基于 AHP-FCE 模型的岩溶隧道突水风险评估与控制措施研究

陈 琼[1] 廖少坤[1] 王彦杰[2] 冯文燕[3] 黄演修[4] 许锦权[1] 余东海[1]
1.广西柳梧铁路有限公司，广西 南宁 530022
2.重庆交通大学土木工程学院，重庆 400074
3.重庆交大交通安全科技研究院有限公司，重庆 400074
4.中铁二十五局集团有限公司，广东 广州 510600

[摘要]岩溶隧道突水突泥灾害具有突发性强、危害大的特点，科学的风险评估是保障施工安全的关键。本文基于层次分析法（AHP）与模糊综合评价法（FCE），构建了针对岩溶隧道突水风险的综合性评估模型。从地质构造条件、水文地质条件和气候条件三个维度建立了包含 12 项指标的评价体系，利用 AHP 法确定了各层级指标的权重，并通过一致性检验验证了权重的合理性。结合广西柳梧铁路岩溶隧道实测数据，运用 FCE 法进行了模糊综合评价。结果表明，该隧道突水风险等级为 IV 级，其中地质构造条件是最关键的因素，围岩级别和不良地质是核心指标。在此基础上，提出了针对性的风险控制措施，为岩溶隧道突水灾害的主动防控提供了科学依据。

[关键词]岩溶隧道；突水风险；层次分析法（AHP）；模糊综合评价（FCE）；风险控制
DOI：10.33142/ec.v9i10.20523 中图分类号：U45 文献标识码：A

Research on Risk Assessment and Control Measures of Karst Tunnel Water inrush Based on AHP-FCE Model

CHEN Qiong[1], LIAO Shaokun[1], WANG Yanjie[2], FENG Wenyan[3], HUANG Yanxiu[4], XU Jinquan[1], YU Donghai[1]
1. Guangxi Liuwu Railway Co., Ltd., Nanning, Guangxi, 530022, China
2. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400074, China
3. Chongqing Jiaotong University Traffic Safety Science & Technology Research Institute Co., Ltd., Chongqing, 400074, China
4. China Railway 25th Bureau Group Corporation Limited, Guangzhou, Guangdong, 510600, China

Abstract: Karst tunnel water and mud inrush disasters have the characteristics of strong suddenness and great harm, and scientific risk assessment is the key to ensuring construction safety. This article constructs a comprehensive evaluation model for the risk of water inrush in karst tunnels based on the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Fuzzy Comprehensive Evaluation (FCE). An evaluation system consisting of 12 indicators was established from three dimensions: geological structural conditions, hydrogeological conditions, and climatic conditions. The weights of each level of indicators were determined using the AHP method, and the rationality of the weights was verified through consistency testing. Based on the measured data of karst tunnels on the Liuwu Railway in Guangxi, a fuzzy comprehensive evaluation was conducted using the FCE method. The results indicate that the risk level of water inrush in the tunnel is level IV, with geological structural conditions being the most critical factor, and surrounding rock level and adverse geology being the core indicators. On this basis, targeted risk control measures were proposed, providing a scientific basis for the active prevention and control of water inrush disasters in karst tunnels.

Keywords: karst tunnel; water inrush risk; Analytic Hierarchy Process (AHP); Fuzzy Comprehensive Evaluation (FCE); risk control

引言

随着我国交通基础设施建设的持续推进，铁路、公路隧道工程日益增多，其中大量隧道需穿越地质条件复杂的岩溶地区。岩溶隧道施工过程中，突水突泥灾害是最常见且危害最大的地质灾害之一，具有突发性强、致灾速度快、治理难度大等特点，一旦发生，轻则延误工期、增加工程投资，重则造成重大人员伤亡和财产损失[1,2]。近年来，国内外多座岩溶隧道在施工期间发生了严重的突水突泥

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

事故，造成了巨大的经济损失和社会影响[3]。因此，如何科学、准确地评估岩溶隧道突水突泥风险，并在初步设计阶段即对高风险区段进行有效识别，已成为隧道工程建设领域亟需解决的关键技术难题。隧道突水突泥灾害的影响因素复杂多样，可以概括为地质因素和工程因素两大类，其中地质因素是客观存在的自然条件，主要包括地层岩性、地质构造、水文地质条件、气候条件等；工程因素则涉及隧道埋深、开挖方式、支护措施等人为可控因素。在初步设计阶段，工程因素尚未完全确定，因此本文重点考虑隧道地质因素对突水突泥灾害的影响程度，通过对地质条件的系统性分析来确定隧道的初始风险等级，从而为后续施工阶段的组织设计和风险防控提供科学依据。

