

郭宝德, 张毅, 王新文, 等. 基于决策树模型的岩溶隧道涌水可能性快速判断——以桂河高速泗顶特长隧道为例[J]. 中国岩溶, 2024, 43(5): 1156-1165.

DOI: 10.11932/karst20240512

基于决策树模型的岩溶隧道涌水可能性快速判断 ——以桂河高速泗顶特长隧道为例

郭宝德¹, 张毅², 王新文¹, 陈志高³, 董志明⁴, 蒙彦⁵

(1. 华邦建投集团股份有限公司, 甘肃兰州 730199; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川成都 610031; 3. 广西壮族自治区桂林水文工程地质勘察院有限公司, 广西桂林 541002; 4. 华杰工程咨询有限公司, 北京 100029; 5. 自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室/中国地质调查局岩溶塌陷防治技术创新中心/中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西桂林 541004)

摘要: 涌水突泥是岩溶区隧道建设面临的重大地质安全问题, 常造成严重的经济损失和人员伤亡。在实际工作中, 对隧道涌水的可能性判断是决定是否采取相应预防和处置措施的重要依据。由于隧道涌水的地质影响因素错综复杂, 这项工作以往多凭借经验进行定性分析, 误报漏报率非常高, 如何通过定量分析提高判断准确性亟待解决。作为一种探索, 文章以桂河高速泗顶特长隧道为例, 在水文地质调查分析研究的基础上, 构建了基于决策树模型的岩溶隧道涌水突泥可能性快速判断方法、指标参数和预测模型。结果表明, 泗顶特长隧道各里程段涌水概率最高为 88.1%, 发生大型涌水突泥的可能性非常大, 实际建设过程中也正是在预测概率最高段发生了涌水突泥。该方法可以为后期类似工程有针对性地开展超前预报提供借鉴。

关键词: 泗顶特长隧道; 岩溶; 决策树; 隧道超前预报; 概率; 涌水突泥

创新点: (1) 获取了隧道横纵断面岩溶率、隧道与地下水垂直分带关系等 10 个具有代表性隧道涌水可能性判别指标参数; (2) 构建了基于决策树模型的岩溶隧道涌水突泥可能性快速判断方法、指标参数和预测模型。

中图分类号: U453.61; P642.25 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2024)05-1156-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

随着我国公路、铁路等基础设施建设的持续推进, 岩溶区隧道不断向着长、大、深方向发展^[1], 其面临的隧道涌水突泥问题也愈发严重, 如何采取有效措施对隧道涌水突泥进行超前预报一直是管理部门

和工程建设单位迫切需要解决的问题, 也是相关研究领域的热点和难点问题^[2]。在决策是否开展超前预报以及在某一里程段进行超前预报方面需要预先对隧道涌水突泥的可能性进行判断, 这对于有针对性地开展相关工作, 降低建设成本, 提高预报准确率等方面至关重要^[3]。从某种程度上来说, 隧道涌水可能性

资助项目: 岩溶峰丛区特长公路隧道绿色建造关键技术研究(甘肃省建设科技项目/JK2024-39); 复杂岩溶管道流体力学过程与岩溶塌陷形成机制(国家基本科研业务重大项目); 岩溶塌陷地质灾害风险评价(DD20230441)

第一作者简介: 郭宝德(1983—), 男, 硕士, 工程师, 现从事市政工程、公路工程施工、设计及科研管理等工作。E-mail: 81708717@qq.com。

通信作者: 陈志高(1981—), 高级工程师, 长期从事水工环地质, 岩土工程, 地质灾害治理工程勘察、设计、施工等工作, E-mail: 281804974@qq.com;

蒙彦(1978—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为岩溶工程安全与地质灾害风险防控, E-mail: 54589998@qq.com。

收稿日期: 2023-08-01

判断属于超前预报的范畴,是进行超前预报的前期基础^[4]。当前,国内外对隧道涌水突泥超前预报研究主要集中在物探方法方面,很多情况是开挖过程中出现了问题才被迫进行预报,而且过度依赖物探设备,对岩溶地质条件重视不足,往往导致预报结果不理想^[5];也有些工程,为了确保安全,采取全线超前预报,结果在地质条件比较好的里程也浪费了大量人力物力,增加了工程成本,延缓了工程进度^[6]。为了降低隧道涌水风险并节约成本,在施工前先进行隧道涌水可能性判断是一种比较科学的做法。隧道涌水与隧道所处的岩溶水文地质环境密切相关^[7],包括隧道区域岩溶发育程度、岩溶地下水动态特征、隧道与岩溶发育带的交割关系^[8]等,这些因素错综复杂,相互影响,通过定性分析很难做出准确判断。决策树分析法(DTA)在地质灾害易发性、危险性评价方面有着广泛的应用^[9],它是直观运用概率分析的一种图解法,是在已知各种情况发生概率的基础上,通过构成决策树来求取净现值的期望值大于等于零的概率,判断其可能性的决策分析方法。在去除不同因素之间的相互影响方面,决策树分析法(DTA)比层次分析法(AHP)有优势^[10],并且在针对隧道大变形灾害动态风险评估与支护决策^[11]、洪水预报^[12]、岩溶塌陷易发性评价^[13]等方面,决策树分析法(DTA)都取得了非常好的效果。

