

尉德新,曾旻,吴荣,等. 东非大裂谷山岭隧道地质灾害熵权可拓物元法评价及风险控制[J]. 华南地震, 2021, 41(3): 18-25. [WEI Dexin, ZENG Min, WU Rong, et al, Study on Assessment and Risk Control for Geological Disasters of Mountain Tunnel in East African Great Rift Valley Based on Entropy Weight Extension Matter Element Method[J]. South China journal of seismology, 2021, 41(3): 18-25]

东非大裂谷山岭隧道地质灾害熵权可拓物元法评价及风险控制

尉德新¹, 曾旻¹, 吴荣¹, 李沛², 彭述权³, 樊玲³, 李文如³
(1. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461; 2. 中交天津港湾工程研究院股份有限公司, 天津 300222; 3. 中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083)

摘要: 东非大裂谷火山、地震、断层移动和地裂缝等地质作用活跃, 严重威胁隧道安全, 有必要研究裂谷内山岭隧道地质灾害破坏。通过系统分析东非大裂谷山岭隧道地质灾害风险源, 建立了4类22项风险评价指标体系以及裂谷内山岭隧道地质灾害熵权可拓物元方法评价方法, 开发了相应的风险安全可视化程序, 得到东非大裂谷山岭隧道地质灾害破坏等级, 提出了相应风险控制措施。运用该模型得到东非大裂谷内马铁路2号隧道地质灾害破坏等级为S4, 对此风险控制措施可为提高抗隧道震设防烈度, 进行隧道抗断层、抗震和抵抗火山作用综合研究设计, 严格把控隧道施工质量, 进行裂谷地质活动和隧道安全监测, 及时进行隧道地质灾害预警, 同时制定隧道地质灾害处置和救援预案。研究结果可对类似工程地质灾害风险评价和控制研究提供参考。

关键词: 东非大裂谷; 山岭隧道; 地质灾害; 熵权可拓物元方法; 风险控制

中图分类号: P694; TV221 文献标识码: A 文章编号: 1001-8662(2021)03-0018-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2021.03.03

Study on Assessment and Risk Control for Geological Disasters of Mountain Tunnel in East African Great Rift Valley Based on Entropy Weight Extension Matter Element Method

WEI Dexin¹, ZENG Min¹, WU Rong¹, LI Pei¹, PENG Shuquan²,
FAN Ling², LI Wenru²

(1. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China; 2. CCCC Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 3. School of Resources and Safety Engineering of Central South University, Changsha 410083, China)

收稿日期: 2020-12-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508579, 51674287)

作者简介: 尉德新(1979-), 男, 高级工程师, 主要从事地下工程方面的研究工作。

E-mail: weidexin@gmail.com

通信作者: 彭述权(1977-), 男, 副教授, 博士, 主要从事生物岩土、结构抗震研究。

E-mail: pqr97linger@cus.edu.cn

Abstract: The active geological processes of the Great Rift Valley of East Africa, such as volcanos, earthquakes, fault movement and ground fissures, seriously threaten the safety of mountain tunnels, so it is necessary to study the geological disaster damage of mountain tunnels in the Great Rift Valley. This paper systematically analyzes the risk sources of geological disasters of mountain tunnel in the Great Rift Valley in East Africa, establishes the risk assessment index system with 4 categories-22 items and the entropy weight matter-element extension evaluation method for the geological disaster risk of the mountain tunnel in the Rift Valley, then develops the corresponding risk safety visual program, obtains the damage level of geological disasters of the tunnel in the Great Rift Valley in East Africa, and puts forward the corresponding risk control measures. The research results show that the damage level of geological disaster of tunnel No.2 of Malaysia railway in the Great Rift Valley is S4. The risk control measures are suggested such as the improving of tunnel seismic fortification intensity, comprehensive design of tunnel for anti-fault, anti-seismic and anti-volcanic action, the strict control of tunnel construction quality, the early warning and monitoring of geological disasters in tunnels, and the tunnel geological disaster treatment and rescue. The research results of this paper can provide reference for similar engineering geological hazard risk assessment and control research.

