https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.317

考虑阈值空间变异性的地震跨孔CT与钻孔数据融合岩溶场地三维建模

程 昊[1,2],张 抒[2*],朱 蕊[2],赵小波[1],秦 宇[1]

1. 中交第二航务工程勘察设计院有限公司,湖北武汉 430071
2. 中国地质大学(武汉)湖北巴东地质灾害国家野外科学观测研究站,湖北武汉 430074

摘 要: 针对现有岩溶场地三维地质建模多基于钻探或物探单一类型探测数据,从而导致因钻孔数据密度不足或物探成果精度低、存在多解性等,致使模型精度不足.以武江某船闸下闸首区为典型岩溶场地三维建模研究区域,提出一种考虑波速阈值空间变异性,基于地震跨孔CT与钻孔数据融合的岩溶三维隐式建模方法.通过提取反演波速数据体虚拟钻孔波速数据,应用实测钻孔数据进行标定,形成阈值样本,考虑溶洞边界波速阈值的空间变异性,采用多种空间插值方法建立溶洞边界波速阈值三维数据体.使用该阈值数据体作为判据,判识波速数据体中的溶洞范围和分布,从而建立岩溶场地三维地质模型.从多种插值融合建模方法结果及与传统方法模型对比可知,(1)武江某船闸下闸首区溶洞系统复杂,在高程33~64 m范围内溶洞极为发育,水平向溶洞优势发育特征明显,垂向发育特征不明显.近河道一侧溶洞密度明显增大,地表径流影响明显.(2)对比反距离加权峰值法、克里金峰值法和反距离加权融合法,克里金融合法的单孔误差率和平均误差率均为最小,其建模精度优势明显.(3)通过对验证钻孔的预测结果表明,该融合方法能准确预测验证钻孔溶洞分布,其中克里金融合法对验证钻孔的预测误差率小于6%,相对其他方法在建模精度上具有明显优势.研究表明,基于地震跨孔CT与钻孔数据融合的岩溶三维建模方法能够准确建立岩溶场地三维地质模型,为岩土工程设计计算和岩溶塌陷灾害风险评估等后续工作提供了技术支持.

关键词: 岩溶;三维建模;地震跨孔CT;数据融合;工程地质.

中图分类号: P642.25 **文章编号:** 1000-2383(2026)10-3895-17 **收稿日期:** 2026-07-03

Karst Site 3D Modeling Using Integration of Seismic Cross-Hole CT and Borehole Data with Threshold Spatial Variability

Cheng Hao[1,2], Zhang Shu[2*], Zhu Rui[2], Zhao Xiaobo[1], Qin Yu[1]

1. *CCCC Secound Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan* 430071, *China*
2. *Badong National Observation and Research Station of Geohazards, China Universuty of Geosciences (Wuhan), Wuhan* 430074, *China*

Abstract: The accuracy of 3D geological models for karst sites is often undermined by an over-reliance on single-source data, such as sparse boreholes or low-accuracy geophysical interpretations that are subject to non-uniqueness. An implicit 3D geological modeling method for karst sites based on the integration of borehole and seismic cross-hole CT data with wave speed threshold

基金项目: 中交第二航务工程勘察设计院有限公司博士后科研项目(No. RP2024043683);国家自然科学基金面上项目(No. 425877208).
作者简介: 程昊(1988-),男,博士,主要从事三维地质建模方法,岩土有限元分析计算等方面研究. E-mail: 875549311@qq.com
* **通讯作者:** 张抒(1986-),女,副研究员,博士,主要从事地统计、岩土参数空间变异性等方面研究. E-mail: szhang@cug.edu.cn

引用格式: 程昊,张抒,朱蕊,赵小波,秦宇,2026.考虑阈值空间变异性的地震跨孔CT与钻孔数据融合岩溶场地三维建模.地球科学,51(10):3895-3911.