本文针对岩溶区长大隧道超前预报靶区选择难

的问题,以桂河高速泗顶特长隧道为例,探索运用决策树分析方法进行岩溶隧道涌水可能性判别研究,以指导建设单位有针对性开展超前预报,降低风险和成本。

1 工程概况

桂林—河池高速公路(桂河高速)起点位于桂林市临桂区四塘镇,终点至河池市宜州区全村,全长 216 km,设计时速 100 km·h⁻¹,按双向 4 车道建设。泗顶隧道全长 5.6 km,是广西区内已建成的最长高速公路隧道(图 1),是桂河高速最为关键的控制性工程,隧道进口高程 473.42 m,出口高程 340.87 m,最大埋深约 301 m,纵坡为-2.367%的单向坡,进口坡向 125°,坡度 12°,出口坡向 296°,坡度 15°。

2 隧道涌水地质条件分析

岩溶隧道涌水的影响因素众多,包括地形地貌、地层岩性、地质构造、水文地质特征等等,但是最重要的就是隧道与岩溶水的关联程度,其他因素都可以反映在这两个方面,比如地质构造与岩溶发育程度和地下水富集、运移等紧密相关,岩溶发育越强烈、岩溶地下水越丰富、隧道与岩溶地下水的交割关系越密切,则越容易发生涌水,岩溶发育规模、岩溶地

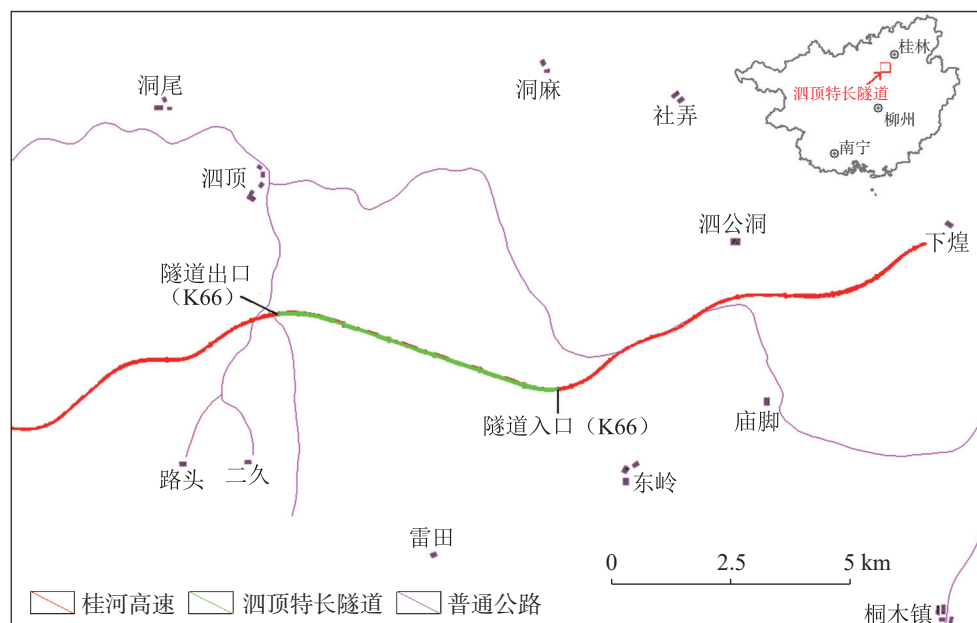


图 1 泗顶隧道交通位置图

Fig. 1 Location of Siding tunnel

下水水量及水压也同时决定了涌水量的大小。

2.1 岩溶发育程度与隧道关系

泗顶特长隧道穿越岩溶峰丛洼地,下伏基岩为泥盆系上统融县组(D_3r)浅灰色细晶厚层—中厚层灰岩和泥盆系中统东岗岭组(D_2d)深灰色隐晶中厚层白云质灰岩、白云岩。在平面上,岩溶发育具有明显的条带性,沿断裂带特别是洼地内岩溶发育强烈,可见多处漏斗和管道暗河,洼地两侧山体岩溶发育则相对较弱,但个别山体上也发育有规模较大的落水

洞,且与洼地内的管道联通。在垂向上,岩溶发育具有明显的分层性,标高 270 m 以上,岩溶发育强烈;标高 270~240 m,岩溶发育中等,并逐渐减少;至 240 m 以下,岩溶弱发育,溶洞很少发育,只有小裂隙存在。岩溶在平面和垂向上的差异,导致隧道穿越区的岩溶发育分布极不均匀,进行隧道涌水可能性判别需要识别岩溶发育的里程位置、岩溶发育深度以及岩溶发育规模。根据隧道区地质调查、物探、钻探等资料综合分析,岩溶发育的里程及相关特征见表 1。

