

# 基于故障树分析法的亚热带地区泥石流危险性评价

吴强<sup>1</sup>, 徐林荣<sup>1</sup>, 陈宏伟<sup>1</sup>, 陈鸿志<sup>2</sup>

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 重庆蜀通岩土工程有限公司, 重庆 401147)

**摘要:**通过分析泥石流危害的影响因子及其间存在的逻辑关系,运用故障树分析法(FTA),针对亚热带地区泥石流主要危害线域工程的特点,建立了泥石流灾害评价故障树,并应用于泥石流危险性评价。对广东省乐昌市 16 条泥石流沟危险度的评价结果表明,该方法与传统灰色关联度危险度评价法结果一致性较高,且更符合实际情况。该法克服了传统方法因子、权重不灵活,未考虑因子之间的非线性关系,及地区适用局限性问题。从而证明了故障树分析(FTA)法在泥石流危险性评价应用中的有效性和可行性。

**关键词:** 泥石流; 故障树分析法(FTA); 亚热带; 危险性评价

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2014)06-0316-05

中图分类号: P642.23

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.06.061

## Hazard Assessment of Debris Flow in Subtropical Area Based on Fault Tree Analysis

WU Qiang<sup>1</sup>, XU Lin-rong<sup>1</sup>, CHEN Hong-wei<sup>1</sup>, CHEN Hong-zhi<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hu'nan

410075, China; 2. Chongqing Shutong Geotechnical Engineering Co., Ltd., Chongqing 401147, China)

**Abstract:** The hazard assessment of debris flow was conducted by applying fault tree analysis(FTA) on characteristics of debris flow line engineering in subtropical area after analyzing influence factors of debris flow and the logical relationships between them. The new hazard assessment was applied to evaluate the hazard degree of 16 debris flow gullies in Lechang City of Guangdong Province. The results showed that it is more reasonable than the traditional grey correlation method because it solved some of the problems the traditional method always got such as the applying area was limited, the influence factors and weight were inflexible, and the non-linear relationship between them was not considered. Therefore, the fault tree analysis (FTA) was proved to be an effective and feasible method for the hazard assessment of debris flow.

**Keywords:** debris flow; fault tree analysis(FTA); subtropical; hazard assessment

泥石流是山区常见的地质灾害之一,具有分布广、爆发突然、破坏力强等特点,常冲毁铁路公路等交通基础设施,甚至危害城镇人民生命财产安全。因此,泥石流危险和损失的评价研究对于防灾减灾工作具有重要意义。关于泥石流危险度评价方面的研究最早始于 1977 年足立胜治<sup>[1]</sup>的研究,但其当时主要指泥石流发生频率。其后, Hollingsworth 等<sup>[2]</sup>采用打分方法,对泥石流危险度进行定量评价。国内与泥石流危险度有关的研究最早见于 1986 年谭炳炎<sup>[3]</sup>的泥石流沟严重程度的数量化综合评判,其科研成果已在铁路部门得到推广和应用。泥石流危险度一词的正式使用始于刘希林<sup>[4]</sup>,其提出以泥石流规模和发生频率为主要因子,用关联度分析法提取次要因子,得出的单沟泥石流危险度评价公式在国内具有代表性。泥石流危险度的影响因素很多,不同学者对泥石流危险性评价因子的选取和权重确定也存在差异<sup>[3,5]</sup>。

史培军<sup>[6]</sup>提出由致灾因子、承灾体及孕灾环境共同组成灾害系统的概念,进行灾害链损失评估,对泥石流灾害评价具有指导意义。

中国南方亚热带地区暴雨泥石流分布广泛,如华南南岭,武夷山,湘西等地区<sup>[6-7]</sup>,该地区多为低山丘陵区,泥石流爆发通常为中、小规模,主要的危害是损毁线域工程(铁路、公路等)的基础设施和威胁运营安全<sup>[8-9]</sup>。1961 年 Warton<sup>[10]</sup>提出故障树分析法(FTA),在复杂系统可靠性分析与设计中得到广泛应用,近年来该方法在各类系统故障诊断中引起关注<sup>[11]</sup>。本研究通过分析泥石流灾害链各影响因素的相互关系,建立亚热带线域工程泥石流起动一致灾链故障树分析模型,并以广东省乐昌市 2013 年台风“尤特”引发的泥石流灾害进行分析,论证此方法的有效性和可行性,希望能为解决泥石流对线域工程的危害评价问题提供新的思路。