Citation: Cheng Hao, Zhang Shu, Zhu Rui, Zhao Xiaobo, Qin Yu, 2026. Karst Site 3D Modeling Using Integration of Seismic Cross-Hole CT and Borehole Data with Threshold Spatial Variability. *Earth Science*, 51(10): 3895-3911.

spatial variability has been proposed, associated with the lower lock head zone of a ship lock in the Wujiang River as a typical karst site. The threshold data samples of wave speed from karst caves have been evaluated using borehole data, and a 3D threshold data volume of wave speed for karst caves has been established by considering the spatial variability of wave speed threshold data. Consequently, using 3D threshold data volumes with multiple spatial interpolation methods to identify the distribution and extent of caves based on the CT data volume, a 3D model of the limestone and cave system in the lower lock head zone was constructed. Results show follows. (1) The karst cave system in the lower lock head zone of a ship lock located on the Wujiang River exhibits complex characteristics. Caves are extensively developed within the elevation range of 33 m to 64 m, with pronounced preferential development in the horizontal direction, whereas vertical development is less obvious. Cave density is significantly higher on the side adjacent to the river channel, indicating a noticeable influence of surface runoff. (2) Among the four methods—inverse distance weighting (IDW) peak, ordinary kriging (OK) peak, IDW fusion, and OK fusion—the OK fusion method exhibited the lowest single-hole and mean error rates, indicating its superior modeling accuracy. (3) Based on validation borehole predictions, the fusion method can accurately predict cave distribution. The OK fusion method exhibited a prediction error rate under 6%, which is significantly lower than that of the other methods, highlighting its modeling accuracy advantage. The study demonstrates that a karst 3D modeling method integrating seismic cross-hole CT and borehole data can accurately establish 3D geological models of karst sites, offering valuable technical support for geotechnical engineering design and karst collapse risk assessment.

Key words: karst site; three-dimensional modeling; seismic cross-hole CT; data integration; engineering geology.

0 引言

岩溶(喀斯特)地貌在中国分布广泛,主要集中在广西、广东、云南、贵州等地区.岩溶发育对水运工程建设构成严重威胁,可引发基础承载力不足、地面塌陷、船闸漏水等工程病害.传统的工程地质钻探虽直观可靠具有精度高分层准确的优点,但受场地条件和成本限制,孔距往往较大,数据密度稀疏,针对空间连续性差的溶洞地质体,难以完整刻画孔间溶洞的空间分布及连通情况.地震跨孔CT(Computed Tomography, CT)技术通过在两个或多个钻孔间发射和接收地震波信号,利用射线追踪和层析成像反演算法,获取钻孔间二维或三维的地下介质波速分布图像,具有空间数据密度高的优点,能对钻孔数据有效补盲,但精度相对钻孔较低,具有一定多解性.因此如何将两者有机结合,综合利用两种方法探测结果反映勘区岩溶分布特征.提高岩溶场地勘探成果整体精度是一个需要解决的问题.

与传统二维剖面相比,三维建模能够直观呈现异常体在地下空间的展布情况,从而可以实现多方位、多角度的异常分析与解译,弥补了二维剖面或线状钻孔展示成果信息的局限性,为满足岩溶精细化勘探提供了重要手段.近年来,学者们对岩溶场地三维建模方法进行了大量研究,潘雅静(2021)利用钻孔数据提取溶洞空间位置关键点坐标,生成溶洞椭球面模型进而建立岩溶模型;刘文祥(2019)利用钻孔揭示溶洞剖面绘制空间曲面从而形成溶洞表面,再进一步建立溶洞模型.但基于钻孔数据的岩溶三维建模方法只在钻孔竖向具有精度,无法有效反映孔间溶洞形态;张琦等(2018)和危皓等(2026)基于地震跨孔CT解译剖面和钻孔数据建立溶洞模型,该类方法实则是一种显式建模方法,他保证了与钻孔数据和解译剖面的吻合,溶洞形态具有一定精度,但由于过于依赖人工解译剖面而非实测数据构建孔间模型,因此孔间溶洞模型形态精度不高;陈文学(2021)基于弹性波跨孔CT反演波速以及波速梯度属性,识别与建立溶洞模型;李祖能(2018)应用地震跨孔CT反演波速数据建立岩溶区波速属性三维模型,依据经验和场地波速分布情况确定2 000 m/s为划分阈值,确定小于该阈值的低波速区域即为溶洞区域;胡俊杰等(2022)基于少量钻孔约束,确定电磁波吸收系数4.5 db/m为阈值,从而在跨孔电磁波CT成果基础上圈定溶洞范围;王启明和车爱兰(2019)应用峰值法对地震跨孔CT反演波速数据进行阈值划分,并通过对波速数据体节点数据的二值化和三维重构建立了岩溶场地模型.但这类方法未考虑与钻孔数据的融合,模型结果与钻孔数据符合性较差,溶洞边界阈值假设为定值,这与实际情况不符,未考虑由于场地地质条件的空间差异导致的溶洞边界面波速阈值的空间变异性.