表 1 隧道各里程岩溶发育数量及规模

Table 1 Number and scale of karst developed in each mileage of the tunnel

里程	地表岩溶数量 /处	岩性分界线条数/处	地质构造交割条数/处	钻孔遇洞率/%	纵断面岩溶规模超过 3 m 数量/处及占比/%	纵断面岩溶规模 1~3 m 数量/处及占比/%	纵断面岩溶规模小于 1 m 数量/处及占比/%	隧道轴线岩溶率/%	横断面最大岩溶率/%
k61+000~k62+000	11	1	1	24.39	2 18.18	9 2.15	81.82 0	35.45	0
k62+000~k63+000	7	0	0	19.73	0 0	5 4.33	71.43 2	24.29	28.57
k63+000~k64+000	0	0	2	0	0 0	0 0	0 0	0	0
k64+000~k65+000	3	0	1	11.53	1 33.33	2 8.14	66.67 0	26.67	0
k65+000~k66+000	7	0	0	20.31	2 28.57	3 5.12	42.86 2	32.86	28.57
k66+000~k67+000	9	1	3	26.36	3 33.33	5 12.87	55.56 1	37.78	11.11

注:本表中的岩溶规模是指纵断面揭露的溶洞直径、溶槽、缝隙宽度。
Note: The karst scale in this table refers to the diameter of the karst cave, the width of the solution trough and the gap exposed by the longitudinal section.

2.2 岩溶地下水与隧道关系

泗顶特长隧道区受大气降雨和北部碎屑岩地区补给,地下水类型为碳酸盐岩裂隙溶洞水,富水性中等—丰富,隧道整体位于地下水径流和排泄区,其中进口和出口位于地下水排泄区,中部位于地下水径流区,隧道区发育有麻弄(1)和都章(2)两条地下河,麻弄地下河总体发育方向 200 度,都章地下河总体发育方向 170 度,地下水最大流速 $43.70\text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ (图 2)。隧道区地下水自然变幅巨大,枯水季地下水水位 315~320 m,丰水季地下水水位 450~460 m,隧道设计进口高程 473.42 m,出口高程 340.87 m,隧道位于岩溶地下水季节变动带,在枯水季隧道整体位于地下水水面以上 25~159 m,在丰水季隧道大部分受到地下水水位上升影响,例如隧道斜井(K64+150)施工期间,在高程 448.9 m 位置揭露大型岩溶管道,其与外部洼地落水洞联通,丰水季地下水水位抬高,管道内有大量地下水涌出,而枯水季水量则变得很小,甚至无水(图 3)。

3 隧道涌水可能性快速判断

岩溶隧道涌水可能性快速判别属于超前预报范畴,是决定是否进行超前预报和采取应急处治措施的重要基础,以往工作常缺少快速判别这个环节,即使少数隧道偶尔进行了涌水可能性判别,但是也主要采取基于地质分析的定性方法,结果往往与实际存在差别,容易出现误判,甚至有时花费了大量的人力物力进行了涌水量预测、超前预报和隧道防水设计,实际却未发生涌水,而未进行预报和防护的路段却涌水突泥严重,因此隧道涌水可能性判断的准确性对于是否开展后期预测和防治工作至关重要。作为一种探索,本文选用决策树分析法(Decision Tree Analysis)进行隧道涌水可能性判断分析,并进行实际验证(表 2,表 3)。

