

基于事件树分析的 GIS 地质灾害动态评估

孙清娟<sup>1</sup>, 胡圣武<sup>2</sup>, 郝亚东<sup>1</sup>, 杜广峰<sup>3</sup>

(1. 黄河水利职业技术学院,河南 开封 475004; 2. 河南理工大学  
测绘学院,河南 焦作 454000; 3. 开封市祥和测绘大队,河南 开封 475003)

**摘要:** 运用事件树分析方法并结合 GIS 技术对动态地质灾害进行研究,并以福建省泉州市德化县浔中镇的地质灾害为实例进行动态地质灾害评价。结果表明:充分考虑到地质灾害的动态因素才可以更加科学地、及时地预测地质灾害,对地质灾害的防护具有很强的指导作用。因此,在进行地质灾害评价时应考虑其动态性,应进一步加强地质灾害的动态评价研究。

**关键词:** 事件树分析;地质灾害;GIS;动态评估

**中图分类号:** P208,P694      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1003-2363(2015)03-0151-05

0 引言

中国在区域地质灾害风险评价中已经开展了大量卓有成效的工作并取得了丰硕的研究成果,如对区域洪涝灾害进行的灾害等级划分和评价<sup>[1-2]</sup>、对区域地质灾害的防治及其国内外评价<sup>[3-7]</sup>等。但目前对地质灾害风险评价是基于静态过程,而地质灾害是随着时间的变化而变化的,是一个动态过程。地质灾害动态风险评价也有一些学者进行了研究,如杜振国等<sup>[8]</sup>、刘明华等<sup>[9]</sup>对地质灾害动态性评价进行了研究。从研究成果来看,地质灾害动态评价还属于探索阶段,监测体系与预警系统还不够完善。概括起来,存在以下几个方面的问题。(1)地质灾害是一个动态的演化过程,随着时间的推移以及影响因素的改变,地质灾害的状态是发生变化的,然而目前的风险评价模型都是静态的,难以反映地质灾害风险随时间的动态变化,无法满足地质灾害应急与处置的需要。(2)评价指标的选取不一,多数评价模型力求各指标是相互独立的,尤其是缺少对指标属性及各指标属性关联的标定,导致指标冗余,不具备可操作性。(3)承灾体数据由于调查成本过高,通常数据缺乏,如果进行较大面积评价时以“点”扩到“面”,将导致评价结果失真。(4)常出现“监测不滑,滑未监测”现象,导致了本该监测的没有监测和大量监测资源的浪费。因此,本研究探讨用事件树分析并结合 GIS 技术,进行地质灾害动态评估,并以福建省泉州市德化县浔中镇为例,对 2012 年第 9 号台风“苏拉”发生期间的 3 个时刻进行地质灾害动态评估的分析。

1 事件树分析法

1.1 事件树模型基本原理

事件树分析是一种逻辑演绎方法,由决策树分析发展而来<sup>[7]</sup>。它由初始事件开始根据事件发展的时间顺序对初始事件可能导致的各种后果进行分析。一般情况下,事件的发生是由多种原因(后续事件)共同作用的结果,而且这些后续事件是相互关联的,存在因果关系。只有一些事件的发生才可能导致另一些事件的发生。通过逐步地分析各事件可能的后续事件状态(成功、失败、正常、故障、安全、危险等),直到系统故障或事故为止,最后形成水平放置的树枝状图,即事件树。事件树分析法的步骤为:(1)确定初始事件。初始事件是事件树中在一定条件下造成事故后果的最初原始事件;(2)找出与初始事件有关的环节事件。环节事件是指出现在初始事件后的一系列可能造成事故后果的其他原因事件;(3)画事件树;(4)说明分析结果。