收稿日期:2014-05-04

修回日期:2014-06-04

资助项目:国家自然科学基金资助项目“泥石流危害桥隧工程承灾链特征与工程易损度动态评价方法研究”(41272376);中国铁路总公司科技研究开发计划项目(2011G017-C)

作者简介:吴强(1989—),男(汉族),江西省吉安市人,硕士研究生,研究方向为地质灾害评估与防治。E-mail:wqiang\_369@163.com。

# 1 故障树分析法在线域工程泥石流灾害评价中的应用

## 1.1 故障树分析

故障树分析法(FTA)是以系统最不希望发生的事件作为分析的目标(顶事件),找出系统内可能发生的部件失效、环境变化、人为失误等因素(各种底事件)与系统失效之间的逻辑联系,可形象地用倒立树状图形表示出来<sup>[12]</sup>。

当系统顶事件  $T$  的状态用  $\Phi$  来表示,则  $\Phi$  必然是底事件状态  $x_i$  的函数。

$$\Phi = \Phi(x) = \Phi(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

式中: $\Phi(x)$ 就是作为故障树的数学表述的结构函数。

用最小割集表示的结构函数来求顶事件发生概率<sup>[10,12]</sup>,设系统最小割集的表达式为  $K_j(x)$ ,则系统最小割集结构函数为:

$$\Phi(x) = \sum_{j=1}^k K_j(x) \quad (2)$$

式中: $k$ ——最小割集数。 $K_j(x)$ 的定义为

$$K_j(x) = \prod_{i \in k_j} x_i \quad (3)$$

求系统顶事件发生概率,即使  $\Phi(x) = 1$  的概率,只要对公式(3)两端取数学期望,左端即为顶事件发生概率:

$$g = p_r \{ \sum_{j=1}^k K_j(x) = 1 \} \quad (4)$$

令  $E_i$  为属于最小割集  $K_j$  的全部底事件均发生的事件,则顶事件发生的事件即  $K$  个  $E$  中至少有一个发生的事件,因此

$$g = p_r \{ \sum_{i=1}^k E_i \} \quad (5)$$

如果将事件和的概率写作  $F_j$

$$F_j = \sum_{1 \leq i_1 \leq i_2 < \dots < i_j \leq K} P_r \{ E_{i_1} \cap E_{i_2} \cap \dots \cap E_{i_j} \} \quad (6)$$

则公式(6)可以展开为:

$$g = \sum_{j=1}^k (-1)^{j-1} F_j = \sum_{r=1}^k p_r \{ E_r \} - \sum_{1 \leq i < j \leq K} p_r \{ E_i + E_j \} + \dots + (-1)^{k-1} p_r \{ \bigcap_{r=1}^k E_r \} \quad (7)$$

如已知事件发生概率  $q_i$ ,公式(7)可转化为:

$$F_j(q) = \sum_{1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_j \leq K} \prod_{l \in K_{i_1} \cup K_{i_2} \cup \dots \cup K_{i_j}} q_l \quad (8)$$

$$\text{可得: } g(q) = \sum_{r=1}^k \prod_{l \in K_r} g_l - \sum_{1 \leq i < j \leq K} \prod_{l \in K_i \cup K_j} g_l + \dots + (-1)^{K-1} \prod_{i=1}^k g_l \quad (9)$$

结构重要度:在不考虑底事件发生概率值情况下,观察故障树的结构,以决定该事件的位置重要程度。

$$I_\varphi(i) = \frac{1}{2^{n-1}} \eta_\varphi(i) \quad (10)$$

$\eta_\varphi(i)$ 即为第  $i$  个底事件由 0 变为 1 时,使系统发生故障的贡献次数。

## 1.2 故障树分析法在亚热带线域工程泥石流危害评价中的应用

从灾害系统的维度<sup>[6]</sup>出发,首先调查泥石流形成的孕灾环境,即亚热带低山丘陵区气候与地质环境特征;然后筛选泥石流致灾因子,并分析其相互间的关系;最后从灾害损失的角度,调查线域工程基础设施承灾情况,因为亚热带地区泥石流主要是对交通工程产生危害。利用故障树的图形符号(事件符号与逻辑门符号)将各底事件和中间事件联系起来,最后进行概率计算和重要度分析,为治理决策提供依据(图 1)。