3.1 建模方法

决策树分析(DTA)是直观运用概率将构成决策问题的有关因素通过特定算法用树状图形来选择决

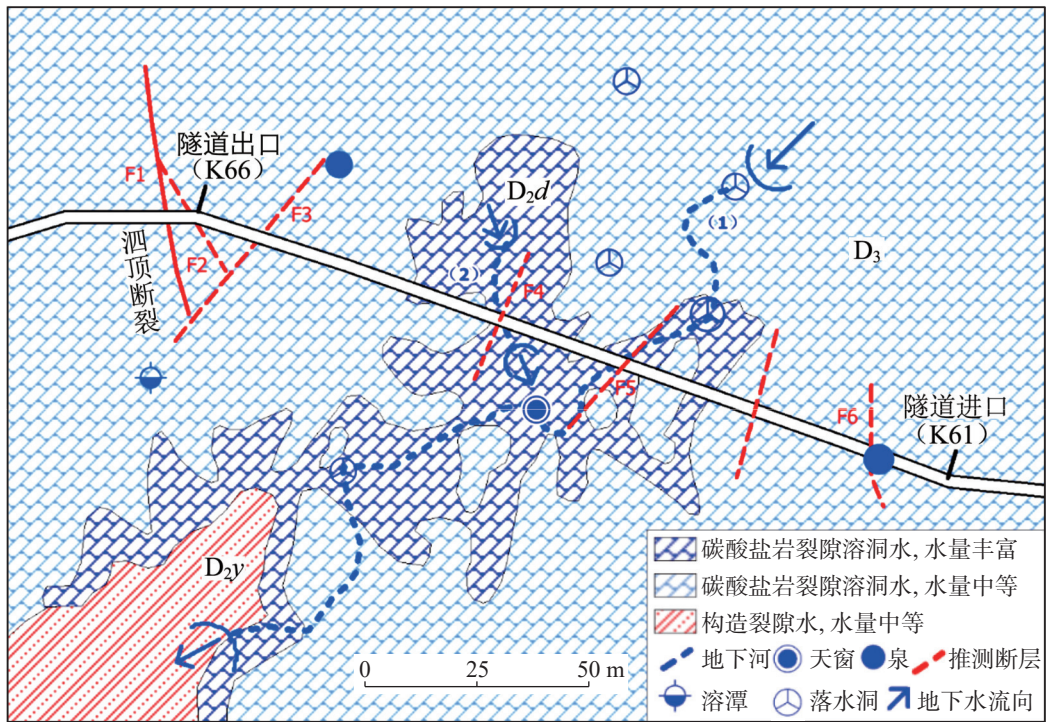


图 2 泗顶隧道岩溶水文地质简图
Fig. 2 Diagram of karst hydrogeology of Siding tunnel

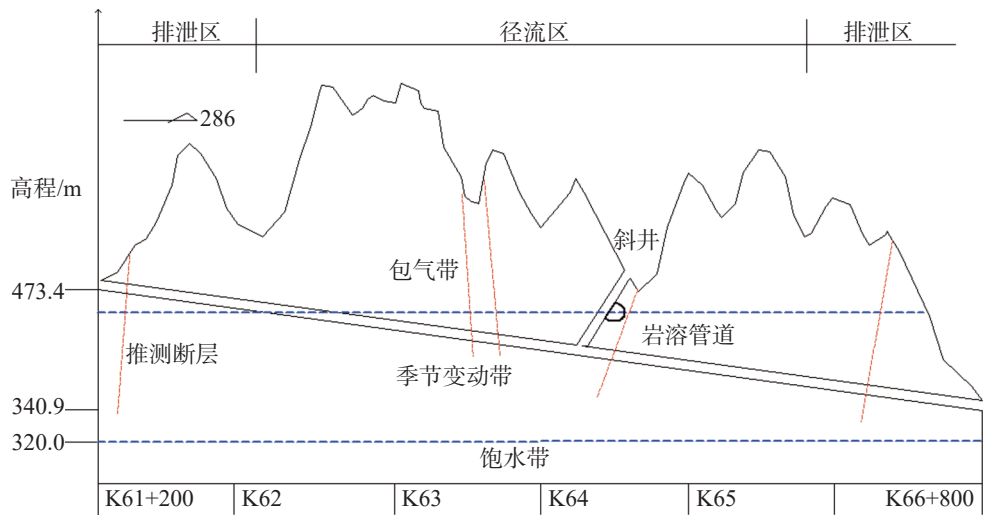


图 3 岩溶地下水水位与隧道交割关系图
Fig. 3 Relationship between tunnel and karst groundwater level

表 2 隧道各里程岩溶地下水与隧道关系

Table 2 Relationship between tunnel and karst groundwater in each mileage of the tunnel

里程	是否排泄区 (是1, 否0)	是否径流区 (是1, 否0)	枯水位与隧洞最小 距离/m(负为水面下)	是否存在强径流带 (地下河)(是1, 否0)
k61+000~k62+000	1	0	13.4	0
k62+000~k63+000	0	1	0	0
k63+000~k64+000	0	1	-11.84	0
k64+000~k65+000	0	1	-35.51	1
k65+000~k66+000	0	1	-59.18	0
k66+000~k67+000	1	0	-78.11	1

策方案的一种图解分析方法,它在已知各种情况发生概率的基础上,通过构成决策树来求取净现值的期望值大于等于零的概率,进而判断其可能性,是风险型决策最常用的方法之一。它具有层次分明、逻辑清晰的特点,能够使决策者有步骤的进行科学决策,避免单纯凭经验和想象而导致的决策上的失误,提高决策的有效性。针对不同的决策类型有不同的算法,本文根据岩溶隧道涌水地质影响因素的特点,

选用 ID(Iterative Dichotomiser)算法(公示(1))构建决策树模型。

$$G(D,A)=E(D)-\sum_{i=1}^n\frac{N_i}{N}E(D_i)$$

(1)

式中: $G(D,A)$ 为样本集合 D 下,特征属性 A 的信息增益函数; n 表示对特征属性 A ,样本集合被划分为 n 个不同部分; N_i 表示第 i 个部分的样本数量; $E(D_i)$ 表示特征属性 A 下,第 i 个部分分类集合的熵。

表 3 隧道涌水突泥快速判别决策树模型物理参数表

Table 3 Physical parameters of decision tree model for rapid assessment of water and mud intrush in the tunnel

