

# 基于事件树和模糊理论的 GIS 动态地质灾害评估

胡圣武<sup>1</sup> 王育红<sup>1</sup>

1 河南理工大学测绘学院,河南 焦作, 454000

**摘 要:**我国目前对地质灾害评估的研究主要是基于静态的,而实际上地质灾害是一个动态变化的过程,应进行动态地质灾害评估的研究。首次探讨用事件树分析和模糊多层次综合评判结合 GIS,进行动态地质灾害评估的研究,选择福建省泉州市德化县浔中镇为实例,通过选用 2012-08 台风“苏拉”,08-02:15:00、08-03:10:00 与 08-03:23:00 等 3 个时刻的地质灾害情况,分别作出评价风险图,预测地质灾害的动态变化趋势,从而采取相应的地质灾害防范的措施。其研究结果对地质灾害的防范具有一定的指导作用,能减少一定损失。

**关键词:**事件树分析;模糊理论;GIS;动态地质灾害;评估

**中图法分类号:**P208; P258      **文献标志码:**A

我国在区域地质灾害风险评价中开展了大量卓有成效的工作,并取得了丰硕的成果,但现有地质灾害风险评价主要是基于静态的,动态风险评价还处于探索阶段,监测体系与预警系统还不够完善<sup>[1-3]</sup>。概括起来,主要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,导致数据缺乏,如果进行较大面积区域评价时以“点”扩到“面”,将导致评价结果失真。

(4) 失败的预警率高,监测预警模型的预警对象是一个较大的区域范围,而山区通常有“一山分四季,十里不同天”的现象,面域降雨量与地质灾害点所在降雨量会有显著差异,同时地质条件的差异,降雨的动态变化,因而准确预报的概率低。

(5) 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<sup>[4]</sup>。

本文探讨用事件树分析和模糊多层次综合评判并结合 GIS,进行动态地质灾害评估的研究,并选福建省泉州市德化县的浔中镇为实例进行动态地质灾害评估的分析。

## 1 事件树分析法

### 1.1 事件树模型基本原理

事件树分析(event tree analysis, ETA)是一种逻辑演绎方法,由决策树分析发展而来<sup>[5]</sup>。它由初始事件根据事件发展的时间顺序进行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。通过一步一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,故叫事件树。事件树分析法的步骤如下。

① 确定初始事件。初始事件是事件树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

收稿日期:2013-09-07

项目来源:国家自然科学基金-河南省人才培养联合基金资助项目(U1304401)。

第一作者:胡圣武,副教授,博士,现主要从事 GIS 基础理论和图像处理技术研究。E-mail:hushengwuzhu@163.com

通讯作者:王育红,副教授,博士。E-mail:wangyh@hpu.edu.cn

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 承灾体状态变化事件树分析

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 3 类<sup>[6]</sup>,如表 1 所示。

表 1 承灾体状态类型

Tab. 1 Type of Hazard Bearing Body State		状态	
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

