌、地层岩性和降雨。事实上, 对于不同的地区, 影响地质灾害发生的关键因素可能与此有所不同, 也可能远不只三个。在实际应用中, 如果可以确定影响地质灾害发生的几个关键因素与产生地质灾害的地质体系统可以近似构成一个多态并联系系统(或多态串联系统)时, 仍然可以基于矩阵分析法对区域地质灾害危险性评价。除此之外, 当影响地质灾害发生的主要因素与产生地质灾害的地质体系统不能简单地构成一个多态并联系系统(或多态串联系统)时, 还需要对多态系统的可靠性模型做进一步深入的理论研究, 以尽可能地使所取的的理论成果与从工程实践相结合。当然, 无论是基于矩阵分析的多态并联(或多态串联)系统可靠性分析方法, 还是一个尚待深入研究的更为复杂的其他多态系统可靠性分析问题, 都有待于在区域地质灾害危险性评价的实践中进一步研究和发展。

参考文献:

- [1] 张樑. 21 世纪中国地质灾害防治形势与减灾战略思考[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(2): 16-21.
- [2] 黄润秋, 许强, 陶连金, 等. 地质灾害过程模拟和过程控制研究[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [3] P. Aleotti, R. Chowdhury. Landslide hazard assessment: summary review and new Perspectives [J]. Bull Eng Geol Env, 1999, (58): 21-44.
- [4] 黄润秋, 向喜琼, 巨能攀. 我国区域地质灾害评价的现状 & 问题[J]. 地质通报, 2004, 23(11): 1078-1082.
- [5] 李阔, 唐川. 泥石流危险性评价研究进展[J]. 灾害学, 2007, 22(1): 106-111.
- [6] 刘希林, 莫多闻. 泥石流风险评价[M]. 成都: 四川科学技术出版社; 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 2003.
- [7] 祝玉学. 边坡可靠性分析[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.
- [8] 杨坤, 周创兵, 张昕, 等. 边坡块状结构岩体模糊随机可靠性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 407-413.
- [9] 谭晓慧. 岩质边坡稳定的可靠性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(S0): 1042-1045.
- [10] 谢全敏, 陈立文, 李道明, 等. 滑坡灾害危险性评价的可靠性分析方法[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(1): 109

- 112.
- [11] 罗文强, 张倬元, 王士天, 等. 滑坡灾害的空间可靠性评价[J]. 地质科技情报, 2000, 19(3): 70-72.
- [12] 高社生, 张玲霞. 可靠性理论与工程应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [13] Barlow R E, Wu A S. coherent system with multistate components[J]. Mathematics of operations research, 1978, 3(4): 275-281.
- [14] 唐良忠, 程礼. 求离散多态系统可靠性的矩阵分析法[J]. 空军工程大学学报, 2004, 5(2): 92-94.
- [15] 地质矿产部. 中华人民共和国地质矿产部地质专报-区域地质: 贵州省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1987.
- [16] 贵州省交通规划勘察设计研究院, 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所. 西部地区公路地质灾害监测预报技术研究-地质灾害分类及区划研究报告[R]. 2007.

A Reliability Analysis of Multi-state System on Geological Hazard Zoning

LI Xiuzhen^{1,2}, Kong Jiming^{1,2}, Wang Chenghua^{1,2} and Wang Zhenyu³

- (1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;
2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;
3. Sichuan Vocational and Technical College of Communications, Chengdu 611130, China)

Abstract: Based on researching on reliability of multi-state system, the reliability analysis method of the system using matrix analysis is first introduced into hazard assessment of regional geological hazard. The results indicate that the hazard of regional geological hazard could be better assessed by the method. By using the method, not only the main and secondary hazard areas could be obtained for each sub-region, but also the confidence level of each sub-region in different hazard levels could be obtained. The method basically overcomes the random and artificial factors on classification and quantity of assessing indexes and classification of hazard level in present hazard assessment, and has the characteristics of unified classification criterion, simple assessing indexes and method and better applicability.

Key words: geological hazard; hazard zoning; multi-state system; reliability analysis; matrix analysis method