决策	方案枝	状态枝	概率枝	概率条件	可能性	
1涌水 2不涌水	1)可能性极大(加权概率>90%) 2)可能性大(60%<加权概率≤90%) 3)可能性中等(30%≤加权概率≤60%) 4)可能性小(10%≤加权概率<30%) 5)可能性极小(加权概率<10%)	(1)岩溶发育程度	①地表岩溶点密度	>10个·km ⁻¹ 2~10个·km ⁻¹ <2个·km ⁻¹	大 中 小	
			②岩性分界线密度	密度>2条·km ⁻¹ 1<密度≤2条·km ⁻¹ 密度≤1条·km ⁻¹	大 中 小	
			③断层线密度	密度>2条·km ⁻¹ 1<密度≤2条·km ⁻¹ 密度≤1条·km ⁻¹	大 中 小	
			④钻孔遇溶率	遇洞率≥30% 10%≤遇洞率<30% 遇洞率<10%	大 中 小	
			⑤隧道纵断面溶洞直径、缝隙宽度	单段连续规模≥3 m的占比≥30%,或者单段连续规模≥3 m的占比<30%,并且1 m≤单段连续规模<3 m的占比≥60% 其他情况	大 中	
			⑥隧道轴线岩溶率	单段连续规模<1 m的占比<10%,并且其他规模不发育 线岩溶率≥60% 30%≤线岩溶率<60% 线岩溶率<30%	小 大 中 小	
			⑦隧道横断面(掌子面)最大岩溶率	面岩溶率>30% 面岩溶率10%~30% 面岩溶率<10%	大 中 小	
			⑧补径排关系	排泄区 径流区 补给区	大 中 小	
			(2)隧道与岩溶水关联度	⑨隧道与地下水位关系	隧道位于季节变动带下部 隧道位于季节变动带中部 隧道位于季节变动带上部及包气带	大 中 小
				⑩隧道穿越强径流带(地下河等)情况	密度≥1条·km ⁻¹ 0<密度<1条·km ⁻¹ 0条·km ⁻¹	大 中 小

3.2 建模参数

根据影响岩溶隧道涌水的岩溶发育程度和岩溶地下水与隧道交割关系这两个最重要影响因素,进行涌水可能性判断(决策点),断定是否涌水。方案枝包括:(1)可能性极大(加权概率 $>90\%$);(2)可能性大($60\% < \text{加权概率} \leq 90\%$);(3)可能性中等($30\% \leq \text{加权概率} \leq 60\%$);(4)可能性小($10\% \leq \text{加权概率} < 30\%$);(5)可能性极小(加权概率 $<10\%$)。状态枝包括:(1)岩溶发育程度;(2)隧道与岩溶水关联程度。概率枝包括:①地表岩溶点密度;②岩性分界线密度;③断层线密度;④钻孔遇洞率;⑤隧道纵断面岩溶规模;⑥隧道轴线岩溶率;⑦隧道横断面(掌子面)最大岩溶率;⑧补、径、排关系;⑨隧道与地下水位关系;⑩隧道与岩溶交割情况;隧道穿越强径流带(地下河等)情况。

3.3 模型构建

以 K66+000~K67+000 里程段为例,根据所选参数,通过 2 种方案的状态枝进行组合分析建立涌水可能性快速判别的决策树模型,对于隧道某一具体里程段,只要按照模型的状态条件进行统计,然后把相关参数带入决策树模型,通过计算机按照一定的算法进行概率分析,即可以实现涌水可能性的快速判断。

3.4 涌水概率计算

以 K66+000~K67+000 里程段为例,首先通过专家打分运用层次分析法确定不同概率条件的涌水权重,然后通过涌水可能性加权,最终获得状态枝概率作为决策树模型计算参数。

按照图 4 构建 K66+000~K67+000 里程段隧道涌水突泥快速判别决策树模型,按照表 4 进行计算参数赋值,通过专家打分及层次分析法确定不同概率条件的涌水权重,并进行涌水可能性加权,获得状态枝概率作为决策树模型计算参数(表 5)。

运用决策树分析软件,计算 K66+000~K67+000 里程段涌水概率为 76.61%(图 5), K61+000~K62+000 里程段涌水概率为 49.35%, K62+000~K63+000 里程段涌水概率为 49.06%, K63+000~K64+000 里程段涌水概率为 43.75%, K64+000~K65+000 里程段涌水概率为 67.27%, K65+000~K66+000 里程段涌水概率为 57.05%。

