

蒋英礼, 崔杰, 王景梅, 等. 基于指标信度测度赋权的岩溶隧道水害危险性集对云评价研究[J]. 中国岩溶, 2022, 41(2): 276-286.
DOI: 10.11932/karst20220208

基于指标信度测度赋权的岩溶隧道水害危险性集对云评价研究

蒋英礼^{1,2}, 崔杰², 王景梅¹, 张彦龙³

(1. 广东交通职业技术学院, 广东 广州 510650; 2. 广州大学, 广东 广州 510006;
3. 广东华路交通科技有限公司, 广东 广州 510420)

摘要:隧道水害危险性评价是一个非线性复杂的不确定系统问题。首先, 针对其评价指标参数具有不确定性、模糊性和随机性等特点, 在充分考虑岩溶隧道水害危险性评价指标关联性的基础上, 提出了基于 Jusselme 距离的指标信度测度动态赋权理论, 实现不同的实例、不同的指标实测值对整个系统的动态赋权, 降低实际工作中由于指标实测值误差或错误导致评价结果偏差的风险; 其次, 运用云理论优化集对联系度, 与所得权重加权得出系统综合云联系度, 并与等级评价区间期望加权平均得到危险值, 同时生成对应的等级云图判定隧道水害危险性等级, 进而判定岩溶隧道水害危险状态, 实现水害危险等级判定的可视化; 再次, 基于大气降水为岩溶隧道水害主要来源的视角, 选取年均降水量、入渗系数、汇水面积、渗透系数和单位涌水量 5 项指标作为集对云评价指标, 并以 6 条典型岩溶隧道为样本数据进行模型检验, 发现评价结果与其他方法的评价结果相吻合, 证明了该模型的可靠性和有效性。最后, 将模型应用于京珠高速公路媯双坳岩溶隧道水害事故中, 评价结果与实际情况相符, 采取与评价等级相对应的处治措施, 取得了良好的水害治理效果, 表明该模型具有工程实用价值, 评价流程可操作性强, 为岩溶隧道水害的预测和防治提供参考。

关键词: 指标信度测度; 隧道水害; 危险性评价; 集对云

中图分类号: U457.2 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2022)02-0276-11 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

随着我国经济快速发展和交通强国战略的提出, 我国已成为世界上隧道运营里程最多、数量最多、地质条件和结构形式最复杂、发展速度最快的国家。统计资料显示^[1-3], 截至 2020 年底, 我国铁路隧道运营里程为 19 630 km, 公路隧道运营里程为 19 285 km, 水下隧道运营里程为 1 100 km。然而, 运营隧道也存在着较为严重的病害问题, 其中隧道渗漏水已成

为我国隧道工程最为普遍的病害之一^[4]。数据显示, 30%~40% 的交通隧道存在不同程度的水害问题^[5-6], 给隧道运营管理部门带来了极大的困难和压力。实践证明, 岩溶地区的隧道水害问题更为严重, 如京广线大瑶山隧道、襄渝线大巴山隧道、贵昆线梅花山隧道等, 在施工期间及交付运营后, 都曾发生严重的水害事故。因此, 对隧道水害, 特别是岩溶隧道水害进行危险性判定研究具有重要的意义。由于隧道水害发生机制是水在围岩运移过程中发生的渐进式破

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578167); 广东省普通高校特色创新项目(2021KTSCX221); 广州市基础研究计划基础与应用基础研究项目(2022-1720)

第一作者简介: 蒋英礼(1984—), 男, 副教授, 博士研究生, 从事隧道工程方面的教学与研究工作。E-mail: jiangyingli@163.com。

通信作者: 崔杰(1962—), 男, 博士, 博士生导师, 研究员, 从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: jcui2009@hotmail.com。

收稿日期: 2021-04-05

坏失稳或骤然产生大量涌水现象,学者们常采用力学理论分析、数值模拟等进行隧道水害发生机理分析^[5,7-8],但隧道水害是受地理环境、水文地质条件、隧道工程条件等诸多因素综合作用的结果,采用理论分析或数值模拟难以建立普适的评价模型。近年来,学者们将粒子群算法^[9]、Bayes 判别法^[10]、集对分析理论^[11]、未确知测度理论^[12]等新的数学理论或系统工程分析方法引入到了隧道水害评价。但以上方法也存在一定的缺陷,主要体现为:一是上述方法在评价过程中未充分考虑指标间的不确定性、模糊性或随机性对系统的干扰和指标的级别判定与系统风险评价联系度的关系,降低了评价体系的鲁棒性;二是现有的赋权理论多注重于评价指标体系的构建,忽略了指标间、指标与评价等级间的关联性 & 指标实测值的变化对权重的影响等。

鉴于此,本文基于不确定人工智能的理论和思想^[13],引入云理论优化集对联系度,选取相关性评价指标并建立了以指标距离为基础的信度测度动态赋权理论,得到不同案例、不同指标实测值的准确权重,最后结合指标权重加权得出隧道水害危险性评价综合云联系度,进而判定岩溶隧道水害危险状态。该耦合模型兼顾了评价指标间的关联性、评价体系的不确定性和评价指标等级的模糊性,提高了岩溶隧

道水害危险性评价结果的精确度,为快速有效地分析岩溶隧道水害危险性提供了一种新方法。

1 基于指标信度测度动态赋权法的集对云模型构建

1.1 评价流程

通过指标信度测度赋权法和集对云构建隧道水病危险性评价模型,整体研究思路见图 1,主要包括:①建立评价指标体系,并运用信度测度赋权法确定各指标权重;②引入云模型优化集对联系度,建立各指标与评价等级间的云联系度,并将步骤①得到的各指标权重与云联系度加权确定综合云联系度;③风险感知,将步骤②中计算所得综合云联系度归一化,根据综合云联系度对应的云图确定岩溶隧道水害危险性等级,并通过计算各阶偏联系度确定岩溶隧道水害危险性发展趋势,最后,根据评价结果给出相应的改进建议与措施。

1.2 基于Jousselme 距离的指标信度测度动态赋权法

本文针对不同的指标实测值以正态分布函数^[14]构造各指标的 Mass 函数,通过融合 Jousselme 距离^[15]多证据关系系数,借此刻画指标之间的关联性,在充