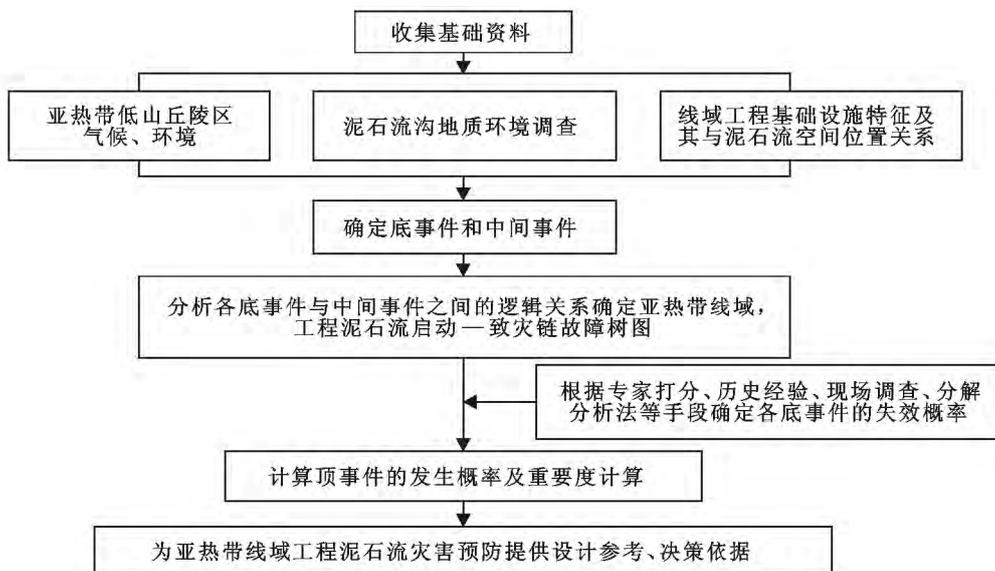


图 1 亚热带线域工程泥石流启动一致灾链故障树分析方案

## 2 实例应用

### 2.1 灾害概况

广乐高速公路是京港澳高速公路粤境段的复线,由南向北贯穿乐昌市全境。乐昌市位于广东省粤北地区,与湖南南部交界,属构造剥蚀丘陵—低山地貌,植被茂盛,区域地质构造运动强烈,处于南岭纬向构造带、华夏式构造带与粤北山字型构造复合部位,区

内出露地层主要为第四系崩坡积物、第四残坡积层、第四系泥石流堆积物、泥盆系中统东岗岭组基岩,气候属亚热带湿润性季风气候,气候温暖湿润,雨量充沛。受超强台风“尤特”影响,2013年8月15—17日乐昌市普降暴雨或特大暴雨,广乐高速乐昌段K37—K72标段爆发规模大小不等的泥石流近18条,冲毁施工板房,毁坏刚压实的路基,严重威胁施工人员安全和施工进度(图2)。



图2 泥石流堵塞隧道、冲毁施工板房

### 2.2 计算结果对比

亚热带线域工程泥石流灾害分析故障树如图3所示。并以此对2013年广乐高速乐昌标段爆发的泥石流灾害进行危险性评价,其中16条泥石流沟基础数据较为完整。目前,泥石流危险性评价对于因子的选取与权重确定,应用较广的为灰色关联度分析法<sup>[5]</sup>,由于文献<sup>[5]</sup>的危险级别评价标准主要是对西南

山区泥石流拟定的,而乐昌属华南低山丘陵区,爆发的泥石流普遍规模小,故需进行调整(表1)。基于灰色关联度法的危险性评价结果详见表2,基于故障树分析法的危险性评价结果详见表3—4。