Keywords: Great Rift Valley of East Africa; Mountain tunnel; Geological disaster; Entropy weight matter-element extension method; Risk control

0 前言

东非大裂谷山岭隧道地质灾害评价及风险控制研究对我国“一带一路”工程建设具有重大意义。东非大裂谷是一个正在活动着的大裂谷,以0.2~2 mm/年的速率扩张,地震活动频繁^[1-2]。Rostom提出采用GPS测量其扩张速率^[3]。Philip阐述了东非大裂谷中Nakuru地区内火山岩广泛分布地貌的形成机理^[4]。Simiyu报道了肯尼亚东非大裂谷的Olkaria地热区地震监测,从1996年5月至9月期间,平均每4~5 d爆发一次不超过3级的微震,震源深度不超过6 km^[5]。Tuluka报道了2004年东非大裂谷Nyamuragira火山爆发,是由长周期地震诱发,同时收到构造运动加强^[6]。Tuluka和Zana运用小震记录模拟大震作用下地面震动,揭示距裂谷内震中距离为R的东非大裂谷西部侧翼地区地方的地震加速度峰值Y与地震等级M之间的关系,如式(1)^[7-9]。东非大裂谷除了地震、滑坡等不良工程地质作用,人类生产活动也会形成新的不良工程地质作用。Ayalew报道了埃塞俄比亚因为过量抽取地下水形成了长1 km,深6~12 m,宽度1~3m的地裂缝。

$$\begin{aligned} M = 5.0 & \quad Y = 1.42e^{1.43M} R^{-1.1} \\ M = 5.0 - 6.5 & \quad Y = 1.42e^{1.43M} R^{-1.2} \\ M = 7.0 & \quad Y = 1.42e^{1.43M} R^{-1.3} \\ M = 7.5 & \quad Y = 1.42e^{1.43M} R^{-1.4} \end{aligned} \quad (1)$$

大裂谷扩张、地震和人类活动形成的地裂隙

这些不良工程地质作用^[10-11],将对大裂谷内的交通隧道形成巨大的安全风险,但是这方面风险研究尚未见报道,有必要针对东非裂谷全球独有的复杂地质条件中,研究其中的隧道地质灾害风险及相应的风险控制措施。

隧道是地质条件、隧道设计施工、隧道支护结构相结合的一个复杂体系,隧道地质灾害风险安全评价一个复杂的系统性问题。隧道地质灾害风险安全的影响因素很多,包括地质条件、隧道设计施工情况、隧道地震和动力效应以及隧道结构工作状态等多种,且各指标之间关系是错综复杂^[12]。国内外学者采用层次分析法和模糊综合评判法研究评价了隧道的地质条件、隧道工程的施工情况以及地质活动本身带来的动力扰动对隧道地质灾害风险的影响规律^[13-18]。可拓物元安全评价方法由我国蔡文教授上世纪80年代提出^[19],可用来分析评价隧道地质灾害风险。

本文拟系统分析东非大裂谷隧道风险源,建立相应的风险评价体系,运用熵权可拓物元方法建立其地质灾害风险等级评价方法,开发相应的风险安全可视化程序,分析评价东非大裂谷隧道地质灾害风险并提出相应的风险控制措施,可为我国类似重大工程比如川藏铁道风险评价和控制建设提供参考。

1 隧道工程概况

2号隧道位于肯尼亚内罗毕西部30 km,恩贡

镇西北9 km, Lusigetti村西侧5 km, 属于东非大裂谷东翼山区。起讫里程桩号为DIK46+390-DIK47+500, 中心里程桩号为DK46+945。隧址区地形起伏, 山体自然坡度较大, 最大埋深约46 m。线路

