

DOI:

基于多源信息融合的隧道施工综合安全动态评估技术研究

彭浩¹, 韩玉¹, 梁铭^{1,*}, 解威威^{1,2}, 朱孟龙¹, 宋冠先¹, 黄能豪¹, 吴梦岚¹, 曾农健¹, 解韞泽³

(1. 广西路桥工程集团有限公司, 广西 南宁 530000; 2. 广西大学 土木与建筑工程学院, 广西 南宁 530004;

3. 中国地质大学(武汉) 工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 针对当前隧道施工安全评估体系静态割裂、安全信息多源性不足以及评估方法可靠度难以保障等现状, 提出一种基于多源信息融合的隧道施工综合安全动态评估技术及工程应用体系。整体以多维多尺度为理念, 将隧道施工周期划分形成勘察设计、超前预测与开挖监测三个逐一嵌套尺度, 以及各自尺度下地质、施工和预测三个安全信息来源维度以形成多源信息评估指标体系, 该体系可满足匹配施工进度度的勘察设计、超前预测尺度下的两项总体安全评估以及开挖监测尺度下的多种专项施工安全评估需求。同时为提高安全评估结果的合理性与可靠度, 以D-S证据理论为融合框架, 分别利用区间欧氏距离法以及平均证据法, 对其过程涉及的分配概率计算及证据冲突合成进行优化。最后以实际隧道工程为例, 阐述了该综合安全动态评估方法及体系的实施过程。结果显示评估结果与实际现场情况吻合, 且通过讨论、对比与检验进一步论证了其合理性与可靠度, 可为隧道施工安全评估与管控提供参考和实践指导。

关键词: 隧道工程; 施工安全评估; 多源信息融合; 证据理论; 多策略优化

中图分类号: U456.3

文献标识码: A

文章编号: XXX

作者简介: 彭浩(1994-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事隧道地质预报数据智能解译与安全评估控制等方面的科研工作。E-mail: gxlq3409ph@163.com。

Research on Dynamic Safety Assessment Technology for Tunnel Construction Based on Multi-source Information Fusion

PENG Hao¹, HAN Yu¹, LIANG Ming^{1,*}, XIE Wei-wei^{1,2}, ZHU Meng-long¹, SONG Guan-xian¹,

HUANG Neng-hao¹, WU Meng-lan¹, ZENG Nong-jian¹, XIE Yun-ze³

(1. Guangxi Road and Bridge Engineering Group Co., Ltd, Guangxi Nanning 530000, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China;

3. College of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: In response to the current situation of static fragmentation in tunnel construction safety assessment systems, insufficient multi-source information, and the challenge of ensuring the reliability of assessment methods, this paper proposes an integrated dynamic safety assessment technology and engineering application system for tunnel construction based on multi-source information fusion. With a multi-dimensional and multi-scale concept, the tunnel construction cycle is divided into three nested scales: survey and design, advance prediction, and excavation monitoring, as well as three source dimensions under each scale: geological information, construction information, and prediction information, to form a multi-source safety information assessment index system. This system can meet the requirements of survey and design in alignment with construction progress, two overall risk assessments under the advance

基金项目: 广西重点研发计划项目(编号: 桂科 AB22080033)

收稿日期: 2024-05-11

*通讯作者(E-mail: csuliangming@csu.edu.cn)

prediction scale, and various specialized construction safety assessments under the excavation monitoring scale. To enhance the rationality and reliability of safety assessment results, the D-S evidence theory serves as the fusion framework. The interval Euclidean distance method and average evidence method optimize the basic probability assignment calculation and conflicting evidence fusion in the multi-source information fusion process. The implementation of this comprehensive dynamic safety assessment method and system is illustrated through a real tunnel engineering project. Results show consistency between the assessment outcomes and actual on-site conditions. Further discussion, comparison, and verification demonstrate its rationality and reliability, providing valuable reference and practical guidance for tunnel construction safety assessment and control.

Key words: tunnel engineering; construction safety assessment; multi-source information fusion; D-S theory; multi-strategy optimization

0 引言

隧道作为道路运输过程中可克服地形或高程障碍、改善线形、缩短里程的工程结构物,对于交通发展起着积极的促进作用^[1]。截至 2023 年末^[2],全国公路隧道已达 27297 处,共计 3023.18 万延米,近三年均保持 10%以上的增长速度。伴随庞大的建设需求,隧道工程呈现出地质条件复杂化与环境气候恶劣化的发展趋势^[3],导致施工过程中坍塌、大变形等不良地质灾害频发,带来极大的人员财产安全风险,并严重影响工程进度和建设成本。因此,如何高效、可靠开展隧道施工安全评估是目前行业内的一大迫切需求^[4]。

隧道施工安全评估大致经历了定性、半定量及定量分析三个发展阶段^[5]。早期如 Sorrell^[6]、毛儒^[7]等国内外学者从地质条件、技术水平等方面定性地进行有益探索。近年来随着数学理论及技术手段的快速发展,隧道施工安全评估在半定量或定量分析方面发展迅速,主要体现在以下三方面:一是针对评估对象形成了总体加专项的安全评估体系^[8-9];二是以上述安全评估对象为目标,指标体系逐步丰富,多源信息融合趋势显著,如张锦^[10]等从 4 个方面选取 20 个指标完成了对川藏铁路重点桥梁隧道工程的总体安全评估,李术才^[11]等选取岩溶突涌水灾害的 7 个主要影响因素构成指标体系并建立相应的高可靠度评估模型,刘灿^[12]等选取了工程地质等 4 项一级指标,配合 12 项二级指标建立了塌方安全评估模型等;三是在评估方法方面,模糊综合评估法^[13]、灰色系统^[14]等逐渐被广泛应用,积极推进了隧道安全评估的定量化发展。

然而,上述研究成果存在一定程度问题:首先在隧道安全评估对象和评估指标方面,总体与专项评估二者通常是静态割裂的,且评估指标体系构建侧重于

数据采集的便捷性,对安全信息的多源性考虑不足,对于多源信息综合影响的机制和综合评估模型还需要进一步的研究^[4];其次目前多数方法虽具备定量分析性质,但在评估的过程中仍容易受到人为主观因素的影响,包括指标权重的确定、隶属函数的选择等^[15],这都使得评估结果的准确度与可靠度难以保证。