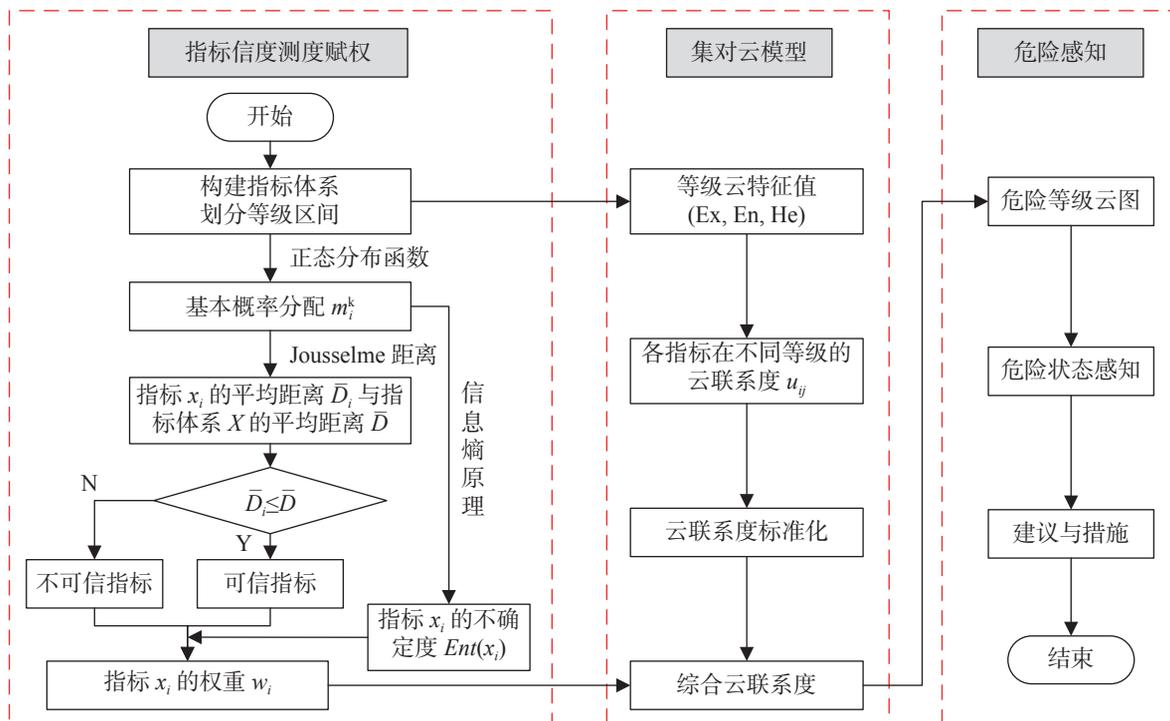


图 1 岩溶隧道水害危险性评价集对云模型结构图及评价流程

Fig. 1 Structure diagram and evaluation process of tunnel flood

分考虑了指标实测数据真实性的前提下, 对其进行信度归类并赋予不同的权重, 以实现对整个系统的动态赋权过程, 其具体赋值过程如下:

Step1 构建指标体系, 划分等级区间

选取相互关联的指标以构建指标体系, 将各指标的危险状态划分为 n 个等级, 并确定各个等级的区间, 设指标 i 的第 j 等级的上下界限为 $(X_{ij,\min}, X_{ij,\max})$ 。

Step2 构造 Mass 函数, 求解基本概率分配 m_i^k

正态分布函数(也称为钟型函数)作为隶属度函数来构造 Mass 函数, 可以充分考虑隧道水害危险性评价过程中的模糊性和不确定, 以减少主观因素的影响, 其一般形式如下:

$$\mu(x) = \begin{cases} \exp\left\{-\left[\frac{(x-x_0)}{c}\right]^2\right\} \\ c = \frac{a^+ - a^-}{1.66} \end{cases} \quad (1)$$

当单边区间时, 采用正态或上型和正态或下型隶属函数处理。因此式(1)可得出任意 $k(k>1)$ 等级区间的一般表达式, 式(2)。

$$\mu_k(x) = \begin{cases} 0 & x \leq \bar{a}_{k+1} \text{ 或 } x > \bar{a}_{k-1} \\ 1 - \exp\left\{-\left[\frac{1.66}{2} \left(\frac{x - \bar{a}_{k+1}}{\bar{a}_{k+1} - \bar{a}_{k-1}}\right)\right]^2\right\} & \bar{a}_{k+1} \leq x < \bar{a}_k^- \\ \exp\left\{-\left[1.66 \left(\frac{x - \bar{a}_k}{a_k^+ - a_k^-}\right)\right]^2\right\} & \bar{a}_k^- \leq x \leq a_k^+ \\ 1 - \exp\left\{-\left[\frac{1.66}{2} \left(\frac{x - \bar{a}_{k-1}}{\bar{a}_{k-1} - a_k^+}\right)\right]^2\right\} & a_k^+ \leq x < \bar{a}_{k-1} \end{cases} \quad (2)$$

式中: x 为某指标的实测值; x_0 为某等级区间的平均值; a^+ 、 a^- 为等级区间上下限; \bar{a}_k^- 、 a_k^+ 为物理量的区间分段值; \bar{a}_{k-1} 、 \bar{a}_k 、 \bar{a}_{k+1} 为各相邻区间中值。

结合指标实测值 x_i 和式(2)可求解每个分类指标所属等级 k 的基本概率分配 m_i^k 。

Step3 计算指标 x_i 的平均距离 \bar{D}_i 和指标集 X 的平均距离 \bar{D}

Jousselme 等人于 2001 年提出 Jousselme 距离, 常被用来度量两指标之间信度赋值的差异度。令 d_{ij} 为指标 x_i 和 x_j 之间的 Jousselme 距离, 则 d_{ij} 的计算式见(3)。

$$\begin{aligned} d_{ij} &= \sqrt{\frac{1}{2}(\vec{m}_i - \vec{m}_j)^T \underline{D}(\vec{m}_i - \vec{m}_j)} \\ &= \sqrt{\frac{1}{2}(\|\vec{m}_i\|^2 + \|\vec{m}_j\|^2 - 2\langle \vec{m}_i, \vec{m}_j \rangle)} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $\underline{D} = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|}$ ($A, B \in P(\Theta)$), 为一个 $2^n \times 2^n$ 的矩阵, $\langle \vec{m}_i, \vec{m}_j \rangle$ 为两向量内积。