经过的活动断层地段存在岩体较破碎, 节理裂隙发育, 完整性差和岩体整体强度低, 稳定性差等问题。隧道工程地质条件和横断面见图1和图2。

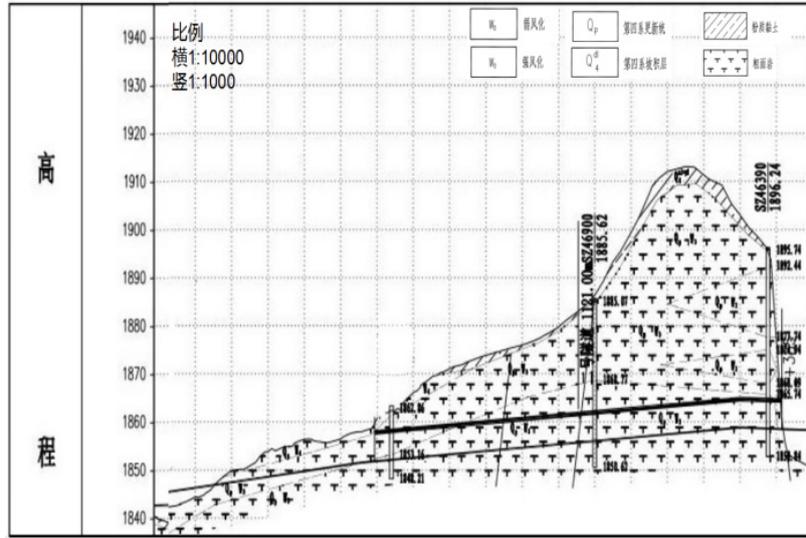


图1 隧道纵断面图

Fig.1 Longitudinal section of the tunnel

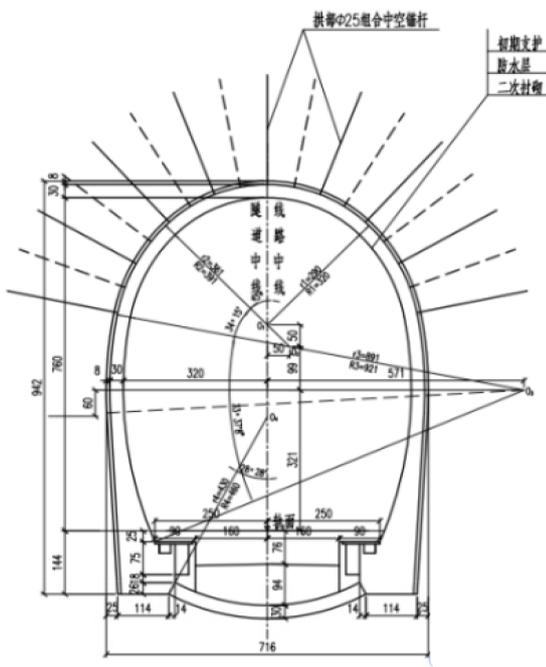


图2 隧道横断面图

Fig.2 Cross-section of the tunnel

2 东非大裂谷隧道地质灾害风险源分析

2.1 隧道地质条件

东非大裂谷是一个正在活动着的大断裂, 始于大约3000万年前的非洲板块和印度洋板块张裂拉

伸形成, 断裂下陷运动, 以0.2~2 mm/年的速率扩张。板块扩张运动导致东非大裂谷出现大量的断层移动、火山、地裂缝, 裂谷内隧道处于复杂的地质条件中。因此复杂地质条件是东非大裂谷隧道地质的灾害主要风险源之一, 具体表现为:

活动断层: 该断裂扩张下陷运动, 导致断裂带处于整体上不稳定状态和内部构造复杂, 形成了多级断层, 破碎断层厚度一般比较大, 达10 m至几十米, 且处于持续活动中。断层错动可导致穿越断层的山岭隧道开裂, 甚至严重破坏, 影响其正常使用。

隧道洞身围岩和洞口边坡岩体: 隧道洞身围岩和洞口边坡岩体质量较差, 衬砌后容易形成空洞, 减弱隧道抵抗地质灾害能力。因此, 裂谷内活动断裂是隧道开裂地质灾害重要风险源之一。

火山作用: 东非大裂谷内地表分布大量的火山作用形成的粗面岩, 块度20~2000 cm不等。因此火山作用是隧道开裂地质灾害重要风险源之一。

地裂缝: 东非大裂谷内地质板块不稳定, 常产生地裂缝, 导致地表开裂, 是一种重要的不良地质现象。地裂缝是隧道地质灾害重要风险源之一。

2.2 隧道设计施工情况

隧道设计断面形式显著影响衬砌内力分布, 马蹄形、多心圆截面隧道内力分布相对均匀, 有利于抵抗地质灾害, 隧道断面尺寸越大, 施工难度越

大,越容易发生地质灾害。隧道设计埋深越大,越利于抵抗地质灾害。隧道洞口能够放大隧道地质作用动力响应,依据隧道洞口地质条件合理选择环框式、端墙式或翼墙式等隧道洞门形式,对于隧道洞门抵抗地质灾害具有重要作用。提高隧道洞口混凝土强度、隧道断面支护结构刚度和隧道施工质量,也有利于隧道抵抗地质灾害。裂谷隧道断面为马蹄形,采用35~50 cm厚C30混凝土钢拱架衬砌,洞口为环框性C30混凝土结构,采取综合措施保障隧道施工质量,这些均有利于隧道抵抗地质灾害,但是最大埋深约为40 m,埋深较浅,不利于隧道抵抗地质灾害。

