

基于AHP的岩溶隧道涌水专家评判系统在德江隧道建设中的应用

马白虎^{1*}, 方永桥², 雷宗勇¹, 靳俊奇², 杜毓超^{3#}

¹贵州省公路开发有限责任公司, 贵州 贵阳

²贵州路桥集团有限公司, 贵州 贵阳

³山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南

收稿日期: 2022年11月30日; 录用日期: 2023年1月4日; 发布日期: 2023年1月12日

摘要

基于AHP的岩溶隧道涌水专家评判系统, 是研究隧道岩溶涌水风险最直接有效的方法, 尤其是应用在南方岩溶地区的越岭隧道, 可相对直观地了解地下水系统与隧道洞身的空间位置关系, 掌握隧道与地下岩溶管道间的水力联系程度, 从而判断隧道涌水的风险。本文利用“基于AHP的岩溶隧道涌水专家评判系统”技术, 结合以往案例将隧道岩溶涌水风险等级划分为: $S_{karst} \leq 0.25$ 为低风险区段; $0.25 < S_{karst} < 0.50$ 为中等风险区段; $S_{karst} \geq 0.50$ 为高风险区段。并对德江隧道岩溶涌水的风险进行评估, 并结合实际工程开挖情况进行对比分析, 其结果为: ZK6 + 760~ZK7 + 200段、ZK9 + 100~ZK9 + 650段、ZK10 + 500~ZK12 + 170段和ZK8 + 150~ZK9 + 100段为低风险区段; ZK7 + 200~ZK8 + 150段为中等风险区段; ZK9 + 650~ZK10 + 500段为高风险区段。

关键词

AHP, 德江隧道, 岩溶涌水, 评判系统

Application of AHP-Based Expert Evaluation System of Karst Tunnel Water Inflow in Dejiang Tunnel

Baihu Ma^{1*}, Yongqiao Fang², Zongyong Lei¹, Junqi Jin², Yuchao Du^{3#}

¹Guizhou Highway Development Co., Ltd, Guiyang Guizhou

²Guizhou Road & Bridge Group Co., Ltd, Guiyang Guizhou

³Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan Shandong

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 马白虎, 方永桥, 雷宗勇, 靳俊奇, 杜毓超. 基于 AHP 的岩溶隧道涌水专家评判系统在德江隧道建设中的应用[J]. 地球科学前沿, 2023, 13(1): 1-9. DOI: 10.12677/ag.2023.131001

Abstract

The AHP-based expert evaluation system of karst tunnel water inflow is the most direct and effective method to study the risk of tunnel karst water inflow, especially when it is applied to mountain-crossing tunnels in the karst area of southern China. It can intuitively illustrate the spatial relationship between the groundwater system and the tunnel body and help grasp the hydraulic connection between the tunnel and the underground karst pipelines, thus, determining the risk of tunnel water inflow. In this paper, we used the technology of “AHP-based expert evaluation system for karst tunnel water inflow” to grade the risk of karst tunnel water inflow into 3 levels, *i.e.*, low-risk with $S_{\text{karst}} \leq 0.25$, medium-risk with $0.25 < S_{\text{karst}} < 0.50$, and high-risk with $S_{\text{karst}} \geq 0.50$. We further assessed the risk of karst water inflow in Dejiang Tunnel and compared with the actual excavation. The results are drawn as follows: sections of ZK6 + 760~ZK7 + 200, ZK9 + 100~ZK9 + 650, ZK10 + 500~ZK12 + 170 and ZK8 + 150~ZK9 + 100 have a low risk of water inflow; while sections of ZK7 + 200~ZK8 + 150 and ZK9 + 650~ZK10 + 500 are medium-risk and high-risk sections, respectively.