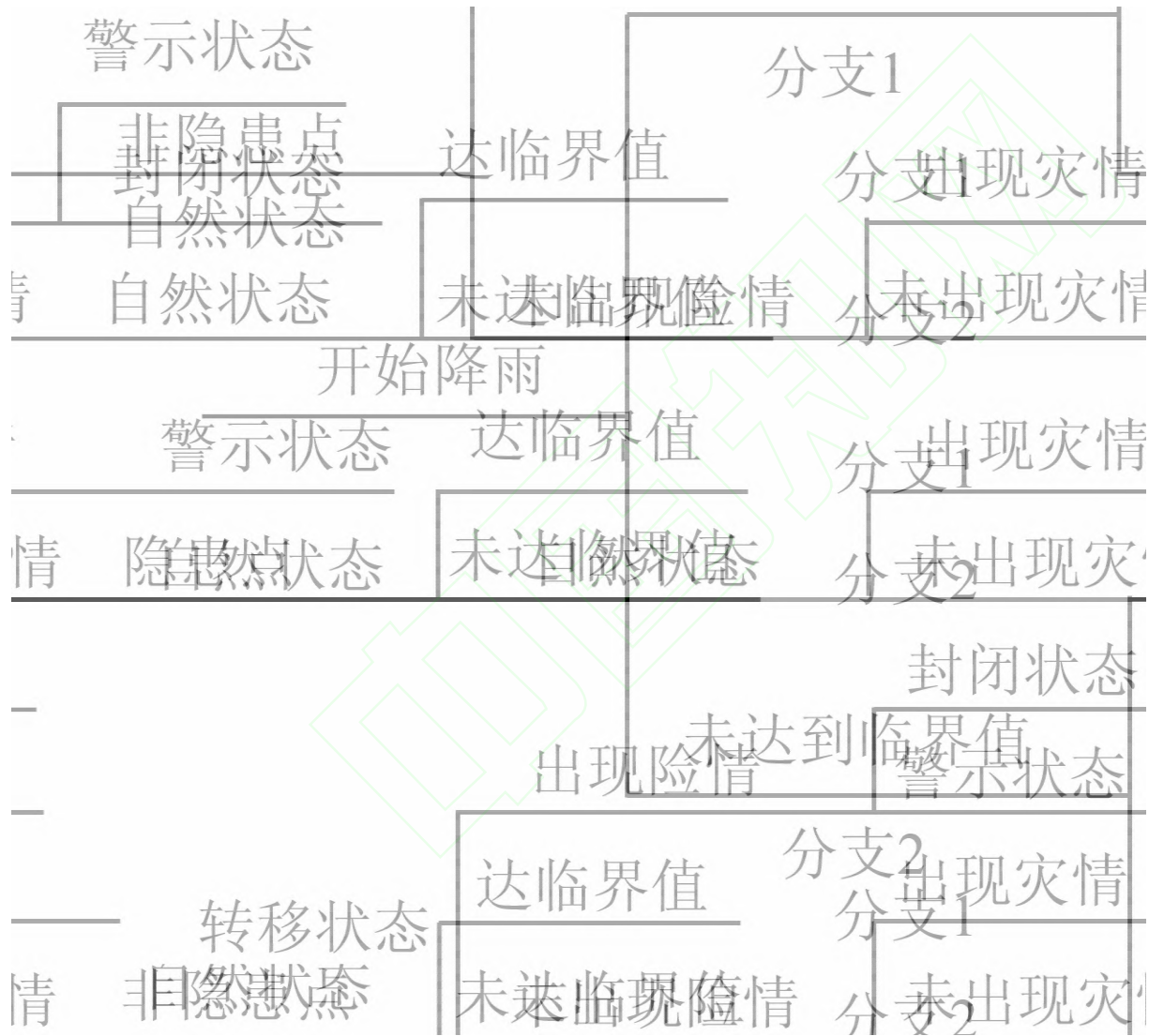


图 1 人员状态变化事件树

Fig. 1 The Event Tree of Personnel Status Change

① 人员状态变化事件树

考虑降雨诱发滑坡灾害风险变化问题,降雨为激发事件,可得到如图 1 所示人员状态变化事件树,从图 1 可以清楚地看出降雨情况下可能发生的事件。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的时候,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,具有较高的易损性。