2.3 地震及其动力效应

东非大裂谷地质作用活跃,地震发生概率高,地震震级和烈度高,达到八级地震和八级烈度。裂谷内隧道穿越活断层(其与活动断层的距离为零),活动断层倾角接近垂直且厚度大、隧道偏压程度较大、土岩地层介质参数相差大、东非大裂谷隧道地震动力效应大,是一类重要的隧道地质灾害风险源。

2.4 隧道结构工作性态

东非裂谷隧道洞口边坡坡度大,超过70°滚石多,整治难度较大。初期支护和二次衬砌安全储备大,有利于隧道抵抗地质灾害。在裂谷隧道处于非常复杂地质作用和强震作用下,采用最高抗震等级设计也只能有限提高初期支护和二次衬砌安全储备。

3 东非大裂谷隧道地质灾害风险指标体系

在上述多种风险作用下东非大裂谷隧道容易发生衬砌破损。根据对隧道结构损坏程度,分为5个破损等级,分别为S1, S2, S3, S4和S5,相应的破损描述见表1。东非大裂谷隧道地质灾害风险性评价指标体系是其评价模型核心^[8]。根据东非大裂谷隧道地质灾害风险源分析,选取了如下隧道地质活动作用及其动力效应,隧道设计施工情况,隧道结果工作形态等4类共计22项评价指标,见图3,相应评价标准见表2,其中表3为断裂活动性分级表。

表1 隧道结构破损等级

Table 1 Damage level of tunnel structure

破损等级	S1	S2	S3	S4	S5
描述	安全情况正常	较安全,结构存在轻微破坏	少量离散裂缝且宽度小于1 mm	较危险,隧道结构破坏,裂缝较少,深度较大,可贯穿衬砌	危险,结构存在严重破坏

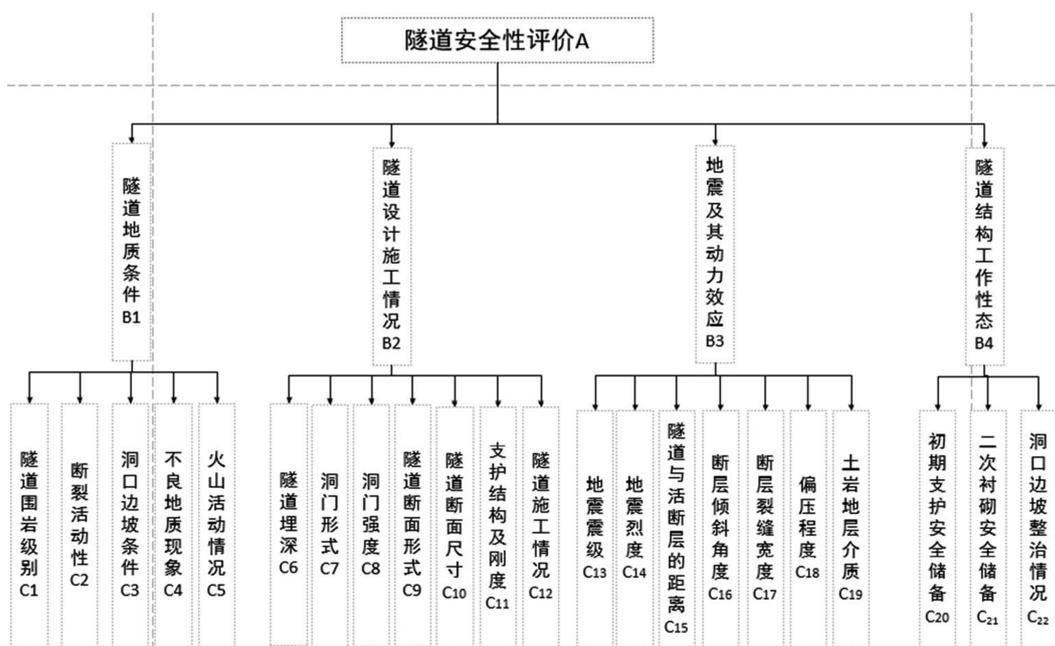


图3 东非大裂谷隧道地质灾害风险安全评价指标体系

Fig.3 The geological disaster risk safety evaluation index system of the Great Rift Valley Tunnel in East Africa

