

doi: 10.11731/j.issn.1673-493x.2021.01.018

基于云模型的富水岩溶隧道涌水风险评价*

刘敦文¹, 曹敏¹, 唐宇¹, 徐谦¹, 姜冰², 王方立²

(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 中交路桥华南工程有限公司, 广东 中山 528400)

摘要: 为适应风险因素不确定性、随机性及动态反馈性等特点, 建立新型富水岩溶隧道涌水风险评价体系, 提出1种基于云模型的模糊综合评价方法。选取5个1级指标、29个2级指标构建评价指标体系; 综合层次分析、熵权与加权平均计算法合理分配各指标权重; 利用云生成算法计算出云数字特征参数并生成足够数量的云滴; 将方法应用于贵州省某隧道涌水风险评价。结果表明: 隧道综合云模型云滴大部分处于“中度风险”与“高度风险”之间, 与实际开挖及地质雷达分析结果一致。所提出的基于云模型的模糊综合评价法对富水岩溶隧道涌水风险评估提供良好的实践参考, 为日后隧道质量控制和寿命评估提供参考。

关键词: 富水岩溶隧道; 突水风险; 云模型; 评估指标体系; 云数字特征

中图分类号: X951; TU714

文献标志码: A

文章编号: 1673-193X(2021)-01-0109-07

Risk evaluation of water inrush in water-rich karst tunnel based on cloud model

LIU Dunwen¹, CAO Min¹, TANG Yu¹, XU Qian¹, JIANG Bing², WANG Fangli²

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China;

2. CCCC Road & Bridge South China Engineering Co., Zhongshan Guangdong 528400, China)

Abstract: To adapt to the characteristics of uncertainty, randomness and dynamic feedback of risk factors, a new risk evaluation system for the water inrush of water-rich karst tunnel was established, and a fuzzy comprehensive evaluation method based on the cloud model was proposed. 5 level-1 indicators and 29 level-2 indicators were selected to construct the evaluation indicator structure. The combination of hierarchical analysis, entropy weighting and weighted average calculation methods was used to reasonably allocate the weight of each indicator. The cloud generation algorithm was used to calculate the cloud digital characteristic parameters and generate a sufficient number of cloud droplets. This method was applied to the water inrush risk assessment of a tunnel in Guizhou Province. The results showed that most of the cloud droplets in the comprehensive cloud model were between “medium risk” and “high risk”, which was consistent with the results of actual excavation and geological radar analysis. The proposed fuzzy comprehensive evaluation method based on cloud model provides a good practical reference for the risk assessment of water inrush in the water-rich karst tunnel, and provides a reference for future tunnel quality control and life estimation.

Key words: water-rich karst tunnel; water inrush risk; cloud model; evaluation indicator system; cloud digital characteristic

0 引言

由于我国西南地区岩溶面积占总地区面积的30%以上, 在交通建设过程中易遇到高水压、富水、岩溶情况, 特别是岩溶隧道工程地下涌水问题尤为突出^[1-2]。又因隧道岩溶情况复杂, 其涌水风险具体涉及工程地质、水文条件和施工环境等因素, 故在施工过程中可能

引发施工安全、质量及环境影响等问题, 因此有必要开展富水岩溶隧道的涌水风险评价研究。

针对岩溶隧道的涌水风险评价问题, 国内外学者从不同角度对富水岩溶隧道涌水问题开展研究。李利平等^[3]对中国近50 a岩溶隧道突水工程实例进行系统整理, 分析得出隧道突水的典型影响因素包括不良地质、地下水位、地层岩性、地形地貌、岩层产状5项因素的水

收稿日期: 2020-06-02

* 基金项目: 中南大学博士后科研启动基金项目(228697)

作者简介: 刘敦文, 博士, 教授, 主要研究方向为土木工程及工程质量安全与灾害控制。

通信作者: 唐宇, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为桥梁与隧道工程安全评价与灾害防治。

文地质(孕险环境)类,以及包括开挖与支护、超前地质预报、监控量测3项因素的隧道施工管理水平(致险因子)类;舒森^[4]应用层次分析法建立突水预报模型,研究各项预报因素在突水风险评估中的影响权值;贾磊等^[5]针对隧道施工突水灾害多因素相互关联的特点,提出利用模糊综合评价法来评判隧道突水风险;Li等^[6]在未确知测度模型的基础上,根据实测数据选取各评价指标的度量函数,建立隧道突水灾害风险评估模型。各类指标因素的模糊性、随机性与不确定性在风险评估中普遍存在,但在现有岩溶隧道涌水风险评价的研究中,均未有效解决上述特性对评估结果的不利影响,又因评价指标不全面,未能系统反映岩溶隧道涌水灾害的各类影响因素,故对工程施工动态反馈因素研究较少。云模型是1种基于传统模糊集理论和概率论的理论模型,可将不确定因素的等级状态转换为对应的云数字特征,实现定性概念与其定量表示之间的不确定性转换^[7],已广泛运用于数据挖掘和系统综合评估等方面。