针对上述问题,基于现有评估思路,考虑实际隧道勘察设计、超前预报及掌子面开挖三阶段划分,结合 D-S (Dempster-Shafer) 证据理论的多源信息融合思想提出一种定量的综合安全动态评估技术及工程应用体系。其与常规方法的主要区别在于:一是借助尺度嵌套可实现匹配施工进度的总体及专项多种安全评估需求;二是多尺度评估信息的传递以及针对多源信息融合过程的多策略优化使得概率计算以及评估结果更具合理性与可靠度;三是整体评估体系具备较强灵活度,可以根据实际隧道情况进行评估指标与专项安全评估对象的选取与增减。最后结合实际隧道安全评估案例,阐述了该技术及体系的具体应用流程,并通过讨论、对比与检验对本文方法评估结果的合理性与有效性进行了充分说明与论证。

1 证据理论基本概念

D-S 证据理论是一种常用于不确定性推理的数学方法^[16-17],它提供了合理、可靠框架来处理多源信息的决策层融合与推断。目前已被应用于如人工智能、模式识别、决策分析等广泛领域,近年来也开始有学者将其引入到基坑、隧道等岩土工程领域开展相关研究^[18-19]。对比最大熵、模糊集等不确定信息推断理论,D-S 证据理论能够处理多源证据的冲突性,聚焦多个具体证据的共同支持点从而得到更加合理的评估结论^[20]。其基本原理如下:

设 $\theta = \{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ 及 $\phi = \{A_1, A_2, \dots, A_k\}$ 分别为多源信息融合问题的识别框架与证据集, 现若有函数 $m: 2^\theta \rightarrow [0, 1]$ 满足如下式 (1) 条件:

$$\begin{cases} m(\phi) = 0 \\ \sum_{F_i \subseteq \theta} m(A_j(F_i)) = 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: ϕ 为空集; $m(A_j(F_i))$ 为证据 A_j 对识别框架中子集 F_i 的支持概率。

则称 m 是识别框架 θ 的基本概率分配函数, 所计算结果称为基本分配概率 BPA (Basic probability assignment)。当从多个信息源得到证据集中每一证据体的 BPA 后, 需要将这些证据按照一定的规则进行融合。常规 D-S 融合规则如下式 (2) 所示:

$$\begin{cases} m(F) = \frac{1}{1-K} \sum_{F_i \cap \dots \cap F_n = F} m(A_k(F_n)), \forall F \subseteq \theta, F \neq \emptyset \\ m(F) = 0, F = \emptyset \end{cases} \quad (2)$$

式中: K 被称为冲突因子, 可由式 (3) 进行计算:

$$K = \sum_{F_1 \cap \dots \cap F_n = \emptyset} m(A_1(F_1)) \cdots m(A_k(F_n)) \quad (3)$$

冲突因子 K 在 D-S 证据理论中被用于描述证据之间存在冲突性, K 越大则说明证据体之间的冲突越大, 也意味着所融合后的决策结果的可靠度越差。

2 多源信息融合安全评估模型

2.1 多维多尺度评估指标

2.1.1 划分概念

一般隧道施工安全评估多关注于勘察设计尺度的总体评估, 以及施工阶段的掌子面尺度的专项评估, 这种尺度上的巨大跨越导致总体评估与专项评估之间静态割裂的局面。同时造成在具体安全评估指标选取方面, 着重于已揭露的地质信息与设计施工信息, 安全信息来源存在局限性^[21]。

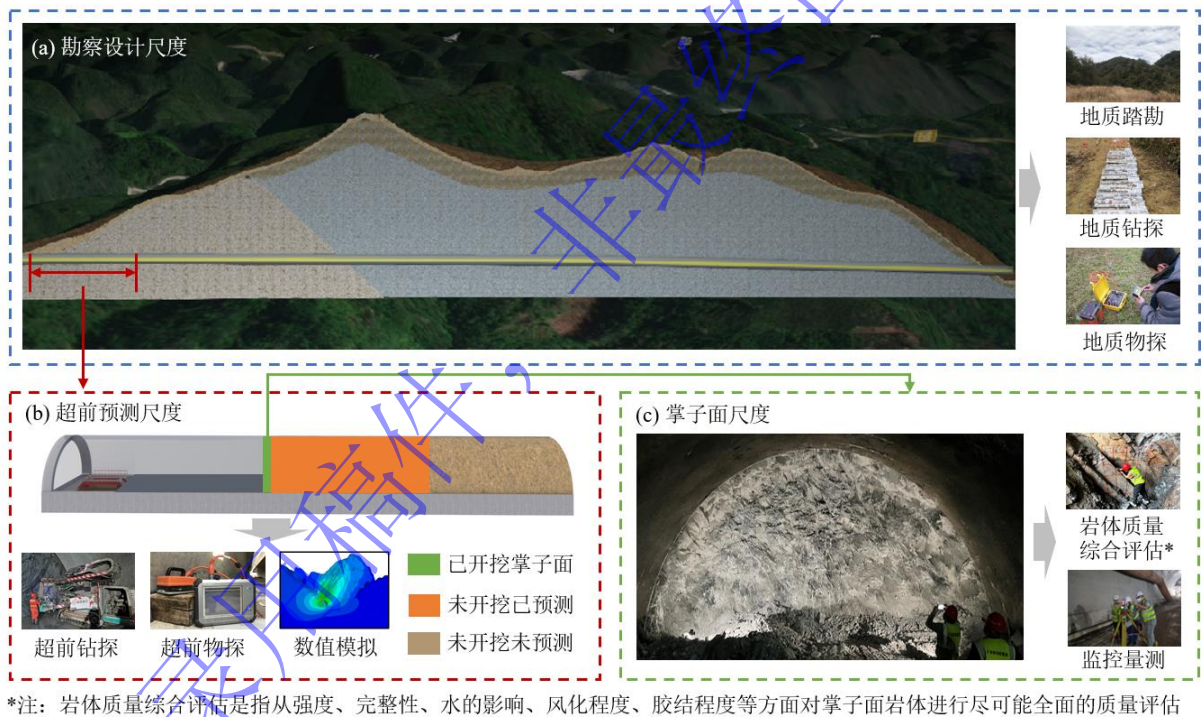


图 1 隧道工程多尺度施工划分概念示意图

Fig.1 Conceptual diagram of multi-scale construction division in tunnel engineering