② 道路状态变化事件树分析

采用相同的方法进行道路状态变化事件树分析,如图 2 所示。

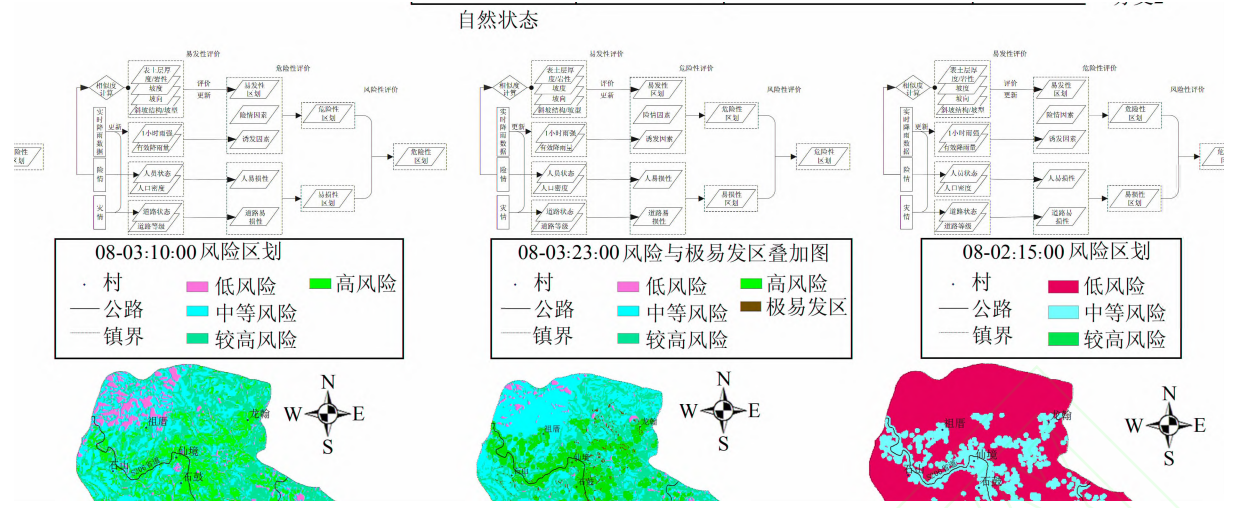


图 2 道路状态变化事件树  
Fig. 2 The Event Tree of Status Change

## 2 模糊综合评判的动态风险评价

影响地质灾害风险的因素是多层次与多方面的,各因素对风险的影响程度是不同的,风险级别的划分以及各因素对应不同等级的界限是模糊的。本文选用模糊综合评判方法,将实时更新的降雨、险情、承灾体状态等因子以及其他静态因子进行地质灾害动态风险评价。

### 2.1 模糊综合评判模型数学原理

模糊综合评判方法,是基于模糊变换原理与评价模糊系统的一种综合评价方法。在处理难以用精确数学方法进行描述的复杂系统问题时,表现出了独特的优越性,所以被广泛应用于各个学科领域<sup>[7-8]</sup>。

#### ① 模糊评语集的确定

将评判等级标准分为“较低风险”、“中等风险”,“较高风险”和“高风险”等 4 个等级,即评语集为: $V = \{I \ II \ III \ IV\} = \{\text{较低风险} \ \text{中等风险} \ \text{较高风险} \ \text{高风险}\}$ 。

#### ② 模糊评判标准的确立

从评价指标体系与模糊评语集出发,将定性指标与量化的指标按照统一量纲的原则,确定评判标准。

#### ③ 隶属函数的构造

在模糊综合评判中,隶属函数的建立是单因素评判的关键环节,本文选取的评价指标中,即有定性指标(离散型),如地层岩性、斜坡结构类型、险情等,也有定量指标(连续型),如降雨量、人口密度等。对于定性指标,首先划分出因子的风险级别,赋予不同级别值,采用经验赋值的方法确定

隶属度。对于定量指标的隶属函数,采用梯形分布函数来刻画<sup>[9-10]</sup>。

#### ④ 模糊变换与综合评判

评判各因子由于各有侧重,需对各因子赋予权重  $W = \{a_1 \ a_2 \ \cdots \ a_n\}$ ,然后采用模糊综合评判模型  $B = W \cdot R_i$  进行一级模糊综合评判。然后对评判结果作归一化处理,根据最大隶属原则确定样本归属。本文为了将各因子对地质灾害动态风险的影响程度都反映出来,故采用加权平均模型  $M(\cdot, +)$  模糊算子进行模糊变换。其评价流程如图 3 所示。

把用模糊综合评判的结果用于事件树分析,确定出风险区划和采取措施。

## 3 实例分析

### 3.1 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:北纬  $25^{\circ}26' \sim 25^{\circ}34'$ ,东经  $118^{\circ}11' \sim 118^{\circ}18'$  之间,总面积  $57.20 \text{ km}^2$ ,为德化县人民政府所在地。

浔中镇地质灾害主要类型有滑坡、崩塌、不稳定斜坡等,此外还有众多的屋后潜在地质安全隐患点,地质灾害点共有 27 处,其中滑坡 26 处,崩塌 1 处,灾害点密度  $0.472 \text{ 处/km}^2$ 。