4 结果分析

根据泗顶特长隧道不同里程段的指标参数构建了决策树模型,并进行实际涌水概率计算,结果表明,6 个里程段中有 4 个涌水概率低于 60%,涌水可能性

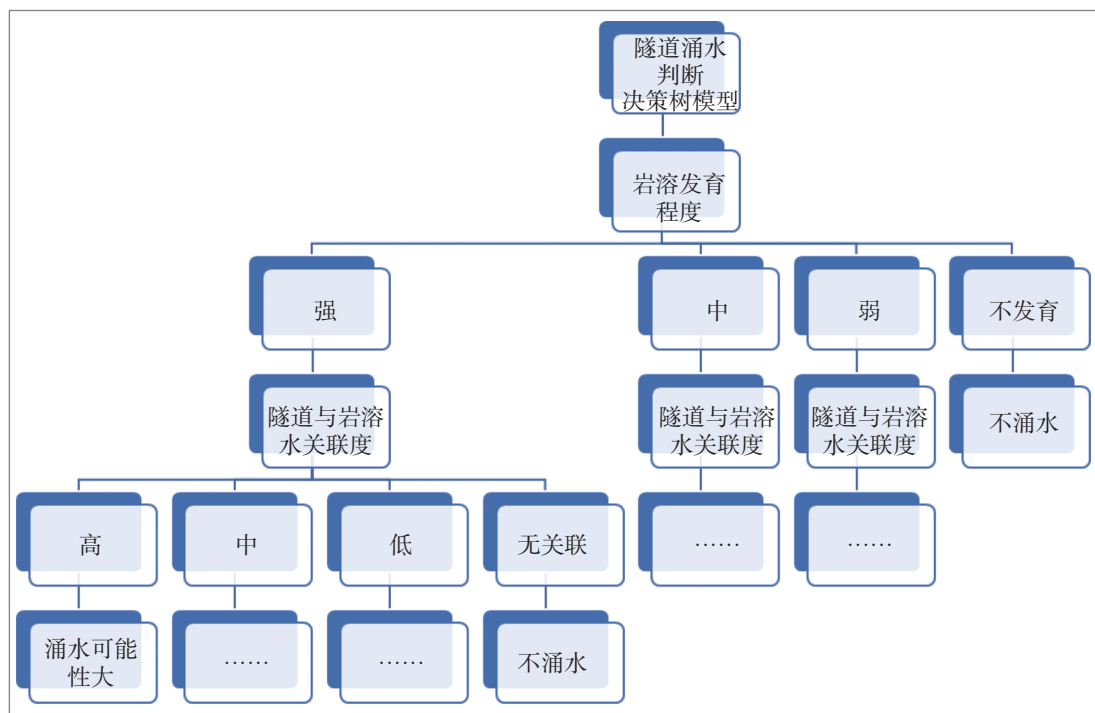


图 4 隧道涌水突泥决策树模型

Fig. 4 Decision tree model of water and mud inrush in the tunnel

表 4 隧道涌水突泥快速判别决策树模型计算参数表 (K66)

Table 4 Calculation parameters of decision tree model for rapid assessment of water and mud inrush in the tunnel (K66)

里程段	状态枝	概率条件	涌水权重/%	对应可能性	可能性加权/%	加权涌水权重/%	状态枝概率/%
k66+000~k67+000	岩溶发育程度	地表岩溶点密度	1.65	中	75.00	1.24	33.61
		岩性分界线数量	3.56	小	25	0.89	
		断层线密度	4.90	大	100	4.90	
		钻孔遇洞率	2.93	小	25	0.73	
		纵断面岩溶规模	9.82	大	100	9.82	
		轴线岩溶率	8.15	中	75.00	6.11	
		横断面岩溶率	13.22	中	75.00	9.92	
	隧道与岩溶水关联度	补径排关系	1.03	大	100	1.03	55.77
		地下水位	20.45	大	100	20.45	
		强径流带数量	34.29	大	100.00	34.29	

表 5 隧道不同里程段状态枝概率

Table 5 Probability of state branch in each mileage of the tunnel

里程段	状态枝	状态枝概率/%
k61+000~k62+000	岩溶发育程度	25.20
	隧道与岩溶水关联度	14.72
k62+000~k63+000	岩溶发育程度	24.87
	隧道与岩溶水关联度	14.46
k63+000~k64+000	岩溶发育程度	13.51
	隧道与岩溶水关联度	13.94
k64+000~k65+000	岩溶发育程度	20.71
	隧道与岩溶水关联度	50.40
k65+000~k66+000	岩溶发育程度	24.87
	隧道与岩溶水关联度	29.80
k66+000~k67+000	岩溶发育程度	35.07
	隧道与岩溶水关联度	55.77

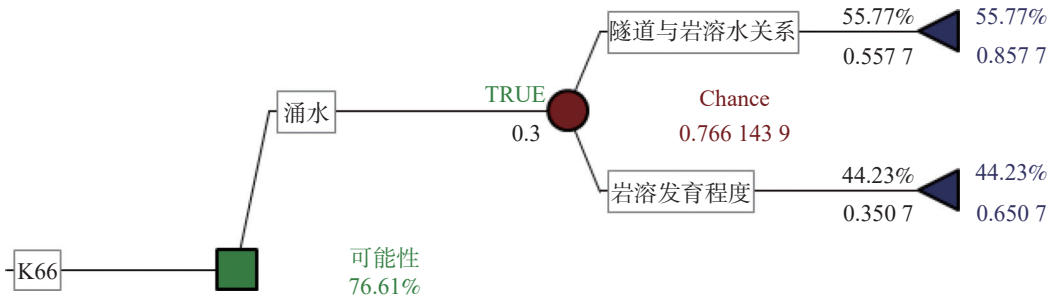


图 5 泗顶特长隧道涌水可能性决策树模型计算结果(K66)

Fig. 5 Calculation results of decision tree model for the likelihood of water inrush in Siding tunnel (K66)