表1 基于文献[5]调查的华南地区泥石流危险级别评判

危险级别	轻度危险	中度危险	高度危险	极度危险
危险度 R	≤0.2	0.2~0.3	0.3~0.5	≥0.5

表2 基于文献[5]的乐昌市16条泥石流沟危险性评价结果

编号	沟道名称	$L_1$	$L_2$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$S_8$	危险度 R	危险级别
1	YK37+645	0.55	3	1.05	6.7	2.37	0.683	>0.6	232	214	1.34	0.282	中度
2	YK40+980	1.65	5	1.18	7.8	1.98	0.652	>0.6	230	164	1.29	0.304	高度
3	BK0+039	0.09	3	0.14	3.1	0.90	0.354	0.3	247	89	1.10	0.128	轻度
4	K54+480	1.14	3	1.02	8.3	2.53	0.685	>0.6	188	278	1.19	0.326	高度
5	K59+035	0.06	3	0.08	2.1	0.64	0.227	>0.55	152	26	1.11	0.148	轻度
6	K59+340	0.04	3	0.05	1.9	0.59	0.229	0.4	246	7	1.13	0.108	轻度
7	K59+420	0.04	5	0.06	3.2	0.62	0.212	>0.6	245	6	1.09	0.152	轻度
8	K60+940	0.09	3	0.03	1.7	0.31	0.109	0.2	245	0	1.05	0.052	轻度
9	K61+994	0.04	3	0.18	3.8	0.57	0.171	0.2	245	3	1.13	0.092	轻度
10	K62+300	0.25	50	0.34	4.1	1.59	0.521	0.8	246	23	1.11	0.336	高度
11	K68+450	0.16	3	0.27	4.7	1.24	0.427	0.4	246	0	1.13	0.148	轻度
12	K68+659	0.07	3	0.15	5.1	1.05	0.375	0.55	246	3	1.08	0.178	轻度
13	K69+160	0.16	5	0.16	6.3	1.08	0.348	0.8	246	7	1.09	0.190	轻度
14	K69+320	0.08	5	0.17	5.3	1.12	0.381	0.45	245	0	1.10	0.192	轻度
15	K70+500	0.55	50	0.52	6.9	1.87	0.511	0.45	245	3	1.16	0.362	高度
16	K72+595	0.25	3	0.54	5.5	1.9	0.482	0.65	245	0	1.11	0.216	中度

注:泥石流危险因子排序:一次泥石流冲出物最大方量  $L_1(10^4 m^3)$  > 泥石流发生频率  $L_2(\%)$  > 流域面积  $S_1(km^2)$  > 流域切割密度  $S_2(km/km^2)$  > 主沟长度  $S_3(km)$  > 流域相对高差  $S_4(km)$  > 泥砂补给段长度比  $S_5 > 24 h$  最大降雨量  $S_6(mm)$  > 人口密度  $S_7(/km^2)$  > 主沟床弯曲系数  $S_8$