评价指标 $x_i(i=1, 2, \dots, s)$ 与其他指标的平均 Jousselme 距离 \bar{D}_i 和指标集 X 的平均 Jousselme 距离 \bar{D} 的计算分别见式(4)、式(5)。

$$\bar{D}_i = \sqrt{\frac{1}{s-1} \sum_{i \neq j, j=1}^s d_{ij}^2} \quad (4)$$

$$\bar{D} = \frac{1}{s} \sum_{i \neq j, j=1}^s \bar{D}_i \quad (5)$$

式中: s 为指标总个数。

Step4 判别指标信度

指标集 X 中, 满足式(6), 则该指标实测值定义为可信指标, 否则为失信指标。

$$\bar{D}_i < \bar{D} \quad (6)$$

Step5 计算指标的不确定度和信度测度函数

依据信息熵的原理计算各指标的不确定度 $UM(x_i)$, 并进行归一化得到 $Ent(x_i)$, 计算见式(7)。

$$\begin{cases} UM(x_i) = -\sum_{k=1}^n m_i^k \lg_2 m_i^k \\ Ent(x_i) = \frac{UM(x_i)}{\sum_{i=1}^n UM(x_i)} \end{cases} \quad (7)$$

引入指标信度测度函数来确定权重, 可信指标和不可信指标分别采用可信函数和失信函数计算其权重:

$$v_i = \begin{cases} \exp[-Ent(x_i)] & \text{可信函数} \\ [1 - Ent(x_i)]^{\theta^{Ent(x_i)+1}} & \text{失信函数} \end{cases} \quad (8)$$

式中: 参数 θ 为待定系数, 一般 $\theta \in [0, 1]$, 本文取 $\theta = 0.5$ 。

Step6 计算权重

依据信度函数可归一化并得出指标 x_i 的权值 w_i , 计算见式(9)。

$$w_i = \frac{v_i}{\sum_{i=1}^n v_i} \quad (9)$$

1.3 集对云评价模型

集对分析(set pair analysis, SPA)^[16] 是将具体背景下 2 个具有一定联系的事物用集合 A 和 B 的形式组成一个集对 $H=(A, B)$, 且 $A \cap B \neq \emptyset$, 通过同一度、差异度、对立度描述这 2 个集合间的不确定关系, 并用

联系数的形式定量刻画事物间的内在联系,联系数的一般表达式,见式(10)。

$$\begin{cases} \mu_{(A,B)} = a + bi + cj \\ \text{s.t. } a + b + c = 1 \end{cases} \quad (10)$$

式中: a 、 b 、 c 分别为同一度、差异度和对立度; $i \in [-1, 1]$, 为差异系数; $j \in [-1, 1]$, 为对立系数。

式(10)称为三元联系度,而在一些实际情况中,还可将 bi 进行不同程度的拓展,如在集对分析中将评价样本和对应的等级指标标准构成相互关联的集对,则式(10)可改写为:

$$\begin{cases} \mu_i = \mu_{(A,B)} = a_i + b_{1,i} \cdot i_1 + \dots + b_{n-2,i} \cdot i_{n-2} + c_n \cdot j \\ \text{s.t. } a_i + b_1 + \dots + b_{n-2} + c_n = 1 \end{cases} \quad (11)$$

式(11)称为 n 元联系度, μ_m 为指标 m 的联系度, n 为评级等级, b_1, b_2, \dots, b_{n-2} 为差异度分量, i_1, i_2, \dots, i_{n-2} 表示差异分量系数。

Step7 计算各指标的等级云特征值

根据评价指标对应等级的上下限可确定云模型的数字特征:期望、熵和超熵,以此兼顾评价等级界限值的模糊性和随机性,实现分级区间软化。各指标对应等级的期望、熵与超熵根据式(12)计算得出。

$$\begin{cases} \exp \left[\frac{(X_{ij,\max} - X_{ij,\min})^2}{8(E_{n,ij})^2} \right] = 0.5 \\ E_{x,ij} = \frac{X_{ij,\max} + X_{ij,\min}}{2} \\ H_e = \eta \end{cases} \quad (12)$$

式中: $E_{x,ij}$, $E_{n,ij}$ 为指标 i 对应等级 j 的期望值与熵值; $X_{ij,\min}$, $X_{ij,\max}$ 分别为指标 i 对应等级 j 危险值下界、上界; H_e 为各指标对应等级的超熵; η 为云的厚度,一般取 0.01。

Step8 确定各指标在不同等级的云联系度

采用正态云函数作为关联度函数确定评价模型各指标在不同等级的云联系度,即通过式(13)计算云联系度 μ_{ij} 。

$$\mu_{ij} = \exp \left(-\frac{(x_i - E_{x,ij})^2}{2(E_{n,ij})^2} \right) \quad (13)$$

式中: μ_{ij} 为指标 i 对应等级 j 的云联系度,是对联系度 μ_i 的改进。

由式(13)可依次得出各指标对应等级的云特征值,并代入式(14)可得出各指标对应等级的云联系度 μ_{ij} ,并归一化处理得到云联系度 μ_{ij}^* :

$$\mu_{ij}^* = \mu_{ij} \left/ \sum_{j=1}^n \mu_{ij} \right. \quad (14)$$

Step9 确定综合云联系度

联立式(11)与式(14)可得到各指标对应等级的 n 元综合云联系度。基于相关危险性等级划分标准,隧道水害危险性一般划分为 4 个评价等级,得到的四元综合云联系度 μ_i 为:

$$\begin{cases} \mu_i = \mu_{i,I}^* + \mu_{i,II}^* \cdot i_1 + \mu_{i,III}^* \cdot i_2 + \mu_{i,IV}^* \cdot j \\ \text{s.t. } \mu_{i,I}^* + \mu_{i,II}^* + \mu_{i,III}^* + \mu_{i,IV}^* = 1 \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\mu_{i,I}^*$, $\mu_{i,II}^*$, $\mu_{i,III}^*$, $\mu_{i,IV}^*$ 为指标 i 处于 I ~ IV 等级的程度。