因此,针对上述不足,需研究一种基于钻孔数据与地震跨孔CT数据融合的岩溶场地数据驱动隐

式建模方法.针对多源异构数据融合进行三维建模的研究较多,包括融合显示先验地质数据与隐式建模方法的融合(王丽芳等,2024;杭振泉等,2026)、基于深度学习的多源数据融合建模方法(胡迅等,2024;Lyu *et al.*, 2025;Wang *et al.*, 2025;Xia *et al.*, 2026)、井震融合建模方法(袁照威,2017)等,但这类方法多集中针对钻孔与剖面数据融合、剖面与物探数据融合、钻孔数据约束物探反演解译(孙浩等,2022;王鹏,2025)、地震多参数联合反演建模等方面.但就考虑岩性物探属性阈值空间变异性,创建溶洞边界物探属性阈值数据体,在岩溶模型全域融合钻孔岩性结构信息与物探属性信息进行建模,从而提高岩溶场地模型整体精度的方式未见报道.本文以地震跨孔CT反演波速三维数据体为基础,融合钻孔数据(本文所述钻孔数据均指钻孔岩性结构数据),考虑溶洞边界阈值数据空间变异性,建立溶洞边界波速阈值三维数据体(以下称阈值数据体),以阈值数据体为基础判据,对地震跨孔CT反演波速数据体(以下称反演波速数据体)进行溶洞判识,进而建立岩溶场地三维模型.该方法在模型全空间域综合考虑了地震跨孔CT反演波速和钻孔数据效能,通过对武江某船闸下闸首区域的建模应用,与传统属性建模方法和分别采用反距离加权、克里金插值方法建模结果精度对比、误差分析,以及模型验证表明,该方法获得了优秀的建模效果,提高了岩溶场地勘探成果的整体精度.

1　岩溶建模区域概述

本文以北江航道扩能工程计划新建某船闸工程为例进行岩溶场地三维地质建模.该新建船闸位于广东省韶关市武江江段,武江是北江干流上源河段之一.该新建船闸,设计船舶吨位为1 000吨级.拟建船闸闸室尺度为190 m×23 m×4.5 m.该区域主要发育石炭系下统大塘阶石磴子组(C_1ds)灰岩,受武江等水系影响,岩溶发育.

本文选取该拟建船闸下闸首区域作为岩溶建模研究区域,其东西长52 m,南北宽39.5 m.该区域靠近既有坝体,并且覆盖性岩溶强发育,溶洞多呈串珠状发育,对既有坝体影响较明显.因此为详细探明该区域溶洞发育情况,在该区域设置了6个钻孔,并在其间以三角网状方式布设了7幅地震跨孔CT测试剖面,研究区范围及钻孔、CT剖面布设情况如图1示.

地震跨孔CT测试结果反演波速剖面和钻孔岩性结构如图2所示,其中低波速区域代表溶洞或覆盖层区域,而高波速则代表灰岩分布区域.

综合各钻孔及跨孔CT剖面可知,该场地区域灰岩与覆盖层界面的最高高程低于63 m,溶洞发育最深处高程高于35 m,为聚焦岩溶建模问题,因此本文选取的模型高程范围是33.0～64.5 m,总高度31.5 m.与之相对应,针对对钻孔数据,本文截取了高程64.5 m以下的部分,并对深度较浅的钻孔做了