综上所述,本文针对岩溶隧道的涌水及现有评价模型的不足等问题,建立基于云模型理论的富水岩溶隧道涌水风险评价模型,相比其他评估方法,本文得出的云滴图能清晰直观地反映风险的模糊隶属情况,确定风险等级;以某岩溶隧道涌水工程实例和现场实测数据进行验证,实现对富水岩溶隧道涌水的评价,以期对现场施工起到反馈和指导作用。

1 云模型基本理论

1.1 云模型的定义

设评价属性 (x_1, x_2, \dots, x_n) 是定量论域 U 上的精确表示,模糊概念 \tilde{A} 是与之对应的定性描述。存在论域 U

中任意 $x_m (m = 1, 2, 3, \dots, n)$ 对应的隶属度 $C_T(x_m)$,其值稳定且随机,直接反映属性 x 对于描述 \tilde{A} 的确定度。 x 在 U 上的分布即为云模型,简称为云。任意元素 x_m 与其隶属度 $C_T(x_m)$ 组成的元组对称称为1个云滴^[8]。

1.2 标准评语云的确定

云模型内含3次正态分布规律,记为 $U^3(Ex, En, He)$,用以表征模糊概念 \tilde{A} ,其中 Ex, En, He 分别称作云模型的期望值、熵及超熵。对于存在双边界 $[C_{\min}, C_{\max}]$ 的模糊概念 \tilde{A} ,可采用式(1)计算评语云各参量大小^[9]。

$$\begin{cases} Ex = \frac{C_{\max} + C_{\min}}{2} \\ En = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{6} \\ He = k \end{cases} \quad (1)$$

式中: k 为云滴粒度控制常数,根据具体案例不确定性及随机性相应调整,本文取0.1。

1.3 云模型的计算

云发生器(Cloud Generator, CG)是1种通过计算机运算实现定性模糊概念与定量确定数值间映射转化的科学工具,常见类型包括正向云发生器(CG)与逆向云发生器(CG^{-1})2类。该工具可将云的数值特征转化为所需云滴,实现定性概念的定量化描述, CG^{-1} 则与其互逆。CG运行模式示意图及CG量化定性概念的具体算法步骤如图1所示。

2 富水岩溶隧道涌水风险评价模型

2.1 评价指标体系构建

通过检索与相关文献[10-12]分析得出,构建富水岩溶隧道涌水风险评价指标体系的风险因素选取主要



图1 正向云发生器示意图及云模型算法步骤

Fig.1 Schematic diagram of forward cloud generator and algorithmic steps of cloud model

遵循层次性、定性定量相辅性、相容性3大原则。

1) 层次性。隧道涌水风险评价体系主要由水文条件、地形地质条件、围岩情况、建设施工因素及风险动态反馈5大类因素构成,每大类又包含诸多细分因素,形成由总至分的层次结构。