根据信度测度赋权法确定的权重 W 与各指标四元联系度 μ_i 加权可得到隧道水害危险性综合云联系度 μ 为:

$$\mu = \sum_{i=1}^s w_i \cdot \mu_i \quad (16)$$

Step10 危险性状态感知及处理措施

取隧道水害危险性 I ~ IV 等级评价区间为 [0, 0.25)、[0.25, 0.5)、[0.5, 0.75)、[0.75, 1.0], 代入式(12)可得隧道水害危险等级的集对云模型(Set Pair Cloud, SPC)的 3 个数字特征,即 $SPC=(E_{x,i}, E_{n,i}, H_e)$, 将各等级评价区间的期望值 $E_{x,i}$ 与式(16)加权平均得到综合云期望值 E_x , 定义为危险值 U , 并确定出危险性状态等级。最后,可根据评价等级结果采用相应的工程处治措施,对应关系见表 1。

2 工程实例

2.1 评价指标体系建立

岩溶隧道水害是在隧道与外界环境相互融合构成的复杂系统下发生的,受自然环境、地质及水文条件、工程条件等因素影响。文献[6]基于“自然地理特征—地质环境—水文条件—工程条件”是隧道水害的最主要的控制因素,提出了地形地貌、植被覆盖率、降水量等 14 个水害评价指标;文献[11]从水害评价因素之间较大的相关性入手,选取渗透系数、降水量和单位涌水量 3 个指标为评价指标;文献[12]基于水害评价的内外因的视角,从水害来源、通道、水量三个方面,提出了降水量、地表水文情况、渗透系数等 13 项评价指标。以上研究表明,隧道水害危险性评价受到多种因素的影响且非常复杂,评价指标过多或过少都会影响评价结果,所以选择隧道水害危险性评价指标体系应保证全面和简洁。

表 1 水害危险性等级表述及相应处治措施
Table 1 Risk grades of tunnel flood and its corresponding treatment

评价结果	危险值 U			
	[0, 0.25)	[0.25, 0.5)	[0.5, 0.75)	[0.75, 1.0]
云模型 SPC	(0, 0.107, 0.01)	(0.375, 0.107, 0.01)	(0.625, 0.107, 0.01)	(1, 0.107, 0.01)
危险性等级	危险性极大 (I)	危险性较大 (II)	危险性一般 (III)	危险性小 (IV)
危险性描述	隧道出现衬砌结构破损、涌水涌泥事故,严重影响隧道安全及行车安全,急需加固处治	隧道出现严重渗漏水,影响隧道安全及行车安全,需要加固处治	隧道出现一般渗漏水	隧道几乎无渗漏水或渗漏水很少
加固处治措施	进行隧道专项检测,掌握隧道结构安全状态,采取封缝、衬砌背后注浆及岩洞回填封堵、植筋加固、地表注浆,并配以地表封堵引排与洞内引排等多种措施	进行隧道专项检测,保证隧道结构安全,并配以封缝、衬砌背后回填封堵及注浆、植筋加固等工程措施	需重点部位加强监控检测,并配以封缝等处治措施	无需加固,日常维护检修

大气降水为岩溶隧道水害主要水源,其为我们研究岩溶隧道水害危险性评价提供了一种思路,即降水量、入渗系数、汇水面积作为降水入渗的主要参数,可直接作为水害评价的指标;单位涌水量既是评价水害的直接指标,又间接地反映了自然环境、地质与水文条件、工程条件等评价因素;同时渗透系数与单位涌水量具有复杂的正相关性,能反应隧道区域内的岩土性质及渗透性能。因此,本文选取隧道区年均降水量(x_1)、入渗系数(x_2)、汇水面积(x_3)、渗透系数(x_4)和单位涌水量(x_5)5个相关性因子作为评价指标,且 x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 均与岩溶隧道水害危

险性成正相关性。

隧道水害与降水量存在正相关性,根据公路工程岩溶环境一级区划的划分^[17],年降水量大于 800 mm 的 I 级岩溶环境区内,岩溶发育以强烈为主,局部中等发育,地表、地下岩溶均发育,岩溶隧道水害事故频发。因此,隧道区年均降水量 x_1 以 800 mm 为标准由 IV 级向 I 级反向确定等级标准;入渗系数 x_2 、汇水面积 x_3 和渗透系数 x_4 根据分布区间划分等级标准;单位涌水量 x_5 按规范^[9] 岩层富水性划分弱、中等、强和极强 4 级及其对应单位涌水量标准确定等级标准。各个因素评价等级划分标准见表 2。

表 2 隧道水害危险性评价指标分级表
Table 2 Index grades of risk assessment for tunnel flood

评价指标	评价等级			
	危险性极大 (I)	危险性较大 (II)	危险性一般 (III)	危险性小 (IV)
年均降水量 x_1/mm	>1 600	1 200 ~ 1 600	800 ~ 1 200	<800
入渗系数 x_2	>0.5	0.4 ~ 0.5	0.3 ~ 0.4	<0.3
汇水面积 x_3/km^2	>7.5	5 ~ 7.5	2.5 ~ 5	<2.5
渗透系数 $x_4/\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	> 10^{-3}	$10^{-4} \sim 10^{-3}$	$10^{-5} \sim 10^{-4}$	< 10^{-5}
单位涌水量 $x_5/\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$	>5	1 ~ 5	0.1 ~ 1	<0.1