1.2 事件树模型基本原理

承灾体状态包括人员状态与道路状态。人员状态与道路状态可分为三类<sup>[6]</sup>(表 1)。目前,在地质灾害易发省份,国土部门在降雨预报的基础上发布地质灾害预警,共分为 5 个等级:5 级预警区用红色表示,4 级预警区用橙色表示,3 级预警区用黄色表示,2 级预警区用绿色表示,1 级预警区用蓝色表示。3~5 级向社会发布预警预报(人员接警),1~2 级不予发布(人员待警)。4~5 级要求隐患点人员进行转移,公路封闭,3 级则提醒人员提高警惕,公路设立警示牌。

表 1 承灾体状态类型  
Tab. 1 Type of hazard bearing body state

承灾体类型	状态		
人员	自然状态	警惕状态	转移状态
道路	自然状态	警示状态	封闭状态

收稿日期: 2013-09-05; 修回日期: 2015-04-01  
基金项目: 国家自然科学基金委员会-河南省人才培养联合基金  
项目(U1304401)  
作者简介: 孙清娟(1977-),女,河南南阳市人,讲师,学士,主  
要从事测绘专业教学与研究,(E-mail)sqjuan999@163.com。

而现势状态下,承灾体状态是实时变化的,与降雨、险情、灾情、预警信息发布情况等因素相关。当出现险情或灾情时,人们具有自我的防灾意识,或接到预警而进行自动的避灾转移或警惕。

考虑降雨诱发滑坡灾害风险变化问题,降雨为激发事件,得到人员状态变化事件树(图 1)和道路状态变化事件树(图 2),由此可以清楚地看出降雨情况下可能发

生的子事件。以人员状态事件树(图 1)为例分析,随着降雨的持续,降雨可能达到临界值,岩土体可能出现宏观变形破坏迹象,即出现险情。对于隐患点与非隐患点承灾体的状态是不同的,隐患点一般具有应急预案,在险情达到一定程度时,人员将采取相应的措施,转移、警惕等。而非隐患点人员一般处于自然状态,具有较高的灾害易发性。若出现灾情,灾情区域人员为转移状态。