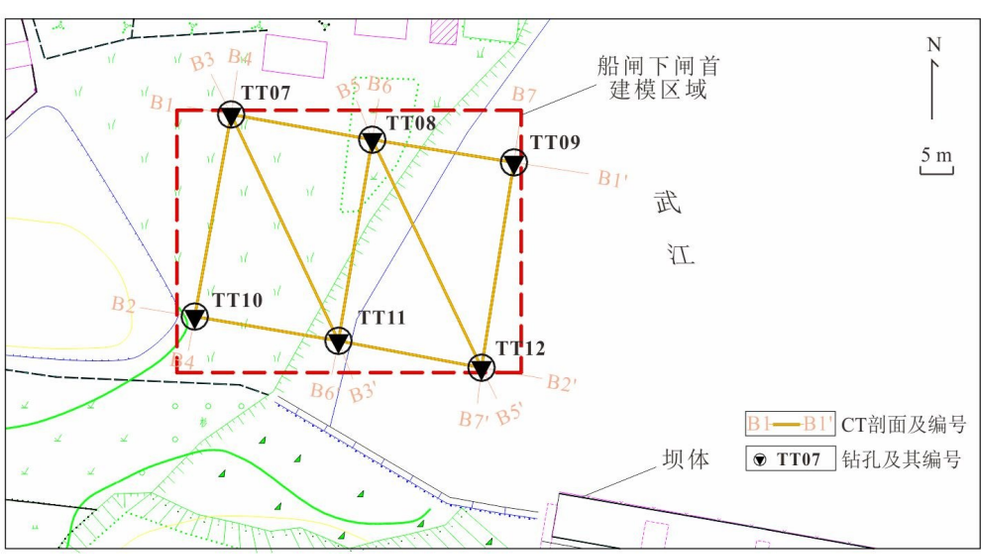

图1　钻孔及CT剖面布置平面图

Fig.1　Borehole and CT profile payout map

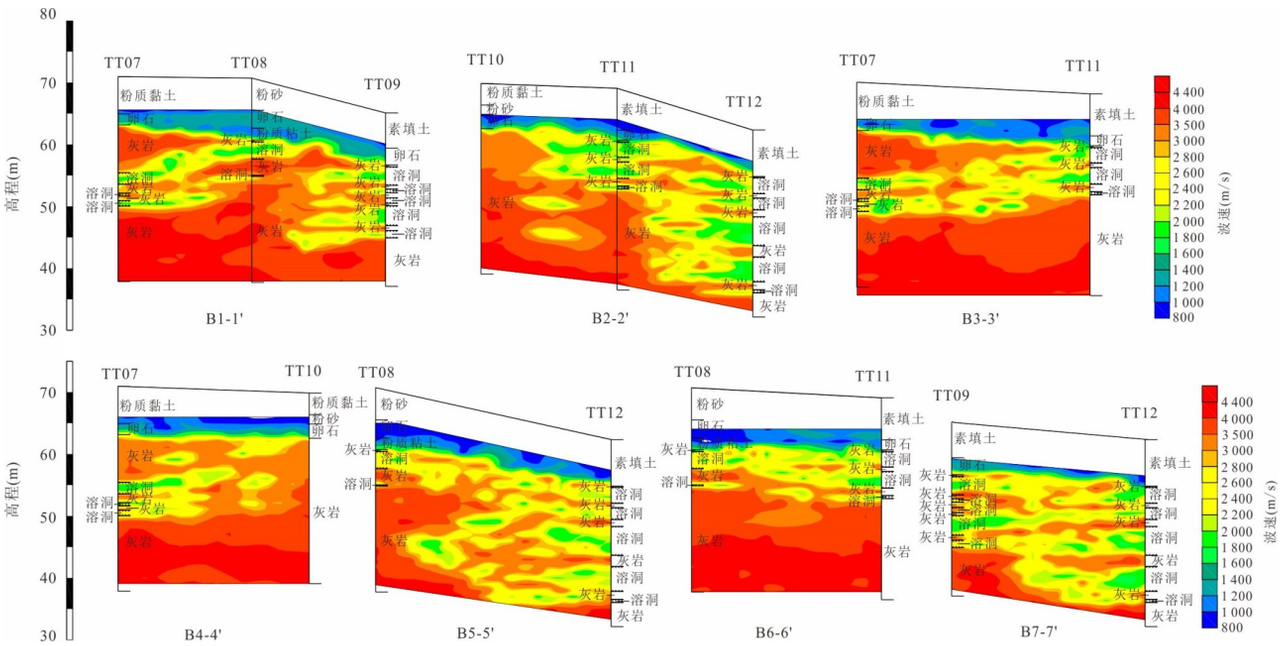

图 2 地震跨孔 CT 反演波速剖面及钻孔岩性结构

Fig.2 Inverted velocity profile from seismic cross-hole CT

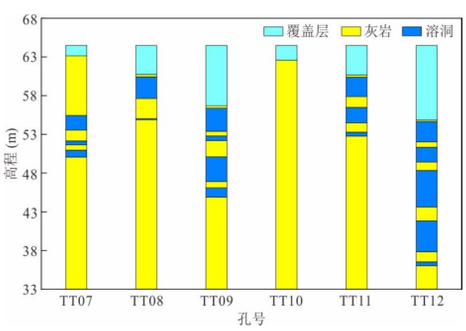

图 3 实测钻孔柱状图

Fig.3 Borehole log

深度补偿,发现在孔底深度以下到高程 33 m 处的模型底界区域内均为灰岩.基于此绘制的实测钻孔柱状图如图 3 所示.

2 基于地震跨孔 CT 与钻孔数据融合的岩溶场地三维建模方法

如上文所述,传统岩溶场地三维地质建模主要有 3 种方式:(1)主要依据钻孔数据进行建模,但孔间溶洞分布缺乏数据依据,稀疏钻孔建模精度差;(2)依据物探反演数据进行属性建模(下称属性建模法),但其结果往往存在与钻孔数据符合性较差且缺乏验证的问题;(3)将物探解译剖面转化为虚拟钻孔,从而将物探数据转化为钻孔同构数据后进行融合建模,但该方法将物探数据的精度和可靠度等级提升到与钻孔数据同等级的层次,且对物探解译成果过于依赖,影响模型精度.为此,针对研究区岩溶发育特征和数据质量,本文提出了一种考虑溶洞边界波速阈值空间变异性的地震跨孔 CT 与钻孔数据融合的岩溶场地三维建模方法(下称融合法),并将建模结果与传统属性建模法结果进行对比,验证了融合法的准确性.

