

改进 DS 证据理论算法岩溶特征融合与三维成像

师学明¹, 何家乐¹, 张凯¹, 王菲¹, 张亚星¹, 田杉², 姚洪锡², 蒋道君², 郑洪²

1. 中国地质大学地球物理与空间信息学院 地球内部多尺度成像湖北省重点实验室 湖北武汉 430074

2. 中铁第四勘察设计院集团有限公司 湖北武汉 430063

摘要: 地下岩溶会给陆路交通工程基础设施的设计、施工和安全运行带来巨大的安全隐患。为探明地下岩溶发育情况, 对空天地多源异构综合勘察数据, 包括遥感解译、工程地质调绘、钻孔、物探高密度电法和瞬变电磁法解译成果资料, 统一时空坐标和数据标准, 实现岩溶不良地质体的数据级融合。在此基础上, 建立地下岩溶不良地质体的识别框架, 构建地下空间点域初始基本概率分配函数赋值方法, 采用基于 Kendall 相关系数改进的 DS 证据理论算法, 对综合勘察数据证据进行多源数据融合获取岩溶评价指标, 三维空间插值网格化后进行岩溶特征三维成像。结果表明: 改进 DS 算法有效解决了综合勘察成果间的高度冲突问题, 形成对岩溶目标体的智能决策, 实现了综合勘察解译成果的岩溶地质信息特征级融合。融合结果的三维成像, 提高了地下岩溶不良地质体勘察的可靠性和精度, 提升工作效率 30% 以上。DS 智能融合算法为陆路交通工程在设计、施工和运行的全寿命周期条件下, 处置岩溶灾害提供了有效的方法指导和合适的评价手段。

关键词: DS 证据理论; 岩溶; 数据融合; 综合勘察; 多源异构数据

中图分类号: P631.3

收稿日期: 2024-11-04

Karst Feature-level Data Fusion of Comprehensive Exploration Data Using Improved DS Evidence Theory Algorithm

Shi Xueming¹, He Jiale¹, Zhang Kai¹, Wang Fei¹, Zhang Yaxing¹, Tian Shan², Yao Hongxi², Jiang Daojun², Zheng Hong²

1. Hubei Subsurface Multi-scale Imaging Key Laboratory, School of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074,

China

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No: 2021YFB2600402)

第一作者: 师学明 (1971-), 男, 博士, 教授, 地球探测与信息技术专业。主要从事城市与工程地球物理方法技术、地质工程、人工智能等研究工作。ORCID: 0009-0001-9685-3467. Email: xmshi@cug.edu.cn

Abstract: Underground Karst formations pose significant safety risks to the design, construction, and safe operation of land transportation projects. To investigate the development of underground Karst, comprehensive multi-source heterogeneous survey data were utilized, including remote sensing interpretation, engineering geological mapping, drill hole data, and the results from electrical resistivity tomography and transient electromagnetic methods. These data were unified in terms of temporal and spatial coordinates and standards to achieve data-level fusion of adverse Karst geological bodies. Based on this foundation, a recognition framework for underground Karst geological bodies was established. A method for assigning initial basic probability assignment(BPA) functions to underground spatial point domain was developed, and a modified Dempster-Shafer (DS) evidence theory algorithm based on Kendall's correlation coefficient was employed for multi-source data fusion to obtain Karst evaluation indices. After 3D spatial interpolation, 3D imaging of Karst features was plotted. The results indicate that the improved DS algorithm effectively solves the high conflicts among comprehensive survey evidence, enabling intelligent decision-making regarding Karst targets. This improved DS algorithm facilitated the integration of Karst geological information features from comprehensive survey results. The 3D imaging of the integrated results enhanced the reliability and accuracy of underground Karst geological body investigations, increasing work efficiency by 30% or more, and providing methodological guidance and evaluation tools for engineering design, construction, and operation.

Key words: DS evidence theory; Karst; Data fusion; Comprehensive survey; Multi-source heterogeneous data

0 引言

陆路交通（铁路、公路）基础设施工程建设是交通运输业的发展基础，在陆路交通基础设施建设中，地下岩溶等不良地质体可能引发地面塌陷、隧道涌水等工程问题，对工程建设与安全运行产生重要影响（罗利锐和刘志刚，2011）。早期岩溶勘察主要采用单一钻探方法或单一物探方法。钻探方法受成本和工期制约，加上钻探是“一孔之见”，难以详细刻画地下岩溶复杂形态。单一物探方法又受物探成果多解性影响，岩溶探测效果受到制约（孙跃军等，2001）。为此，国内外众多学者对岩溶综合勘察方法进行了大量研究。杨银湖和黄正发（2001）采用工程地质测绘、物探和钻探相结合的方法，查明了京珠国道湖北南段岩溶的空间分布特征、发育规律，为公路工程设计提供可靠依据。彭超（2016）联合应用地震映象法和高密度电法，查明了某高速公路工程岩溶塌陷区的范围、发育形态和规模。张业（2021）采用高密度电法、跨孔电磁波 CT、孔内电视法等综合物探技术手段，对铁路灰岩区路基地下岩溶发育情况进行了岩溶探测，避免了单一物探方法成果的多解性。雷伟平等（2022）结合工程地质、水文地质资料，采用音频大地电磁法、高密度电法、瞬变电磁法三种物探方法，在富水岩溶发育区取得较好的岩溶探测效果。王凯（2024）采用地质调查、地质雷达和钻探的综合勘察方法，查明了高铁隧道基底岩溶发育情况。

在岩溶发育地区，地层、岩溶分布极不规律，岩溶勘察往往采用钻探、物探、地质调绘、遥感等综合勘察手段。然而，综合勘察对多种勘察技术的成果分析仍以人工综合为主，综合勘察成果整合率低，信息融合程度低，地下地质信息综合分析方法单一。如何采用智能算法，对综合勘察成果进行多源数据智能融合，是当前研究热点。

柏成浩（2021）采用机器学习方法对成昆铁路岩溶隧道的突水突泥风险进行智能预测。胡励耘等（2023）综合 GIS 勘察系统、横波反射法和地质雷达法，采用案例分析法把传统勘察技术应用于岩溶数字化勘察领域；王祥等（2023）采用层次分析法，并结合专家打分法对岩溶隧道盾构法施工风险进行综合风险指数计

算，并建立岩溶隧道盾构施工风险评价体系。杨超杰等（2024）采用模糊层次分析法对米仓山隧道进行了涌突水危险度评价。DS 证据理论（Dempster-Shafer Evidence theory）从本质上讲，是一种智能算法，它可以对多个传感器数据（多源数据）合并证据，给出推理结论（Dempster, 1967; Shafer, 1976）。DS 证据理论早期主要用于军事指挥与决策（王媛娜等，2020），现已广泛应用于数据融合（黄智勇等，2024）、故障诊断（王鹤等，2024）、目标识别（李捷等，2019）、风险评价（陈宁和谢旺，2022）、地质灾害预测（侯守江，2023）等领域。陈钊等（2023）依据 DS 证据理论，基于改进条件概率的贝叶斯网络，对广西老山隧道坍塌进行了风险评价；罗雨梦（2024）采用改进 DS 证据理论算法，对云南昆明小江流域的泥石流进行了危险性评价。本文旨在采用改进 DS 证据理论（罗雨梦，2024）算法，研究如何利用遥感、工程地质调绘、钻探、物探等综合勘察方法的解译成果资料，对地下岩溶不良地质体进行风险评价，形成岩溶不良地质体的智能决策，实现综合勘察多源异构数据的智能融合，提高综合勘察成果可靠性和精度，提升工作效率，给陆路交通工程设计施工与安全运行提供评价方法和可靠资料。