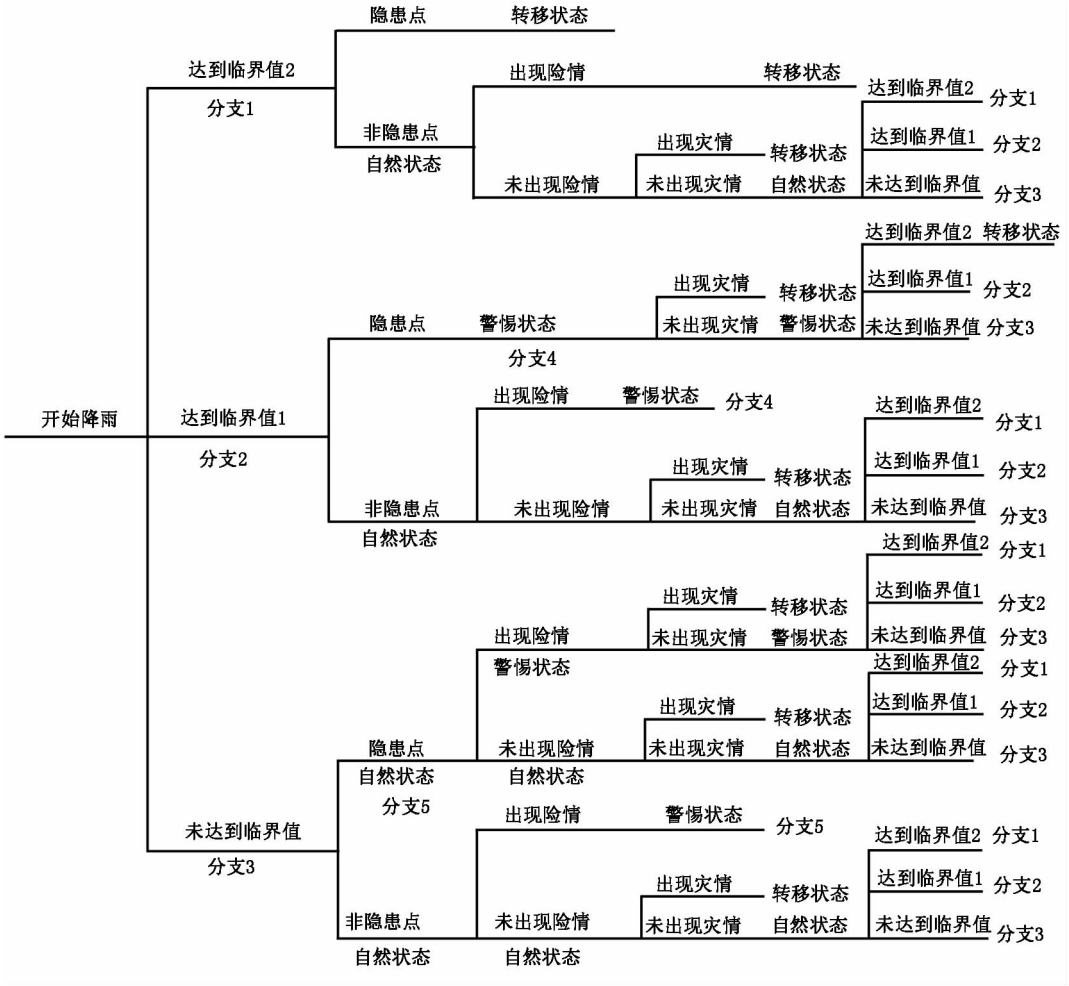


图 1 人员状态变化事件树

Fig. 1 Event tree of personnel status changed

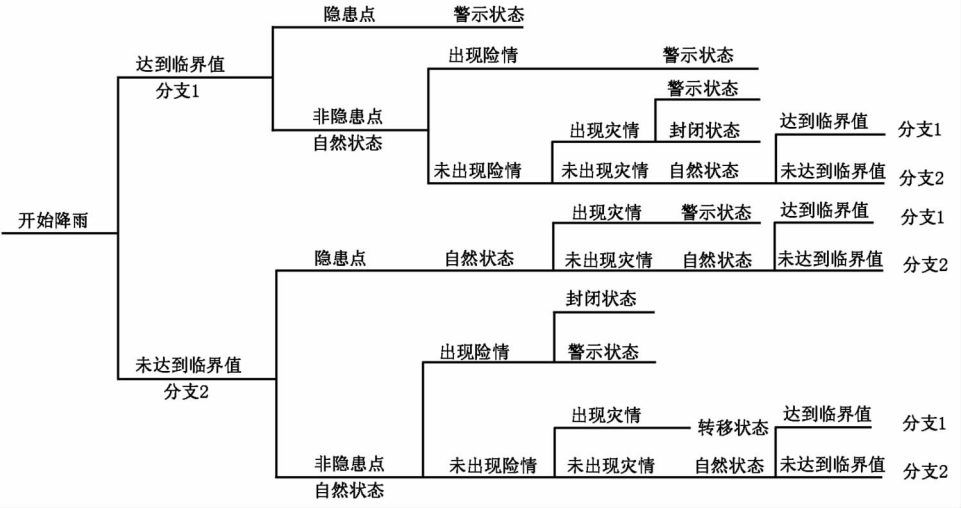


图 2 道路状态变化事件树

Fig. 2 Event tree of road state changed

## 2 实例分析

### 2.1 研究区特征

浔中镇隶属福建省泉州市德化县管辖,位于德化县南部,地理坐标为北纬 25°26′~25°34′、东经 118°11′~118°18′,总面积 57.20 km<sup>2</sup>,为德化县人民政府所在地,是全县政治、经济、文化中心。

浔中镇属于亚热带季风气候,年平均气温 15~19℃,年平均降雨量 1 867.2 mm,日照量为 1 769.6 h。降雨的年际变化大。全年分为 3 个降雨季节:3~6 月为雨

季,多年平均降雨量为 796.5 mm,占全年 42.9%;7~9 月为台风雷阵雨季,多年平均降雨量 775.2 mm,占全年 41.8%,表现为台风暴雨或大暴雨,雨量大而集中,强度高,也是地质灾害易发期;10 月至翌年 2 月为少雨季,多年平均 281.4 mm,仅占全年 15.2%。