目前，国内外学者已针对隧道突水风险评估开展了大量研究工作，提出了多种评估方法。定性分析方法如专家调查法、故障树分析法等，操作简便但主观性较强；定量分析方法如数值模拟法、统计回归法等，精度较高但对数据要求严格且计算复杂。相比之下，层次分析法（AHP）作为一种经典的多准则决策工具，通过构建层次化的指标体系，将多维决策问题转化为具有逻辑递阶结构的分析模型，能够有效整合专家的经验判断，精准量化各层级指标的相对重要性[4]。然而，AHP 方法在处理模糊性和不确定性问题时存在一定局限。模糊综合评价法（FCE）则恰好弥补了这一不足，它通过构建评语集与模糊关系矩阵，将难以精确量化的定性指标转化为可计算的模糊子集，从而实现对复杂系统的综合评价，为岩溶隧道突水风险评估提供了兼具系统性和适应性的分析框架[5,6]。

1 工程概况

本文选择了具有典型性代表的柳梧铁路岩溶隧道作为研究对象。根据相关勘测资料得知，项目隧址区属岩溶、剥蚀低山丘陵区，岩溶裂隙-管道水：赋存于灰岩裂隙及岩溶管道中，受大气降水补给，向坡脚及低洼处排泄。隧道处山峰陡峭，汇水面积较小，岩溶裂隙水中等发育，隧道洞身 DK11+225~DK13+300 处于岩溶水季节变动带内，隧道进出口处于岩溶水垂直渗流带内。但测区灰岩溶蚀强烈，地表溶蚀洼地、落水洞等岩溶形态发育，裂隙、管道发育，暴雨季节时裂隙-管道水可能形成短时涌水，对隧道施工影响较大。

2 隧道突水风险评价指标体系及评价指标量化的构建

隧道突水突泥灾害的影响因素复杂多样，可以概括为地质因素和工程因素。本文旨在进行初步设计阶段的风险评估，考虑隧道地质因素对突水突泥灾害的影响程度，确定初始风险等级，以指导隧道施工阶段的组织设计。因此从地质构造条件、水文地质条件和气候条件展开研究，建立如图 1 所示的隧道突水突泥风险评估指标体系。

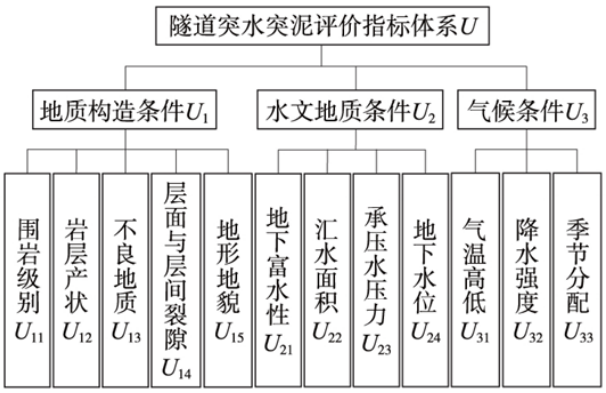


图 1 隧道突水突泥风险评估指标体系

图 1 所示的评价指标体系中，不同指标的量级和量纲差异较大，无法进行统一运算。因此，将评价指标向［0，10］进行量化，划分为 4 个等级，评价指标的具体量化标准如表 1 所示。

表 1 量化标准

量化分值	0-3	3-5	5-7	7-10 平均值
围岩等级	I、II	III	IV	V、VI
岩层产状（倾角/°）	0°~10°	10°~25°	25°~45°	>45°
不良地质	无	小型	中型	大型
层面与层间间隙	完整	不发育	较发育	完全发育
地形地貌	无	小型	中型	大型
地下富水性	不含水	微含水	较含水	富含水
汇水面积/km2	＜5	5.0～7.5	7.5～10.0	>10.0
承压水压力/Mpa	<0.5	0.5～1.0	1.0～1.5	>1.5
地下水位（水位高差/m）	<0	0～30	30～60	>60
气温高低/℃	＜5	5～10	10～20	>20
降水强度/mm	<400	400～800	800～1200	>1200
季节分布	分布均匀	较均匀	夏季集中	夏季非常集中