2) 定性定量相辅性。将定性、定量指标有机结合,形成主观判断与客观监测相结合的综合体系。

3) 相容性。隧道涌水风险评价指标在某一风险等级状态下的取值为1个具体范围,属于集合问题。为确保各风险等级状态间的连续性,避免属性值的绝对和突

变,应当采取最优区间法对数据进行处理。

依据上述3项原则,结合工程实际问题并参考文献[13-18]。最终构建出包含水文条件、地形地质条件、

围岩情况、建设施工因素、风险动态反馈 5 个 1 级指标, 29 个 2 级指标的富水岩溶隧道涌水风险评价指标体系, 如图 2 所示。

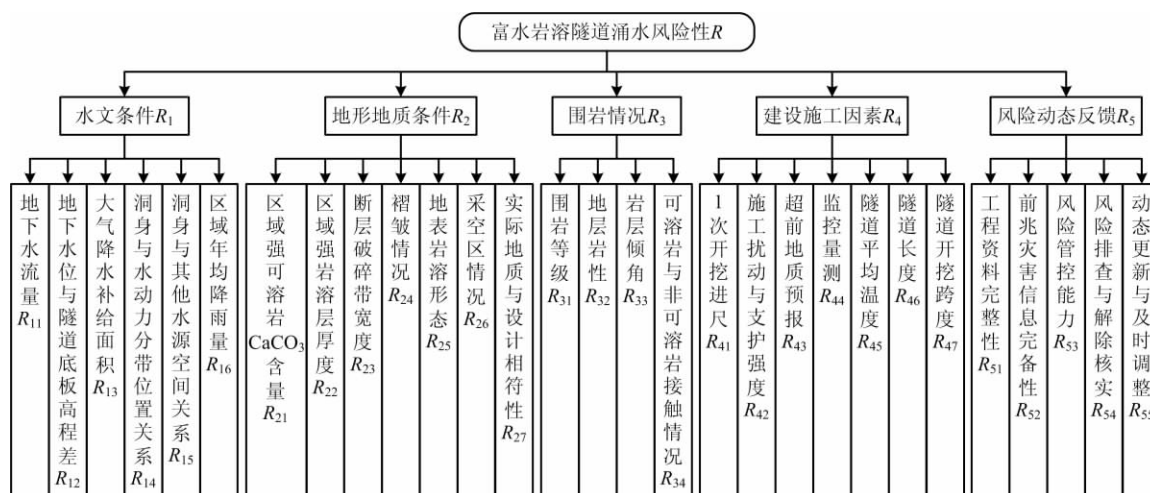


图2 富水岩溶隧道涌水风险评价指标体系

Fig. 2 Risk evaluation indicator structure of water inrush in water-rich karst tunnel

2.2 评价指标权重计算

基于图2构建的风险评价指标体系,采用德尔菲法并结合运筹学理论,确定各风险指标的权重,用以降低单名专家对指标评分的主观倾向,减少主观权重与客观事实间的偏差。该体系指标评分咨询了科研院校地质

灾害领域教授 4 位、隧道施工单位工程师 2 位、勘查设计研究院工程师 2 位及隧道检测单位工程师 2 位,共 10 位专家,得出风险评价判断矩阵。对判断矩阵进行科学计算,经一致性检验及归一化处理得出各级指标权重值,见表 1。

表 1 富水岩溶隧道涌水风险评价指标体系权重

Table 1 Weights of risk evaluation indicator system of water inrush in water-rich karst tunnel

1 级指标	2 级指标	1 级指标	2 级指标	1 级指标	2 级指标	1 级指标	2 级指标	1 级指标	2 级指标
$R_1 = 0.41$	$R_{11} = 0.17$	$R_2 = 0.17$	$R_{21} = 0.19$	$R_3 = 0.28$	$R_{31} = 0.45$ $R_{32} = 0.27$ $R_{33} = 0.14$ $R_{34} = 0.14$	$R_4 = 0.09$	$R_{41} = 0.13$	$R_5 = 0.05$	$R_{51} = 0.06$ $R_{52} = 0.15$ $R_{53} = 0.21$ $R_{54} = 0.44$ $R_{55} = 0.14$
	$R_{12} = 0.26$		$R_{22} = 0.21$				$R_{42} = 0.23$		
	$R_{13} = 0.08$		$R_{23} = 0.32$				$R_{43} = 0.32$		
	$R_{14} = 0.14$		$R_{24} = 0.04$				$R_{44} = 0.09$		
	$R_{15} = 0.05$		$R_{25} = 0.07$				$R_{45} = 0.03$		
	$R_{16} = 0.30$		$R_{26} = 0.09$				$R_{46} = 0.05$		
			$R_{27} = 0.08$				$R_{47} = 0.15$		

2.3 标准云评价模型

根据文献[14],建立统一的富水岩溶隧道涌水风险评估标准,采用10分制进行评判。鉴于定性风险指标难以精确量化的特点,本文采用4个风险等级进行区间划分。区间划分结果为低度风险($7.5 \sim <10$),中度风险($5 \sim <7.5$),高度风险($2.5 \sim <5$),极高风险($0 \sim <2.5$)。利用式(1)将各风险等级转换为标准评语云模型,其数字特征分别为:低度风险(8.75,0.42,0.1)、中度风险(6.25,0.42,0.1)、高度风险(3.75,0.42,0.1)、极高风险(1.25,0.42,0.1)。定性风险指标根据

专家评分大小,利用模糊评语集表示。定量指标则参考既有文献[14],基于风险级别区间范围进行区间标准化,具体划分标准见表2。

2.4 评价模型的生成

通过逆向云发生器将定性评分及定量区间标准化结果转化为云数字特征参数。设专家评语集为 $\{P_1, P_2, \dots, P_k, \dots, P_n\}$, 其中 P_k 为第 k ($k=1, 2, \dots, n$) 位专家对某2级风险评价指标的主观评分值。具体步骤如下:

1) 采用式(2) 计算出该指标的云数字特征参数 Ex_i, En_i 及 He_i 。

表 2 富水岩溶隧道涌水定量指标风险区间划分标准

Table 2 Risk interval classification criteria for quantitative indicators of water inrush in water-rich karst tunnel

编号	指标	级别划分			
		低度风险	中度风险	高度风险	极高风险
R_{11}	地下水流量/($L \cdot s^{-1}$)	$0 \sim <20$	$20 \sim <60$	$60 \sim <100$	≥ 100
R_{12}	地下水位与隧道底板高程差/m	≥ 60	$30 \sim <60$	$10 \sim <30$	$0 \sim <10$
R_{13}	大气降水补给面积/ km^2	$0 \sim <1$	$1 \sim <5$	$5 \sim <10$	≥ 10
R_{16}	区域年均降雨量/mm	$0 \sim <300$	$300 \sim <600$	$600 \sim <1\ 000$	$\geq 1\ 000$
R_{21}	区域强可溶岩 $CaCO_3$ 含量/%	$0 \sim <25$	$25 \sim <50$	$50 \sim <75$	≥ 75
R_{22}	区域强岩溶层厚度/m	$0 \sim <10$	$10 \sim <30$	$30 \sim <50$	≥ 50
R_{23}	断层破碎带宽度/m	$0 \sim <0.2$	$0.2 \sim <0.5$	$0.5 \sim <1.0$	≥ 1.0
R_{33}	岩层倾角/($^\circ$)	$25 \sim 65$	$10 \sim <25 \cup >65 \sim 80$	$>80 \sim 90$	$0 \sim <10$
R_{41}	1 次开挖进尺/m	$0 \sim <1$	$1 \sim <2$	$2 \sim <3$	≥ 3
R_{45}	隧道平均温度/ $^\circ C$	$0 \sim <5$	$5 \sim <25$	$25 \sim <40$	≥ 40
R_{46}	隧道长度/m	$0 \sim <1\ 000$	$1\ 000 \sim <3\ 000$	$3\ 000 \sim <5\ 000$	$\geq 5\ 000$
R_{47}	隧道开挖跨度/m	$0 \sim <9$	$9 \sim <14$	$14 \sim <18$	≥ 18

$$\begin{cases} Ex_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n P_k \\ S_i^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (P_k - Ex_i)^2 \\ En_i = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |P_k - Ex_i| \\ He_i = \sqrt{|S_i^2 - En_i^2|} \end{cases} \quad (2)$$

2) 利用式(3)加权平均算术法将各 2 级风险评语云(风险子云)转化为 1 级风险综合云(风险父云)。

$$\begin{cases} Ex = \frac{\sum_{i=1}^m Ex_i En_i w_i}{\sum_{i=1}^m En_i w_i} \\ En = \sum_{i=1}^m En_i w_i \\ He = \frac{\sum_{i=1}^m He_i En_i w_i}{\sum_{i=1}^m En_i w_i} \end{cases} \quad (3)$$

式中: m 为各 1 级风险指标下属的 2 级风险指标个数, w_i 表示各 2 级风险指标的权重值。得出的风险父云即为岩溶隧道涌水风险评价综合云,利用正向云发生器即可生成各风险云滴。

3) 通过式(4)计算综合云对各等级云的隶属度 ξ_i ,验证云模型直观判断的准确性,其结果进一步与工程实际勘查情况进行对比分析。

$$\xi_i = e^{\left(-\frac{(x_i - Ex_i)^2}{2(En_i)^2}\right)} \quad (4)$$

3 工程应用

3.1 工程概况

本文依托贵州省某高速公路隧道工程,根据隧址区

水文条件、地质结构及岩溶发育程度,将隧道右洞划分为以下 3 个区段:里程桩号 YK20+480(隧道进口)~YK21+100 段、桩号 YK21+100~YK21+960 段及桩号 YK21+960~YK24+300(隧道出口)段。其中,首尾区段地质赋存为志留系隔水岩层,隔水层阻碍了地下水的转移运动,因而岩溶涌水风险极低。隧道中段 YK21+100~YK21+960 穿越向斜核部二叠系栖霞-茅口组(P_1q+m)岩溶含水层,区域强可溶岩 $CaCO_3$ 含量较高,存在较大岩溶涌水灾害风险隐患,研究区段地质水文情况如图 3 所示。

隧道中段内的 YK21+100~YK21+240 里程区间围岩饱和抗压强度较低,仅 12.3 MPa,且围岩岩体较为破碎,推测拱部及侧壁自稳性较差,开挖时易引发掉块、坍塌等事故,岩溶涌水风险较大。该段前期地质调查结果显示,存在多条近似平行展布且富含丰富地下水的岩溶通道,隧道穿越其中极易揭露破坏,致使岩溶涌水事故发生。本文采用该高速公路隧道 YK21+100~YK21+240 里程段作为重点风险防控段进行岩溶涌水风险评价。