### 2.2 动态风险评估标准

评价因素主要考虑坡度、坡向、表土层厚度、坡型、降雨、人口密度、公路等因子<sup>[10-11]</sup>,并按照各指标的特征进行风险等级划分(表 2)。

表 2 浔中镇崩滑灾害动态风险评估标准				
Tab.2 Criterion of landslide disaster dynamic risk assessment of Xunzhong Town				
指标	分级			
	较低风险	中等风险	较高风险	高风险
表土层厚度/m	<1 >6	1~2 5~6	2~3 4~5	3~4
坡向	NW,NE	S,SE,SW	W,E	N
坡度/(°)	<5 >55	5~15 45~55	15~25 35~45	25~35
斜坡结构类型	其他类型斜坡	反向坡	斜向坡	顺向坡
有效降雨量/mm	<40	40~60	60~90	>90
小时雨强/mm	<2	2~4	4~8	>8
险情	无险情		有险情	
人员伤亡	无人员伤亡		人员受伤	人员死亡
道路毁坏	道路通行正常		道路部分破坏,通行困难	道路堵塞或桥梁毁坏,无法通行
人口密度	低	中	较高	高
人员状态	转移状态	警惕状态	自然状态	
道路状态	封闭状态	警示状态	自然状态	
道路等级	乡公路	县公路	省公路	国家公路

### 2.3 GIS 实现动态风险评估

2.3.1 2012 年 8 月 2 日 15 时风险区划与制图。应用 ArcGIS 中的 Overlay 功能,采用公式进行叠加分析:灾害易发性得分=坡度×0.51+坡向×0.07+坡型×0.21+表土层厚度×0.21,得到灾害易发性区划图(图 3)和评估分区结果(表 3)。

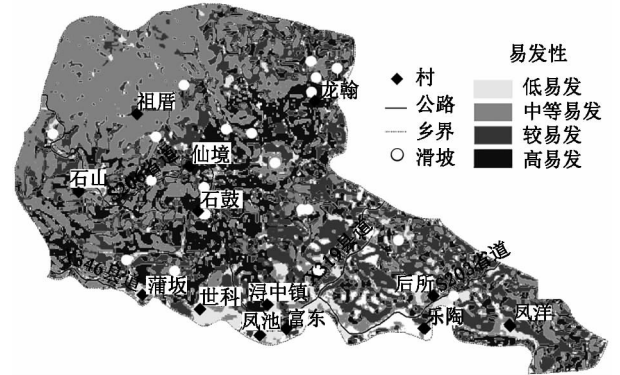


图 3 浔中镇灾害易发性区划图  
Fig.3 Liability zoning map of Xunzhong Town

从表 3 中可以看出,灾害高易发区包含了 24 个灾害点中的 13 个,占到了一半以上,较易发区包含 6 个,占 1/4,证明易发区划较为合理。

表 3 浔中镇各行政村灾害易发性评估分区结果

Tab.3 Results of the vulnerability assessment partition of each administrative village in Xunzhong Town				
分区域别	等级	分布行政村	灾害点/个	
高易发	4	龙翰、仙境、石山、石鼓、浔中、后所	13	
较易发	3	石山、蒲坂、凤洋、后所、乐陶	6	
中等易发	2	祖厝、世科、富东	4	
低易发	1	祖厝、世科、富东、凤池、乐陶	1	

2.3.2 2012 年 8 月 3 日 10 时与 23 时风险区划与制图。根据以上事件树分析结果,3 日 10 时降雨达到临界值 3,隐患点周边区域人员处于转移状态,进行人员状态更新,得到即时更新的灾害易发区划图(图 4a)。同时,进行降雨数据更新,并采用相同的方法进行风险评估。3 日 23 时发生灾害,首先进行相似度计算,提取与灾情点相同地质环境区域(图 4b),然后进行灾情点周边区域人员状态更新,得到即时更新的灾害易发区划图(图 4c)。再次,进行降雨数据更新及危险区域图更新,结合灾害易发区划图进行运算,得到 3 日 23 时风险评估区划图(图 5)。