1 改进 DS 证据理论的岩溶特征融合算法

1.1 岩溶评价指标与基本概率指派函数赋值

空天地综合勘察资料，从不同角度和方面反映了地下岩溶不良地质体的信息。因此评价目标可定义为利用遥感、工程地质调绘、钻探、物探（高密度电法、瞬变电磁法、大地电磁法、面波法等）等资料，综合判断地下某点的岩溶发育情况。此时，这些多源异构综合勘察数据，可看作多源传感器数据。因此，构建岩溶不良地质体的识别框架 Θ 为：

$$\Theta = \{\text{岩溶}, \text{非岩溶}\} \quad (1)$$

根据拟建宜涪铁路的综合勘察资料，构建岩溶评价指标为：

指标 1：遥感解译资料

指标 2：工程地质调绘资料

指标 3：钻孔岩心资料

指标 4: 高密度电法解译资料

指标 5: 瞬变电磁法解译资料

构建完评价指标后, 需要根据实际勘察资料, 对地下某点为岩溶(命题 A_1) 还是非岩溶(命题 A_2) 的基本概率指派(Basic probability assignment, 简称 BPA, 常用 m 表示) 函数进行赋值。

钻孔和工程地质调绘是直接勘察方法, 物探和遥感是间接勘察方法。根据钻孔岩心资料可直接确定地下岩溶的 BPA 值。例如, 若钻孔岩心为溶洞, 则将该点 BPA 赋值为 1; 若钻孔岩心为溶蚀性灰岩, 则将该点 BPA 赋值为 0.5; 其他情况则将该点 BPA 赋值为 0。物探解译资料如果是定性资料, 则需根据工程经验进行概率赋值; 如果是定量解译资料, 即已圈定岩溶区域, 则可把岩溶边界外区域的 BPA 赋值为 0, 岩溶边界及内部区域的 BPA 赋值为 1。工程地质调绘资料、遥感解译资料除表层岩溶分布为直接信息外, 地下岩溶分布信息往往是定性描述, 需要依据工程经验对 BPA 进行赋值。

例如, 地下空间某点, 根据遥感和工程地质调绘资料, 该区为岩溶强发育区, 地下存在岩溶的可能性较大, 因此, 可令指标 1 (遥感解译资料) 和指标 2 (工程地质调绘资料) 为岩溶的 BPA 赋值 0.60, 非岩溶的 BPA 赋值 0.40。该点钻孔岩心资料正好对应溶洞, 因此, 指标 3 (钻孔资料) 为岩溶的 BPA 赋值 1, 非岩溶的 BPA 赋值为 0。物探高密度电法和瞬变电磁法解译该点无岩溶。因此, 指标 4 (高密度电法解译资料) 为岩溶的 BPA 赋值 0, 非岩溶的 BPA 赋值 1, 指标 5 (瞬变电磁法解译资料) 为岩溶的 BPA 赋值 0, 非岩溶的 BPA 赋值 1, 如表 1 所示。

表 1 基本概率指派函数值

Table 1 Basic probability assignment value

指标	命题 A_1	命题 A_2
	岩溶	非岩溶
指标 1: 遥感解译资料 m_1	0.60	0.40
指标 2: 工程地质调绘资料 m_2	0.60	0.40
指标 3: 钻孔岩心资料 m_3	1.00	0.00
指标 4: 高密度电法解译资料 m_4	0.00	1.00

在每个命题均已给定多个指标的基本概率指派函数 BPA 值（相当于有多个传感器数据）之后，就可以采用 DS 证据理论算法智能融合多源数据，量化岩溶和非岩溶命题的可信度和似然度，对岩溶进行综合评价。

1.2 传统 DS 证据理论算法

DS 证据理论的核心是登普斯特（Dempster）合成规则（也称为合成准则、证据合成规则）。 n 个质量（mass）函数的 Dempster 合成规则为：

对于 $\forall A \subseteq \Theta$ ， Θ 上的 n 个质量函数 m_1, m_2, \dots, m_n 的 Dempster 合成规则为：

$$\begin{aligned} m(A) &= (m_1 \oplus m_2 \oplus \dots) (A) \\ &= \frac{1}{K} \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots} m_1(A_1) \cdot m_2(A_2) \cdot \dots \end{aligned} \quad (2)$$

式中， $A_1, A_2, \dots \in \Theta$ ， \oplus 为组合运算符， K 为归一化系数，计算公式为：

$$\begin{aligned} K &= \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \neq \emptyset} m_1(A_1) \cdot m_2(A_2) \cdot \dots \\ &= 1 - \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots = \emptyset} m_1(A_1) \cdot m_2(A_2) \cdot \dots \end{aligned} \quad (3)$$

定义 $k = 1 - K$ ， k 为冲突因子。

DS 证据理论提供了一个有用的相关证据的合成方法，能够融合多个证据源提供的证据。但 DS 理论合成公式当证据之间存在冲突时，合成结果可能错误。例如，当冲突系数 $k = 1$ 时，证据完全冲突，无法用公式进行合成；当 $k \rightarrow 1$ 时，证据高度冲突，会导致查德（Zadeh）悖论（Zadeh, 1984）。为解决冲突证据的合成问题，可以在传统 Dempster 合成规则基础上进行合成规则修正（Yager, 1987；李文立和郭凯红，2010；孙全等，2000；李弼程等，2002），也可以首先对冲突证据进行预处理，然后再用传统 DS 规则合成数据（宋香鹏等，2021；张欢等，2020；罗雨梦，2024）。

1.3 基于 Kendall 相关系数改进的 DS 证据理论算法

本文采用的方法是基于肯德尔 (Kendell) 相关系数的改进 DS 证据理论算法 (罗雨梦, 2024)。其方法步骤是: 首先, 通过 Kendall 相关系数计算证据体之间的数据相关性, 构造相关性测度矩阵; 然后, 利用相关矩阵可信度计算规则, 计算可信度系数和权重, 接着修正初始 BPA 指派函数, 再对零因子进行再修正, 避免一票否决问题。最后, 将修正后的 BPA 函数使用传统 DS 证据组合规则进行多证据融合。改进 DS 证据理论算法流程如图 1 所示。

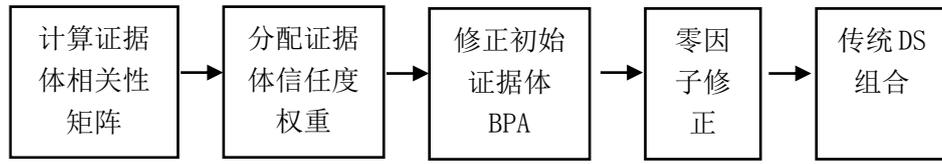


图 1 改进 DS 证据理论算法流程图

Fig. 1 Flowchart of improved DS evidence theory algorithm

两个变量之间的 Kendall 相关系数计算公式为

$$\tau_{ij} = \frac{c_{ij} - d_{ij}}{\frac{1}{2}n(n-1)} \quad (4)$$

式中, τ_{ij} 为 Kendall 相关系数, c_{ij} 为两个变量中的一对观测值的排列顺序一致的个数, d_{ij} 为两个变量中的一对观测值的排列顺序不一致的个数。 n 为样本个数。 Kendall 相关系数的取值范围为 $[-1,1]$, 当 τ_{ij} 为 1 时, 表示两个变量是一致的等级相关性; 当 τ_{ij} 为 -1 时, 表示两个变量是完全相反的等级相关性; 当 τ_{ij} 为 0 时, 表示两个变量相互独立。