3.2 云模型数字特征计算

依据云模型评价指标的主客观性,可将收集到的基础数据分为实测数据及专家评分结果 2 类。其中,现场实测数据见表 3,其风险程度依据国家标准及行业规范划分的等级区间(见表 2)而定,每项风险因素实测数值按照其所处风险区间百分比映射至标准风险区间。

为克服现场监测条件限制,其他数据采用专家集体打分确定,每项风险因素评分结果见表 4。

结合表 4 中的评分数据,采用式(2)加权平均算法降低评分的主观性,得出各定性指标的云模型数字特

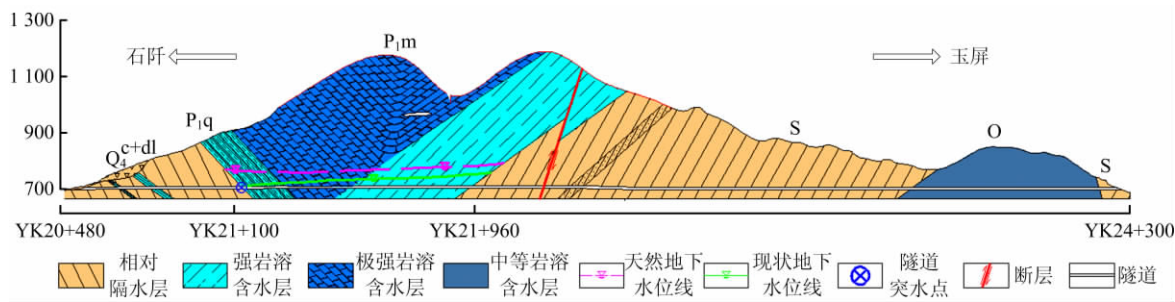


图3 研究地点水文地质情况
Fig.3 Hydrogeological conditions of studied site

表3 突水风险因素数值
Table 3 Values of risk factors for water intrush

因素	$R_{11}/(L \cdot s^{-1})$	R_{12}/m	R_{13}/km^2	R_{16}/mm	$R_{21}/\%$	R_{22}/m
数值	40	26.1	4.085	1 472	65	24.71
因素	R_{23}/m	$R_{33}/^{\circ}$	R_{41}/m	$R_{45}/^{\circ}C$	R_{46}/m	R_{47}/m
数值	0.8	72	1	16	3 820	10.25

征。利用式(1) 计算得出2 类风险指标对应的数字特征,2 类指标归一化处理后的云参数结果见表5。

依据表1 中各风险指标的权重值,利用式(3) 计算出风险云模型的5 个1 级指标的数字特征分别为:
 $R_1 = (4.13, 0.48, 0.13)$, $R_2 = (5.30, 0.47, 0.13)$, $R_3 = (4.39, 0.67, 0.24)$, $R_4 = (7.10, 0.67, 0.17)$, $R_5 = (7.37, 0.71, 0.42)$ 。综合5 个1 级风险指标的云模型

表4 专家评分结果
Table 4 Results of experts scoring

专家	R_{14}	R_{15}	R_{24}	R_{25}	R_{26}	R_{27}	R_{31}	R_{32}	R_{34}	R_{42}	R_{43}	R_{44}	R_{51}	R_{52}	R_{53}	R_{54}	R_{55}
P_1	6	5	7	4	8	8	4	3	7	9	6	8	9	6	7	7	6
P_2	5	5	7	5	9	7	3	4	6	8	7	7	7	6	9	8	6
P_3	7	6	6	5	9	7	4	4	5	9	8	9	9	7	9	7	8
P_4	6	5	6	5	8	8	4	3	6	9	8	8	9	6	7	8	6
P_5	6	5	6	4	8	6	4	5	5	8	6	8	8	7	8	7	7
P_6	7	5	6	4	8	6	4	4	7	7	8	8	9	7	8	7	7
P_7	7	5	6	4	8	7	3	3	7	7	8	9	9	6	8	8	7
P_8	5	6	7	5	8	7	3	3	5	8	7	8	7	6	8	7	6
P_9	5	5	6	4	8	8	3	5	6	9	7	7	7	6	9	7	6
P_{10}	7	5	6	4	8	8	4	4	7	7	7	7	7	7	9	7	8