表2 指标体系评价标准
Table 2 Evaluation criteria of index system

指标	序号	S1 (20~24.9分)	S2 (15~19.9分)	S3 (10~14.9分)	S4 (5~9.9分)	S5 (1~4.9分)
隧道围岩级别	C1	I级	II级	III级	IV级	V级
断裂活动性 ^[20]	C2	无	弱	中等	强	极强
洞口边坡条件 (边坡高度)	C3	<10 m	10~25 m	25~35 m	35~50 m	>50 m
不良地质现象	C4	未见	不发育	一般发育	发育	强烈发育
火山活动情况 ^[21]	C5	休眠	开始扰动	小规模喷发	中规模喷发	大规模喷发
隧道埋深	C6	>500 m	2.5 h ₁ ~ 500 m	1.5 ~ 2.5 h ₁	1 ~ 1.5 h ₁	<h ₁
洞门形式	C7	IV级围岩以上 翼墙	IV级围岩以上 柱式式	IV级围岩以上 削竹式	IV级围岩以上 端墙式	IV级围岩以上 环框式
洞门强度	C8	C40	C30	C25	C20	小于C20
隧道断面形式	C9	马蹄形	圆形	拱形	卵形	矩形
隧道断面尺寸	C10	<50 m ²	50~75 m ²	75~100 m ²	100~150 m ²	大于150 m ²
支护结构及刚度	C11	>25D	25~15D	15~5D	2~5D	小于2D
隧道施工情况	C12	工法先进 管理规范	工法合理 管理规范	工法合理 管理基本规范	工法合理 管理不规范	工法不合理 管理混乱
地震震级	C13	<3级	3~5级	5~7级	7~9级	9级及以上
地震烈度	C14	<6°	6°~8°	8°~9°	9°~10°	10°以上
隧道与活断层距离	C15	>300 m	300~100 m	100~50 m	10~50 m	小于10 m
断层倾角	C16	0°~20°	20°~40°	40°~70°	70°~80°	80°~90°
断层厚度	C17	0~5 m	5~10 m	10~20 m	20~30 m	大于30 m
隧道偏压 (地面倾角)	C18	0°	15°	30°	40°	60°
土岩地质条件K	C19	0.75	0.55~0.75	0.35~0.55	0.1~0.15	小于0.1
初级支护安全储备	C20	>3.5	2.0~2.5	1.5~2.0	1.5~1.2	1.0~1.2
二次衬砌安全储备	C21	>3.5	2.0~2.5	1.5~2.0	1.5~1.2	1.0~1.2
洞口边坡整治情况	C22	边坡稳定	边坡基本稳定 整治较好	边坡基本稳定 基本整治	边坡基本稳定 未整治	边坡失稳 未整治

表3 断裂活动性分级表
Table 3 Classification table of fault activity

等级	断层速率 $R / (\text{mm} \cdot \text{yr}^{-1})$			$M > 7.0$ 地震原地复发间隔 $T / (\text{kyr})$
	走滑断层	正断层	逆断层	
极强	>15.0	>2.0	>10.0	<0.5
强	5.0~15.0	0.5~2.0	2.0~10.0	0.5~2.5
中等	0.5~5.0	0.1~0.5	0.2~2.0	2.5~10.0
弱	0.1~0.5	0.01~0.1	0.1~0.2	10~20
无	<0.1	<0.01	<0.1	>20

表2中C6项中 h_1 为等效荷载高度, $2.5 h_1$ 为深埋和浅埋隧道临界深度。本文针对东非大裂谷全球独有的复杂地质活动, 提出了断裂活动性、火山活动情况、不良地质现象, 断层倾角和宽度, 隧道与断层距离等地质活动指标。

4 基于熵权可拓物元法隧道地质灾害风险等级评价方法

物元为事物名称、特征和量值组成的有序三

元组。可拓物元方法运用物元来描述事物,通过关联度表分析元素与集合的关系。该方法适合于多因素分析。隧道地质灾害风险等级评价物元由有序三元组 $S = (R, C, X)$ 构成。 R 为隧道地质灾害风险等级, C 为隧道地质灾害风险等级评价指标, X 为隧道风险评价指标取值。由 R 、 C 以及等级指标标准范围组成经典域物元 S_i 和节域物元 S_p , 分别见(2.2)和(2.3)。

$$S = [RC_i X_i] S_i = [R_i C_i (a_{ij}, a_{i,j+1})] S_p = [R_i C_i (a_{i1}, a_{im})] \quad (2)$$