Kendall 相关性测度矩阵 M 计算公式为:

$$M = (\tau_{ij}) = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & & \tau_{1,n} \\ \tau_{2,1} & \cdots & & \tau_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tau_{n,1} & \tau_{n,2} & \cdots & \end{bmatrix} \quad (5)$$

由于 Kendall 相关系数反映的是数据之间的秩次关系, 为减少非正相关性证据体对整体识别框架 BPA 指派函数的影响和置信冲突问题, 当相关性测度矩阵 M 中的元素 ≤ 0 时, 取 $\tau_{ij} = 0.001$ (罗雨梦, 2024)。

由相关性测度矩阵 M 可计算证据体的可信度, 计算公式为:

$$cred(\tau_i) = \frac{\sup(\tau_i)}{\sum_{i=1}^n \sup(\tau_i)} \quad (6)$$

式中， $\sup(\tau_i)$ 为证据体的支持度，计算公式为：

$$\sup(\tau_i) = \sum_{j=1}^n \tau_{ij} - 1 \quad (7)$$

利用每个证据体的可信度 $cred(\tau_i)$ ，对每个证据的 BPA 函数值进行加权修正，得到新的 BPA 函数值，计算公式为：

$$m_i^*(A_i) = \begin{cases} cred(\tau_i) * m_i(A_i), & A_i \neq \Theta \\ cred(\tau_i) * m_i(A_i) + 1 - cred(\tau_i), & A_i = \Theta \end{cases} \quad (8)$$

对于新的 BPA 函数值中的证据体为 0 的项，再次采取去 0 值修正策略（罗雨梦，2024），赋值 0.001，得到新的多证据 BPA 函数值。最后，利用传统 DS 组合规则（公式 2）进行多证据体智能融合。对融合结果进行排序，进而根据规则即可对岩溶或非岩溶命题作出评价。

1.4 数值实验与结果分析

采用传统 DS 证据理论算法和改进 DS 证据理论算法，对 5 个证据源进行融合实验，结果如表 2 所示。

表 2 传统与改进 DS 证据理论算法的结果

Table 2 The results of traditional and improved DS evidence theory algorithms

证据合成算法	k	$m(A_1)$	$m(A_2)$	备注
传统 DS 证据理论算法	1	—	—	完全冲突 无法计算
改进 DS 证据理论算法	0.87	0.69	0.31	

从上表可以看出，对于传统 DS 证据理论算法，由于冲突系数 k 为 1，导致归一化系数 K 为 0，传统 DS 证据理论公式无法计算。但是，改进 DS 证据理论算法（罗雨梦，2024），由于引入了 Kendall 相关系数对证据源进行了修正，冲突系数得到改善，计算结果表明该点为岩溶命题的综合评价指标为 0.69，非岩溶

Fig. 2 Schematic diagram of distribution of comprehensive survey data points in underground space point domain (spherical domain)

接着, 将这 N 个点按勘察方法进行分类, 例如钻孔有 N_1 个点, 物探高密度电法有 N_2 个点, 物探瞬变电磁有 N_3 个点。 N_1 个钻孔岩心岩溶数据中, 岩心为溶洞的有 M_1 个点, 岩心为溶蚀性灰岩的有 M_2 个点, 岩性为其他岩性的有 M_3 个点, $M_1+M_2+M_3 = N_1$ 。设定岩心为溶洞的初始概率为 1, 溶蚀性灰岩的初始概率设置为 0.5, 其他岩性初始概率为 0。据此可构建地下空间点域范围内钻孔对应的岩溶命题的基本概率指派函数值和非岩溶的基本概率指派函数值。

岩溶命题的基本概率指派函数值计算公式为:

$$m(A_1) = \frac{M_1}{N_1} \times 1 + \frac{M_2}{N_1} \times 0.5 \quad (9)$$

非岩溶命题的基本概率指派函数值计算公式为:

$$m(A_2) = 1 - m(A_1) \quad (10)$$

如果该点域范围内无钻孔资料, 此时可在证据体中去除钻孔岩心资料指标。

采用同样方法, 可对物探高密度电法和瞬变电磁法的基本概率指派函数值进行计算。高密度电法解译成果资料中, 解译成果溶洞边界和溶洞内的数据点, 初始概率赋值为 1, 溶洞外的数据点, 初始概率赋值为 0。根据空间子域搜索的点数, 利用公式 (9) 和 (10) 就可以计算高密度电法对岩溶命题和非岩溶命题的 BPA 函数值。瞬变电磁法与高密度电法数据处理方式相同。如果地下空间点域无钻孔和物探资料, 则该点域范围无勘察资料, 证据不足, 不用处理。

通过划分空间点域, 根据搜索半径和搜索控制点数, 自适应搜索点域范围内钻孔资料的岩溶信息、物探高密度电法、瞬变电磁法等多种勘察方法解译成果的岩溶信息数据, 可自适应计算每种勘察方法的初始 BPA 函数值。利用这种方法, 可以快速构建点域范围岩溶和非岩溶的初始 BPA 函数值, 用于地下岩溶不良地质体评价。

2.2 岩溶特征三维成像

将空间点域遍历整个勘察数据空间, 可得到每个点域的岩溶评价函数值, 形成了工区地下空间岩溶特征数据集 $\{x, y, h, m\}$ (x, y 为大地坐标, h 为高程, m 为

DS 证据理论算法计算的岩溶评价函数值, $0 \leq m \leq 1$)。然后, 利用三维图形平台, 例如 Surfer 软件, 对数据集进行三维空间插值网格化, 形成*.vtk 文件。加载 vtk 文件, 可显示岩溶特征的三维图形。选择合适阈值, 可显示不同评价阈值情况下, 地下岩溶的三维分布形态图。一般情况下, 岩溶阈值宜取 0.65 以上。阈值越大, 地下岩溶范围越小, 存在岩溶的可能性就越大; 否则, 反之。

2.3 算法流程

基于改进 DS 证据理论的岩溶特征融合算法与三维成像流程如图 3 所示。

第 1 步: 收集和整理工区综合勘察资料。

第 2 步: 统一时空坐标和数据标准。将综合勘察资料进行坐标转换, 代码化和数字化, 形成综合勘察数据集。由于统一了时空坐标和数据标准, 各种勘察成果资料可以在三维图像平台上进行可视化显示, 从而实现岩溶数据级融合的可视化。

第 3 步: 构建岩溶识别框架。在岩溶数据级融合的基础上, 进行岩溶特征级融合, 首先构建岩溶识别框架。

第 4 步: 构建空间点域(球形子域)的初始 BPA 函数值。根据搜索半径和最大点数, 根据公式(9)和(10), 自动搜索综合勘察数据集, 自适应计算地下空间点域每种勘察方法的初始基本概率指派(BPA)函数值, 为改进 DS 证据理论算法提供勘察证据数据。