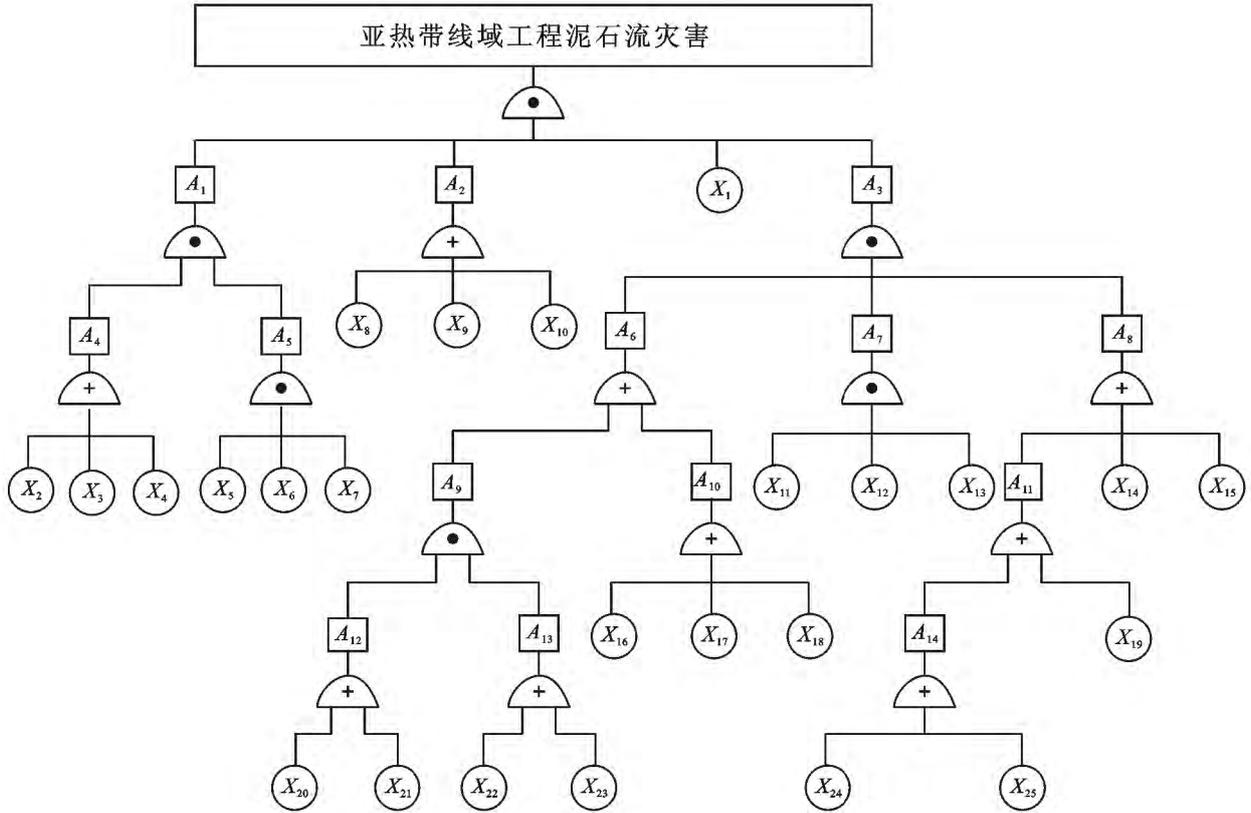


图 3 亚热带线域工程泥石流灾害分析故障树图

注: + 表示逻辑或门符号,当  $n$  个输入事件的任一个或更多个事件出现时,则输出事件出现; · 表示逻辑与门符号,当  $n$  个输入事件全部出现时才出现输出事件;  $A_1$  为工程设计抗灾能力;  $A_2$  为运营管理水平;  $A_3$  为泥石流发生;  $A_4$  为工程选址优化不够;  $A_5$  为工程结构类型与性能;  $A_6$  为丰富的松散堆积物来源;  $A_7$  为利于泥石流形成的地形;  $A_8$  为大量突发性水源作用;  $A_9$  为地质条件提供物质来源;  $A_{10}$  为人类活动提供物质来源;  $A_{11}$  为降雨作用使水分达临界值;  $A_{12}$  为内力地质作用;  $A_{13}$  为外力地质作用;  $A_{14}$  为非台风常规降雨;  $X_1$  为施工质量;  $X_2$  为工程与沟道走向夹角;  $X_3$  为工程与沟道的距离;  $X_4$  为工程场地地质环境;  $X_5$  为工程通行方式(隧道断面、桥梁孔跨、路基排水设施);  $X_6$  为工程防护设施类型(隧道衬砌强度、桥梁墩台基础、路基边坡防护);  $X_7$  为工程自身级别(隧道围岩级别、桥下净空高度、路基填料质量);  $X_8$  为使用时间长;  $X_9$  为养护维修力度弱;  $X_{10}$  为亚热带丘陵区泥石流灾害防治意识弱;  $X_{11}$  为山坡坡度与坡面长度;  $X_{12}$  为流域面积大;  $X_{13}$  为沟床比降大;  $X_{14}$  为地下水、积雪融水作用使水分达临界值;  $X_{15}$  为水库(渠)溃决使水分达临界值;  $X_{16}$  为植被破坏、覆盖率低;  $X_{17}$  为不合理的弃渣、开矿、采石;  $X_{18}$  为修建工程时的不合理开挖;  $X_{19}$  为台风作用;  $X_{20}$  为地层岩性易于提供大量松散物质;  $X_{21}$  为地质构造作用强烈;  $X_{22}$  为风化作用(覆盖层厚度);  $X_{23}$  为不良地质现象严重;  $X_{24}$  为前期降雨;  $X_{25}$  为短历时强降雨。

由图 3 可知,只要知道基本事件  $X_{11} \sim X_{25}$  的概率,即可依据公式(3)~(10)编制程序求得中间事件  $A_3$  的概率,建立基于故障概率的泥石流危险级别评判标准(表 2),经 3~5 位专家实地察看,并对各底事件引发泥石流的概率进行打分,其中与勘察规范<sup>[13]</sup>附表 G1 中已有指标相同的底事件,其概率与附表得分对应,如植被覆盖率 > 60% 则  $X_{11}$  的失效概率为 0.1。本文采用的概率值与事件发生的可能性及严重程度间的对应关系是:0.01 为不可能,0.1 为可能性较小,0.3 为可能但不经常,0.5 为可能且一般较为严重,0.7 为相当可