Keywords

AHP, Dejiang Tunnel, Karst Water Inflow, Evaluation System

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

贵州省地处我国西南岩溶集中连片典型发育区,洼地、落水洞、地下河广泛分布[1][2],对隧道建设提出了很高的挑战,岩溶隧道突涌水事故屡有发生。因此,查明隧道岩溶地区水文地质条件,分析岩溶发育规律以及岩溶地下水系统特征[3][4][5][6],对隧道岩溶涌水的预防、预测,具有重要意义。

隧道岩溶涌水的预测是非常复杂的问题,目前在预测工作方面经常出现错误,其预测精度也远远不够。影响隧道岩溶涌水的因子很多,根据韩行瑞教授[7][8]提出的“岩溶隧道涌水专家评判系统”,概括起来可分为:区域岩溶层段、岩溶层段中的岩溶水系统及类型、隧道洞身所处岩溶水动力分带、隧道洞身岩溶及岩溶结构面发育强度及空间位置等五类。

层次分析法[9][10][11]是美国运筹学家 A. L. Saaty 教授于二十世纪 80 年代提出的一种实用的多方案或多目标的决策方法。自 1982 年被介绍到我国以来,以其定性与定量相结合地处理各种决策因素的特点,以及其系统灵活简洁的优点,迅速地在我国社会经济各个领域内,如能源系统分析、城市规划、经济管理、科研评价等,得到了广泛的重视和应用。近年来层次分析法也被广泛应用在工程风险评价领域,如刘政等[12],将层次分析法应用于基坑风险评价中;崔恩泽等[13],将层次分析法在工程招投标中;李翔、周树仁等[14],将层次分析法应用在医学工程领域;张杰等[15],将层次分析法应用在大跨度桥梁施工工期风险分析中。杜毓超、韩行瑞等[16]采用层次分析法(AHP)技术将“岩溶隧道涌水专家评判系统”有风险性的决策思维过程数字化,通过一系列数学方法对多层次、多方案系统做出综合评价,从而为方案的决策提供依据,不论是岩溶隧道涌水风险性评价,还是隧道岩溶涌水预测,都具有重要意义。

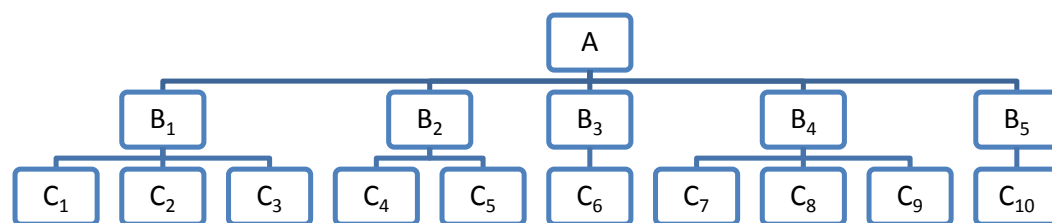
德江隧道位于贵州省德江至务川段，为德务高速段内一特长隧道，隧道全长 5500.00 m，最大埋深 557.11 m。隧道区内岩溶水文地质条件复杂、岩溶强烈发育，特别是隧道出口段，处于富水向斜构造区，发育闹水岩地下河，为典型的地下河及管道型岩溶水系统。该地下河系统与隧道洞身立交，发生岩溶涌水的风险极高，严重影响隧道施工。

基于 AHP 的岩溶隧道涌水专家评判系统，是研究隧道岩溶涌水风险最直接有效的方法，尤其是应用在南方岩溶地区的越岭隧道，可相对直观地了解地下水系统与隧道洞身的空间位置关系，掌握隧道与地下岩溶管道间的水力联系程度，从而判断隧道涌水的风险。因此，本文利用“基于 AHP 的岩溶隧道涌水专家评判系统”技术，对德江隧道岩溶涌水的风险进行评估，并结合实际工程开挖情况进行对比分析，更直观地分析该评判系统影响因子的合理性及系统适用性，以便进一步推广应用。

2. 预测模型的构建及应用

2.1. 影响因子的选取

“岩溶隧道涌水专家评判系统”的基本理念是以岩溶发育基本理论、岩溶水文地质及岩溶水系统理论、地下水动力学理论、地质结构体及结构面理论等，作为研究和判断的基础条件，结合各种勘测资料建立岩溶水文地质概念模型，其影响因子，归纳起来为五类十项，详见岩溶涌水影响因子体系框图[7] [8] [16] (图 1)。具体如下：