### 3.2 动态风险评价的 GIS 建模实现

#### 3.2.1 动态风险评价标准

评价因素主要考虑:坡度、坡向、表土层厚度、坡形、降雨、人口密度、公路等。其他各因子等级划分见表 2。



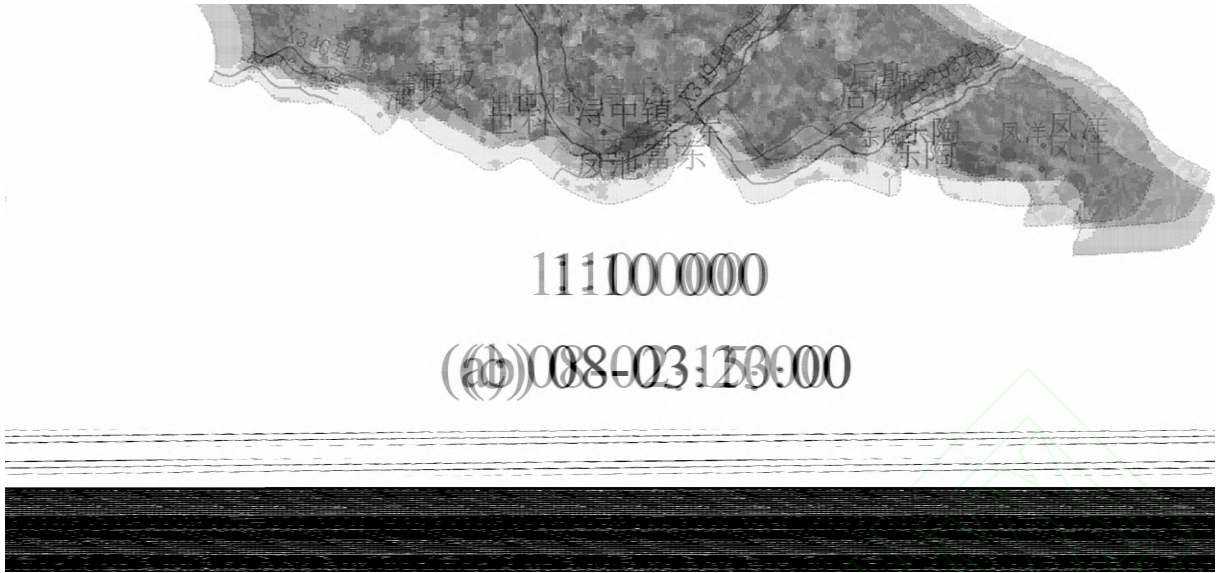


图 3 评价流程  
Fig. 3 Flowchart of Assessment

表 2 浔中镇崩滑灾害动态风险评价标准

Tab. 2 The 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

3.2.2 GIS 建模实现

1) 试验区评价单元网格剖分

评价范围和工作比例尺:浔中镇面积为57.20 km<sup>2</sup>,属于面评价。根据面评价的特点及该区地质灾害分布特征及研究程度,选择1:1万地形图。

评价单元形式及大小:评价单元主要有地貌形态单元,斜坡结构类型单元,行政区划和规则网格单元,根据可操作性和简易性采用规则网格单元划分。采用10 mm×10 mm的方格进行网格化,依据基础图件为1:10 000的地形图和工程地质图,总共划分为5 968个评价单元。

2) 评价指标的栅格模型量化

基于 ArcGIS 软件平台,对指标进行模型量

化,采用梯形隶属函数对定量指标进行隶属度计算,对表土层厚度与坡度两个中间值最易发的指标,采用“越大越优”或“越小越优”带入隶属度函数进行运算。对于其他定量指标,如每小时雨强、人口密度等,代入隶属度函数进行运算,分别得到隶属度分布。对定性指标,如坡向、坡型、险情、承灾体状态等指标直接采用经验对隶属度进行赋值,在 ArcGIS 中采用编辑属性表的方式进行,得到坡型隶属度分布。