能且严重,0.9 为完全可能且非常严重<sup>[14]</sup>。

### 2.3 评价结果分析

对比分析表 2 与表 4 的评价结果,得出基于故障树的评价结果与基于文献[5]方法的一致性较高,且 YK40+980 等 13 条泥石流沟评价结果符合其实际危害现状、活动趋势,限于篇幅未全部列出,重点分析与文献[5]方法评价结果不同的 YK37+645, K70+500 和 K72+595 沟道。从表 5 可知,本评价结果相比文献[5]方法与泥石流沟危害现状及活动趋势更加吻合,表明本评价方法具有更好的有效性和可行性。

表 3 基于故障树分析法的华南地区泥石流危险级别评判

危险级别	轻度危险	中度危险	高度危险	极度危险
事件发生概率 $F/\%$	$\leq 2$	2~5	5~10	$\geq 10$

表 4 基于故障树分析法的乐昌市 16 条泥石流沟危险性评价结果

沟道名称	基本事件概率															事件发生 概率 $F$	危险 级别
	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$	$X_{14}$	$X_{15}$	$X_{16}$	$X_{17}$	$X_{18}$	$X_{19}$	$X_{20}$	$X_{21}$	$X_{22}$	$X_{23}$	$X_{24}$	$X_{25}$		
YK37+645	0.8	0.4	0.8	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.9	0.7	0.8	0.5	0.7	0.1	0	0.086 3	高度
YK40+980	0.6	0.4	0.8	0.1	0	0.1	0.2	0.2	0.9	0.7	0.8	0.6	0.7	0.2	0	0.071 3	高度
BK0+039	0.4	0.1	0.5	0.01	0	0.5	0.01	0	0.9	0.6	0.8	0.4	0.5	0.2	0	0.009 6	轻度
K54+480	0.8	0.4	0.8	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.9	0.7	0.8	0.6	0.7	0.1	0	0.076 8	高度
K59+035	0.5	0.2	0.6	0.01	0.01	0.2	0.01	0	0.8	0.6	0.6	0.4	0.6	0.01	0	0.011 7	轻度
K59+340	0.5	0.1	0.5	0.01	0.01	0.2	0.01	0.01	0.8	0.4	0.5	0.4	0.5	0.01	0	0.004 8	轻度
K59+420	0.5	0.1	0.7	0.01	0.01	0.3	0.01	0	0.8	0.5	0.6	0.5	0.4	0.01	0	0.009 9	轻度
K60+940	0.5	0.1	0.7	0.01	0	0.1	0.01	0	0.8	0.5	0.5	0.5	0.4	0.01	0	0.003 5	轻度
K61+994	0.4	0.1	0.7	0.01	0	0.7	0.1	0.1	0.8	0.5	0.5	0.5	0.4	0.01	0	0.019 4	轻度
K62+300	0.5	0.3	0.6	0.01	0	0.7	0.01	0.1	0.8	0.6	0.5	0.5	0.5	0.01	0	0.061 9	高度
K68+450	0.5	0.2	0.8	0.01	0	0.1	0.1	0.01	0.8	0.5	0.7	0.6	0.5	0.1	0	0.014 9	轻度
K68+659	0.4	0.1	0.7	0.01	0	0.4	0.1	0.1	0.8	0.5	0.8	0.6	0.4	0.1	0	0.013 6	轻度
K69+160	0.4	0.1	0.6	0.01	0	0.2	0.1	0.1	0.8	0.7	0.7	0.6	0.5	0.01	0	0.008 2	轻度
K69+320	0.4	0.1	0.6	0.01	0.01	0.4	0	0.1	0.8	0.5	0.6	0.4	0.4	0.01	0	0.010 0	轻度
K70+500	0.4	0.2	0.5	0.01	0.01	0.4	0.1	0.2	0.8	0.7	0.7	0.6	0.6	0.01	0	0.021 9	中度
K72+595	0.5	0.2	0.5	0.01	0.1	0.1	0.1	0.2	0.8	0.7	0.8	0.6	0.6	0.1	0	0.015 2	轻度