A: 隧道岩溶涌水风险性; B₁ 区域岩溶层段; B₂ 岩溶水系统类型; B₃ 垂向岩溶水动力分带; B₄ 垂向岩溶水动力分带; B₅ 岩溶结构面发育; C₁: 区域强岩溶地层; C₂: 区域中等岩溶地层; C₃: 弱岩溶地层及层间岩溶; C₄: 地下河系统或泉域补给面积(km²); C₅: 岩溶管道与隧道的距离(m); C₆: 枯水期水头(m); C₇: 位于排泄带; C₈: 位于补给径流带; C₉: 位于补给区; C₁₀: 可能揭露溶洞直径或溶隙宽度(m)。

Figure 1. Framework for impacting factors system of karst gushing [16]

图 1. 岩溶涌水影响因子体系框图[16]

① 隧道洞身揭露的区域岩溶层段

西南扬子地台区和华南褶皱带的强岩溶层均具有广泛的区域分布，尽管有岩相变化但基本都具有厚度大、分布广、质地纯的特点，地下河系统多分布在这些岩层中。因此，隧道洞身是否揭露这些岩溶层，揭露宽度多少，是判断突水的首要条件。

② 岩溶层段中的岩溶水系统及类型

在岩溶隧道涌突水研究中，对岩溶发育规律及涌水水源的判断应分清是岩溶泉系统还是地下河系统，而后者才是造成重大和特大涌突水的根源。因此，隧道洞身揭露地下河系统也是形成大型至特大型岩溶涌水的必要条件之一。本文以地下河系统或泉域的补给面积为评价指标。

③ 隧道洞身所处岩溶水动力分带

隧道洞身所处岩溶水动力带的不同，发生岩溶涌水的可能性及涌水特征就有所不同，必须通过钻孔水文地质观测，确定洞身所处的水动力分带，这是决定涌水特征及涌水量评价方法的重要因素。本文以

枯水期水头高为评价指标。

④ 隧道洞身岩溶及岩溶结构面发育强度及空间位置

由于岩溶发育的不均一性，隧道发生岩溶涌水也具有机遇性，隧道洞身岩溶及岩溶结构面发育强度及空间位置主要是判定隧道岩溶涌水的可能性及涌水规模的关键要素之一。必须通过综合调查、岩溶结构面三维分析及深岩溶研究判断隧道可能揭露溶洞、溶隙的规模、位置。本文以隧道可能揭露溶洞直径或溶隙宽为评价指标。

在岩溶隧道涌水中，地下河系统是造成重大和特大涌突水的根源[7] [8]。地质构造可切穿多个岩溶含水层，在地质构造的关键部位，如褶皱核部及断裂作用区，顺断裂和裂隙延伸方向发育大的岩溶管道(溶洞)可能性非常大[17] [18]，也是涌水可能性极大部位。

2.2. 预测模型的构建

采用多项式来综合考虑各因素的影响，建立评价模型，即：

$$S_{karst} = I_1 \cdot X_1 + I_2 \cdot X_2 + \dots + I_n \cdot X_n \quad [16]$$

式中， S_{karst} 为岩溶涌水风险性分析结果， X_i 为各影响因素， I_i 为权重。

采用层次分析法(AHP)来确定各影响因素的权重。为了将比较判断定量化，通过专家咨询，引入 1~9 比率标度法[16]。

组建判断矩阵，确定各层次及各影响因子的权重根。即层次 B 对 A 的权重值及层次 C 对层次 A 的权值[16] (表 1)。

Table 1. The weigh values sequences of different layers [16]

表 1. 各层次之间的权值排序[16]

层次	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	C 层对 A 层的权值(I_i)
	0.039072697	0.144841496	0.173817741	0.043275604	0.598992461	
C ₁	0.637					0.0249
C ₂	0.2583					0.0101
C ₃	0.1047					0.0041
C ₄		0.25				0.0362
C ₅		0.75				0.1086
C ₆			1			0.1738
C ₇				0.7306		0.0316
C ₈				0.1884		0.0082
C ₉				0.081		0.0035
C ₁₀					1	0.5990