第 5 步: 基于 Kendall 相关系数计算新的 BPA 函数值。根据公式(4)~(8), 修改初始 BPA 函数值, 计算得到新的 BPA 函数值。

第 6 步: 采用 DS 证据理论算法, 合成多证据源证据, 形成岩溶评价指标 m 值。

第 7 步: 重复步骤 4 ~ 6, 遍历勘察工区, 得到地下空间岩溶评价指标数据集 $\{x,y,h,m\}$, 实现岩溶特征级智能融合。

第 8 步: 对岩溶评价指标数据集 $\{x,y,h,m\}$ 进行三维空间插值和网格化, 形成*.vtk 文件, 为岩溶三维图像提供数据。

第 9 步: 在三维图像平台例如 Surfer 软件, 加载 vtk 文件, 即可实现岩溶特征三维图像的可视化。

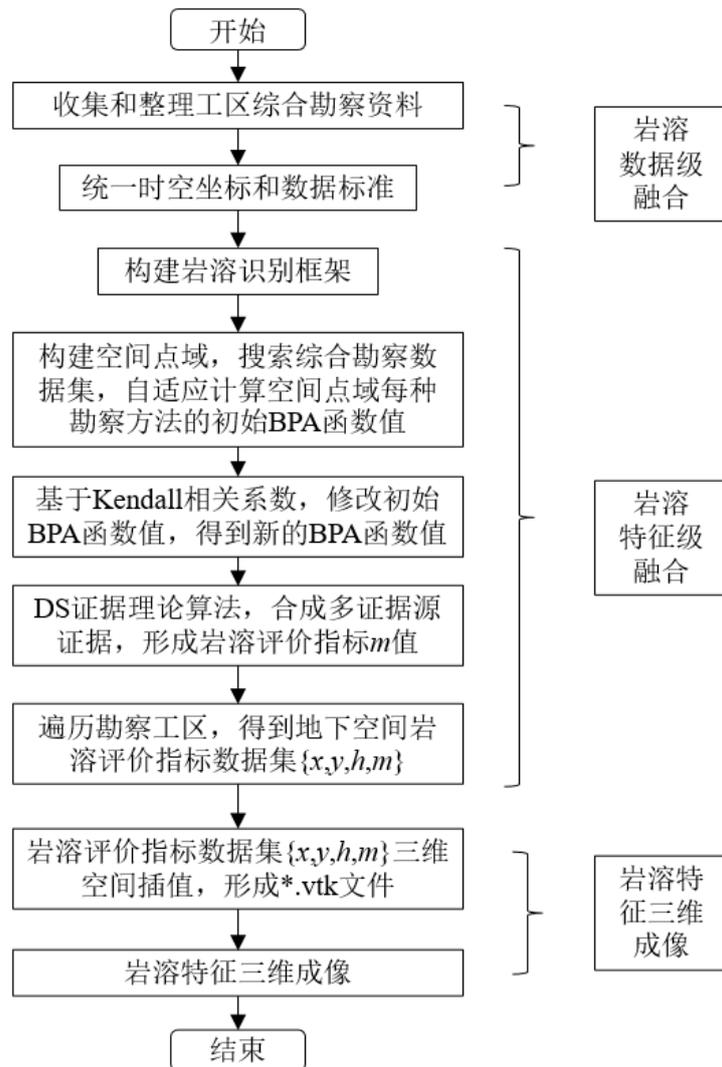


图 3 基于 DS 证据理论的岩溶特征级融合算法与三维成像流程图

Fig.3 Flowchart of Karst feature-level data fusion algorithm and 3D imaging based on DS evidence theory

基于以上流程，采用 Qt 跨操作系统平台的 C++语言开发工具，研发了空地一体化多源异构勘察数据智能融合软件（sSurveyAIfusion），在多个工程进行了测试和应用，取得较好地质效果。

3 应用实例

3.1 区域概况

工区为新建宜涪铁路五峰—恩施南段的拟建跨省道特大桥，位于宜昌市五峰县渔洋关镇境内(如图 4)，桥址区属剥蚀溶蚀低山地貌区，该桥设计桥长 641.27m。



图 4 工区地理位置示意图

Fig. 4 Geographical location diagram of the work area

桥址区位于长乐坪背斜的南翼。背斜核部为寒武系地层，翼部由奥陶、志留系地层组成。在核部常发育密集的棱形网状节理群，以及二次纵张断裂和压性或压扭性断裂的组合物。东段南翼，被九姊妹尖断裂切割。桥址区内断裂构造主要为仙女山正断层，桥梁于 DKXX+560 跨越该断层。

根据勘察资料，桥址区的岩土层按其成因分类主要有第四系全新统填筑土(Q_4^{ml})杂填土，第四系冲洪积层(Q^{al+pl})粉质黏土，第四系残坡积层(Q^{el+dl})粉质黏土、碎石土，奥陶系下统南津关组(O_{1n})灰岩、泥质灰岩，寒武系上统三游洞组(ϵ_{3sn})白云质灰岩等。奥陶系下统南津关组(O_{1n})主要为溶蚀性灰岩和灰岩。溶蚀性灰岩青灰色，强风化，隐晶质结构，节理裂隙发育，岩芯多呈短柱状、块状，溶蚀

裂隙发育。寒武系上统三游洞组(ϵ_{3sn})主要为溶蚀性白云质灰岩和白云质灰岩。溶蚀性白云质灰岩青灰色,强风化,隐晶质结构,节理裂隙发育,溶蚀强烈,岩芯多呈短柱状、块状,溶蚀裂隙发育。

桥梁主要跨越碳酸盐岩地区,岩溶较发育,地表溶蚀作用明显,多见溶沟、溶槽、溶洞,洼地内分布有大量溶洞、落水洞和岩溶漏斗。根据钻孔揭露,桥址区可溶岩主要为奥陶系下统南津关组(O_{1n})灰岩、泥质灰岩,寒武系上统三游洞组(ϵ_{3sn})白云质灰岩,已钻120个钻孔,见溶洞的钻孔58个,钻孔见洞率为48.3%。溶洞多呈多层分布,最大洞高达42m,溶洞多为无充填,半充填~全充填溶洞的充填物主要为黏性土及灰岩碎块石。

根据《铁路工程不良地质勘察规程》(TB10027-2022)和《建筑地基基础设计规范》(GB50007-2011)判定:场地岩溶属裸露型~浅覆盖型,线岩溶率为10.4%,见洞率为48.3%,桥址区岩溶发育等级为岩溶强发育。

3.2 数据整理

该区实施的综合勘察方法有带状工程地质调绘、遥感解译、工程地质钻探、物探高密度电法、物探瞬变电磁法等手段,如表3所示。

表3 勘察完成工作量一览表

Table 3 List of comprehensive survey workload

工作项目	单位	工作量
带状工程地质调绘	km	0.64
遥感解译	km ²	0.8
工程地质钻探	m/孔	5932.63/120
物探高密度电法	km	1.43
物探瞬变电磁法	km	0.55

收集和整理了工区地形数据、遥感解译信息、工程地质调绘成果、物探解译成果以及钻探等多源异构综合勘察数据,具体情况如下。

(1) 勘察数据库导出3个excel文件格式的钻孔数据,包括工点范围内的钻孔坐标数据、标准地层数据和实际钻孔地层数据。

(2) 宜涪铁路高分辨率地形数据和工点范围数据。

(3) 遥感和工程地质调绘解译的断层平面数据。

(4) 物探高密度电法测线坐标和解译溶洞、断层数据。

(5) 物探瞬变电磁法测线坐标和解译溶洞、断层数据。

由于不同勘察方法提供的勘察成果信息维度不一样，因此需对原始的勘察数据进行预处理。钻孔提供的是钻孔所揭露的地下地层、溶洞等信息，遥感和工程地质调绘提供的是断层、岩溶洼地、地表地层分布等信息，物探高密度电法、瞬变电磁法提供的是物探测线地下地层、断层、岩溶破碎带等信息。不同勘察方法提供的成果数据格式也很不一样。钻孔数据一般是点数据格式，遥感和工程地质调绘数据一般是平面数据格式，物探方法数据一般是剖面数据格式。这些不同勘察成果数据，具有多源、异构、数据格式不一样、反映地下地层、断层、岩溶等不良地质体的信息维度不同的特点。进行智能融合之前，采用统一时空坐标和数据标准，进行数据转换和提取。