如上图 1 所示, 常规钻爆法隧道施工过程一般会历经三个从大到小的尺度变化: ①勘察设计阶段的隧道全长尺度; ②施工过程中为进一步探明地质情况而形成的超前预测尺度, 该尺度具体与所采用技术手段的有效探测范围有关; ③开挖所揭露的掌子面尺度, 该尺度范围可以进行最真实的岩体质量评估以及监控量测等相关数据统计。

在评估指标的维度方面, 根据信息来源情况总体可将评估指标划分为三个主要维度: ①地质维度, 该部分指标主要由隧址区客观工程地质条件所决定, 如隧道埋深、地应力等; ②施工维度, 该部分指标主要由该隧道的设计及施工方案所决定, 如开挖直径、循环进尺等; ③预测维度, 该部分指标主要是利用各种方法对已知信息的预测结果。这一部

分常常被忽略，如由设计地勘资料得到的围岩变形强度预测^[22]、由超前地质预报得到前方待开挖岩体的质量指标预测、由数值模拟得到的围岩稳定性评估以及开挖后监控量测数据的变化趋势预测等。

2.1.2 安全评估指标体系

以上述多维多尺度概念，将隧道施工全周期划

分为勘察设计、超前预测以及开挖监测三个阶段。同时考虑满足总体及多种专项评估(本文暂以塌方、突泥涌水、大变形三种常规隧道施工安全为评估对象)需求，结合相关指南规范^[8-9]所构建隧道施工综合安全评估指标体系如下表 1 所示。

表 1 多维多尺度隧道施工综合安全评估指标体系

Table1 Comprehensive safety assessment index system with multiple dimensions and scales				
尺度划分	评估类型	地质信息维度	施工信息维度	预测信息维度
勘察设计	总体安全	隧道最大埋深、围岩等级、偏压角度、强度应力比、年降水量、涌水量、地应力、完整程度、坚硬程度、风化程度、岩溶发育程度	开挖直径、隧道长度、开挖工法、循环进尺	围岩变形强度
超前预测	总体安全	/	/	地质雷达、超前钻探、数值模拟
施工监测	塌方专项安全	掌子面岩体强度、完整程度、优势结构面倾角、围岩等级、风化程度、胶结程度	相对变形量、支护效率、支护措施合理性、监测方案合理性、地勘资料准确性	/
	突泥涌水专项安全	掌子面岩体强度、完整程度、出水类型、出水面积、涌水量、围岩等级、岩溶发育程度	防排水措施合理性、地勘资料准确性	/
	大变形专项安全	掌子面岩体强度、完整程度、围岩等级、风化程度	相对变形量、沉降速率、累计沉降、支护效率、支护措施合理性、监测方案合理性、地勘资料准确性	累计沉降、沉降速率

2.1.3 注意事项

针对表 1，结合隧道工程施工的复杂环境以及 D-S 证据理论的多源信息融合特性，有以下注意事项需要说明：①根据相关指南规范建议将安全等级划分为 I（较小）、II（一般）、II（较大）与 IV（严重）共四级，并根据工程实际情况进行各等级下指标取值范围的划定；②由于 D-S 理论多源信息融合框架的灵活性，在实际应用过程中受限于指标采集的手段与效率允许个别指标缺失，但最终评估结果的准确及可靠度与指标的真实和丰富度呈正相关；③难以量化指标可以借助专家打分法等定性或半定量手段进行取值。

2.2 D-S 证据理论多策略优化

2.2.1 概率分配函数选择

考虑实际隧道工程中评估指标取值的多样性（包括范围值与精确值），引入基于区间数的欧式距离模型^[23]进行 BPA 的灵活计算，具体流程如下：

设 $Q_j=[q_j^-,q_j^+]$ 为第 j 个评估指标的取值，指标体系中 $F_i=[f_i^-,f_i^+]$ 为所划定的第 i 个安全等级的范围值。二者的区间欧氏距离如式（4）所示：

$$D(Q_j,F_i)=\sqrt{(q_j^--f_i^-)^2+(q_j^+-f_i^+)^2}$$
（4）

则基本概率分配函数如下式（5）所示：

$$m(A_j(F_i))=\frac{1/D(Q_j,F_i)}{\sum_{i=1}^n[1/D(Q_j,F_i)]}$$
（5）

由式（4）与式（5）可知，所计算的欧氏距离 $D(Q_j,F_i)$ 越小，说明该指标从属于该安全等级的概率越大。且特殊情况下，可以令 $q_j^-=q_j^+$ ，即同时适用于指标采集值为范围或精确值两种情况。

2.2.2 冲突程度弱化

通常而言，伴随证据体数量的增加，其冲突概率将显著加剧^[20]。而隧道施工安全往往受多来源、多指标的综合影响，采用丰富指标进行安全评估必要且合理的。因此，为提高多源信息融合结果的可靠度，有必要对这种冲突性进行优化处理。

本文采用 Murphy 法^[24]进行多源证据间冲突程度的弱化。该方法基于冲突证据平均化处理的理念，具体流程为设有 n 个待融合的证据体 $m_j, j=1,2,...,n$ 存在高度冲突性，则根据式（6）计算平均证据体：

$$m_{MEA}(A)=\frac{1}{n}\cdot\sum_{j=1}^nm(A_j(F_i))$$
（6）

完成平均证据体 $m_{MEA}(A)$ 的求解后，继续使用式（2）所示 D-S 融合规则融合将其迭代 $n-1$ 次，即可得到最终的融合结果。

2.3 评估结果有效性检验

在安全评估领域，完成概率计算后通常根据最

大隶属度原则判定最终所属等级。但这种方法易造成概率分布信息丢失，甚至会得出不合理的结论^[25]，因此应对评估判定结果开展有效性验证。定义有效性因子 α 如式（7）所示：

$$\alpha = \frac{m\beta - 1}{2\gamma(m - 1)}$$

(7)