3) 08-02:15:00、08-03:10:00 与 08-03:23:00 风险评价结果图

根据上文事件树分析,进行降雨数据更新,危险区域图更新,结合易损性区域图进行运算,得到3个时刻的风险评价区划图(图4)。

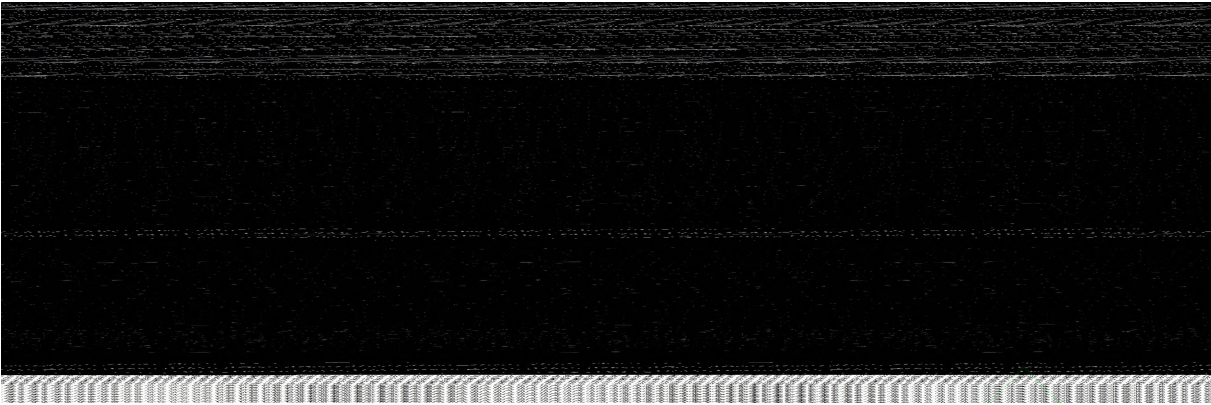


图 4 3 个时刻风险评价结果图

Fig. 4 The Results of the Risk Assessment Map of the Three Moments

3.3 评价结果分析

3 个时刻风险评价结果见表 3 所示,说明如下。

1) 08-02:15:00,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,其他地区为低风险中等风险区。主要由于 08-02:15:00 降雨刚开始,除东南部乐陶村、凤洋村、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) 08-03:10:00,风险分布如下。

① 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、以及凤洋南部、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。

② 较高风险区

主要分布在凤洋村、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。

③ 中等风险区

中等风险区公布在凤洋村、石山村南部、县道 X346 沿线。此地区在浚溪流域周边,坡度较缓,地质灾害中等易发。

④ 低风险区

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、后所两处隐患点区。祖厝村北部大部分地区海拔较高,地质灾害较不易发,风险较低。石鼓、后所两处隐患点为低风险区。

3) 08-03:23:00,风险分布区域大体与

08-03:15:00 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、后所两处隐患点以及龙翰村 9 组滑坡区域为低风险。

3 个时刻风险评价结果对比分析。

1) 08-02:15:00,由于降雨等级较低,虽然人员状态与道路状态为自然状态,具有较高的易损性,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) 08-03:10:00,全镇范围降雨从 08-03:15:00 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、后所两处隐患点风险由高风险转为低风险。

3) 08-03:23:00 与 08-03:10:00 相比,高风险区域面积扩大。虽然本时刻降雨已由暴雨转为小雨,然后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 08-03:10:00 相近。此时石鼓、后所两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,与此滑坡相似地质环境区域(图 4 紫色区域)为极易发区。其中高风险区与极易发区重合区域(图中红色与紫色重合区域)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。

3.4 动态风险管理

现就浔中镇地质灾害风险动态评价结果提出以下风险管理建议。

(1)转移避让。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

表 3 3 个时刻风险评价结果对比表

Tab. 3 The Comparison Table 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
08-02:15:00	单元数	0	41	1 960	3 966
	面积/km <sup>2</sup>	0	0.39	18.79	38.02
	所占比率/%	0	0.70	32.84	66.46
08-03:10:00	单元数	1 401	2 396	1 677	492
	面积/km <sup>2</sup>	13.43	22.97	16.08	1.82
	所占比率/%	23.49	40.15	28.11	8.25
08-03:23:00	单元数	1 567	2 191	2 018	190
	面积/km <sup>2</sup>	15.02	21.01	19.35	1.82
	所占比率/%	26.26	36.73	33.82	3.19

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。

(2)监测预警。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)应急准备。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,合理分配救援力量以及救物质,提前做好应急准备。并根据实时风险动态变化,进行方案调整。

4 结 语

本文运用事件树分析和模糊综合评判等理论,通过 GIS 建模的方式进行福建省德化县浔中镇 2012 年第 8 号台风“苏拉”影响期间地质灾害动态风险评价,包括网格划分、栅格模型量化、有权叠加运算,得到 3 个时刻的地质灾害风险评价结果,并进行了 3 个结果比较,提出动态风险管理建议,验证了动态地质灾害风险评价模型的可行性。