将表 2 中的等级划分标准数值代入式(12)计算出各指标的云特征值参数,并运用正向正态云发生器,将隧道水害危险性评价的 5 个因子生成相对应

的集对云模型,如图 2 所示。图 2 中的 5 个因子与危险等级反相关,其集对云模型从左到右分别代表水害危险等级 IV~I 的云图。

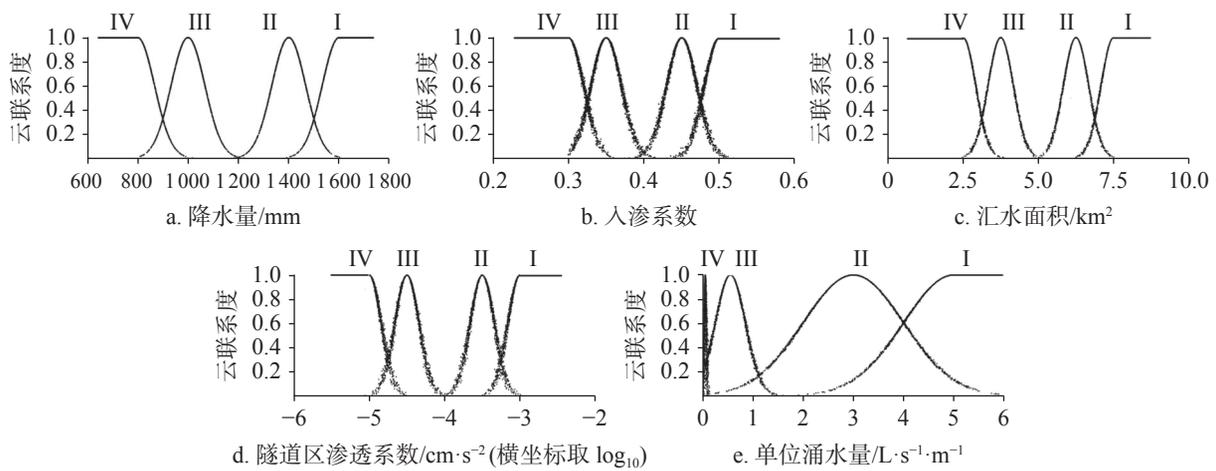


图 2 隧道水害危险性评价指标的集对云模型

Fig. 2 Model of set pair cloud for evaluation indexes of tunnel flood

2.2 模型有效性检验

为验证基于指标关联性的集对云模型的准确性和有效性,本文选用文献 [10] 所给出的 6 个典型岩溶隧道水害样本进行验证分析,具体参数见表 3。

2.2.1 指标权重计算

现以样本 3 为例具体说明指标权重的计算流程,首先通过式(2)计算隧道区降水量 $x_1=892$ mm 分别隶属等级 III 和等级 IV 的 Mass 函数值 $m_I=m_{II}=0$, $m_{III}=0.818$, $m_{IV}=0.182$, 同理可得其他指标的 Mass 函数值,从而形成基本概率分配矩阵 M_3 :

$$M_3 = \begin{matrix} & \begin{matrix} I & II & III & IV \end{matrix} \\ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.818 & 0.182 \\ 0.643 & 0.357 & 0 & 0 \\ 0 & 0.436 & 0.564 & 0 \\ 0.033 & 0.967 & 0 & 0 \\ 0.332 & 0.668 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

将基本概率分配矩阵 M_1 代入式(3)依次可求出

各指标的 Mass 函数距离 $d_{12}=0.788$, $d_{13}=0.379$, $d_{14}=0.905$, $d_{15}=0.793$, $d_{23}=0.607$, $d_{24}=0.610$, $d_{25}=0.311$, $d_{34}=0.548$, $d_{35}=0.491$, $d_{45}=0.299$, 代入式(4)、式(5)计算的平均指标距离 $\bar{D}_1=0.744$, $\bar{D}_2=0.604$, $\bar{D}_3=0.513$, $\bar{D}_4=0.658$, $\bar{D}_5=0.514$ 和指标集 X 的平均距离 $\bar{D}=0.607$, 通过比较,指标 x_2 、 x_3 、 x_5 为可信指标,指标 x_1 、 x_4 为失信指标。矩阵 M_3 根据信度分类分别代入式(7)~式(9)可求出指标体系的权重 $w_3=[0.115, 0.248, 0.244, 0.144, 0.249]$ 。同理可得出其他样本指标的权重见表 4。

2.2.2 评价结果及分析

根据正向态云发生器的算法,由式(13)计算某指标数据 x_i 隶属于某水害危险性评价等级的确定度。同样以样本 3 中隧道区降水量 x_1 数值说明指标联系度的过程。首先,通过正向云发生器得到 $x_1=892$ mm 隶属各隧道水害危险性等级的确定度 $\mu_I=0$, $\mu_{II}=0.007$, $\mu_{III}=0.483$, $\mu_{IV}=0.510$, 代入式(15)得: $\mu_{31}=0+0.007i_1+$

表 3 岩溶隧道样本及相应指标的测定值

Table 3 Measured values of sample indexes

样本编号	岩溶隧道名称	评价指标				
		年均降雨量 x_1 /mm	入渗系数 x_2	汇水面积 x_3 /km ²	渗透系数 x_4 /cm·s ⁻¹	单位涌水量 x_5 /L·s ⁻¹ ·m ⁻¹
1	岭头隧道	2 450	0.44	2.93	3×10^{-3}	4.73
2	葡萄山隧道	2 200	0.43	3.57	7×10^{-2}	4.39
3	马鹿箐隧道	892	0.51	4.89	4×10^{-4}	4.53
4	竹林坪隧道	1 345	0.42	2.98	5×10^{-4}	3.37
5	双峰隧道	956	0.32	1.57	2×10^{-6}	0.70
6	太行山隧道	624	0.25	2.95	8×10^{-7}	0.12

表 4 隧道样本各评价指标权重
Table 4 Weight coefficients of indexes of sample tunnels

样本编号	评价指标				
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
1	0.184	0.165	0.102	0.292	0.256
2	0.361	0.097	0.160	0.179	0.203
3	0.115	0.248	0.244	0.144	0.249
4	0.271	0.214	0.073	0.153	0.289
5	0.274	0.297	0.082	0.154	0.193
6	0.242	0.276	0.090	0.310	0.082

$0.483i_2+0.510j$; 其次, 同理可计算其他指标云联系度, 并代入式(16)可得样本 3 的综合云联系度: $\mu_3=$

$0.423+0.335i_1+0.170i_2+0.072j$; 最后, 对其加权平均后得出样本 3 综合期望值, 即危险值 $U=0.324 \in [0.25, 0.5]$, 危险等级为 II 级。同理可得到各隧道样本的水害危险性评价等级结果, 具体结果表 5。

由表 5 可知, 基于指标信度测度动态赋权法的隧道水害危险性集对云模型其计算结果与其他理论方法的评价结果基本吻合, 且符合实际情况, 该模型一定程度上具有可行性和有效性。同时, 为形象直观地反映隧道水害危险性评价等级, 利用标准云进行对比分析, 见图 3。图 3 绘制了样本 1、样本 3 和样本 6 对应的危险等级云图, 该图直接展示了样本 1 处于危险性大(I 级)状态、样本 3 处于危险性较大(II 级)状态、样本 6 处于危险性小(IV 级)状态。