式中： m 为隶属等级数量， β 和 γ 分别是概率分布中的最大分量和次大分量。

显然， α 越大，所采用的最大隶属度安全等级判定越有效，具体标准为： $\alpha = 0$ ，完全无效； $\alpha \in (0, 0.5)$ ，低效； $\alpha \in (0.5, 1]$ ，比较有效； $\alpha \in [1, +\infty)$ ，非常有效； $\alpha = +\infty$ ，完全有效。

3 综合安全动态评估流程

根据前文介绍各理论与模型，所构建基于多源信息融合技术的隧道施工综合安全动态评估工程应用体系如下图 2 所示，主要步骤有以下几点：

（1）在勘察设计阶段获取各评估指标相应的指标值，经融合得到勘察设计总体施工安全评估结果；

（2）隧道施工过程中，在超前预测阶段获取各评估指标相应的指标值，经融合得到超前预测总体施工安全评估结果，并在融合过程中将勘察设计总体施工安全评估结果作为证据体纳入融合过程；

（3）隧道施工过程中，完成超前预测与掌子面开挖后获取各评估指标相应的指标值，经融合得到所需的专项安全评估结果，并在融合过程中将超前预测总体施工安全评估结果作为证据体纳入融合过程。

通过大小尺度嵌套及评估结果的传递融合最终形成匹配施工进度动态安全评估过程。

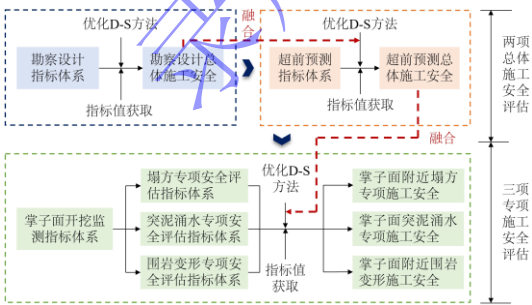


图 2 施工安全动态评估工程应用体系流程

Fig.2 The schematic diagram of the safety assessment system

4 工程案例

4.1 工程概况与评估对象

如图 3 所示，拉力隧道位于广西天峨-北海公路巴马至平果段，隧道设计宽度 14.5m，起止桩号为 K19+005~K20+903，设计长度约为 1890m。地质勘探结果显示，围岩以 IV 级中~强风化砂岩、灰岩为主，约占总长的 58.98%，其次 V 级围岩约占总长的 21.28%。根据现场前期开挖情况，围岩自稳能力较差，开挖过程中掉块现象严重，并于 ZK19+175 断面发生小规模塌方，现场如图 3（c）所示。

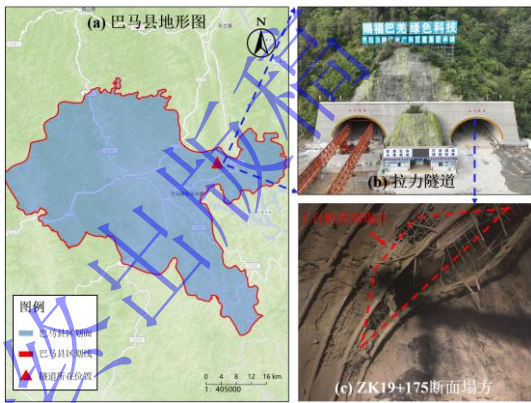


图 3 拉力隧道及其塌方现场

Fig.3 Lali Tunnel and collapse site of section ZK19+175

其中由收集资料已知 ZK19+104、ZK19+127、ZK19+150 断面开挖后围岩稳定性一般，有零星掉块现象，直至 ZK19+175 断面发生塌方。基于上述现场实际情况，结合所搜集施工资料，具体评估对象如下：

① 针对拉力隧道全长开展勘察设计尺度下的总体安全施工安全评估；

② 选取 ZK19+104~ZK19+175 开展超前预测尺度下的总体施工安全评估，并根据地质预报资料分为 ZK19+104~ZK19+125、ZK19+125~ZK19+157 和 ZK19+157~ZK19+175 三个子段落；

③ 根据现场掌子面地质素描资料，选取 ZK19+104、ZK19+127、ZK19+150、K19+175 共 4 个掌子面作为开挖监测尺度下的塌方专项安全评估对象。

4.2 指标体系构建

根据前文 2.1 所述，以表 1 为基础，结合拉力隧道实际的地勘设计资料、现场施工、超前地质预报以及监控量测等各方面情况，最终构建本工程总

体及塌方专项安全评估所需的指标体系如下表 2 所示。共计 20 项指标，其中勘察设计尺度下共计 12 项指标，超前预测尺度下共计 2 项指标，开挖监测尺度下共计 6 项指标。

表 2 拉力隧道多维多尺度安全评估指标体系及取值划分

Table2 Multiple dimensions and scales risk assessment index grading and value suggestion							
编号	尺度	维度	安全指标	安全等级			
				较小（Ⅰ）	一般（Ⅱ）	较大（Ⅲ）	重大（Ⅳ）
1	勘察 设计 尺度	地质 维度	隧道最大埋深(m)	0~200	200~500	500~800	800~1200
2			围岩等级(V 级/%)	0~20	20~40	40~70	70~100
3			偏压角度(°)	0~15	15~30	30~45	45~90
4			涌水量 (m³/d)	0~2000	2000~10000	10000~20000	20000~30000
5			完整程度(Kv)	0.55~1	0.35~0.55	0.15~0.35	0~0.15
6			坚硬程度(MPa)	60~120	30~60	15~30	0~15
7			风化程度(百分制)	0~20（未~微）	20~40（微~中）	40~70（中~强）	70~100（强~全）
8			岩溶发育程度(百分制)	0~20（不发育）	20~40（较发育）	40~70（发育）	70~100（极发育）
9	施工 监测 尺度	施工 维度	开挖直径(m)	0~9	9~14	14~18	18~25
10			隧道长度(m)	0~1000	1000~3000	3000~5000	5000~8000
11			循环进尺(m)	0~1	1~2	2~3	3~5
12	预测 尺度	预测 维度	变形强度(大变形/%) ^a	0~10	10~30	30~50	50~100
13	超前 预测 尺度	预测 维度	地质雷达(BQ)	451~600	351~451	251~351	0~251
14			数值模拟沉降(mm) ^b	0~50	50~100	100~200	200~500
15	施工 监测 尺度	地质 维度	掌子面坚硬程度(MPa)	0~15	15~30	30~60	60~120
16			掌子面完整程度(百分制)	0~20 （完整~较完整）	20~40 （较完整~较破碎）	40~70 （较破碎~破碎）	70~100 （破碎~极破碎）
17			掌子面风化程度(百分制)	0~20（未~微）	20~40（微~中）	40~70（中~强）	70~100（强~全）
18		施工 维度	相对变形量(%)	0~1	1~2	2~3	3~5
19			支护效率(min)	0~60	60~120	120~180	180~240
20			支护合理性(百分制)	0~20（很好）	20~40（正常）	40~70（差）	70~100（很差）