数字特征,得出岩溶隧道涌水风险综合云数字特征 $R = (4.91, 0.56, 0.19)$ 。

3.3 风险评价结果及分析

计算得到岩溶隧道涌水风险综合评价云滴图,如图4 所示。

由图4 可知,综合评价标度中心位于5 左右,综合评价云滴处于“中度风险”和“高度风险”之间,偏向“高度风险”水平。根据式(4) 求得综合云数字特征与“低度风险”“中度风险”“高度风险”“极高风险”的隶属度分别为0,0.005 7,0.020 9,0,与“高度风险”对应隶属度最大,计算结果与综合评价云滴图显示一致。因此推断该富水岩溶隧道 YK21 + 100 ~ YK21 + 240 段涌水风险为高度风险水平。

计算得出1 级风险指标水文条件(R_1)、围岩情况

(R_3) 的云数字特征分别为(4.13,0.48,0.13)、(4.39,0.67,0.24),而综合云数字特征为(4.91,0.56,0.19),三者的期望值 $4.13 < 4.39 < 4.91$,表明水文条件及围岩情况是影响该富水岩溶隧道涌水风险的不安全因素。

3.4 结果验证

为对该段隧道涌水的高度风险等级进行验证,对该段隧道的涌水情况进行详细的勘察和分析,现场情况如图5 所示。

该隧道开挖至 YK21 + 100 ~ YK21 + 240 段,YK21 + 122.8 掌子面左上方最初出现突水现象,如图5(a) 所示。随着掌子面向前推进,YK21 + 128 左侧拱脚、YK21 + 139 上台阶溶洞、YK21 + 148 右侧小溶腔均相继发生涌突水,如图5(b) ~ (d) 所示。

表 5 富水岩溶隧道涌水风险指标数字特征
Table 5 Digital characteristics of risk indicators for water inrush in water-rich karst tunnel

指标	数字特征	指标	数字特征
R_{11}	(6.25, 0.42, 0.10)	R_{33}	(6.33, 0.42, 0.10)
R_{12}	(2.99, 0.42, 0.10)	R_{34}	(6.10, 0.90, 0.22)
R_{13}	(6.31, 0.42, 0.10)	R_{41}	(7.50, 0.42, 0.10)
R_{14}	(6.10, 0.90, 0.22)	R_{42}	(8.10, 0.90, 0.22)
R_{15}	(5.20, 0.40, 0.13)	R_{43}	(7.20, 0.80, 0.15)
R_{16}	(1.32, 0.42, 0.10)	R_{44}	(7.90, 0.68, 0.29)
R_{21}	(3.50, 0.42, 0.10)	R_{45}	(6.13, 0.42, 0.10)
R_{22}	(5.66, 0.42, 0.10)	R_{46}	(6.03, 0.42, 0.10)
R_{23}	(4.50, 0.42, 0.10)	R_{47}	(3.13, 0.42, 0.10)
R_{24}	(6.30, 0.53, 0.21)	R_{51}	(8.10, 1.13, 0.53)
R_{25}	(4.40, 0.60, 0.31)	R_{52}	(6.40, 0.60, 0.31)
R_{26}	(8.20, 0.40, 0.13)	R_{53}	(8.20, 0.80, 0.15)
R_{27}	(7.20, 0.80, 0.15)	R_{54}	(7.30, 0.60, 0.66)
R_{31}	(3.60, 0.60, 0.31)	R_{55}	(6.70, 0.88, 0.30)
R_{32}	(3.80, 0.80, 0.20)		

结合隧道超前地质预报, 预报测线按从左至右测线及从右至左测线方式进行布置, 得出的雷达处理图, 如图 6 所示。

由图 6 可知, 隧道在 YK21 + 125 - YK21 + 155 段层间裂隙极为发育, 涌水风险水平较高。由此可知, 云模型评价结果与隧道实际开挖情况相符, 涌水风险属于高度风险水平, 验证基于云模型富水岩溶隧道涌水风险评

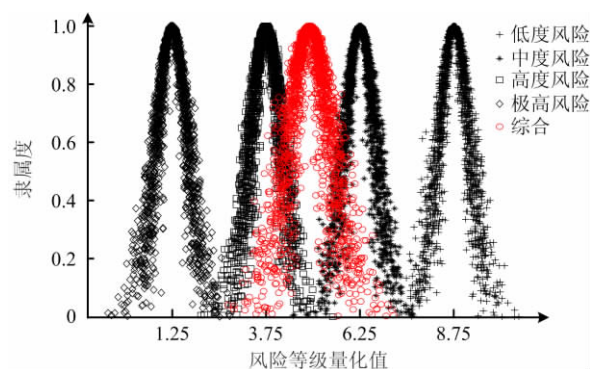


图 4 岩溶隧道涌水风险综合评价云滴

Fig. 4 Cloud droplet map for comprehensive evaluation of water inrush risk in karst tunnel