表 5 各样本隧道的指标云联系度、综合云联系度和评价结果
Table 5 Index cloud connection degree, comprehensive connection degree and evaluation results of sample tunnels

样本编号	指标云联系度	综合云联系度	危险值 U	评价结果			是否发生过水害
				本文	文献[11]	文献[12]	
1	$\mu_{11}=1+0i_1+0i_2+0j$	$\mu_1=0.678+0.207i_1+0.058i_2+0.057j$	0.170	I	I	I	是
	$\mu_{12}=0.256+0.665i_1+0.076i_2+0.003j$						
	$\mu_{13}=0+0.005i_1+0.445i_2+0.550j$						
	$\mu_{14}=1+0i_1+0i_2+0j$						
	$\mu_{15}=0.623+0.377i_1+0i_2+0j$						
2	$\mu_{21}=0.992+0.008i_1+0i_2+0j$	$\mu_2=0.653+0.102i_1+0.161i_2+0.084j$	0.223	I	I	I	是
	$\mu_{22}=0.004+0.075i_1+0.665i_2+0.256j$						
	$\mu_{23}=0+0.027i_1+0.602i_2+0.371j$						
	$\mu_{24}=1+0i_1+0i_2+0j$						
	$\mu_{25}=0.572+0.428i_1+0i_2+0j$						
3	$\mu_{31}=0+0.007i_1+0.483i_2+0.510j$	$\mu_3=0.423+0.335i_1+0.170i_2+0.072j$	0.324	II	II	II	是
	$\mu_{32}=0.721+0.278i_1+0.001i_2+0j$						
	$\mu_{33}=0.045+0.389i_1+0.494i_2+0.072j$						
	$\mu_{34}=0.516+0.484i_1+0i_2+0j$						
	$\mu_{35}=0.593+0.407i_1+0i_2+0j$						
4	$\mu_{41}=0.420+0.497i_1+0.064i_2+0.019j$	$\mu_4=0.346+0.510i_1+0.096i_2+0.048j$	0.328	II	II	II	是
	$\mu_{42}=0.141+0.631i_1+0.212i_2+0.016j$						
	$\mu_{43}=0+0.006i_1+0.458i_2+0.536j$						
	$\mu_{44}=0.500+0.500i_1+0i_2+0j$						
	$\mu_{45}=0.434+0.566i_1+0i_2+0j$						
5	$\mu_{51}=0+0.021i_1+0.582i_2+0.397j$	$\mu_5=0.057+0.091i_1+0.463i_2+0.389j$	0.713	III	III	III	否
	$\mu_{52}=0+0.006i_1+0.463i_2+0.531j$						
	$\mu_{53}=0+0i_1+0.155i_2+0.845j$						
	$\mu_{54}=0.258+0.190i_1+0.203i_2+0.349j$						
	$\mu_{55}=0.091+0.277i_1+0.632i_2+0j$						
6	$\mu_{61}=0.048+0i_1+0.107i_2+0.845j$	$\mu_6=0.242+0.094i_1+0.124i_2+0.540j$	0.797	IV	IV	IV	否
	$\mu_{62}=0+0i_1+0.115i_2+0.885j$						
	$\mu_{63}=0+0.005i_1+0.450i_2+0.545j$						
	$\mu_{64}=0.731+0.269i_1+0i_2+0j$						
	$\mu_{65}=0.043+0.139i_1+0.306i_2+0.512j$						

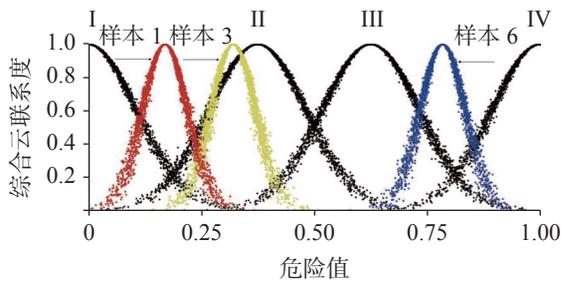


图 3 样本 1、样本 3 和样本 6 综合云与评价标准云对比图
Fig. 3 Cloud comparison chart of integrated cloud and evaluation standard for sample 1, sample 3 and sample 6

2.3 实例应用

京珠高速公路媯双坳隧道位于广东省韶关市乳源县境内，隧道全长 760 m，穿越岩溶地层，地下水、

地表水丰富，2011 年由于雨季和特大暴雨袭击，隧道内发生涌流及喷射状渗漏水，路面大量积水，严重影响隧道结构安全及行车安全，隧道水害现场图见图 4。水害事故后对渗漏水严重区段(LK1 905+280 ~ LK1 905+480)进行了隧道结构专项检测，采用地震映像法共发现 61 处岩溶发育处和岩溶裂隙发育带，发育带内岩体破碎，可能存在大溶洞、串珠状小溶洞等，是岩溶水径流通道，隧道岩溶探测结果平面展开图见图 5。

隧道结构专项检测还查明各参数 $x_1=2\ 000\ \text{mm}$, $x_2=0.48$, $x_3=5.62\ \text{km}^2$, $x_4=3.0\times 10^{-3}\ \text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, $x_5=3.65\ \text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ ，代入本文模型计算得出综合云联系度为： $\mu=0.598+0.362i_1+0.037i_2+0.003j$ ，危险值 $U=0.161\in[0,$