式中 $X = [x_1, x_2, \dots, x_m]$, $i=1, 2, \dots, m$ 表示评价指标, $m=22$ 。 $j=1, 2, 3, 4, 5$ 表示经典域, 分别对应 S_1, S_2, S_3, S_4 和 S_5 级。

考虑地质活动作用, 参考经典域物元和节域物元, 建立物元隧道地质灾害风险评价矩阵 A 。

$$A = \begin{bmatrix} [a_{11}, a_{12}] [a_{12}, a_{13}] [a_{13}, a_{14}] [a_{14}, a_{15}] [a_{14}, a_{15}] [a_{11}, a_{15}] \\ [a_{21}, a_{22}] [a_{22}, a_{23}] [a_{23}, a_{24}] [a_{24}, a_{25}] [a_{14}, a_{15}] [a_{21}, a_{25}] \\ \dots\dots\dots \dots\dots\dots \dots\dots\dots \dots\dots\dots \dots\dots\dots \\ [a_{m1}, a_{m2}] [a_{m2}, a_{m3}] [a_{m3}, a_{m4}] [a_{m4}, a_{m5}] [a_{14}, a_{15}] [a_{n1}, a_{n5}] \end{bmatrix} \quad (3)$$

进而计算评价指标和风险等级的关联度函数

K_{ij} , 见式(4)

$$K_{ij} = \begin{cases} \frac{-\rho(X_i, A_{ij})}{|a_{i,j+1} - a_{ij}|} & X_i \in A_{ij} \\ \frac{-\rho(X_i, A_{ij})}{\rho(X_i, A_{ij}) - \rho(X_i, A_{i6})} & X_i \notin A_{ij} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\rho(X_i, A_{ij}) = |X_i - 0.5(a_{ij} + a_{i,j+1})| - 0.5(a_{i,j+1} - a_{ij})$, $\rho(X_i, A_{i6}) = |X_i - 0.5(a_{i1} + a_{i5})| - 0.5(a_{i5} - a_{i1})$ 。

构造指标值矩阵 C_{ik} , 其中 $i=1, \dots, m$ 个评价指标, $k=1, \dots, n$ 个评审专家, 采用熵值法计算第 i 个指标的权重。首先将矩阵 C_{ik} 均一化得到 \bar{C}_{ik} , 见式(5)

$$\bar{C}_{ik} = \frac{C_{ik} - \min(C_i)}{\max(C_i) - \min(C_i)} \quad (5)$$

然后, 计算指标矩阵熵值 H_{ik} , 见式(6)

$$H_i = -\frac{\sum_{k=1}^n P_{ik} \ln P_{ik}}{\ln m}, P_{ik} = \frac{\bar{C}_{ik}}{\sum_{k=1}^n \bar{C}_{ik}} \quad (6)$$

进而得到指标 i 的权重 ω_i , 见式(7)

$$g_i = 1 - H_i \omega_i = \frac{g_i}{\sum_{j=1}^m g_j} \quad (7)$$

由指标权重、指标与等级关联度计算得到指标等级综合关联度, 见式(8)

$$K_j = \sum_{i=1}^m \omega_i K_{ij} \quad (8)$$

最大关联度所对应的风险等级, 即为物元东非大裂谷隧道地质灾害风险等级, 见式(9)

$$K = \max(K_j) R = \text{index}(K) \quad (9)$$

式中 $R = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ 。

基于上述建立的隧道风险性评价模型, 用计算机语言将以上评价模型程序化, 运用 Microsoft Access Database 编写可视化风险安全评价程序, 程序典型界面包括:

根据东非大裂谷隧道实际状况, 取值风险指标, 根据 10 位专家对指标权重打分, 计算得到各指标权重, 见表 4。

进而得到风险指标与隧道地质灾害破坏等级的综合关联度为

$$K = [-2.8538 - 1.9264 - 1.4443 - 1.0095 - 1.0214]$$

因此, 东非大裂谷隧道地质灾害风险等级为

表 4 风险指标取值和指标权重表

Table 4 Risk indicator values and indicator weight table

风险指标	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
取值	5	2	12	5	3	7	21	18	21	5	18
权重%	10.63	3.26	3.22	4.68	3.29	4.67	4.68	4.68	3.32	3.33	4.67
风险指标	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22
取值	20	2	2	3	2	2	7	5	15	15	15
权重%	3.48	4.70	4.68	10.63	3.19	3.32	3.37	4.67	3.54	3.33	4.67