3.3 数据级融合

采用项目研究的智能融合软件 sSurveyAlfusion 进行数据转换和提取，获取统一时空坐标的勘察数据。

工区高程 Dem 三维等值线图如图 5 所示。从图可以看出，工点范围内地形起伏较大，发育有一条河流。

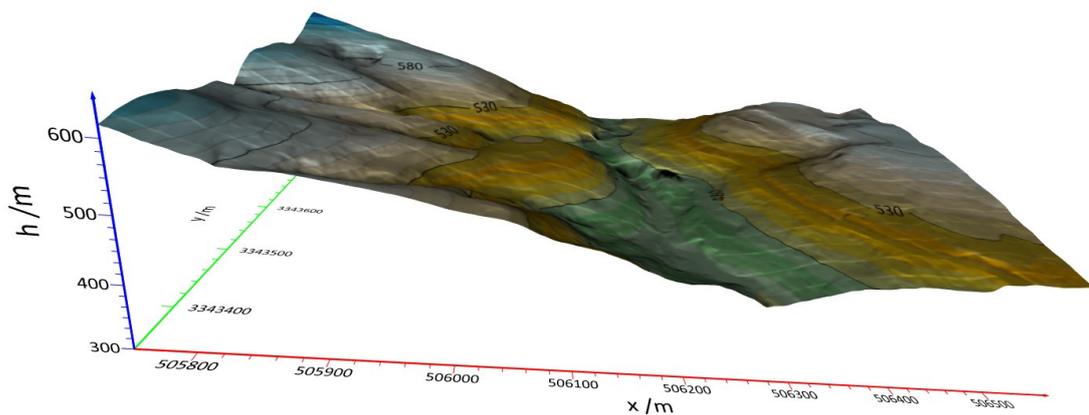


图 5 工区高程 Dem 三维等值线图

Fig. 5 3D contour map of Dem elevation at the work area

钻孔岩溶数据转换与提取，是根据输入钻孔坐标、标准地层表、实际钻孔地层三个 excel 文件进行转换得到。三个钻孔信息文件均可从勘察数据库中导出或

人工整理得到。由于钻孔所揭露的岩溶发育程度是语言类描述，需要将语言类描述转换为数值类型数据，以方便智能融合算法使用。这里采用设置溶洞编码值、溶蚀性灰岩编码值和其他岩性编码值的方法。溶洞编码值设置为 1.0，溶蚀性灰岩编码值设置为 0.5，其他岩性编码值设置为 0，即自动搜索岩心的语言类关键词，匹配以上编码值进行钻孔岩溶数字化转换。

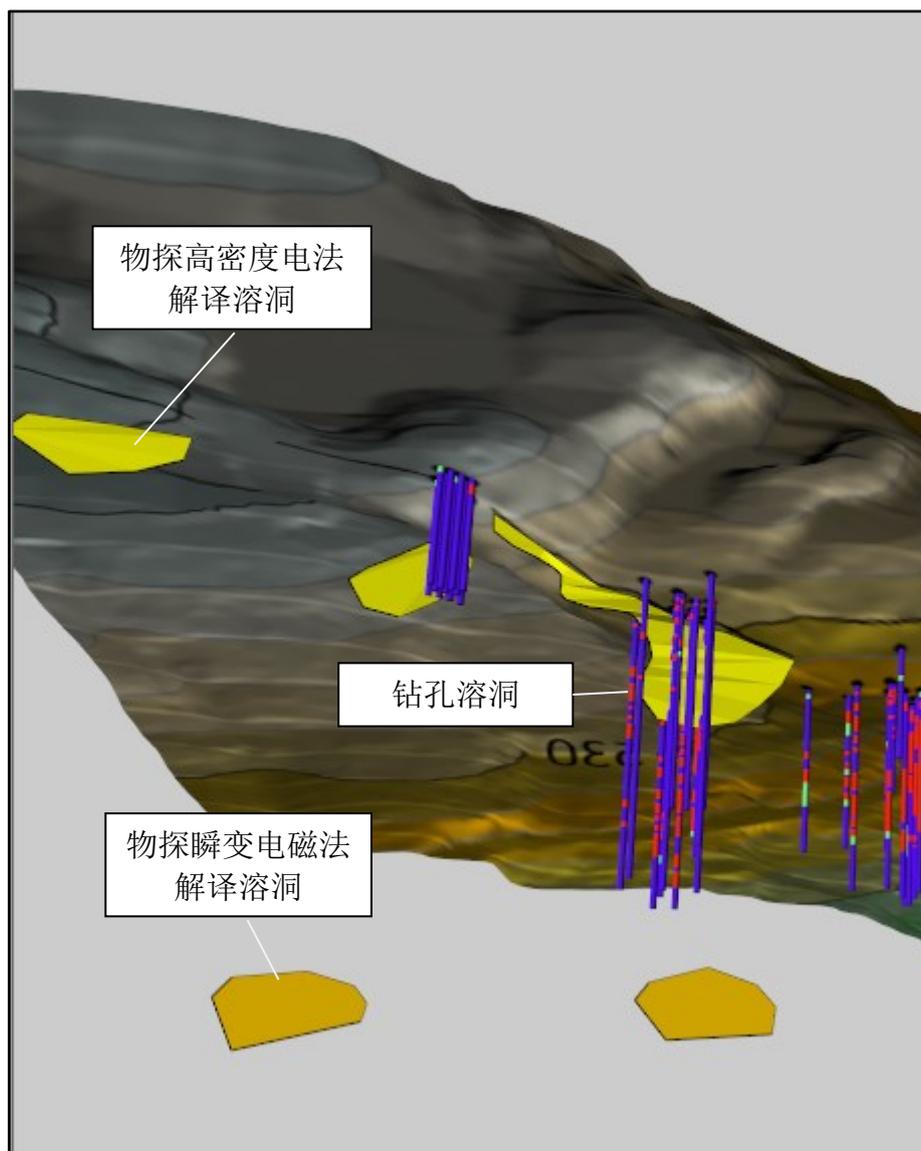


图 6 钻探、物探高密度电法、瞬变电磁法溶洞三维数据级融合图

Fig.6 3D data-level fusion map of Karst by drill hole, geophysical electrical resistivity tomography and transient electromagnetic methods

钻孔岩芯：红色表示溶洞；绿色为溶蚀性灰岩；蓝色为其他岩性（非岩溶）

智能融合软件自动分析三个 excel 文件的钻孔信息，生成钻孔溶洞 excel 文件。这个文件包含 4 个子表，分别是 Collars、Survey、Interval 和 Point 子表，可在 Surfer 软件中显示钻孔、钻孔岩溶信息。

物探岩溶数据转换，是智能融合软件自动根据物探测线坐标数据、物探解译成果图的溶洞数据，将物探解译图上的溶洞数据转换为统一坐标的数据。物探溶洞数据转换成功后，软件自动生成溶洞数据和溶洞边界节点数据。可用三维图形软件继续加载溶洞边界节点数据，生成岩溶数据级融合图，如图 6 所示。

从钻探、物探高密度电法、瞬变电磁法溶洞三维数据级融合图可以直观看出，不同勘察方法揭示的地下溶洞分布具有不同的特征。物探瞬变电磁法探测深度比较深，可以揭示深部地下溶洞的分布情况；物探高密度电法探测深度比较浅，可以揭示浅部地下溶洞的分布情况。物探高密度电法、瞬变电磁法等都是间接解释地下溶洞分布情况的方法，其优点是既可以了解溶洞的纵向分布，也可以了解溶洞的横向分布，缺点是物探解译结果具有多解性和不确定性。钻孔可以直接揭示地下溶洞的纵向分布情况，但横向连续性不足。