从区域地质、水文地质来看：当隧道预测段围岩为区域强岩溶地层时，模型中的“C₁”取“1”，“C₂”“C₃”取“0”；当隧道预测段围岩为区域中等岩溶地层时，模型中的“C₂”取“1”，“C₁”“C₃”取“0”；当隧道预测段围岩为弱岩溶地层及层间岩溶或非岩溶地层时，预测时模型中的“C₃”取“1”，“C₂”“C₃”取“0”。

从横向岩溶水动力分带来看：当隧道预测段位于排泄带时，模型中的“C₇”取“1”，“C₈”“C₉”取“0”；当隧道预测段位于补给径流带时，模型中的“C₈”取“1”，“C₇”“C₉”取“0”；当隧道预

测段位于补给区时, 预测时模型中的“ C_9 ”取“1”, “ C_7 ”“ C_8 ”取“0”。

其中, 地下河系统或泉域补给面积(C_4)、岩溶管道与隧道的距离(C_5)、枯季地下水位(C_6)和可能揭露溶洞直径或溶隙宽(C_{10})均为实际值。按下式进行归一化处理, 使其值介于 0~1 间, 即:

$$\bar{c} = \frac{c - c_{\min}}{c_{\max} - c_{\min}} \quad (\text{将公式中的最大最小改为下标}) [16]$$

(其中枯水期水头: $c_{\max} = 500 \text{ m}$ 、 $c_{\min} = -100 \text{ m}$; 补给面积: $c_{\max} = 50 \text{ km}^2$ 、 $c_{\min} = 0 \text{ km}^2$; 溶洞直径或溶隙宽: $c_{\max} = 5 \text{ m}$ 、 $c_{\min} = 0 \text{ m}$; 地下河或岩溶管道与隧道洞身的距离: $c_{\max} = 100 \text{ m}$ 、 $c_{\min} = -500 \text{ m}$ (由于此影响因子对目标产生负面影响, 故隧道上方取负值, 下方取正值)), 从而得出各影响因子的相对标准值。

因此, 本评价模型适用于隧道处于枯水期水头在 $-100 \sim 500 \text{ m}$ 之间; 地下河系统或泉域的补给面积 $0 \sim 50 \text{ km}^2$ 之间; 溶洞直径或溶隙宽在 $0 \sim 5 \text{ m}$ 之间; 地下河或岩溶管道与隧道洞身的距离 $-500 \sim 100 \text{ m}$ 以内。

综上所述, 预测模型[16]: $S_{\text{karst}} = I_1 \cdot X_1 + I_2 \cdot X_2 + \dots + I_n \cdot X_n$ 。即:

$$S_{\text{karst}} = 0.0249 \cdot C_1 + 0.0101 \cdot C_2 + 0.0041 \cdot C_3 + 0.0362 \cdot C_4 + 0.1086 \cdot C_5 + 0.1738 \cdot C_6 + 0.0316 \cdot C_7 + 0.0082 \cdot C_8 + 0.0035 \cdot C_9 + 0.5990 \cdot C_{10}$$

3. 预测模型在德江隧道的应用

3.1. 隧道区地质背景

可溶岩分布受地层岩性、地形地貌和构造控制[19]。德江隧道区内出露地层[20] [21]以奥陶系、志留系及二叠系分布最广, 三叠系仅涉及下统夜郎组灰岩。第四系仅洼地、谷地底部见有些分布。其中, 桐梓-红花园组(O_{1t-h})上部为中厚层灰岩夹白云质灰岩和白云岩, 中下部页岩、介壳结晶灰岩, 底部含燧石石灰岩; 栖霞-茅口组(P_{2q-m})中上部为厚层灰岩, 局部夹燧石灰岩, 下部为厚层灰岩为主, 夹瘤状泥质灰岩; 吴家坪-长兴组(P_{3w-c})中至厚层灰岩, 夹炭质页岩及煤层。其中, 隧道出口段主要穿越志留系及二叠系地层(如图 2)。

3.2. 隧道涌水风险预测

据隧道区地质构造及水文地质特征, 可将隧道分为 7 段进行涌水风险分析。其中隧道 ZK6 + 760~ZK7 + 200 段, 围岩主要为志留系龙马溪群(S_{1ln})钙质砂岩、砂质泥岩及粉砂岩、页岩等。