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

3 基于 AHP 的指标权重确定

通过发布问卷调查的方式，并邀请 10 位相关专家，根据自己的经验判断分析，采用 1-9 评价尺度方法确定准则层（U1-U3）及指标层（U11-U33）进行两两重要性比较，构造各层次指标的判断矩阵。

3.1 准则层判断矩阵

构造隧道突水风险安全评估的判断矩阵，并对矩阵进行归一化处理然后计算权重，并进行一致性检验，计算结果如表 2 所示。

表 2 隧道突水安全评估研究指标权重

U	U1	U2	U3	权重
U1	1	3	5	0.637
U2	1/3	1	3	0.258
U3	1/5	1/3	1	0.105

将隧道突水安全研究指标的矩阵完成一致性检验。根据相应的计算从而得出此矩阵的最大特征值$\lambda_{max}=3.038$，其中 AW 为判断矩阵与权重的乘积，以及其一致性指标$CI=0.019$，$CR=0.033<0.10$，CR 数值结果小于 0.1，一致性检验合理通过，得出的权重结果比较可靠，可以判定矩阵的结构是合理的。

由数据可分析出，最关键的指标是地质构造条件，占比达到 63.7%。

3.2 指标层判断矩阵

对指标层进行上述操作，得到指标层的权重如表 4、5、6 所示，并进行一致性检验。

（1）地质构造条件（U1）

表 3 地质构造条件指标权重

U	U11	U12	U13	U14	U15	权重
U11	1	3	2	5	7	0.417
U12	1/3	1	1/2	3	5	0.195
U13	1/2	2	1	4	6	0.262
U14	1/5	1/3	1/4	1	3	0.083
U15	1/7	1/5	1/6	1/3	1	0.043

将地质构造条件指标的矩阵完成一致性检验。根据相应的计算从而得出此矩阵的最大特征值$\lambda_{max}=5.21$，以及其一致性指标$CI=0.0525$，$CR=0.047<0.10$，CR 数值结果小于 0.1，一致性检验合理通过，得出的权重结果比较可靠，可以判定矩阵的结构是合理的。

数据可分析出，地质构造条件（U1）指标体系中，最重要的是围岩级别，其占比达到了 41.7%。

（2）水文地质条件（U2）

表 4 水文地质条件指标权重

U	U21	U22	U23	U24	权重
U21	1	4	3	6	0.499
U22	1/4	1	1/2	3	0.171
U23	1/3	2	1	4	0.269
U24	1/6	1/3	1/4	1	0.061

将水文地质条件指标的矩阵完成一致性检验。根据相应的计算从而得出此矩阵的最大特征值$\lambda_{max}=4.14$，以及其一致性指标$CI=0.47$，$CR=0.052<0.10$，CR 数值结果小于 0.1，一致性检验合理通过，得出的权重结果比较可靠，可以判定矩阵的结构是合理的。

数据可分析出，水文地质条件（U2）指标体系中，最重要的是地下富水性，其占比达到了 49.9%。

（3）气候条件（U3）

表 5 气候条件指标权重

U	U31	U32	U33	权重
U31	1	1/3	1/5	0.111
U32	3	1	1/2	0.308
U33	5	2	1	0.581

将气候条件指标的矩阵完成一致性检验。根据相应的计算从而得出此矩阵的最大特征值$\lambda_{max}=3.05$，以及其一致性指标$CI=0.025$，$CR=0.043<0.10$，CR 数值结果小于 0.1，一致性检验合理通过，得出的权重结果比较可靠，可以判定矩阵的结构是合理的。

从数据可分析出，气候条件（U3）指标体系中，最重要的是降水强度，其占比达到了 58.1%。

3.3 指标层综合权重表

将各子指标权重乘以其所属准则层权重，得到全局权重，如表 6 所示。

表 6 指标层综合权重表

准则层权重	子指标	子指标权重	全局权重
U1: 0.637	U11	0.417	0.266
	U12	0.195	0.124
	U13	0.262	0.167
	U14	0.083	0.053
	U15	0.043	0.027
U2: 0.258	U21	0.499	0.129
	U22	0.171	0.044
	U23	0.269	0.069
	U24	0.061	0.016
U3:0.105	U31	0.111	0.012
	U32	0.308	0.032
	U33	0.581	0.061