为中等,实际未发生涌水突泥;有 2 个里程段(K64+000~K65+000 和 K66+000~K67+000) 高于 60%,其中 K64 段为 67.27%,K66 段为 76.61%,涌水可能性均较大,实际建设过程中,K64+150 位置在修建隧道斜井时,揭露了规模比较大的无水岩溶管道,并进行

了处理,在主洞施工过程中未再发生涌水突泥。K66+660 位置在施工时,遇到极端降雨影响发生了涌水突泥,实测单日最大涌水量为 43 804 m³·d⁻¹(图 6);在隧道其他里程段均未发生涌水,仅局部渗水。计算结果与实际结果基本吻合。



图6 泗顶特长隧道实际涌水位置(K66+660)

Fig. 6 Location of water inrush in Siding tunnel (K66+660)

5 结论与建议

本文在岩溶水文地质调查研究的基础上,结合物探、钻探资料,从与隧道涌水突泥关系最为密切的岩溶发育程度、隧道与岩溶地下水关联程度入手,获得了隧道横纵断面岩溶率、隧道与地下水垂直分带关系等10个具有代表性的决策树模型指标参数并进行了量化,为运用决策树方法进行隧道涌水突泥快速判断奠定了基础。

运用决策树模型进行隧道涌水突泥快速判断,前期的岩溶地质调查仍是最根本的,基于地质要素和隧道关系的概率枝及参数选择是决策树模型判断是否准确的关键,虽然本文根据实际案例进行了验证,结果比较吻合,但是由于岩溶地质条件复杂多变,影响隧道涌水突泥的外界因素众多,后期仍需要根据不同隧道涌水突泥案例进行方案枝、状态枝和概率枝的指标完善和参数细化。

通过计算结果分析,表明运用决策树方法进行隧道涌水可能性快速判别是可行的,本文建立的物理模型参数主要依据泗顶特长隧道并结合以往工程案例地质情况制定,可能存在一定的局限性,后期运用该模型进行其他隧道涌水可能性快速判断应根据隧道具体的地质情况进行修订。

运用决策树模型分析进行隧道涌水突泥可能性判别是一种有益的探索性研究,决策树模型能够在多个复杂方案中选择最优方案的优势,能够有效克服因人为经验判断所带来的误差,使得运用地质分析进行隧道涌水突泥判断依据更加科学,结果也更加可信。根据决策树方法的原理,其不仅可以快速判别涌水的可能性,也可以根据不同涌水规模临界值和概率枝概率推断涌水规模,在涌水可能性快速

判断的基础上进一步得出发生某一规模涌水的概率,后期仍需要继续开展研究工作。

参考文献

- [1] 蒋树屏,林志,王少飞. 2018年中国公路隧道发展[J]. 隧道建设, 2019, 39(7): 1217-1220.
JIANG Shuping, LIN Zhi, WANG Shaofei. Development of highway tunnels in China in 2018[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(7): 1217-1220.
- [2] 李术才,王康,李利平,周宗青,石少帅,柳尚. 岩溶隧道突水灾害形成机理及发展趋势[J]. 力学学报, 2017, 49(1): 22-30.
LI Shucai, WANG Kang, LI Liping, ZHOU Zongqing, SHI Shaoshuai, LIU Shang. Mechanical mechanism and development trend of water-inrush disasters in karst tunnels[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2017, 49(1): 22-30.
- [3] 蒙彦,雷明堂. 岩溶区隧道涌水研究现状及建议[J]. 中国岩溶, 2003, 22(4): 287-292.
MENG Yan, LEI Mingtang. The advance and suggestion for the study on discharge rate in karst tunnel gushing[J]. Carsologica Sinica, 2003, 22(4): 287-292.
- [4] Thomas Goetz. The decision tree[M]. Rodale, 2010 (ISBN10: 9781605297293).
- [5] 伍小刚. 隧道超前地质预报物探方法选择与解译阈值研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
WU Xiaogang. Study on method selection and interpretation threshold of advanced geological forecast in tunnel[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.
- [6] 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.
HAN Xingrui. Karst water bursting in tunnel and expert judging system[J]. Carsologica Sinica, 2004, 23(3): 213-218.
- [7] 林永生,邹胜章,朱丹尼. 岩溶隧道涌水原因揭秘[J]. 中国矿业, 2020, 29(Suppl.1): 582-583, 586.
LIN Yongsheng, ZOU Shengzhang, ZHU Danni. The causes of water bursting in karst tunnel[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(Suppl.1): 582-583, 586.
- [8] 王健华,李术才,李利平,许振浩. 隧道岩溶管道型突涌水动态演化特征及涌水量综合预测[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(10): 1880-1888.
WANG Jianhua, LI Shucai, LI Liping, XU Zhenhao. Dynamic evolution characteristics and prediction of water inflow of karst piping-type water inrush of tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(10): 1880-1888.
- [9] 杨光. 基于多源异构数据的滑坡灾害决策树预测模型研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
YANG Guang. Research on decision-tree prediction model of landslide based on multi-source heterogeneous data[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.
- [10] 洪郡伶. 整合层次分析法及决策树对设备投资决策之实证研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.