从图 6 可以看出，在有些区域，物探高密度电法解译成果显示有岩溶，而钻孔资料显示无岩溶；有些区域，钻孔资料显示有岩溶，而高密度电法解译成果显示无岩溶，综合勘察数据解译成果存在冲突。从多源数据融合 DS 证据理论角度来说，钻孔资料是一种证据，物探高密度电法也是一种证据，物探瞬变电磁法也是一种证据。当证据存在冲突时，可以采用 DS 证据理论来合成证据，对地下岩溶等不良地质体进行综合评价。

3.4 岩溶特征级融合

在综合勘察资料的数据级融合基础上，采用智能融合软件 sSurveyAIfusion，基于 Kendall 相关系数的改进 DS 证据理论算法，对综合勘察数据进行岩溶特征级融合。输入为遥感解译、工程地质调绘、钻探、物探高密度电法和瞬变电磁法解译成果数据，空间点域控制参数为：控制半径 2 m，控制点数为 50。输入好参数后，软件自动进行岩溶特征级融合，生成工区岩溶评价数据集。在 Surfer 软件中对岩溶评价参数数据集进行三维空间插值和网格化，形成*.vtk 文件。输入 vtk 文件，可显示岩溶特征的三维可视化图，如图 7 所示。

对比岩溶特征级融合图（图 7）与数据级融合图（图 8）和可以看出，在数据级融合图中，物探高密度电法解译的溶洞分布，与钻孔揭示的溶洞信息有不一致的地方，如图右上角所示。在岩溶特征级融合图中，已根据 DS 证据理论，融合了各种勘察数据信息，消除了物探高密度电法与钻探揭示溶洞的信息冲突，提高了岩溶不良地质体的勘察精度。

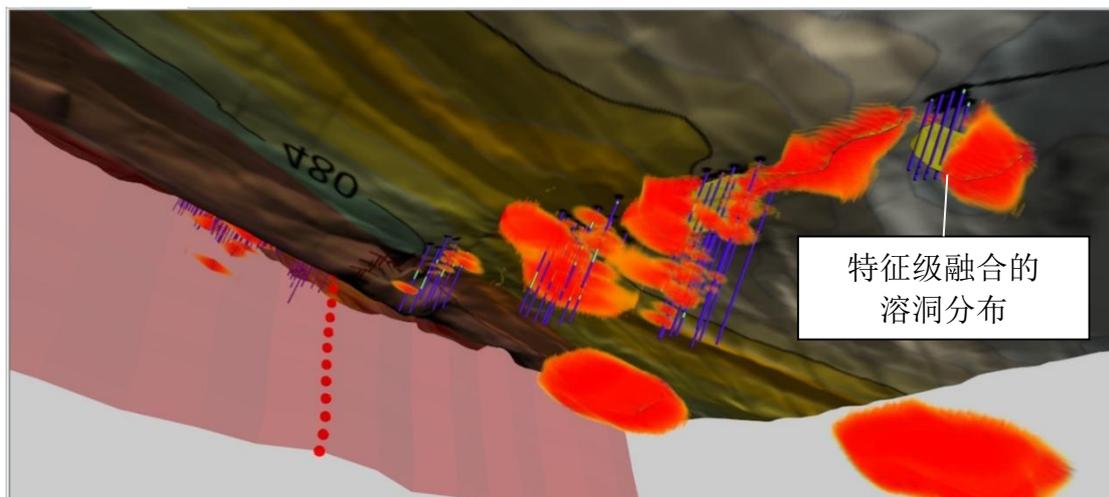


图 7 岩溶特征级智能融合局部三维图

Fig.7 3D map of Karst feature-level fusion results

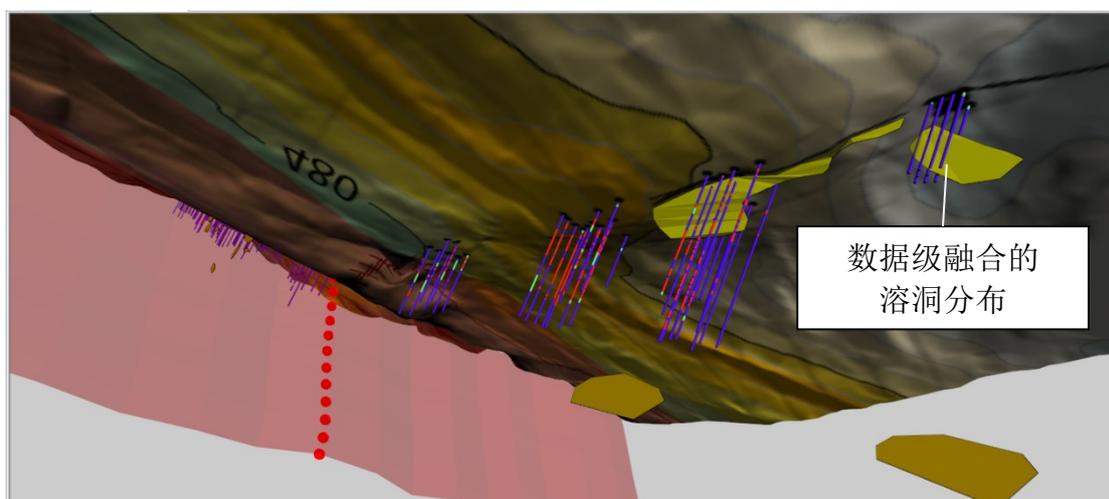


图 8 岩溶数据级智能融合局部三维图

Fig.8 3D map of Karst data-level fusion results

图 9 是工区铁路沿线的岩溶和断层融合特征图。基于改进 DS 决策理论算法的岩溶特征级融合，智能融合了钻孔、物探高密度电法和物探瞬变电磁法岩溶解译成果，获取了工区岩溶特征级融合三维图，更形象直观和真实地揭示了地下岩

溶的三维分布，取得了较好地质效果。

将空天地一体化综合勘察数据智能融合的效率，与人工融合方式进行效率对比。在测试条件基本相同的软硬件、数据环境下，以 1 名高级工程师、2 名初级工程师为测试人员，现场采取手动融合和智能融合的方式对测试工点的多源异构综合勘察数据进行人工融合和智能融合测试。在能够达到基本相同处理准确度的前提条件下，记录测试过程中各流程、各环节测试所需的时间，以融合效率为定量评价指标，最后取平均值作为具备一般业务水平能力的地质人员开展融合勘察数据所需的时间。