隧道 ZK8 + 150~ZK8 + 550 段, 围岩为奥陶系湄潭组(O_{1m})砂质页岩夹石英砂岩、泥岩夹泥灰岩及生物灰岩等。

隧道 ZK9 + 100~ZK9 + 650、ZK10 + 500~ZK12 + 1700 段, 围岩为志留系韩家店群(S_{2-3hn})泥页岩夹灰岩透镜体及薄层砂岩, 页岩、泥岩夹薄层泥灰岩及灰质结核等。

以上隧道段均处于碎屑岩中, 围岩多处于弱风化状态, 破碎地带风化较严重, 有裂隙水渗漏, 在裂隙发育带可能涌现裂隙水及滴渗水, 涌水量不大[22]。

隧道 ZK7 + 200~ZK8 + 150 段, 围岩为桐梓-红花园组(O_{1t-h})灰岩, 为区域强岩溶地层。隧道段处于池坝地下河系统径流-排泄区内, 汇水范围 4.1 km^2 , 主要为洼地汇水。从垂直分带上, 本隧道段处于浅饱水带, 枯季地下水位 5 m 左右, 隧道可能揭露地下河管道, 具备涌水条件, 涌水机率较大。

隧道 ZK8 + 550~ZK9 + 100 段, 围岩为奥陶系中上统(O_{2+3})灰岩、泥质灰岩夹砂质页岩、页岩等, 为区域中等岩溶地质。地下水储存和运移通道主要为顺层裂隙。因此, 本段隧道具备涌水条件, 但涌水机率较小。隧道处于饱水带, 可能遇到裂隙状溶洞并产生有压涌水。

隧道 ZK9 + 650~ZK10 + 500 段, 隧道横穿石朝向斜, 地层为二叠系中下统灰岩夹泥质条带灰岩, 属

于区域强岩溶发育地层。隧道区处于闹水岩地下河系统的下游补给 - 径流区，汇水范围较大为 29.1 km²，隧道洞身处于枯水期地下水位以下地下河排水口以上的饱水含水带，地下水位高出隧道洞身约 210 m，具备了岩溶涌水的必要条件，其涌水机率大，可能遇到裂隙状溶洞或岩溶管道并产生有压突水、突泥。