基于地震跨孔 CT 与钻孔数据融合的岩溶场地三维建模方法主要步骤包括:(1)地震跨孔 CT 反演波速三维数据体创建;(2)阈值数据体创建;(3)溶洞判识与模型构建.其中针对反演波速数据体,确定灰岩岩体和溶洞对应的波速阈值是确定溶洞边界和岩溶场地三维建模的关键,传统阈值划分方法主要有综合经验法、峰值法等,其中综合经验法是物探解译中的常用方法,但主观因素过强.王启明和车爱兰(2019)使用了峰值法进行阈值划分,但该方法并未考虑阈值可能存在的空间变异性,更未考虑与钻孔数据的融合,导致实际应用时模型与钻孔实测结果存在较大差异,模型精度较低.

为解决上述问题,本文提出一种考虑溶洞边界波速阈值空间变异性的地震跨孔 CT 反演波速与钻孔数据模型全空间域融合方法.在地震跨孔 CT 测试结果的解译工作中笔者注意到,实测钻孔揭示的溶洞边界所对应的反演波速数值在整个场地范围内并非唯一,由于受溶洞地质条件,如充填物含量、

充填物含水量、孔隙率等因素的影响,且灰岩与溶洞物介质性质差异明显,溶洞边界的物性参数实际上也存在一定的空间变异性.但受到灰岩岩体边界的控制,一定空间范围内灰岩岩体物性状态以及岩溶发育环境条件相对稳定,因此边界面处的物性参数应存在相对稳定的分布规律,满足准二阶平稳假设,与之对应的岩溶区域灰岩与溶洞之间的波速划分阈值是一个区域化变量,可基于一定的空间插值方法构建三维阈值数据体.

基于此,本文在应用反距离加权和普通克里金等空间插值方法建立地震跨孔CT反演波速三维数据体F的基础上,提取F中与实测钻孔揭示的溶洞边界处所对应的数值作为阈值数据样本点,分别应用反距离加权法和克里金法进行空间插值,生成阈值数据体T.这样生成的阈值数据体T便能保证与钻孔实测数据的符合性.