测试结果表明，具备一般业务水平的地质人员基于智能融合方式，对跨省道特大桥测试工点进行融合的所需的平均耗时 148 分钟，而人工手动融合方式（综合解译）平均耗时 244 分钟，效率提升百分比计算方法为：

$$\text{智能融合效率提升百分比} = (\text{人工耗时} - \text{智能耗时}) / \text{人工耗时} \times 100\%$$

经计算，智能融合方式，融合效率提升 39.34%。其他工点测试结果与该工点基本相同。

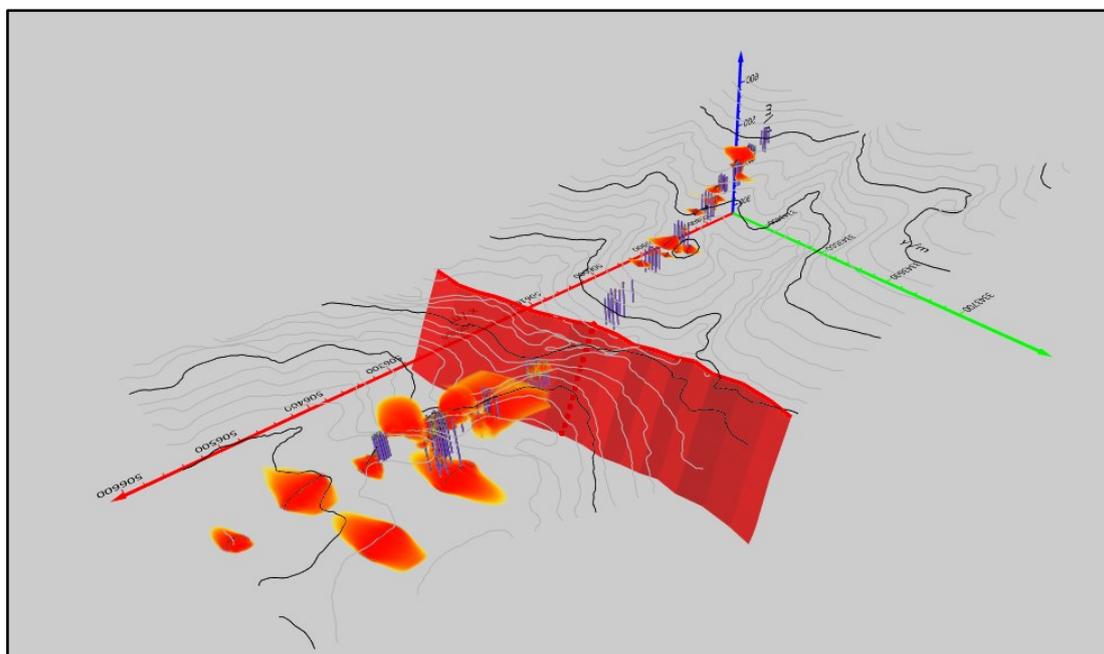


图 9 地形、断层、溶洞智能融合三维图

Fig.9 3D map of terrain, fault, and Karst data-level fusion results

4 结论与展望

岩溶是一种典型的地下不良地质体，是陆路交通工程潜在安全隐患。钻孔探测岩溶存在“一孔之见”具有局限性，地球物探探测成果具有多解性，遥感和工程地质调绘成果在地表的信息较准确，但对地下岩溶的分布往往是定性解释。为此，本文尝试构建包括钻孔、物探等多源地质数据特征级融合框架，用于描绘地下空间岩溶不良地质体的空间位置以及几何特征。该框架融合多源勘察数据，尝试解决钻探的局限性和地球物理探测成果的多解性带来的难以探测地下岩溶体的问题，引入 Kendall 相关系数来处理不确定性和多源数据间的冲突信息，用实际案例来说明多源数据智能融合决策提高岩溶不良地质体的勘察精度和融合效率。本文提出的基于 Kendall 相关性系数的改进 DS 证据理论算法，实现了地下岩溶不良地质体信息的综合评价，获取了地下空间岩溶特征三维图像，取得的主要结论如下。

(1) 初步形成了一套空天地一体化综合勘察数据的岩溶数据级融合、特征级智能融合和三维成像的技术方案。首先，采用统一时空坐标转换和数据标准，对工区的遥感解译、工程地质调绘、钻孔、物探高密度电法、瞬变电磁法勘察成果资料，实现了工区空天地一体化综合勘察信息的数据级融合。然后，构建工区岩溶识别框架，根据地下空间点域综合勘察方法的初始基本概率指派（BPA）函数赋值法，自适应快速计算空间点域的钻孔、物探高密度电法、瞬变电磁法资料的 BPA 函数值，基于 Kendall 相关性系数的改进 DS 证据理论算法对综合勘察资料进行岩溶评价，得到点域岩溶评价概率因子。采用三维空间插值和网格化，在三维图像平台上获得了地下岩溶特征三维成像图。

(2) 基于 Kendall 相关性系数的改进 DS 证据理论算法，有效解决了综合勘察证据间的高度冲突问题，形成对岩溶目标体的智能决策，实现了综合勘察解译成果的岩溶地质信息特征级融合，以及融合结果的三维成像，提高了地下岩溶不良地质体勘察的可靠性和精度。

(3) 编制了空天地一体化综合勘察数据智能融合软件。对空天地一体化综合勘察数据智能融合的效率，与人工融合方式进行效率对比，融合效率提升 30% 以上。

本文以桥梁工程为例，在岩溶发育地区，运用本文提出的岩溶特征智能融合和三维成像方法，对多种综合勘察资料提供的岩溶信息进行处理，能够得到工程区地下岩溶发育的特征。这种关键信息的获取对后续桥梁的整体结构形式、孔跨布置以及基础类型具有重要工程指导意义，能够为避开岩溶灾害区以及节省工程投资提供具有充足可信度的综合信息。在铁路、公路工程勘察中，受成本和工期制约，综合勘察手段数量仍有限，进一步加大勘察手段和工作量，获取更多地下岩溶评价指标，是提高岩溶特征级融合和三维成像精度的基础。另一方面，采用新的智能融合算法，对多勘察成果资料进行智能融合，是今后综合勘察的发展趋势。

Reference:

- Bai, C. H., 2021. Research on Intelligent Prediction Method of Hazard Risk of Water and Mud Inrush in Karst Tunnel Based on Machine Learning. *Thesis of Master Degree*, 35-55 (In Chinese with English abstract).
- Chen, N., Xie, W., 2022. Research on Risk of Liquidity Cargo Shipping Based on Combined Weighting DS Evidence Theory. *Journal of Safety and Environment*, 22(02):623-633 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Z., Yuan, H., Huang, P. Y., et al., 2023. Safety Risk Evaluation of Tunnel Collapse Based on Bayesian Network of Improving Conditional Probability. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 54(01):327-340 (in Chinese with English abstract).
- Dempster, A. P., 1967. Upper and Lower Probabilities Induced by a Multi-Valued Mapping. *Annals of Mathematics Statistics*, 38(4):325-339.
- Hou, S. J., 2023. Study on the Prediction Model of Surrounding Rock Deformation in Soft Rock. *Modern Tunneling Technology*, 60(06):151-164 (in Chinese with English abstract).
- Hu, L. G., Huang, L., Wen, J. G., 2023. Discussion on Geophysical Exploration Technology and Digital Development in Geotechnical Engineering Investigation -Take a Karst Area in Wuhan as an Example. *Informatization of China Construction*, 29(07):84-87 (In Chinese with English abstract).