注：(a) 变形强度指标量化是指基于设计勘察资料数据对隧道总体围岩变形强度的预测结果（具体为预测大变形的占比），本文参考文献^[26]在此不做赘述；(b) 数值模拟沉降是指利用数值模拟方法对该里程段的开挖稳定性分析结果，本文采用 FLAC3D 进行计算。

4.3 各尺度指标采集量化

4.3.1 勘察设计尺度

基于工程地质勘察与设计资料，基于表 2 对评估指标进行采集量化，结果如下表 3 所示。

表 3 勘察设计尺度评估指标取值

Table3 Indicators for survey and design scales	
指标	取值
隧道最大埋深 (m)	294.73
围岩等级 (V 级/%)	21.28
年降水量 (mm)	1554~1860
预测涌水量 (m³/d)	1000~1200
完整程度 (Kv)	0.49~0.55
坚硬程度 (MPa)	37.79~42.40
风化程度 (百分制)	60~70
岩溶发育程度 (百分制)	30~40
开挖直径 (m)	14.5
隧道长度 (m)	1890
循环进尺 (m)	1.8~2.4
变形强度预测 (大变形/%)	5.8

4.3.2 超前预测尺度

如表 2 所示该尺度下分别对地质雷达预报结果及数值模拟沉降结果两项指标进行采集量化。其中在数值模拟方面针对 ZK19+100~ZK19+180 共计 80m 段落基于 FLAC 3D 进行仿真计算。

如图 4 (a)，模型顶面地形轮廓、地层分界线以及地层参数参考设计资料与地勘报告，开挖流程与实际施工保持一致（三台阶）。开挖后位移云图及变形趋势监测如图 4 (b) 及图 4 (c) 所示。

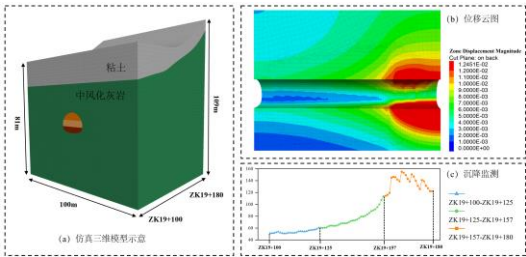


图 4 ZK19+100 ~ ZK19+180 数值仿真模拟结果

Fig.4 Numerical simulation results for ZK19+100~ZK19+180

最终，结合所搜集超前地质预报资料，该尺度下具体指标及取值如下表 4 所示。

表 4 超前预测尺度评估指标取值

Table4 Indicators for advanced prediction scales			
指标	ZK19+100 ~ ZK19+125	ZK19+125 ~ ZK19+157	ZK19+157 ~ ZK19+180
地质雷达	200~250	200~250	100~150
数值模拟	56	89	126

4.3.3 开挖监测尺度

根据对 ZK19+104 等所选 4 个掌子面进行现场跟踪、专家踏勘以及监控量测等资料收集，参照表 2 该尺度下的具体指标及取值如下表 5 所示。

表 5 开挖监测尺度评估指标取值

Table5 Indicators for excavation monitoring scales				
指标	ZK19+104	ZK19+127	ZK19+150	ZK19+175
坚硬程度	35~45	35~45	35~45	60~70
完整程度	80~90	70~80	60~70	60~70
风化程度	80~90	60~70	60~70	40~50
相对变形	0.85	1.44	1.18	1.44
支护效率	50~60	70~90	60~80	150~180
支护合理性	70~80	70~80	60~70	60~70

4.4 数据融合及等级判定

首先利用式（4）与式（5）所述区间数欧氏距离模型，按照表 2 所对应的各等级下指标取值范围对表 3 至表 5 的指标采集值进行 BPA 计算。然后根据图 2 进行各尺度之间的多源信息融合、评估及评估结果传递。

在融合过程中，按照式（3）对表 3~表 5 各尺度下证据体之间的冲突性进行检验。本文选取 0.90 作为判断阈值，超出阈值将按照式（6）进行优化处理。最终 D-S 证据融合结果如下表 6 所示：

表 6 多源安全证据冲突性检验、优化及融合

Table6 Conflict examination, optimization, and synthesis			
评估对象	K	$m_{MEA}(A)$	融合结果
隧道总体	0.965	[0.25,0.36,0.24,0.15]	[0.13,0.77,0.09,0.01]
ZK19+100 ~ZK19+125	0.814	/	[0.05,0.65,0.28,0.02]
ZK19+125 ~ZK19+157	0.825	/	[0.05,0.69,0.23,0.03]
ZK19+157 ~ZK19+180	0.881	/	[0.08,0.52,0.37,0.03]
ZK19+104	0.967	[0.19,0.31,0.21,0.28]	[0.05,0.82,0.12,0.01]
ZK19+127	0.971	[0.14,0.38,0.26,0.22]	[0.05,0.74,0.16,0.05]
ZK19+150	0.977	[0.16,0.36,0.30,0.17]	[0.03,0.71,0.26,0.02]
ZK19+175	0.996	[0.12,0.31,0.40,0.17]	[0.02,0.13,0.79,0.06]