图 4 媯双坳隧道水害事故图
Fig. 4 Flood accident photos of Pishuangao tunnel

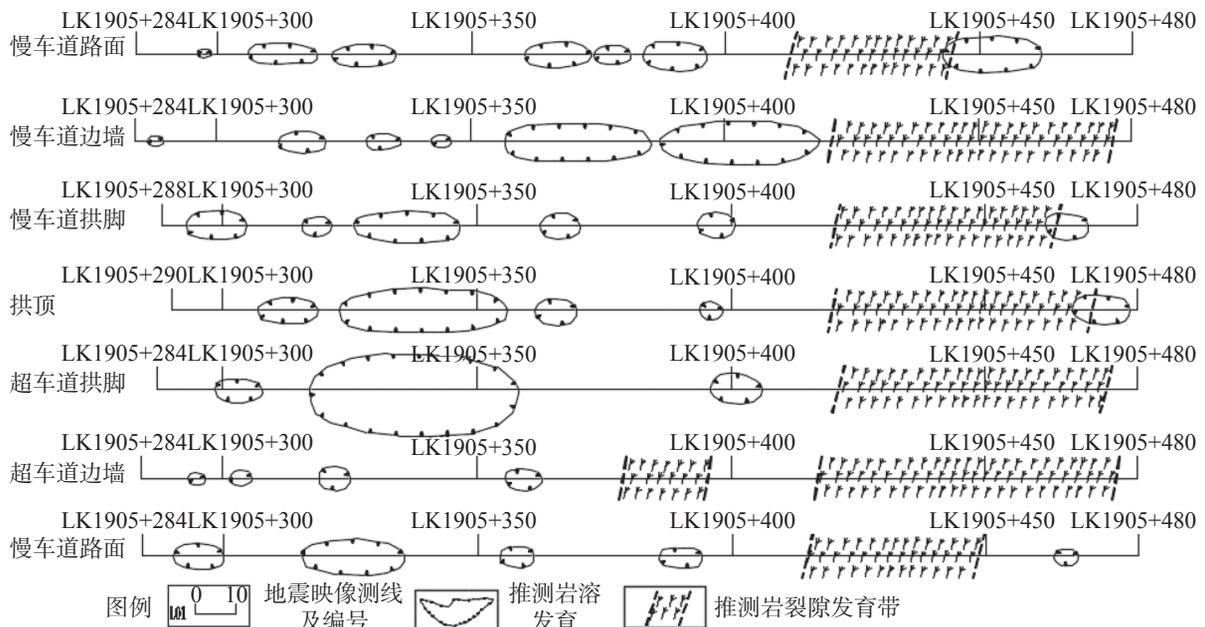


图 5 地震映像法探测结果平面展开图
Fig. 5 Plane expansion of seismic imaging results

0.25],为I等级。根据表1的危险性等级及对应的处治措施,该隧道采取了封缝、衬砌背后注浆及岩洞回填封堵、植筋加固、地表注浆,并配以地表封堵引排与洞内引排等多种措施进行加固处治,实践证明该隧道取得了良好的处治效果。

3 结 论

(1)通过融合 Joussemle 距离多证据关系系数来刻画指标之间的关联性,以此提出了以指标距离为基础的信用测度动态赋权理论,可根据各指标的信用归类分别得到各指标的准确权重,实现了不同的实例、不同的指标实测值对整个系统的动态赋权,降低了实际中由于指标实测值误差或错误导致评价结果偏差的风险,提高了评价模型的鲁棒性;

(2)隧道水害危险性评价是一个非线性复杂的不确定系统问题,评价指标间存在较大的相关性。基于大气降水为岩溶隧道水害的主要来源视角,构建了年均降水量、入渗系数、汇水面积、渗透系数和单位涌水量5项相关性指标作为集对云评价指标,以保证评价指标体系的全面和简洁;

(3)集对云模型将云理论中特征值与集对理论联系度相结合,得到了岩溶隧道水害危险性评价的各指标云联系度,并与指标信用测度动态赋权法得到的指标权重加权得到综合云联系度,并与等级评价区间期望加权平均得到危险值,同时生成对应的等级云图判定岩溶隧道水害危险性等级,进而判定岩溶隧道水害危险状态,实现了水害危险等级判定的可视化。通过6条典型岩溶隧道样本数据进行了模型有效性检验,其评价结果与其他方法的评价结果相吻合,证明了该模型的可靠性和有效性;

(4)将基于指标信用测度动态赋权法的集对云模型运用于媳双坳隧道水害危险性评价中,评价结果与实际情况完全相符,并采用了与评价等级相对应的处治措施,取得了良好的工程效果。该模型及其评价流程可为我国岩溶隧道水害的预测和防治提供参考。

参考文献

- [1] 田四明,王伟,巩江峰.中国铁路隧道发展与展望(含截至2020年底中国铁路隧道统计数据)[J].隧道建设(中英文),2021,41(2):308-325.
TIAN Siming, WANG Wei, GONG Jiangfeng. Development and prospect of railway tunnels in China (including statistics of railway tunnels in China by the end of 2020)[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(2): 308-325.
- [2] 蒋树屏.中国公路隧道数据统计[J].隧道建设(中英文),2017,37(5):643-644.
JIANG Shuping. Statistics of highway tunnels in China[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(5): 643-644.
- [3] 陈建芹,冯晓燕,魏怀,冯欢欢.中国水下隧道数据统计[J].隧道建设(中英文),2021,41(3):483-516.
CHEN Jianjin, Feng Xiaoyan, WEI Huai, FENG Huanhuan. Statistics of underwater tunnels in China[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(3): 483-516.
- [4] 潘海泽,黄涛,杨海静,唐仙.运营隧道渗漏水灾害分类和等级评定方法[J].干旱区地理,2009,32(1):145-151.
PAN Haize, HUANG Tao, YANG Haijing, TANG Xian. Classification and grading assessment method of leakage disasters in running tunnel[J]. Arid Land Geography, 2009, 32(1): 145-151.
- [5] 张彦龙,田卿燕,张建同.广东地区某公路岩溶隧道水害分析及其数值模拟研究[J].中国岩溶,2018,37(2):307-313.
ZHANG Yanlong, TIAN Qingyan, ZHANG Jiantong. Water disaster analysis and numerical simulation of a karst tunnel in a highway of Guangdong Province[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(2): 307-313.
- [6] 蒋英礼,张彦龙,王景梅.基于未确知测度-SPA的岩溶隧道水害危险性评价[J].人民长江,2021,52(5):78-85.
JIANG Yingli, ZHANG Yanlong, WANG Jingmei. Risk assessment of Karst tunnels flood based on multilevel uncertainty measurement-set pair analysis theory[J]. Yangtze River, 2021, 52(5): 78-85.
- [7] 刘敏捷,伍毅敏,高劲松.公路隧道隧底结构水害机理研究[J].地下空间与工程学报,2017,13(1):319-326.
LIU Minjie, WU Yimin, GAO Jinsong. Research on the Water Damage Mechanism of the Bottom Structure of Highway Tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(1): 319-326.
- [8] 刘浩,祝志恒,李林毅.京珠高速公路洋坳隧道水害原因分析及安全性评价[J].隧道建设(中英文),2020,40(5):747-754.
LIU Hao, ZHU Zhiheng, LI Linyi. Causes analysis of water disease in Yangpeng tunnel on Beijing-Zhuhai expressway and its safety evaluation. Tunnel Construction, 2020, 40(5): 747-754.
- [9] 中华人民共和国水利部.水工隧洞设计规范[S].北京:中国水利水电出版社,2016.
Ministry of water resources of the People's Republic of China. Design specifications for hydraulic tunnels[S]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2016.
- [10] 谭洪强,邓红卫,王杰,侯志勇,胡道礼.公路隧道水害倾向性分级的Bayes判别法及应用[J].中国安全生产科学技术,2015(6):122-127.
TAN Hongqiang, DENG Hongwei, WANG Jie, HOU Zhiyong, HU Daoli. Bayes discriminant analysis on flood tendency classification of highway tunnel and its application[J]. Journal of