- Huang, Z. Y., Lin, R. M., Liu H., et al., 2024. Multi- source network security data fusion model based on DS evidence theory. *Modern Electronics Technique*, 47(07):115-121(in Chinese with English abstract).
- Lei, W. P., Yin, J., Chen, S. S., 2022. Application of Comprehensive Electrical Methods in Karst Exploration of Water Diversion Lines. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 43(S2):23-26,31 (In Chinese).
- Li, B. C., Wang, B., Wei, J., 2002. An Efficient Combination Rule of Evidence Theory. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 17(01):33-36(in Chinese with English abstract).
- Li, J., Yang, X. Z., Zhou, L., 2019. Research on Target Identification Based on Improved DS Evidence of Multi-period Fusion Method. *Fire Control & Command Control*, 44(07):43-48 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. L., Guo, K. H., 2010. Combination Rules of D-S Evidence Theory and Conflict Problem. *Systems Engineering - Theory & Practice*, 30(08):1422-1432(in Chinese with English abstract).
- Luo, L. R., Liu, Z. G., 2011. Comparative Analysis of Geological Prediction Methods in Karst Areas. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 33(S1): 351-355 (In Chinese with English abstract).
- Luo, Y. M., 2024. Improvement of Dempster-Shafer Evidence Theory and Its Application in Debris Flow Hazard Assessment Model. *Thesis of Master Degree*, 16-33 (in Chinese with English abstract).
- Peng, C., 2016. The Combined Application of Seismic Imaging Method and High Density Electric Method to the Survey of Karst Collapse Areas. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 13(01):60-63 (In Chinese with English abstract).
- Shafer, G. A., 1976. Mathematical Theory of Evidence. *Princeton University Press*, Princeton, 1-101.
- Song, X. P., Xiao, J. Y., Wu, K. F., et al, 2021. Improved D-S Evidence Theory Algorithm for Solving Conflict Evidence Combination Problem. *Journal of Hubei Minzu University(Natural Science Edition)* , 39(02):180-186(in Chinese with English abstract).

- Sun, Q., Ye, X. Q., Gu, W. K., 2000. A New Combination Rules of Evidence Theory. *Acta Electronica Sinica*, 28(08):117-119(in Chinese with English abstract).
- Sun, Y. J., Yu, G. Z., Shi, G., et al., 2001. The Cross-well Seismic Computerized Tomography Technology and it's Application in The Cavern Survey. *CT Theory and Applications*, 15(04): 10-13 (In Chinese with English abstract).
- Wang A. N., Li, Y. S., He, Z., 2020. State Evaluation of Fire Control System Based on Fusion of D-S Evidence Theory and Rough Set. *Control Engineering of China*, 27(12):2176-2184 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H., Wei, B., Li, S. Q., 2024. Fault Diagnosis of a DC Distribution Network Based on Bayesian Network Information Fusion. *Power System Protection and Control*, 52(05):61-72 (in Chinese with English abstract).
- Wang, K., 2024. Integration of Some Survey Methods to Detect the High-Speed Railway Tunnel Basement Karst: A Case Study of the Huajiashan Tunnel. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 21(05):810-819 (In Chinese with English abstract).
- Wang, X., Xu, T., Ran, J., et al., 2023. Identification and Evaluation on Shield Construction Risk of Metro Tunnel in Karst Area. *Railway Investigation and Surveying*, 49(03):5-11 (in Chinese with English abstract).
- Yager, R. R., 1987. On the D-S framework and new combination rules. *Information Sciences*, 41(2):93-138.
- Yang, C. J., Pu, C., Xiong, H. M., et al., 2024. Research on Inrush Water Prediction Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process. *Shanxi Architecture*, 50(19):167-170 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y. H., Huang, Z. F., 2001. Karst Geological Problems and Their Countermeasures in Southern Hubei Section of Beijing-Zhuhai Speed way. *Earth Science—Journal of China University of Geoscience*, 26(04): 361-364 (In Chinese with English abstract).
- Zadeh, L. A. 1984. Review of Shafer's a mathematical of evidence, *AI Magazine*, 5(3):81-83.
- Zhang, H., Lu, J. G., Tang, X. H., 2020. An Improved DS Evidence Theory Algorithm

for Conflict Evidence. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 46(03):616-623(in Chinese with English abstract).

Zhang, Y., 2021. The Application of Integrated Geophysical Prospecting Technology In Karst Exploration Of Railway Subgrade. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 18(5):738-743 (In Chinese with English abstract).

附中文参考文献:

柏成浩, 2021. 溶隧道突水突泥灾害风险智能预测方法研究. 硕士学位论文, 35-55.

陈宁, 谢旺, 2022. 基于组合赋权-DS 证据理论的易流态化货物海运风险研究. *安全与环境学报*, 22(02):623-633.

陈钊, 袁航, 黄鹏宇, 等, 2023. 基于改进条件概率的贝叶斯网络隧道坍塌安全风险评价. *中南大学学报(自然科学版)*, 54(01):327-340.

侯守江, 2023. 基于多元算法融合的软岩隧道围岩变形预测模型及应用研究. *现代隧道技术*, 60(06):151-164.

胡励耘, 黄亮, 文家刚. 2023. 论岩土工程勘察中物探技术及数字化发展——以武汉某岩溶地段为例. *中国建设信息化*, 29(07):84-87.

黄智勇, 林仁明, 刘宏, 等, 2024. 基于 DS 证据理论的多源网络安全数据融合模型. *现代电子技术*, 47(07):115-121.

雷伟平, 尹剑, 陈爽爽, 等, 2022. 综合电法在引水线路岩溶勘察中的应用[J]. *水利水电快报*, 43(S2):23-26,31.

李弼程, 王波, 魏俊, 等, 2002. 一种有效的证据理论合成公式. *数据采集与处理*, 17(01):33-36.

李捷, 杨雪洲, 周亮. 2019. 基于改进 DS 理论多周期数据融合的目标识别方法. *火力与指挥控制*, 44(07):43-48.

李文立, 郭凯红, 2010. D-S 证据理论合成规则及冲突问题. *系统工程理论与实践*, 30(08):1422-1432.

罗利锐, 刘志刚, 2011. 岩溶地区超前地质预报方法对比分析. *岩土工程学报*, 33(S1): 351-355.

罗雨梦, 2024. D-S 证据理论的改进及其在泥石流危险性评价模型中的应用. 硕士

- 学位论文, 16-33.
- 彭超, 2016. 地震映象法与高密度电法在岩溶塌陷勘察中的联合应用. 工程地球物理学报, 13(01):60-63.
- 宋香鹏, 肖建于, 吴克凤, 等, 2021. 解决冲突证据合成问题的改进 D-S 证据理论算法. 湖北民族大学学报(自然科学版), 39(02):180-186.
- 孙全, 叶秀清, 顾伟康, 2000. 一种新的基于证据理论的合成公式. 电子学报, 28(08):117-119.
- 孙跃军, 俞国柱, 石桂, 等. 2001. 井间地震层析成像技术及其在岩溶勘察中的应用. CT 理论与应用研究, 15(04): 10-13.
- 王媛娜, 李英顺, 贺喆, 2020. D-S 证据理论融合粗糙集的火控系统状态评估. 控制工程, 27(12):2176-2184.
- 王鹤, 韦搏, 李石强, 等, 2024. 基于贝叶斯网络信息融合的直流配电网故障诊断方法. 电力系统保护与控制, 52(05):61-72.
- 王凯, 2024. 多种勘察方法探测高铁隧道基底岩溶—以华家山隧道为例. 工程地球物理学报, 21(05):810-819.
- 王祥, 徐甜, 冉军, 等. 2023. 岩溶地区地铁隧道盾构施工风险识别与评价研究. 铁道勘察, 49(03):5-11.
- 杨超杰, 蒲超, 熊昊旻, 等, 2024. 基于模糊层次分析法的涌突水预测研究. 山西建筑, 50(19):167-170.
- 杨银湖, 黄正发, 2001. 京珠线湖北省南段岩溶地质问题与勘察对策. 地球科学, 26(04):361-364.
- 张欢, 陆见光, 唐向红, 2020. 面向冲突证据的改进 DS 证据理论算法. 北京航空航天大学学报, 46(03):616-623.
- 张业, 2021. 综合物探方法在铁路路基岩溶勘察中的应用, 工程地球物理学报, 18(5):738-743.