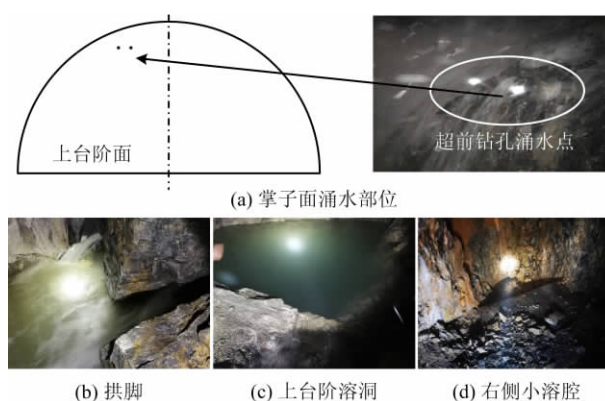


图 5 隧道 YK21 + 100 ~ YK21 + 240 段涌水情况

Fig. 5 Water inrush situation in tunnel section from YK21 + 100 to YK21 + 240

价的有效性和可行性。

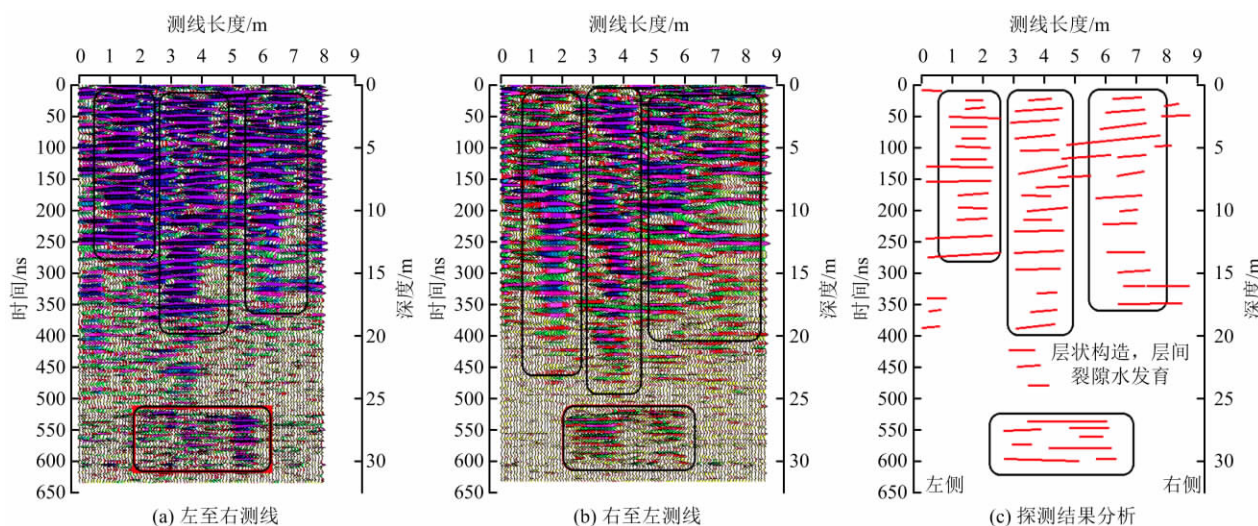


图 6 雷达处理图像

Fig. 6 Radar processing image

4 结论

1) 基于云模型理论可实现定性概念与其定量表示间不确定性转换的特点,选取水文条件、地形地质条件、围岩情况、建设施工因素、风险动态反馈5个1级指标及29个2级指标,构建富水岩溶隧道风险重点段的涌水评价指标体系,并建立富水岩溶隧道涌水风险评价模型。

2) 将本文的风险评价模型应用于某岩溶隧道涌水实际工程,直观清晰地显示出综合云模型云滴大部分处于“中度风险”与“高度风险”之间,对各风险等级的模糊隶属度也加以计算,得出该段隧道涌水风险较高。同时,根据计算结果可得到水文条件及围岩情况为影响隧道突涌水风险的不安全因素,并提出相应的防治措施。

3) 现场的超前地质预报和勘察资料均表明风险评价模型所得结果的正确性,表明基于云模型的岩溶隧道涌水风险评价模型在工程应用中是可行性的。此外,通过综合云数字特征与标准云数字特征比较,可在云滴图中更清晰直观地得出评估结果,确定评估对象涌水风险等级。相比传统的现场监测手段,该方法更加直观、全面,可为岩溶隧道的涌水防控措施决策及安全预警提供参考。