- Safety Science and Technology, 2015(6): 122-127.
- [11] 游波, 施式亮, 刘何清, 李润求, 罗文柯. 基于信息熵和集对分析理论的公路隧道水害倾向性判定[J]. 公路交通科技, 2019(6): 73-78.
YOU Bo, SHI Shiliang, LIU Heqing, LI Runqiu, LUO Wenke. Determination of flood tendency of highway tunnel based on entropy and set pair analysis theory[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019(6): 73-78.
- [12] 谭洪强, 邓红卫, 马浩鹏, 袁晓, 刘冰玉. 基于未确知测度理论的公路隧道水害危险性评价[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(4): 166-172.
TAN Hongqiang, DENG Hongwei, MA Haopeng, YUAN Xiao, LIU Bingyu. Risk assessment on highway tunnel flood based on uncertainty measurement theory[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(4): 166-172.
- [13] 李德毅, 杜鹁. 不确定性人工智能(第2版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
LI Deyi, DU Yu. Uncertain Artificial Intelligence (2nd Edition) [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.
- [14] 苏永华, 何满潮, 孙晓明. 岩体模糊分类中隶属函数的等效性[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(7): 670-675.
SU Yonghua, HE Manchao, SUN Xiaoming. Equivalent characteristic of membership function type in rock mass fuzzy classification[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 29(7): 670-675.
- [15] Jusselme A L, Dominic G, Eloi B. A new distance between two bodies of evidence[J]. Information Fusion, 2001(2): 91-101.
- [16] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000.
ZHAO Keqin. Set pair analysis and its preliminary application [M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 2000.
- [17] 戴建玲, 雷明堂. 公路工程岩溶环境一、二级区划[J]. 中国岩溶, 2013, 32(2): 153-160, 174.
DAI Jianling, LEI Mingtang. First and second level karst environment zoning for highway engineering[J]. Carsologica Sinica, 2013, 32(2): 153-160, 174.

Risk assessment of tunnel flood based on the weighting of index reliability measurement and set pair cloud

JIANG Yingli^{1,2}, CUI Jie², WANG Jingmei¹, ZHANG Yanlong³

(1. Guangdong Communication Polytechnic, Guangzhou, Guangdong 510650, China; 2. Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510006, China; 3. Guangdong Hualu Transport Technology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510420, China)

Abstract Tunnel flood assessment is a nonlinear and complex system with uncertainty. Scientific and reasonable flood grading evaluation and corresponding prevention and treatment measures have become the primary problem to be solved in the construction and operation of karst tunnels. Firstly, aimed at the uncertainty, fuzziness and randomness of evaluation index parameters, the correlation between indexes by the multi-evidence correlation coefficient of Jusselme distance are analyzed in this study. The dynamic weighting theory of index reliability measurement based on Jusselme distance is also put forward. With the weighting method, the accurate weight of each index can be obtained according to the reliability classification of indexes. Thus, the dynamic weighting of the whole system by the measured values of different cases and indexes is realized, and the risk of deviation of evaluation results caused by the error or error of measured values of indexes in practice is reduced; thus, the robustness of the evaluation model will be enhanced.

Secondly, based on the theory and idea of uncertain artificial intelligence, and with the combination of the eigenvalues in cloud theory and the set pair theory, the cloud theory to optimize the set pair connection degree is used to obtain risk assessment indexes of karst tunnel flood. The index cloud connection degree and index reliability measurement are weighted by the dynamic weighting method to obtain the degree of system comprehensive cloud connection, and the risk value is obtained by the expected weighted average of the grading evaluation interval. At the same time, the corresponding grade cloud map is generated to determine the flood grade of karst tunnel. Accordingly, the flood state of karst tunnel is determined, and the visualization of flood grade determination is realized.

Thirdly, the karst tunnel flood occurs in a complex system composed of both the tunnel and the external environment; therefore, its risk assessment is affected by many factors, and the evaluation index system should be established in a comprehensive and concise way. From the perspective that atmospheric precipitation is the main source of flood in karst tunnel, five correlation indexes-annual precipitation, infiltration coefficient, catchment area,

permeability coefficient and unit water inflow-are constructed as evaluation indexes of set pair cloud of karst tunnel flood in this study. On this basis, the grading standard of each evaluation index and its corresponding cloud map of flood grade are established. In order to verify the accuracy and effectiveness of the set pair cloud model and its evaluation index system constructed based on the weighting of the index reliability measurement, the data of six typical karst tunnel samples for the model test is collected. Consistency between evaluation results and those of other methods proves the reliability and effectiveness of the model proposed in this study.

Finally, this model has been applied to the flood accident of Pishuangao karst tunnel of Beijing-Zhuhai expressway, the results of which are also consistent with the actual situation of the project. At the same time, the treatment measures corresponding to Grade I have achieved effective flood control. The result shows that the set pair cloud model constructed in this study based on the weighting of the index reliability measurement takes into account the correlation between the evaluation indexes, the uncertainty of the evaluation system and the ambiguity of the evaluation index grade. The model can improve the accuracy of flood risk assessment in karst tunnels, and the evaluation process of this model is highly maneuverable. In fact, this model can provide a new method for rapid and effective analysis of flood in karst tunnels, and can also provide reference and guidance for the prediction and prevention of flood in karst tunnels in China.

Key words index reliability measurement, tunnel flood, risk assessment, set pair cloud (SPC)

(编辑 杨杨 张玲)