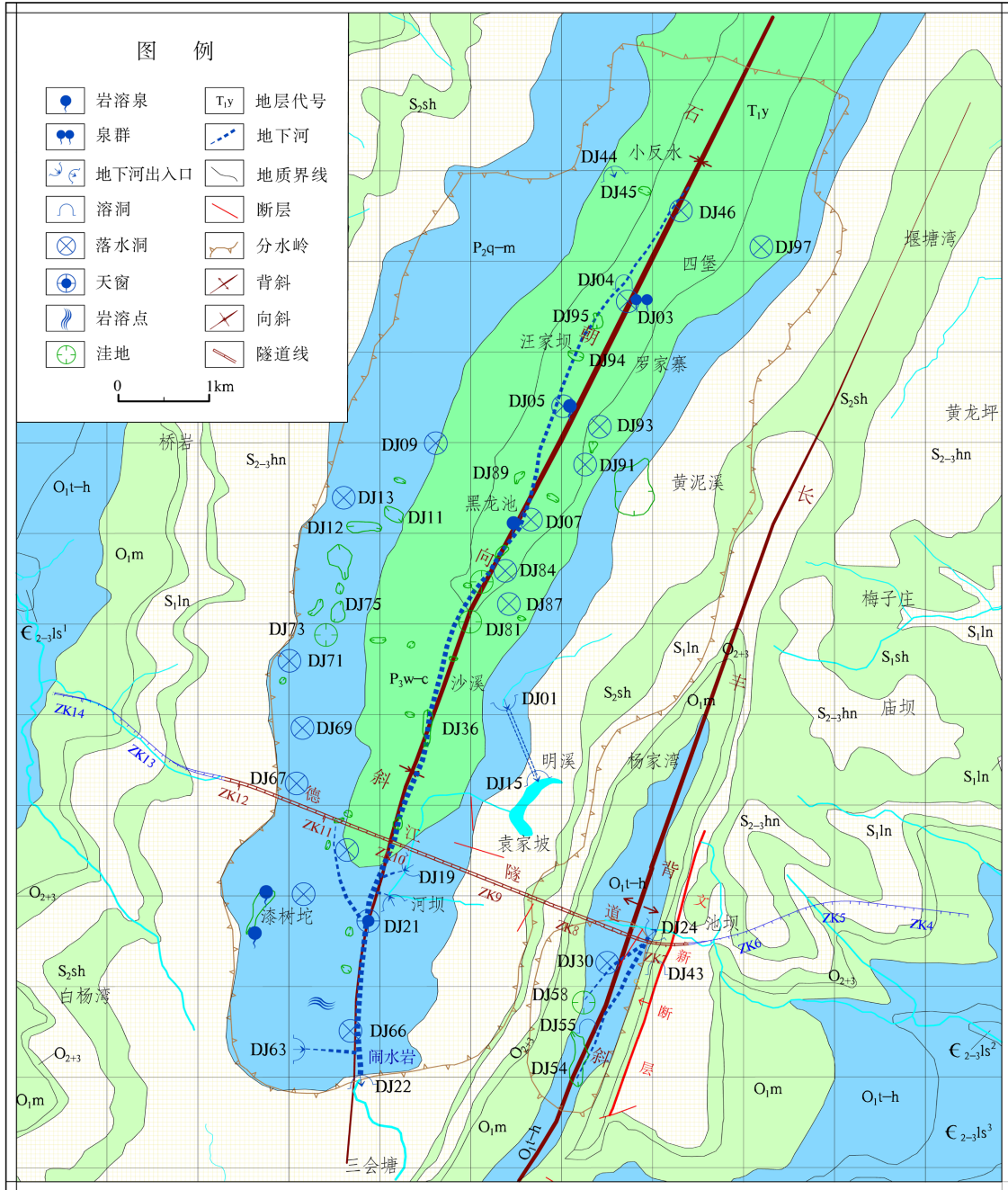


Figure 2. Hydrogeological sketch of the study area [16]
图 2. 研究区水文地质略图[16]

综上所述，将各段影响因子的相对标准值(表 2)与相应的权值(表 1)相乘叠加，即得隧道各段岩溶涌水的危险度值 S_{karst} 。

Table 2. The results for gushing under risk in each section of the Dejiang tunnel
表 2. 德江隧道各段风险性计算结果表

隧道 分段 因子 取值(X_i)	ZK6 + 760~ ZK7 + 200	ZK7 + 200~ ZK8 + 150	ZK8 + 150~ ZK8 + 550	ZK8 + 550~ ZK9 + 100	ZK9 + 100~ ZK9 + 650	ZK9 + 650~ ZK10 + 500	ZK10 + 500~ ZK12 + 170
C_1	0.0000	0.0249	0.0000	0.0000	0.0000	0.0249	0.0000
C_2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0101	0.0000	0.0000	0.0000
C_3	0.0041	0.0000	0.0041	0.0000	0.0041	0.0000	0.0041
C_4	0.0000	0.0030	0.0000	0.0000	0.0000	0.0211	0.0000
C_5	0.0905	0.0905	0.0362	0.0362	0.0272	0.0525	0.0869
C_6	0.0290	0.0304	0.1159	0.1159	0.1304	0.0898	0.0348
C_7	0.0316	0.0316	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
C_8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0082	0.0082	0.0082	0.0082
C_9	0.0000	0.0000	0.0035	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
C_{10}	0.0000	0.1198	0.0000	0.0000	0.0000	0.3594	0.0000
S_{karst}	0.16	0.30	0.16	0.17	0.17	0.56	0.13
风险性	低	中	低	低	低	高	低

3.3. 预测结果及分析

结合以往隧道岩溶涌水风险等级划分[16], $S_{karst} \leq 0.25$ 为低风险区段, 可能发生小型涌水; $0.25 < S_{karst} < 0.50$ 为中等风险区段, 可能发生中型 - 大型岩溶涌水; $S_{karst} \geq 0.50$ 为高风险区段, 可能发生大型 - 特大型岩溶涌水。