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

U11（围岩级别）是影响突水风险的最关键指标（全局权重 26.6%）。U32（降水强度）对气候条件的贡献最大（全局权重 3.2%）。所有子指标判断矩阵的 CR<0.1，模型逻辑合理。高风险隧道需重点监控围岩级别（U11）、不良地质（U13）、降水强度（U32）。对低权重指标（如 U15 地形地貌）可适当简化监测。

4 模糊综合评价（FCE）实施

4.1 模糊关系矩阵构建

根据隧道突水风险评估指标体系，结合模糊数学原理，对各指标层子指标构建的模糊关系矩阵（隶属度矩阵）。通过实测数据或专家评分，将评语集进行划分：I级（低风险）：[0,2.5]；II级（较低风险）：[2.5,5]；III级（中等风险）：[5,7.5]；IV级（高风险）：[7.5,10]。采用梯形隶属度函数，根据量化评分与评语区间的距离计算隶属度。隧道实测数据如表 7 所示。

表 7 广西柳梧铁路某隧道实测数据表

准则层权重	子指标	子指标权重	全局权重
U11	围岩级别Ⅴ级	8.2	[0,0,0.28,0.72]
U12	岩层倾角 30°	6.0	[0,0,1.0,0]
U13	存在中型溶洞	7.0	[0,0,0.67,0.33]
U14	裂隙较发育	5.5	[0,0,0.67,0.33]
U15	大型溶蚀洼地	9.0	[0,0,0,1.0]
U21	较含水（水流量 2L/s）	6.5	[0,0,0.8,0.2]
U22	汇水面积 8km²	7.5	[0,0,1.0,0]
U23	承压水压力 1.2MPa	6.8	[0,0,0.93,0.07]
U24	水位高差 45m	6.0	[0,0,1.0,0]
U31	年平均气温 18℃	7.0	[0,0,0.67,0.33]
U32	年降雨量 1100mm	9.0	[0,0,0,1.0]
U33	降水集中在 7-9 月	8.5	[0,0, 1.0,0.87]

则地质构造条件、水文地质条件和气候条件的模糊关系矩阵 R 分别为：

$$R_1=\begin{bmatrix}0&0&0.28&0.72\\0&0&1.0&0\\0&0&0.67&0.33\\0&0&0.67&0.33\\0&0&0&1.0\end{bmatrix},R_2=\begin{bmatrix}0&0&0.8&0.2\\0&0&1.0&0\\0&0&0.93&0.07\\0&0&1.0&0\end{bmatrix},R_3$$

$$=\begin{bmatrix}0&0&0.67&0.33\\0&0&0&1.0\\0&0&1.0&0.87\end{bmatrix}$$

4.2 合成模糊综合评价结果向量

通过$B_i=W_i\times R_i$，将各准则层的权重向量 W 与模糊关系矩阵 R 合成，得到各指标因素子集模糊综合评价，然后形成总目标评价矩阵 C。本文以地质构造条件 U1 一级指标为例，说明计算过程。运用层次分析法所计算出的相应权重，得隧道突水安全符合性检验 U1 评价指标为：

$$B_i=W_i\times R_i=[0.266\quad 0.124\quad 0.167\quad 0.053\quad 0.027]$$

$$\times\begin{bmatrix}0&0&0.28&0.72\\0&0&1.0&0\\0&0&0.67&0.33\\0&0&0.67&0.33\\0&0&0&1.0\end{bmatrix}$$

$$=[0\quad 0\quad 0.42\quad 0.58]$$

同理可得到水文地质条件 U2、气候条件 U3 的指标评价分别是：

$$B_i=W_i\times R_i=[0\quad 0\quad 0.85\quad 0.15]$$

$$B_i=W_i\times R_i=[0\quad 0\quad 0.09\quad 0.91]$$

4.3 全局模糊综合评价

结合准则层权重$W=[0.637\quad 0.258\quad 0.105]$，进行最终合成：

$$B=W\times[B_1\quad B_2\quad B_3]$$

$$=[0.637\quad 0.258\quad 0.105]$$

$$\times\begin{bmatrix}0&0&0.42&0.58\\0&0&0.85&0.15\\0&0&0.09&0.91\end{bmatrix}$$