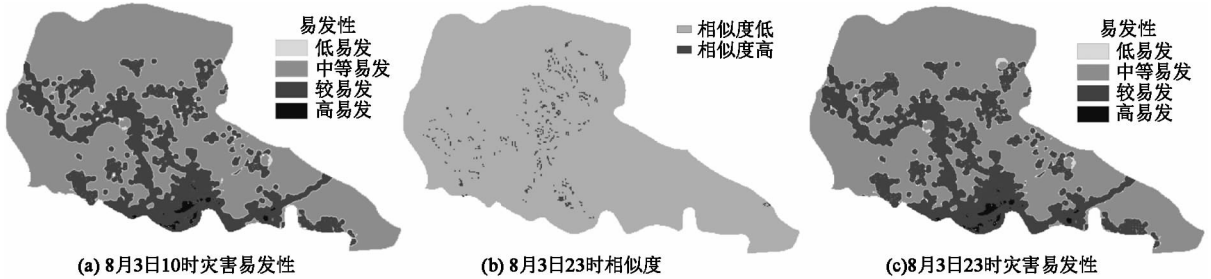


图 4 评价结果

Fig. 4 Evaluation results

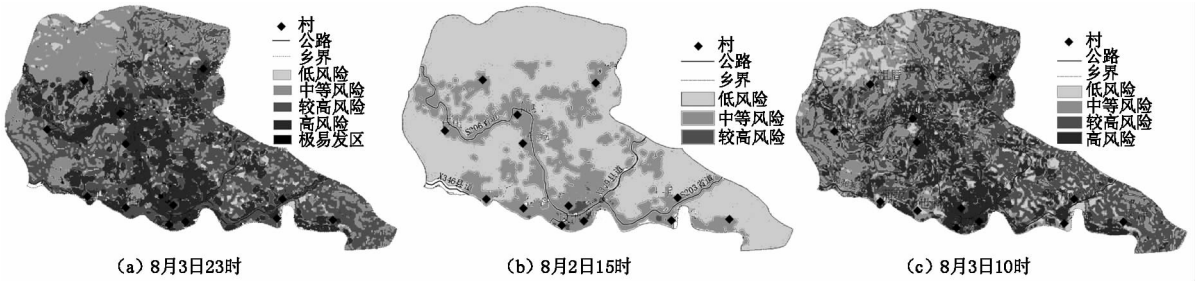


图 5 3 个时刻风险评价结果

Fig. 5 Results of the risk assessment of the three moments

3 评价结果

3.1 评价结果分析

3.1.1 3 个时刻风险评价结果。3 个时刻风险评价结果(表 3)为:① 8 月 2 日 15 时,风险等级不高,没有高风险区域分布,除镇中心东北部、乐陶村小面积为较高风险外,其他地区风险等级都在一、二等级。主要由于 15 时降雨刚开始,除东南部乐陶村、风洋村、后所村降中雨,其他地区为小雨,风险等级较低。镇东北部人口密集,灾害为较易发,风险为较高级。② 8 月 3 日 10 时,有 4 个等级的风险区。高风险区广泛分布在石山村、仙境村、石鼓村、龙翰村、凤池、富东大部分地区以及风洋南部、蒲坂村周边地区。主要由于这些地区地质灾害高易发,人口较密集,省道 S206 和省道 S203 乐陶段从此经过,其中省道 S206 石鼓至石山段以及省道 S203 乐陶段为风险最高。较高风险区主要分布在风洋村、后所村、蒲坂村大部、石山村、世科村、祖厝村南部以及龙翰村东南部与西北部。主要由于地质灾害较易发,人口相对较集中。中等风险区分布在风洋村、石山村南部、县道 X346 沿线。此地区在浈河流域周边,坡度较缓,地质灾害中等易发。低风险区分布在祖厝村北部大部分地区,世科村、后所村部分地区以及石鼓、后所 2 处隐患点区。祖厝村北部大部分地区海拔较高,人口较稀疏,人类工程活动相对较少,地质灾害较不易发,风险较低。石鼓、后所 2 处隐患点为低风险区。③ 8 月 3 日 23 时,风险公布区域大体与 8 月 3 日 15 时相同。主要分布在 S206 省道、S203 省道沿线和石山、仙境、石鼓、富东、后所等村庄以及乐陶村地区。石鼓、后所 2 处隐患点以及龙翰村 9 组滑坡区域为低风险。