表 5 泥石流沟的典型灾害、危害现状及活动趋势

沟道名称	故障树分析(FTA) 法危险级别	文献[5]法 危险级别	典型灾害、危害现状及活动趋势
YK37+645	高度危险	中度危险	泥石流冲毁施工便道及沟道浆砌片石护面墙后,向在建高速公路运移,淤埋大瑶山 1 号隧道出口路基,局部堆积物向隧道内流动,直接经济损失约 150 万元。处于发展期,易发程度评分为 95 分,其易发程度属易发
K70+500	中度危险	高度危险	沿沟而下的碎屑流大部分堆至沟道中下游,部分冲入在建高速公路上。该沟沟源处崩塌体于 2011 年暴雨期间垮塌,并引发泥石流。易发程度评分为 83 分,其易发程度属轻度易发
K72+595	轻度危险	中度危险	经调查之前未爆发过泥石流,此次爆发部分碎屑流淤埋至在建高速公路路基坡脚,未造成直接经济损失。现为低频泥石流,此次泥石流一次性最大冲出量为 2 500 m <sup>3</sup>

### 3 结论

(1) 基于故障树分析(FTA)建立的泥石流灾害评价模型分析泥石流灾害的启动一致灾链,不同因子的致灾贡献因现场实际情况而异,更符合客观实际,克服了传统灰色关联度法中由于因子、权重不灵活及未考虑因子之间的非线性关系而出现评价结果偏差、适用地区局限的问题。

(2) 应用故障树分析法评价广东省粤北地区 16 条泥石流沟的危险度。结果表明,基于故障树的泥石流危险评价模型与文献[5]方法中的结果一致性较高,且更符合实际情况,表明了 FTA 方法在泥石流危险性评价应用中的有效性和可行性。

(3) 基于故障树分析的亚热带泥石流灾害评价模型还可应用于评价线域工程的易损性,结合文中的危险度评价,最终形成亚热带线域工程泥石流灾害评

价模式,并通过重要度计算分析泥石流灾害防治的薄弱环节,为解决泥石流对工程的危害评价与防治提供参考。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 足立胜治,德山久仁夫,中筋章人,等. 土石流发生危险度の判定にフヤて[J]. 新砂防,1977,30(3):7-16.
- [2] Hollingworth R. Soil slumps and debris flows; Prediction and protection[J]. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, 1981,38(1):17-28.
- [3] 谭炳炎. 泥石流沟严重程度的数量化综合评判[J]. 水土保持通报,1986,6(1):51-57.
- [4] 刘希林. 泥石流危险度判定的研究[J]. 灾害学,1988,3(3):10-15.
- [5] 刘希林,唐川. 泥石流危险性评价[M]. 北京:科学出版社,1995.
- [6] 刘希林,莫多闻. 泥石流易损度评价[J]. 地理研究,2002,21(5):569-577.

(下转第 326 页)