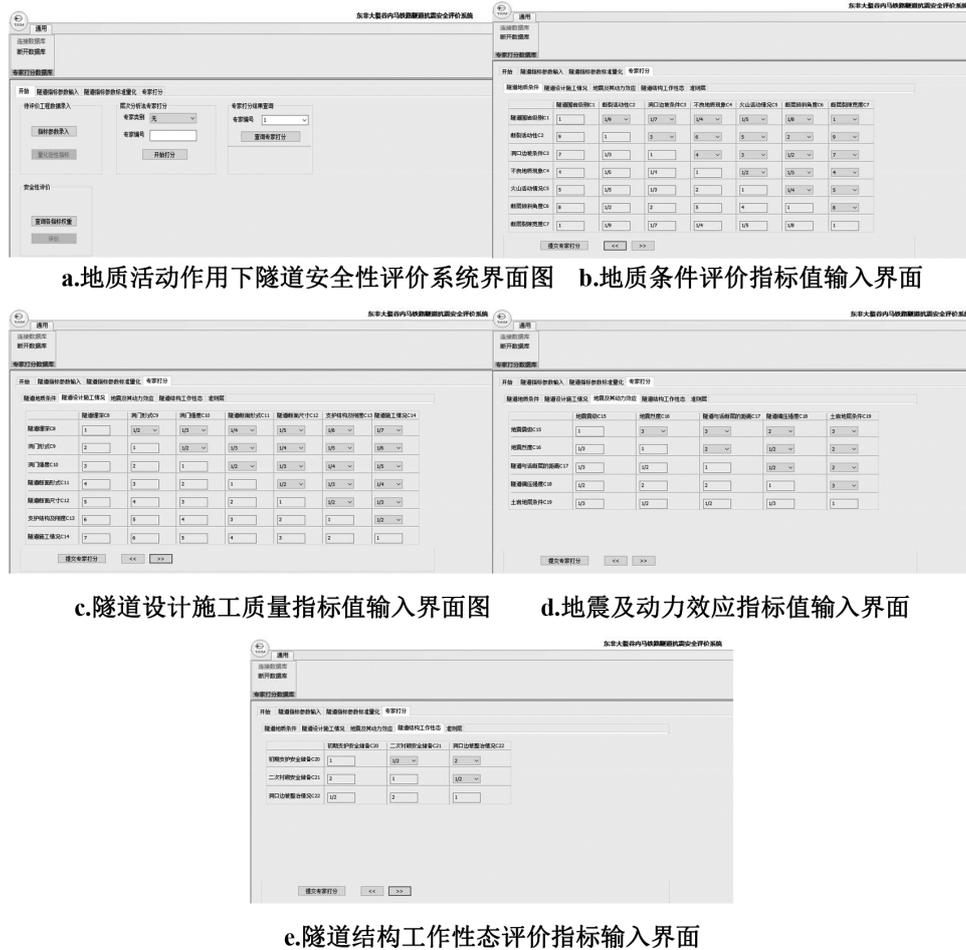


图4 东非大裂谷隧道地质灾害可视化风险安全评价程序

Fig.4 The visualized risk and safety assessment procedure for geological hazards in the Great Rift Valley tunnel in East Africa

S4级。这表明东非大裂谷隧道一旦发生地质灾害，则地质灾害对隧道破损较为严重，可能会出现隧道结构破坏，危及行人安全，可能出现贯穿隧道衬砌裂缝。本文所用方法理论上也能适用于深埋隧道，但是需要进行更深入的研究。

5 风险控制措施

针对隧道地质灾害后果严重，可以从隧道结构设计和施工，以及地质活动监测方面进行风险控制措施。

- (1)针对东非大裂谷隧道地质作用特征，提高抗隧道震设防烈度，进行隧道抗断层、抗震和抵抗火山作用综合研究设计，提高隧道抗滑移和地震共同作用能力，以及提高隧道抵抗火山作用能力。
- (2)严格把控隧道施工质量。
- (3)东非大裂谷地质活动具有持续性和破坏

强，因此在隧道运营期，进行东非大裂谷地质活动和隧道安全监测，及时进行隧道地质灾害预警，同时制定隧道地质灾害处置和救援预案。

6 结论

本文通过系统分析东非大裂谷隧道风险源和风险评价指标体系，建立了裂谷内隧道地质灾害风险熵权可拓物元方法评价方法，开发了相应的风险安全可视化程序，分析评价了东非大裂谷隧道地质灾害风险并提出相应的风险控制措施，得到以下结论：