3.1.2 3 个时刻风险评价结果对比分析(表 4)。① 8 月 2 日 15 时,由于降雨等级较低,虽然人员状态与道路状态为自然状态,具有较高的易发性,然而危险性等级低,地质灾害发生可能性小,风险普遍偏低。② 3 日 10 时,全镇范围降雨从 2 日 15 时的小雨转为暴雨,前期有效降雨达到临界值 1,风险普遍增高。根据应急预案,此时隐患点威胁区域人员已经转移,威胁区域外围人员将处于警惕状态。由于承灾对象不存在,因此,石鼓、后所 2 处隐患点风险由高风险转为低风险。③ 3 日 23 时与 10 时相比,高风险区域面积扩大。虽然此时降雨已由暴雨转为小雨,然而前期有效降雨量达到了临界值 3,为最高等级,地质灾害的发生具有滞后效应,此时危险等级仍然很高,因此风险等级与 10 时相近。此时石鼓、后所 2 处隐患点以及龙翰村滑坡区域人员已经转移,虽具有高风险,但无承灾对象,风险等级低。高风险区域面积扩大是由于龙翰村 9 组发生滑坡灾害,与此滑坡相似的地质环境区域为极易发区。其中高风险区与极易发区重合区域应为极高风险区,主要分布在石鼓村、仙境村、浔中村以及龙翰村。

3.2 动态风险管理

3.2.1 转移避让。转移避让是最经济、最有效的地质灾害预防措施。当出现以下情况时将隐患点或威胁区域的人员进行转移避让:① 雨强达到 8 mm/h 或有效降雨量达 90 mm 时;② 斜坡出现裂缝、隆起与沉陷、小型崩塌、冒浑水等险情时;③ 发生灾情时。

3.2.2 监测预警。浔中镇地质灾害滑坡 99% 以上为浅层土质小型滑坡。目前,多数高陡边坡是由于切坡建房、人为开挖坡脚改变了斜坡的自然形态,降低了稳定性,在强降雨作用下易诱发滑坡、崩塌灾害。灾害虽然

表 4 3 个时刻风险评价结果对比  
Tab.4 Comparison of three-time risk assessment results

时间	特征	分级			
		高风险	较高风险	中等风险	低风险
8 月 2 日 15 时	单元数/个	0	41	1 96	3 966
	面积/km <sup>2</sup>	0	0.39	18.79	38.02
	所占比例/%	0	7.00	32.84	66.46
8 月 3 日 10 时	单元数/个	1 401	2 396	1 677	492
	面积/km <sup>2</sup>	13.43	22.97	16.08	1.82
	所占比例/%	23.49	40.15	28.11	8.25
8 月 3 日 23 时	单元数/个	1 567	2 191	2 018	190
	面积/km <sup>2</sup>	15.02	21.01	19.35	1.82
	所占比例/%	26.26	36.73	33.82	3.19

规模较小,但灾害点多,较难全面治理,且在房前屋后,直接威胁居民的生命与财产安全。因此,建立健全地质灾害群测群防网络和监测预警系统是进行浔中镇地质灾害防治工作的重要措施。具体措施如下:①对高风险区域安排责任人进行险情巡查、监测、报警、速报;②对极高风险地区实行重点监测与加密监测;③对处于高风险的重点区域(如学校、公路等)降雨期间设立警示标志,警示或禁止人员与车辆通行。