- HONG Junling. An empirical investigation of decision making on investment of equipment using analytic hierarchy process and decision tree analysis[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.
- [11] 陈语. 隧道大变形灾害动态风险评估与支护决策研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
- CHEN Yu. Dynamic risk assessment and risk-based support decision analysis on tunnel squeezing[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017.
- [12] 丁胜祥, 董增川, 张莉. 基于决策树算法的洪水预报模型[J]. 水力发电, 2011, 37(7): 8-11, 33.
- DING Shengxiang, DONG Zengchuan, ZHANG Li. Flood forecasting model based on decision tree algorithm[J]. Water Power, 2011, 37(7): 8-11, 33.
- [13] Yongli Gao, E Calvin Alexander Jr. Sinkhole hazard assessment in Minnesota using a decision tree model[J]. [Environmental Geology](#), 2008, 54(5): 945-956.

Rapid assessment of water and mud inrush likelihood in karst tunnels based on decision tree model: A case in Siding tunnel of Guihe expressway

GUO Baode¹, ZHANG Yi², WANG Xinwen¹, CHEN Zhigao³, DONG Zhiming⁴, MENG Yan⁵

(1. Huabang Construction Investment Group Co., LTD, Lanzhou, Gansu 730199, China; 2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610031, China; 3. Guilin Hydrological Engineering Geological Survey Institute Co., Ltd. of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Guilin, Guangxi 541002, China; 4. CHELBI Engineering Consultants Incorporation, Beijing 100029, China; 5. Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR/Innovation Center of Karst Collapse Prevention, CGS/Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract With the ongoing advancement of infrastructure projects, such as highways and railways, in China, karst tunnel construction is increasingly evolving towards longer, larger, and deeper dimensions. The problem of water and mud inrush in tunnels is becoming more and more severe. Effective measures for the advance prediction of water and mud inrush in tunnels have consistently been a pressing concern for management departments and engineering construction units. This issue also remains a significant challenge in related research fields. It is essential for us to assess the likelihood of tunnel water and mud inrush when determining whether to carry out advance prediction and identifying the appropriate mileage segment for conducting the prediction. This assessment is vital for targeted interventions, minimizing construction costs, and enhancing prediction accuracy. To some extent, the assessment of the likelihood of water inrush in tunnels falls under the category of advance prediction and serves as the foundational element for conducting such prediction.

The rapid assessment of the likelihood of water inrush in karst tunnels is an important basis for deciding whether to carry out advance prediction and to take measures for emergency treatment. This rapid assessment was often absent in previous work. Even though assessments for the likelihood of water inrush were conducted occasionally in several tunnels, they were primarily based on qualitative methods of geological analysis. This often resulted in discrepancies from actual conditions, leading to misjudgments. In some tunnels, significant manpower and resources were sometimes expended on predicting water inrush, advance prediction, and tunnel waterproofing design, yet no water inrush occurred. Conversely, the sections of some tunnels that were neither predicted nor adequately protected experienced severe water and mud inrush. Therefore, the accuracy of assessments regarding the likelihood of water inrush in tunnels is crucial for determining whether to undertake subsequent prediction and prevention efforts.

This study explored Siding tunnel on Guihe expressway as a case study. Utilizing karst hydrogeological surveys and research, in conjunction with geophysical exploration and drilling data, the study started with the degree of karst development and the relationship between the tunnel and karst groundwater, both of which are closely associated with water and mud inrush in the tunnel. Ten representative parameters for the decision tree model were identified and quantified, including karst rates in the transverse and longitudinal sections of the tunnel, as well as the vertical zonation relationship between the tunnel and groundwater. Based on this analysis, a rapid assessment method, along with indicator parameters and a predictive model for assessing the likelihood of water and mud inrush in the karst tunnel, was developed and practically validated. The results indicate that the highest probability of water inrush in each mileage of Siding tunnel is 88.1%, suggesting a very high probability of large-scale water and mud inrush. Notably,

during the actual construction process, the occurrence of water and mud inrush was observed in the segment with the highest predicted likelihood.

Using a decision tree model to analyze and assess the likelihood of water and mud inrush in the tunnel represents a valuable exploratory study. The decision tree model offers the advantage of selecting the optimal solution among multiple complex options, effectively mitigating errors arising from human experience-based judgments. This approach enhances the scientific rigor geological analysis related to assessments of water and mud inrush in tunnels. According to the principles of the decision tree method, this model can quickly assess both the likelihood and magnitude of water inrush based on various critical values for water inrush sizes and the probabilities associated with different branches. Furthermore, it can determine the probability of a specific scale of water inrush based on the rapid assessment of the likelihood of water inrush. In the future, it will be essential to refine the indicator parameters of scheme branches, state branches, and probability branches on different scenarios of water and mud inrush in tunnels. This refinement will provide targeted guidance for advance predictions in similar projects.

Key words Siding tunnel, karst, decision tree, tunnel advance prediction, probability, water and mud inrush

(编辑 张玲)