期开始,玉米叶片叶绿素相对含量、单株叶面积、茎粗和干物质积累量均高于单作,株高总体表现为间作高于单作。豫玉 22 分别与大豆两个品种间作,玉米叶片叶绿素相对含量和茎粗从大喇叭口期开始高于单作,干物质积累量从吐丝期开始高于单作,单株叶面积在吐丝期显著高于单作,其他时期差异不显著,而株高除了在吐丝期高于单作外,其他时期均低于单作处理。郑单 958 在间作下能够生产更多的光合产物,从而使得干物质积累量在生育后期高于豫玉 22,有利于增产。在所选的两个玉米品种和两个大豆品种的不同间作模式中,郑单 958 和中黄 24 在 2:4 间作下更有利于玉米的生长发育,是较为合理的种植模式。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 李淑敏, 乔海涛, 吕娇. 大豆/玉米间作下干物质累积动态变化与产量分析[J]. 天津农业科学, 2011, 17(4): 38-41.
- [2] Rodrigo V H L, Stirling C M, Teklehaimanot Z, et al. Intercropping with banana to improve fractional interception and radiation-use efficiency of immature rubber plantations[J]. Field Crops Research, 2001, 69(3): 237-249.
- [3] Li Long, Sun Jianhao, Zhang Fusuo, et al. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping (I): Yield advantage and interspecific interactions on nutrients[J]. Field Crops Research, 2001, 71(2): 123-137.
- [4] 安宏明, 杨浩文, 王红晶, 等. 竞争对不同基因型玉米产量及氮素含量的影响[J]. 天津农业科学, 2011, 17(2): 1-4.
- [5] 史中欣, 柴强, 杨彩虹, 等. 带型配置及施氮量对玉米间作豌豆产量和水分利用效率的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2011, 46(1): 39-43.
- [6] Whitmore A P, Schröder J J. Intercropping reduces nitrate leaching from under field crops without loss of yield: A modelling study[J]. European Journal of Agronomy, 2007, 27(1): 81-88.
- [7] Hauggaard-Nielsen H, Jensen E S. Evaluating pea and barley cultivars for complementarity in intercropping at different levels of soil N availability[J]. Field Crops Research, 2001, 72(3): 185-196.
- [8] 陈颖, 邹超亚. 玉米大豆间作复合群体优化配置与生产力研究[J]. 资源科学, 1999, 21(4): 75-79.
- [9] 高阳, 段爱旺, 刘祖贵, 等. 间作种植模式对玉米和大豆干物质积累与产量组成的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(2): 214-221.
- [10] 张建华, 马义勇, 王振南, 等. 间作系统中玉米光合作用指标改善的研究[J]. 玉米科学, 2006, 14(4): 104-106.
- [11] 马骥, 马淑云. 玉米大豆间作效应分析[J]. 西北农业大学学报, 1994, 22(4): 80-84.
- [12] 刘贞琦, 刘振业, 马达鹏, 等. 水稻叶绿素含量及其与光合速率关系的研究[J]. 作物学报, 1984, 10(1): 57-61.
- [13] 唐树延, 孟继武, 杨文杰, 等. 大豆光合作用中叶绿素 a, b 间的能量传递[J]. 大豆科学, 1985, 4(3): 185-192.
- [14] 刘琳. 两个品种的冬小麦对水分胁迫和竞争的响应[D]. 陕西杨凌: 中国科学院水土保持与生态环境研究中心, 2007.
- [15] 史振声, 朱敏, 李凤海, 等. 玉米不同品种间作的增产效果研究[J]. 玉米科学, 2008, 16(2): 107-109.
- [16] 刘晶, 陈颖, 袁远峰, 等. 光, 风, 气对玉米大豆间作群体产量及生态效应的影响[J]. 耕作与栽培, 2008(2): 13-15.
- [17] 东先旺, 刘树堂. 掖单 22 超高产群体光合生理指标的研究[J]. 玉米科学, 1999, 7(3): 58-61.
- [18] 李丽, 王圣毅, 成华伟. 滴灌条件下不同密度对春玉米株高和茎粗的影响[J]. 新疆农垦科技, 2013, 36(4): 3-4.
- [19] 李潮海, 苏新宏, 孙敦立. 不同基因型玉米间作复合群体生态生理效应[J]. 生态学报, 2002, 22(12): 2096-2103.
- [20] 王小林, 张岁岐, 王淑庆, 等. 黄土塬区不同品种玉米间作群体生长特征的动态变化[J]. 生态学报, 2012, 32(23): 7383-7390.

(上接第 320 页)

- [7] 徐林荣, 王磊, 苏志满. 隧道工程遭受泥石流灾害的工程易损性评价[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2153-2158.
- [8] 史培军. 五论灾害系统研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(5): 1-9.
- [9] 谭万沛. 中国灾害暴雨泥石流预报分区研究[J]. 水土保持通报, 1989, 9(2): 48-53.
- [10] 郑裕国, 张康达. 故障树定性和定理分析的算法[J]. 浙江工业大学学报, 1995, 23(1): 42-47.
- [11] 朱大奇, 于盛林. 基于故障树最小割集的故障诊断方法研究[J]. 数据采集与处理, 2002, 17(3): 341-344.
- [12] 朱继州. 故障树原理和应用[J]. 陕西西安: 西安交通大学, 1989.
- [13] 国土资源部. DZ/T0220—2006 泥石流灾害防治工程勘察规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [14] 周继忠. 灰色关联故障树分析法在基坑工程放坡开挖中应用[J]. 土木工程学报, 2009, 42(8): 109-114.