由表 6 最终根据最大隶属度原则对各尺度下各评估对象的所属安全等级进行判定。判定结果为隧道总体施工安全等级处于Ⅱ级，四个超前预测尺度下总体施工安全等级全部处于Ⅱ级，开挖监测尺度下针对塌方专项安全等级掌子面 ZK19+104 处于Ⅱ级、ZK19+127 处于Ⅱ级、ZK19+150 处于Ⅱ级以及 ZK19+175 处于Ⅲ级。

4.5 分析与讨论

4.5.1 融合冲突性

作为采用 D-S 证据理论进行多源信息融合的重要环节，冲突性检验是保证融合结果合理与可靠的重要手段。针对本工程案例，各尺度下安全评估对象的冲突性与所采用的评估指标数量关系如下图 6 所示。

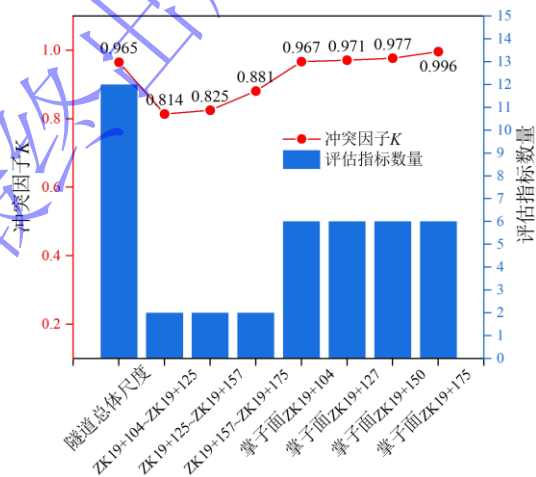


图 5 K 与评估指标数量关系示意

Fig.5 Relationship between K and the number of indicators

由图 5 可以推断，在多源信息融合过程中，证据体即指标之间的冲突性基本与两方面有关。一是指标数量的多少，如超前预测尺度下仅有 2 项指标，即使在指标采集量化过程中出现所属等级不一致的情况，其冲突性也全部未超过阈值，而相较之下勘察尺度以及开挖监测尺度评估指标较为丰富，在融合过程中全部超过优化限定阈值。

另外则与具体取值情况相关。开挖监测尺度下评估指标数量仅为勘察尺度的一半，但 K 值普遍较大。这与勘察阶段受成本及指标量化手段限制，主观倾向性及一致性较强相关。而在开挖监测阶段，评估指标量化结果来源不同，具有较强真实性与客观性，在地质、现场施工及管理等相关因

素的作用下,极易出现指标之间冲突性加剧的现象。

4.5.2 方法对比

为进一步说明本文所提出隧道施工安全评估方法的有效性,将之与模糊综合评估法以及未优化的

D-S 融合结果进行对比。其中模糊综合评估法参考相关文献^[13],具体过程不做赘述。各评价对象最终安全评估结果以及方法对比如下图 6 所示。

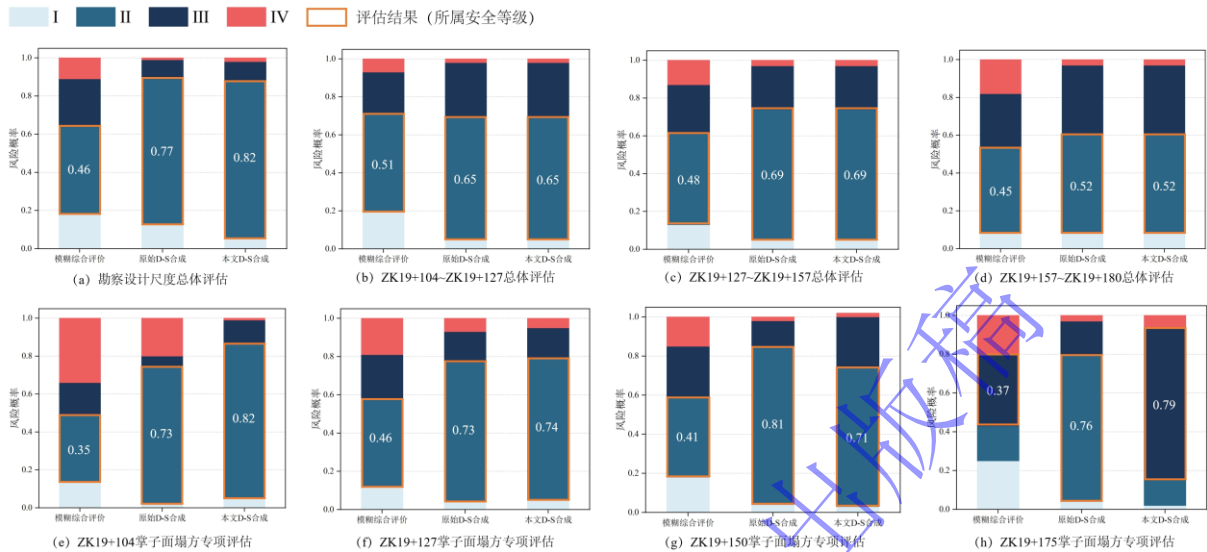


图 6 各尺度具体安全评估结果及对比

Fig.6 Specific risk assessment results and comparisons at each scale

根据图 6 可知三种评估方法结果基本一致,仅有未优化 D-S 融合下的 ZK19+175 断面塌方安全仍未 II 级,这与现场实际情况相违背。推测原因一是 ZK19+175 断面多源证据存在高度冲突性,不经优化易导致评估结果的失真。二是由表 6 的 ZK19+157~ZK19+180 段落超前预测尺度总体安全评估结果来看,此段落属于 III 级安全概率由前一段落的 0.23 提升到 0.37, II 级安全概率由 0.69 下降到 0.52,这种安全趋势变化借由融合路径传递给该段落所属断面的专项安全评估计算过程中,从而使本文 D-S 融合结果更加合理。

此外根据最大隶属度原则,本文 D-S 融合评估结果概率分布更加合理,概率数值从最大隶属度等级向两侧等级递减。与之对应的未优化 D-S 融合的 ZK19+104 断面以及模糊综合评估的 ZK19+104 及 ZK19+175 均出现不合理概率分布,推测与不能妥善处理多源证据之间的冲突性和相关性有关。