- (1)东非大裂谷隧道地质灾害主要风险源为活动断层、火山作用和地震作用，其风险指标体系可由4类22项风险指标构成。
- (2)裂谷内隧道地质灾害等级为S4级，地质灾害对隧道破损较为严重，可能会出现隧道结构破坏，危及行人安全，可能出现贯穿隧道衬砌裂缝。

(3)东非大裂谷内隧道地质风险控制措施包括提高抗隧道震设防烈度,进行隧道抗断层、抗震和抵抗火山作用综合研究设计,严格把控隧道施工质量,进行裂谷地质活动和隧道安全监测,及时进行隧道地质灾害预警,同时制定隧道地质灾害处置和救援预案。

参考文献

- [1] Baker B H, Wohlenberg J. Structure and evolution of the Kenya Rift Valley[J]. *Nature*, 1971, 229(5286):538-542.
- [2] Macdonald R. Petrological evidence regarding the evolution of the Kenya Rift Valley[J]. *Tectonophysics*, 1994, 236(1-4):373-390.
- [3] Rostom R S. Monitoring recent crustal movements in the Kenya rift valley by global positioning system (GPS) - a proposal[J]. *Journal of Geodynamics*, 1991, 14(1-4):65-72.
- [4] Philip T. Leat. Volcanological development of the Nakuru area of the Kenya rift valley[J]. *Journal of African Earth Sciences (and the Middle East)*, 1991, 13(3-4):483-498.
- [5] Simiyu S M. Seismic monitoring of the Olkaria Geothermal area, Kenya Rift valley[J]. *Journal of Volcanology & Geothermal Research*, 2000, 95(1):197-208.
- [6] Tuluka M, Kavotha S K, Lukaya N, et al. Seismic activity prior to the May 8, 2004 eruption of volcano Nyamuragira, Western Rift Valley of Africa[J]. *Journal of Volcanology & Geothermal Research*, 2006, 158(3):355-360.
- [7] Tuluka M, Kavotha S K, Lukaya N, et al. Some aspect of seismicity prior to the 27 November 2006 eruption of Nyamuragira volcano and its implication for volcano monitoring and risk mitigation in the Virunga area, Western Rift Valley of Africa[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2010, 58(5):829-832.
- [8] Tuluka M. An estimate of the attenuation relationship for strong ground motion in the Kivu Province, Western Rift Valley of Africa[J]. *Physics of the Earth & Planetary Interiors*, 2007, 162(1-2):13-21.
- [9] Zana N, Kamba M, Katsongo S, et al. Recent seismic activity of the Kivu Province, Western Rift Valley of Africa [J]. *Physics of the Earth & Planetary Interiors*, 1989, 58(1):52-60.
- [10] 汪德才. 东非裂谷带特殊工程地质——地下空腔工程特性研究[J]. *交通建设与管理*, 2015(8):325-328.
- [11] 温志新, 童晓光, 张光亚, 等. 东非裂谷系盆地群石油地质特征及勘探潜力[J]. *中国石油勘探*, 2012, 17(4):60-65, 8.
- [12] 崔德赛. 承德地区高速公路隧道运行安全评价指标体系[J]. *交通世界(运输·车辆)*, 2015(7):34-35.
- [13] 王云. 城市交通隧道安全评价体系及方法研究[D]. 成都:西南交通大学, 2005, 1-81.
- [14] 韩直, 白云. 公路隧道安全评价指标体系与方法[J]. *公路交通技术*, 2008(6):125-128.
- [15] 龚志红. 国道318线黄草坪隧道抗震安全性评价研究[D]. 成都:成都理工大学, 2007, 20-51.
- [16] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用[J]. *中国安全科学学报*, 2008, 18(5):148-153.
- [17] 严鸿和, 陈玉祥, 许昭明, 等. 专家评分机理与最优综合评价模型[J]. *系统工程理论与实践*, 1989, 9(2):19-23.
- [18] 王普. 改进模糊综合评价在铁路隧道施工风险评估中的应用[J]. *铁路工程技术与经济*, 2018, 33(5):16-19.
- [19] 蔡文. 从物元分析到可拓学[J]. *吕梁学刊*, 1996(2):1-9.
- [20] 吴中海. 活断层的定义与分类——历史、现状和进展[J]. *地球学报*, 2019, 40(5):661-697.
- [21] 洪汉净, 吴建平, 王庆良, 等. 中国火山危险性等级与活动性分类[J]. *地震地质*, 2007, 29(3):447-458.