3.2.3 应急准备。由于隐患点人员已经进行转移,属于低风险。此时应将防灾重点放在高风险区域,快速调度车辆、人员及物资,合理分配救援力量及救援物资,提前做好应急准备,并根据实时风险动态变化调整方案。

4 结论

运用事件树分析,结合 GIS 技术,并通过建模的方式,对福建省德化县浔中镇 2012 年第 9 号台风“苏拉”影响期间地质灾害进行动态风险评价,得到 3 个时刻的地质灾害风险评价结果。并通过对 3 个结果的比较,提出了更加科学的动态风险管理建议,从而验证了地质灾害风险动态评价模型的可行性。

由于地质灾害动态风险评价的复杂性和动态因素

的不可预见性,地质灾害动态评价还有很多问题需要解决,如数据的及时更新等<sup>[12-13]</sup>。希望通过本研究能够促进地质灾害风险动态评价的深入研究。

参考文献:

[1] 周见,郝成元,吴文祥. 基于 GIS 的黑龙江省水稻低温灾害风险等级区划[J]. 地域研究与开发,2014,33(1):109-112.

[2] 吉中会,李宁,吴吉东,等. 区域洪涝灾害损失评估及预测的 CART 模型研究——以湖南省为例[J]. 地域研究与开发,2012,31(6):106-111.

[3] 黄润秋,向喜琼,巨能攀. 我国区域地质灾害评价的现状与问题[J]. 地质通报,2004,23(11):1078-1082.

[4] 陈玉,蔺启忠,王钦军. 区域地质灾害评价模型综述[J]. 防灾科技学院学报,2010,12(4):42-45.

[5] 刘传正,张明霞,孟晖. 论地质灾害群测群防体系[J]. 防灾减灾工程学报,2006,26(2):175-179.

[6] 尚志海,刘希林. 国外可接受风险标准研究综述[J]. 世界地理研究,2010,19(3):72-80.

[7] 谢剑明,刘礼领,殷坤龙. 浙江省滑坡灾害预警预报的降雨阈值研究[J]. 地质科技情报,2003,22(4):101-105.

[8] 杜振国,罗鹏程,厉海涛,等. 基于动态事件树的安全风险分析方法[J]. 科学技术与工程,2011,11(22):5264-5269.

[9] 刘明华,赵爽,杨秀花. 河南省区域综合承载力动态评价研究[J]. 地域研究与开发,2014,33(8):31-36.

[10] 董颖. 地质灾害风险评估理论与实践[M]. 北京:地质出版社,2009.

[11] 姚莉,李小泉,张立梅. 我国 1 小时雨强的时空分布特征[J]. 气象,2009,35(2):80-87.

[12] 胡圣武. GIS 质量评价与可靠性分析[M]. 北京:测绘出版社,2006.

[13] 胡圣武. 基于模糊理论和典型线路的地质灾害评价的 GIS 方法研究[J]. 测绘科学,2011,36(4):86-89.

GIS Dynamic Risk Assessment  
of Geological Disasters Based on Event Tree Analysis

Sun Qingjuan<sup>1</sup>, Hu Shengwu<sup>2</sup>, Hao Yadong<sup>1</sup>, Du Guangfeng<sup>3</sup>

(1. Yellow River Conservancy Technical Institute, Kaifeng

475004, China; 2. School of Surveying and Mapping, Henan Polytechnic

University, Jiaozuo 454000, China; 3. Kaifeng Xianghe Surveying and Mapping, Kaifeng 475004, China)

**Abstract:** In order to study risk assessment of dynamic geological disasters, the paper firstly discussed event tree analysis and then combined with GIS, and treated Xunzhong Town of Dehua County in Quanzhou City, Fujian Province as study area. The results show that it can more scientifically, timely predict geological disasters and has a stronger guiding role to protect geological disasters. Therefore, in the geological hazard assessment should consider its dynamics and research should further strengthen on the dynamics of geological disasters.

**Key words:** event tree analysis; GIS; geological disaster; dynamic evaluation