参考文献

- [1] 张继奎. 圆梁山隧道特殊地质地段施工浅析[J]. 隧道建设, 2004, 24(5): 44-50.
- [2] 曾桅栋, 李海清. 回弄山隧道灾害性涌水突泥的原因分析与对策研究[J]. 公路, 2008, 3: 216-221.
- [3] 李利平, 李术才, 陈军, 等. 基于岩溶突涌水风险评价的隧道施工许可机制及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1345-1355.
LI Liping, LI Shucui, CHEN Jun, et al. Construction license mechanism and its application based on karst water inrush risk evaluation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7): 1345-1355.
- [4] 舒森. 岩溶隧道突水突泥预报综合评估[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(4): 72-78.
SHU Sen. Comprehensive assessment of prediction of water and mud bursting in karst tunnel [J]. Railway Standard Design, 2015, 59(4): 72-78.
- [5] 贾磊, 李源, 章岩, 等. 隧道突水突泥灾害的模糊预测和控制措施[J]. 灾害学, 2014, 29(2): 69-71.
JIA Lei, LI Yuan, ZHANG Yan, et al. Fuzzy-prediction and control measures for water bursting and mud surging of tunnel [J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(2): 69-71.
- [6] LI S C, WU J, XU Z H, et al. Unascertained measure model of water and mud inrush risk evaluation in karst tunnels and its engineering application [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017, 21(4): 1170-1182.
- [7] 李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995(6): 15-20.
LI Deyi, MENG Haijun, SHI Xuemei. Membership clouds and membership cloud generators [J]. Journal of Computer Research and Development, 1995(6): 15-20.
- [8] 刘常昱, 李德毅, 杜鹄, 等. 正态云模型的统计分析[J]. 信息与控制, 2005, 34(2): 236-239, 248.
LIU Changyu, LI Deyi, DU Yi, et al. Some statistical analysis of the normal cloud model [J]. Information and Control, 2005, 34(2): 236-239, 248.
- [9] 宋远骏, 李德毅, 杨孝宗, 等. 电子产品可靠性的云模型评价方法[J]. 电子学报, 2000(12): 75-77.
SONG Yuanjun, LI Deyi, YANG Xiaozong, et al. Reliability evaluation of electronic products based on cloud models [J]. Acta Electronica Sinica, 2000(12): 75-77.
- [10] 徐钟, 邓辉, 卢平, 等. 隧道岩溶段涌水突泥风险评价体系初探[J]. 水利水电技术, 2018, 49(3): 127-134.
XU Zhong, DENG Hui, LU Ping, et al. Preliminary study on risk evaluation system of water inrush and mud burst in karst section of tunnel [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(3): 127-134.
- [11] 翁其能, 吴秉其, 向帅, 等. 隧道涌水突泥风险评价模型研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2012, 31(5): 944-947.
WENG Qineng, WU Bingqi, XIANG Shuai, et al. Model study of risk assessment about water bursting and mud gushing in tunnel [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2012, 31(5): 944-947.
- [12] 杜毓超, 韩行瑞, 李兆林. 基于 AHP 的岩溶隧道涌水专家评判系统及其应用[J]. 中国岩溶, 2009, 28(3): 281-287.
DU Yuchao, HAN Xingrui, LI Zhaolin. Professional evaluation system for karst tunnel gushing based on AHP and its application [J]. Carsologica Sinica, 2009, 28(3): 281-287.
- [13] 杨光, 刘敦文, 褚夫蛟, 等. 基于云模型的隧道塌方风险等级评价[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(6): 95-101.
YANG Guang, LIU Dunwen, CHU Fujiao, et al. Evaluation on risk grade of tunnel collapse based on cloud model [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(6): 95-101.
- [14] 交通运输部工程质量监督局. 公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估制度及指南解析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [15] 李术才, 石少帅, 李利平, 等. 三峡库区典型岩溶隧道突涌水灾害防治与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1887-1896.
LI Shucui, SHI Shaoshuai, LI Liping, et al. Control of water inrush in typical karst tunnels in three gorges reservoir area and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(9): 1887-1896.
- [16] 李利平, 李术才, 陈军, 等. 基于岩溶突涌水风险评价的隧道施工许可机制及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1345-1355.
LI Liping, LI Shucui, CHEN Jun, et al. Construction license mechanism and its application based on karst water inrush risk evaluation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7): 1345-1355.
- [17] 石少帅. 深长隧道充填型致灾构造渗透失稳突涌水机理与风险控制及工程应用[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地下工程防水技术规范: GB/T 50108—2008 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.

(责任编辑: 袁文静)