4.5.3 有效性检验

根据前文 3.3 所述,利用有效性因子 α 对三种方法的概率分布进行服从最大隶属度原则的有效性检验,由式 (7) 计算结果如图 7 所示。由图 7 可以明显看出,相对比 D-S 融合方法,模糊综合评价法得到的概率分布有效性基本落在低效~比较有效区

间,即具体的概率分布对评估结果的支持度较弱,相反所提出 D-S 融合评估方法具有较强支持度。

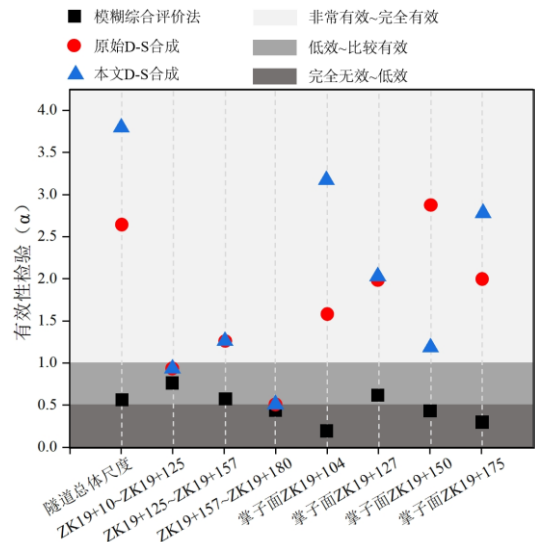


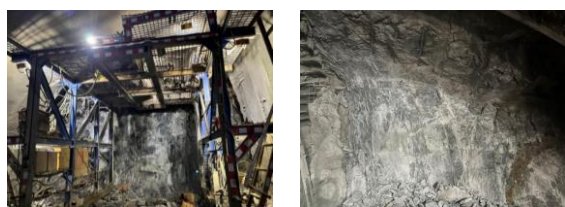
图 7 评估结果概率分布有效性检验

Fig.7 The effectiveness of the probability distribution

4.6 控制措施及效果

由上述评估结果可知, ZK19+175 断面塌方专项安全评估结果由此前断面的 II 级提高到 III 级,这与现场 ZK19+175 断面附近发生的掌子面拱顶塌方

相一致。基于此,现场在后续施工过程中及时调整了开挖工法及支护措施,具体为:将三台阶开挖法变为 CD 法;选用参数为 $\phi 22@1.0\text{m}\times 0.6\text{m}$,长度为 3m 的中空注浆锚杆;采用参数为 $\phi 50\times 0.05\text{mm}$ 、长度为 4.5m 小导管,环向及纵向间距呈 $0.5\times 2.4\text{m}$ 布置;配有 $\phi 8@0.2\text{m}\times 0.2\text{m}$ 钢筋网;采用厚度为 22cm 的 C25 喷射混凝土进行临时支撑的加强及支护,并在开挖过程中严格控制进尺,强化超前地质预报及监控测量。在上述调整的基础上,重新对 ZK19+180 断面进行了塌方专项安全评估,其塌方安全等级计算结果为 II 级。掌子面现场如下图 8 所示,可以看出左、右导洞围岩稳定性良好。



(a) 左导洞 (b) 右导洞

图 8 ZK19+180 掌子面稳定性情况

Fig.8 Stability condition of section ZK19+180

5 结论

(1) 基于多源信息融合思想与多维多尺度概念提出一种隧道施工综合安全动态评估方法及工程应用体系。该方法及体系可满足隧道勘察设计尺度与超前预测尺度两种总体安全评估以及掌子面塌方、突泥涌水及大变形等常规专项安全评估需求,并依托尺度嵌套概念实现匹配施工进度动态安全评估;

(2) 针对上述方法及体系,构建了相应的多维多尺度安全评估指标体系。在具体的安全评估计算方法上以 D-S 证据理论为信息融合框架,采用区间欧氏距离模型与 Murphy 法对 BPA 求解与冲突证据融合进行了优化,从理论计算层面提高了评估结果的合理性与可靠度;

(3) 依托实际需求选取了隧道项目的两项总体安全评估与塌方专项安全评估进行了方法验证,并与原始 D-S 证据融合以及模糊综合评估法进行了比较。结果显示本文方法与工程实际塌方情况相吻合,在具体的安全概率计算方面较其它两种方法表现出

较高的合理性与可靠度。最终依据安全评估结论指导了现场合理施工安排,保障了施工安全,验证了本文安全评估方法的有效性和实用性,可为解决同类工程问题提供借鉴与参考;

(4) 本文提出的隧道施工安全评价方法和工程应用体系具有较强灵活性。一方面可以根据实际隧道工程需求选取所需要的专项安全评估开展工作(表 1 提供指标体系基本满足塌方、突泥涌水以及大变形三类常规专项安全评价),另一方面如遇特殊工况(如高地应力区岩爆安全)可丰富多维指标体系进而适应新的施工安全评估需求。

参考文献(References):

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国隧道工程学术研究综述·2015[J]. 中国公路学报, 2015, 28(05):1-65.(Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's tunnel engineering research:2015[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(05): 1-65.(in Chinese))
- [2] 交通运输部. 2023 年交通运输行业发展统计公报[N]. 中国交通报, 2024-06-18(002).(Ministry of Transport. Statistical Bulletin on the Development of the Transportation Industry in 2023[N]. China Transportation News, 2024-06-18(002))
- [3] 《中国公路学报》编辑部. 中国交通隧道工程学术研究综述·2022[J]. 中国公路学报, 2022, 35(04):1-40.(Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's traffic tunnel engineering research:2022[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(04):1-40.(in Chinese))
- [4] 熊自明, 卢浩, 王明洋, 等. 我国大型岩土工程施工安全安全管理研究进展[J]. 岩土力学, 2018, 39(10):3703-3716. (XIONG Ziming, LU Hao, WANG Mingyang, et al. Research progress on safety risk management for large scale geotechnical engineering construction in China[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(10): 3703-3716.(in Chinese))
- [5] 路美丽, 刘维宁, 罗富荣, 等. 隧道与地下工程安全评估方法研究进展[J]. 工程地质学报, 2006(04): 462-469. (LU Meili, LIU Weining, LUO Furong, et al. Review on risk assessment methods for tunnelling underground projects[J]. Journal of Engineering and Geology, 2006(04): 462-469.(in Chinese))
- [6] Sorill C M. Risk analysis for large projects: models, methods and cases[J]. Journal of the Operational Research Society, 1987, 38(12): 1217-1217.
- [7] 毛儒. 隧道工程安全评估[J]. 隧道建设, 2003(02):1-3.(MAO ru. Risk assessment for tunnel engineering [J]. Tunnel Construction, 2003(02): 1-3.(in Chinese))