由于动态风险评价的复杂性,还有很多问题需要解决,如隶属度的确定,数据的及时更新等。希望通过本文的研究可以促进动态地质灾害风险评价的大力研究。

参 考 文 献

[1] Shang Zhihai,Liu Xilin. Overviews on Foreign Acceptable Risk Criteria[J]. *World Regional Studies*, 2010, 19(3):72-80(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)  
[2] Huang Runqiu, Xiang Xiqiong, Ju Nengpan. Assessment of China's Regional Geohazards: Present Situation and Problems[J]. *Geological Bulletin of China*,2004,23(11):1 078-1 082(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):1 078-1 082)  
[3] Chen Ping, Wang XingLing, Chen Xiaoling. Assessment of Vulneer Ability to Soil Erosion in Poyang Lake Ecological Economic Zone[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(6): 750-755(陈萍,王兴玲,陈晓玲. 鄱阳湖生态经济区土壤侵蚀脆弱性评价[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2012,37(6):750-755)  
[4] Liu Chuazheng,Zhang Mingxia,Meng Hui. Study on the Geo-Hazards Mitigation System by Residents'Self-Understanding and Self-Monitoring[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*,2006, 26(2):175-179(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)  
[5] Xie Jianming,Liu Liling,Yin Kunlong. Study on the Threshold Valves of Rainfall of Landslids Hazards for Early-warning and Prediction in Zhenjiang Province[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2003,22(4):101-105(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)  
[6] Du Zhenguo,Luo Pengcheng,Li Haitao,et al. The Method of Safety Risk Analysis Based on Dynamic Event Tree[J]. *Science Technology and Engineering*, 2011,11(22):5 264-5 269(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科学技术与工程[J]. 2011,11(22):5 264-5 269)  
[7] Hu Shengwu. GIS Quality Evaluation and Reliability Analysis [M]. Beijing: Surveying and Mapping Pres,2006(胡圣武. GIS 质量评价与可靠性分析[M]. 北京:测绘出版社,2006)

[8] Zhang Xiaohong. Fuzzy Mathematics and Rough Set Theory [M]. Beijing: Qinghua University Press, 2013(张小红. 模糊数学与 Rough 集理论[M]. 北京:清华大学出版社,2013)

[9] Dong Ying. Geological Disaster Risk Assessment and Practice [M]. Beijing: Geological Presss, 2009 (董颖. 地质灾害风险评估理论与实践[M]. 北京:地质出版社,2009)

[10] Yao Li, Li Xiaoquan, Zhang Limei. Spatial-Temporal Distribution Characteristics of Hourly Rain Intensity in China[J]. *Meteorological Monthly*, 2009, 35(2):80-87(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)

# GIS Dynamic Risk Assessment of Geological Disasters Based on Event Tree Analysis and Fuzzy Theory

HU Shengwu<sup>1</sup>    WANG Yuhong<sup>1</sup>

1    School of Geodesy and Geomatics, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China

**Abstract:** Risk assessment research on geological disasters mainly focuses on static disasters, but geological disasters however are dynamic process. The study of dynamic geological disasters therefore are a pressing topic at present. The paper firstly discusses the use of event tree analysis and multi-level fuzzy comprehensive evaluation combined with GIS, with the Xunzhong town of Dehua country in Quanzhou city, Fujian province as the study area; selecting the sura typhoon of August 2012, and the geological disasters of August 2nd 15, August 3rd 10 and August 3rd 23 to made a evaluation risk map to predict the development of dynamic change with this trend of geological disasters respectively to support geological disaster prevention measures. The results suggest that such techniques might play a guiding role in protection from geological disasters and could reduce loss.

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

**First author:** HU Shengwu, PhD, associate professor, specializes in GIS basic theory and image processing. E-mail: hushengwuzhu@163.com

**Corresponding Author:** WANG Yuhong, PhD, associate professor. E-mail: wangyh@hpu.edu.cn

**Foundation support:** The Union Fund of the National Natural Science Foundation of China and Fostering talents of Henan Province, No. U1304401.