$$=[0\quad 0\quad 0.50\quad 0.51]$$

最大隶属度 0.51 对应Ⅳ级，这与该隧道围岩差、存在不良地质、降水集中等实际情况相符。

5 风险控制措施

针对高风险等级（IV 级）的岩溶隧道，提出以下风险控制措施：

（1）注浆材料优选与配合比设计

根据风险评估结果，高风险隧道应优先采用快硬型水下不分散砂浆进行预注浆加固。基于论文第三点和第四点的研究结论，推荐配合比为：快硬剂掺量 10%、粉煤灰掺量 5%、早强剂掺量 15%。该配合比下砂浆的流动度为 217mm，浊度 135NTU，初凝时间 88min，3d 抗压强度可达 24.2MPa，水陆强度比 93.0%，能够兼顾抗分散性、流动性和早期强度，适用于高流速动水环境下的快速封堵。

（2）分级注浆策略

高风险区段（IV 级）：采用全断面帷幕注浆，注浆材料选用上述快硬型水下不分散砂浆，注浆压力控制在 1.0～1.5MPa，注浆孔间距 0.5～1.0m，形成厚度不小于 3m 的止水帷幕。

中等风险区段（III 级）：采用局部注浆加固，可适当降低快硬剂掺量至 5%，提高粉煤灰掺量至 10%，以延长凝结时间（初凝约 98min），便于大面积施工。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

低风险区段（I～II 级）：采用常规水泥基注浆材料，辅以必要的排水措施。

（3）超前地质预报与动态监测

综合运用地质雷达、瞬变电磁法和超前钻孔，重点查明围岩级别、不良地质体和地下水富集区的位置与规模。施工过程中实时监测掌子面前方水位、水压变化，当监测数据触发预警阈值时，及时启动注浆预案。

（4）施工工艺优化

采用导管法进行水下浇筑，严格控制导管埋深，避免浆液被水流冲散。根据现场水温、流速动态调整快硬剂和早强剂掺量，确保凝结时间与施工节奏匹配。注浆结束后及时进行质量检测，包括取芯检查和压水试验，确保封堵体密实度与强度达标。

6 结论

本文构建的基于 AHP-FCE 的岩溶隧道突水风险评估模型，将定性分析与定量计算相结合，能够系统地识别风险因素并科学地评估风险等级，所有判断矩阵的一致性比率 CR 均小于 0.1，模型逻辑合理、结果可靠。分析表明，地质构造条件是决定突水风险的首要因素，其中围岩级别和不良地质是最关键的指标，地下富水性和降水强度也是不容忽视的重要因素。针对高风险隧道，建议采用快硬剂掺量 10%、粉煤灰掺量 5%、早强剂掺量 15%的水下不分散砂浆进行全断面帷幕注浆，并结合超前地质预报和动态监测，实现突水灾害的主动防控，该策略可为类似岩溶隧道工程的风险管控提供参考。

[参考文献]

[1]吴镇,葛宇.岩溶隧道突涌水灾害的渗流路径智能识别技术[J].四川建材,2026,52(8):109-111.

[2]谷婷,李强,高成博,等.高原山地复杂地质条件下某拟建岩溶隧道涌水风险分析[J].现代隧道技术,2026,63(2):91-101.

[3]赵龙,王江,孔祥欣宇.岩溶隧道涌突水灾害防护分析——以西南某隧道为例[J].农业灾害研究,2026,16(1):55-57.

[4]吕桂军.基于层次分析法（AHP）的岩溶隧道突水风险评估研究[J].中国水运,2024(7):145-147.

[5]何文,刘冬,罗睿,等.基于 AHP—模糊综合评判的岩溶隧道施工风险性评价[J].湖南工业大学学报,2022,36(6):22-28.

[6]陈晓广.AHP 及模糊综合评判在隧道岩溶灾害危险度评价中的应用[J].地质灾害与环境保护,2015,26(1):81-86.

作者简介：陈琼（1992—），男，汉族，甘肃会宁人，工程师，研究方向为铁路四电专业（强电）。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.