- [8] 中华人民共和国交通运输部. 公路水运工程施工安全评估指南: JT/T 1375.1-2022[S]. 北京: 人民交通出版社, 2022. (Ministry of Transport of the People's Republic of China. Guideline for Safety Risk Assessment of Highway and Waterway Engineering Construction: JT/T 1375.1-2022[S]. Beijing: China Communications Press, 2022.(in Chinese))
- [9] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁和隧道工程设计安全评估指南(试行)[Z]. 2010.(Ministry of Transport of the People's Republic of China. Safety Risk Assessment of Highway Bridge and Tunnel Design(Trial)[Z]. 2010.(in Chinese))
- [10] 张锦, 徐君翔. 川藏铁路桥隧施工安全安全评价[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(1):39-46. (ZHANG Jin, XU Junxiang. Approach to the safety risk assessment of bridge and tunnel construction of Sichuan-Tibet Railway[J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(1): 39-46.(in Chinese))
- [11] 李术才, 周宗青, 李利平等. 岩溶隧道突水安全评价理论与方法及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(09):1858-1867. (LI Shucai, ZHOU Zongqing Q, LI Liping, et al. Risk evaluation theory and method of water inrush in karst tunnels and its applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(09): 1858-1867.(in Chinese))
- [12] 刘灿, 郑邦友, 李政, 等. 基于熵权-改进灰色关联模型的公路隧道塌方安全评估[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(15):6292-6297. (LIU Can, ZHENG Bangyou, LI Zheng, et al. Risk assessment of highway tunnel collapse in entropy weight-modified grey relational model[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(15): 6292-6297.(in Chinese))
- [13] 程远, 朱合华, 刘松玉, 等. 基于模糊理论大跨浅埋公路隧道施工安全评估[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(06):1616-1622. (Cheng Yuan, Zhu Hehua, Liu Songyu, et al. Risk assessment for construction of large-span and shallow buried highway tunnels based on fuzzy theory[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(06): 1616-1622.(in Chinese))
- [14] 赵茗年, 王永刚, 庞小冲, 等. 高寒地区公路特长隧道安全评估优化应用[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(S1):426-430. (Zhao Mingnian, Wang Yonggang, Pang Xiaochong, et al. Optimization application of risk assessment for super long highway tunnel in alpine region[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(S1): 426-430.(in Chinese))
- [15] 梁伟章, 赵国彦. 深部硬岩长短期岩爆安全评估研究综述[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(01):19-39. (LIANG Weizhang, ZHAO Guoyan. A review of long-term and short-term rockburst risk evaluations in deep hard rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(01): 19-39.(in Chinese))
- [16] Dempster A P. Upper and lower probabilities induced by a multi-valued mapping[J]. Annual Math Statist, 1967, 38(4):325-339.
- [17] Shafer G. A Mathematical Theory of Evidence [M]. Princeton University. Press, Princeton, 1976.
- [18] Li S, Liu C, Zhou Z, et al. Multi-sources information fusion analysis of water inrush disaster in tunnels based on improved theory of evidence[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 113: 103948.
- [19] Wu B, Qiu W, Huang W, et al. A multi-source information fusion evaluation method for the tunneling collapse disaster based on the artificial intelligence deformation prediction[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2022: 1-19.
- [20] 韩德强, 杨艺, 韩崇昭. D-S 证据理论研究进展及相关问题探讨[J]. 控制与决策, 2014, 29(01):1-11. (HAN Deqiang, YANG Yi, HAN Chongzhao. Advances in D-S evidence theory and related discussions[J]. Control and Decision, 2014, 29(01): 1-11.(in Chinese))
- [21] 洪开荣. 我国隧道及地下工程近两年的发展与展望[J]. 隧道建设, 2017, 37(02):123-134. (HONG Kairong. Development and prospects of tunnels and underground works in China in recent two years[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(02): 123-134.(in Chinese))
- [22] 王建宇. 对形变压力的认识——隧道围岩挤压性变形问题探讨[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(04):1-11. (WANG Jianyu. The key way is to release the genuine rock pressure discussion on problems of tunnelling in squeezing ground[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(04): 1-11.(in Chinese))
- [23] 曹文贵, 杨伟康, 翟友成. 基于 D-S 证据理论的岩体质量分级组合评价方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(05):86-91. (CAO Wengui, YANG Weikang, ZHAI Youcheng. Combination evaluation method for the classification of rock mass quality based on D-S theory of evidence[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2015, 42(05): 86-91.(in Chinese))
- [24] 李文立, 郭凯红. D-S 证据理论融合规则及冲突问题[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(08):1422-1432. (LI Wenli, GUO Kaihong. Combination rules of D-S evidence theory and conflict problem[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2010, 30(08): 1422-1432. (in Chinese))
- [25] 朱小飞, 王永君, 李大军. 模糊评价中最大隶属度原则有效性检验[J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(05):135-143. (ZHU Xiaofei, WANG Yongjun, LI Dajun. The effectiveness test of the maximum membership principle in fuzzy comprehensive evaluation[J]. GEOMATICS & SPATIAL INFORMATION TECHNOLOGY, 2016, 39(05): 135-143.(in Chinese))
- [26] Liang M, Peng H, Xie W, et al. Dynamic multiclass prediction of tunnel squeezing intensity with stacking model and Markov process[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 146: 105632.