通过上述评判德江隧道可分为三个岩溶涌水风险性区段(图 3), 具体如下:

低风险区段($S_{karst} \leq 0.25$)包括处于非碳酸盐岩区的 ZK6 + 760~ZK7 + 200 段、ZK9 + 100~ZK9 + 650 段、ZK10 + 500~ZK12 + 170 段, 以及碎屑岩夹碳酸盐岩区的 ZK8 + 150~ZK9 + 100 段。隧道区裂隙发育, 可能发生小型涌水, 容易塌方, 在严格按照新奥法施工的情况下, 一般不会产生安全事故, 不影响隧道施工。

中等风险区段($0.25 < S_{karst} < 0.50$)处于浅饱水带的 ZK7 + 200~ZK8 + 150 段。隧道区有小型地下河系统, 枯水期水头小于 100 m, 岩溶发育, 有断层, 发育较小溶洞或溶隙通过洞身, 可能发生大型或特大型涌水、涌泥等地质灾害, 但不会产生大的安全事故, 会影响隧道施工。

高风险区段($S_{karst} \geq 0.50$)包括处于深饱水带的 ZK9 + 650~ZK10 + 500 段。隧道区有大型地下河系统, 枯水期水头大于 100 m, 岩溶发育, 有断层, 发育较大溶洞或溶隙通过洞身, 可能发生较为严重的重大型或特大型突水、突泥地质灾害, 可能导致重大安全事故, 严重影响隧道施工。

目前隧道已经贯通, ZK7 + 200~ZK8 + 150 段虽然未发生特大型涌水, 但雨季多处发生中、小型涌水, 严重影响施工。隧道高风险区段 ZK9 + 650~ZK10 + 500 段, ZK10 + 423 处出现 1.5 Mpa 的高压特大型涌水, 严重影响了施工的进度, 且不同程度的影响了闹水岩地下河出口流量, 虽然采取了围幕注浆, 但仍然有部分地下河水被隧道排水疏干。

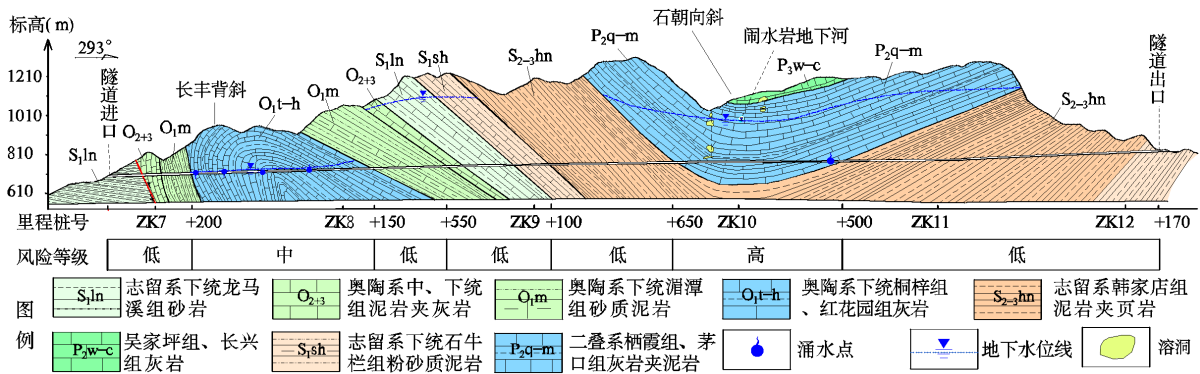


Figure 3. Distribution of the risk for tunnel gushing of Dejiang

图 3. 德江隧道涌水风险性分布图

4. 结论

基于层次分析法的岩溶涌水专家评判系统，能从定性的地质模型向定量的数学模型转化，虽然对影响因子类别的选择，风险性级别的划分具有主观性，但以诸多长期从事岩溶研究的专家打分为基础，减少了主观性带来的偏差。

更为重要的是本文结合以往多个岩溶涌水隧道实例，重新对影响子的权重进行优化调整，更大程度的避免了影响因子的主观性，并对一典型岩溶涌水隧道——德江隧道进行对比评价，将隧道岩溶涌水风险等级重新划分为： $Skarst \leq 0.25$ 为低风险区段； $0.25 < Skarst < 0.50$ 为中等风险区段； $Skarst \geq 0.50$ 为高风险区段。

从预测模型看，隧道区有大型地下河系统、隧道洞身岩溶强发育并有溶洞或宽大溶隙，是引起隧道岩溶涌水的决定性因素；从德江隧道岩溶涌水风险预测结果看，隧道处于深饱水带的 ZK9 + 650~ZK10 + 500 段是发生岩溶涌水的高风险区段，评价结果总体上能客观反映隧道的实际涌水现状。因此，本预测模型广泛适用于特长深埋隧道的岩溶涌水风险评估，可为有关施工部门提供宏观依据，以便合理而有效地进行隧道地质灾害防治。

基金项目

贵州省科技厅科技项目(2020-123-004)。

参考文献

- [1] 杨振华, 宋小庆, 屈秋楠, 等. 岩溶地区水资源-环境系统服务功能评价修正: 以贵州省为例[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(6): 1259-1268.
- [2] 王明章. 贵州岩溶石山生态地质环境研究[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [3] Kiraly, L. (2003) Karstification and Groundwater Flow. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*, 1, 1-26.
- [4] 柴春阳, 巫锡勇, 张广泽. 丽香铁路岩溶发育特征及对隧道工程的影响分析[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(3): 114-117.
- [5] 田清朝, 万军伟, 黄琨, 等. 高家坪隧道岩溶水系统识别及涌水量预测[J]. 安全与环境工程, 2016, 23(5): 13-19.
- [6] Estrelat, S.A. (1997) Modeling the Response of a Karstic Spring at Arteta Aquifer in Spain. *Ground Water*, 35, 18-24. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1997.tb00055.x>
- [7] 韩行瑞. 岩溶隧道涌水及其专家评判系统[J]. 中国岩溶, 2004, 23(3): 213-218
- [8] 韩行瑞, 徐健, 白山云, 等. 隧道岩溶涌水预报与处治——专家评判系统在沪蓉高速公路的应用[M]. 桂林: 广西师范大学出版社, 2010.

-
- [9] Saaty, T.L. (1980) The Analytic Hierarchy Process. McGraw Hill, New York. <https://doi.org/10.21236/ADA214804>
- [10] 赵焕臣, 许树柏, 和金生. 层次分析法[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [11] 许树柏. 层次分析原理[M]. 天津: 天津出版社, 1988.
- [12] 刘政. 基于灰色关联模型的改进型层次分析法及基坑风险评价[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京工业大学, 2018.
- [13] 崔恩泽. 层次分析法在工程招投标中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东建筑大学, 2015.
- [14] 李翔, 周树仁, 彭幼林, 王建莉. 层次分析法在医学工程领域中的应用研究[J]. 医疗卫生装备, 2011, 32(3): 80-82 + 84.
- [15] 张杰. 大跨度桥梁施工期风险分析方法研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 同济大学, 2007.
- [16] 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.
- [17] 徐则民, 黄润秋, 罗杏春. 特长岩溶隧道涌水预测的系统辨识方法[J]. 水文地质工程地质, 2002, 29(4): 50-54.
- [18] 王鹰, 陈强, 魏有仪, 等. 岩溶发育区深埋隧道水岩相互作用机理[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(4): 55-58.
- [19] 高奋飞, 刘宏, 邓杰文. 贵州省岩溶洼地地质成因分析[J]. 路基工程, 2012(6): 23-26.
- [20] 林永生, 杜毓超, 朱丹尼, 等. 贵州省德江隧道岩溶水文地质特征及涌水量预测[J]. 水利水电技术, 2020, 51(12): 63-70.
- [21] 靳俊奇, 杜毓超, 左杰, 王国丰. 贵州德江隧道区岩溶蓄水构造特征及涌水量预测[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(4): 497-504. <https://doi.org/10.12677/AG.2021.114045>
- [22] 袁永才, 李术才, 李利平, 等. 山岭隧道塌方风险评价理论与方法及工程应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(7): 2406-2414.