为进一步建立岩溶三维模型C_r,还需对空间节点数据$C_r(i,j,k)$(i,j,k为空间点坐标)进行二值化,和溶洞判识,即对数据体中的每一个网格节点:

$$C_r(i,j,k)=\begin{cases}0,(F(i,j,k)\leqslant T(i,j,k))\\1,(F(i,j,k)>T(i,j,k))\end{cases},\quad(1)$$

其中:$C_r(i,j,k)=0$表示溶洞,而$C_r(i,j,k)=1$处则为灰岩岩体.以$C_r(i,j,k)$作为节点属性数据,进行三维重构,进而建立岩溶场地三维网格实体模型C_r.由于各数据体F、T和Cr采用相同的网格设置,在经过公式(1)赋值后,模型空间中的全部网格节点都已被赋予了$C_r(i,j,k)$属性数据,因此该步骤无需再进行空间插值,直接利用网格节点数据$C_r(i,j,k)$三维重构进而建立岩溶三维模型.其基本步骤流程可参见图4.

上述方法综合应用了地震跨孔CT数据和钻孔数据,利用反演波速数据体作为数据基底,结合基

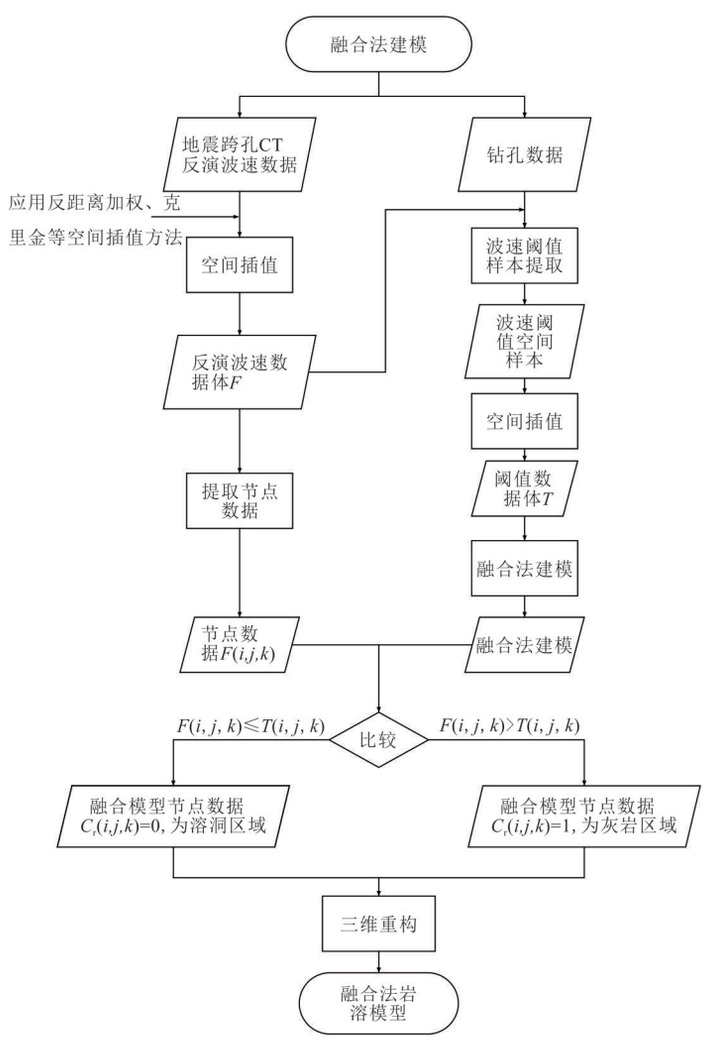

图4　融合法流程

Fig.4　Flowchart of the fusion method

于实测钻孔和波速数据体建立的阈值数据体进行溶洞判识，从而综合考虑了地震跨孔CT与钻孔数据的影响，并避免了对物探人工解译成果的依赖，实现了地震跨孔CT数据与钻孔数据融合岩溶场地三维建模.传统地质勘察工作钻孔数据精度等级高于物探数据精度等级，实测数据（包含钻孔和物探数据）精度等级高于插值数据，而插值数据精度等级高于推测数据.本文提出的融合建模方法在原理层面有效保证了模型与钻孔数据的符合性，而在孔间则借助物探数据有效扩充实测数据样本数量增大样本密度，应用空间插值数据补全无实测数据区域，避免了无依据的推测.该方法不仅实现了自动解译与建模的一体化，还体现了应用钻孔数据对物探成果进行对比解译与修正的基本原则，同时融合应用了多种勘探方法数据样本补充了样本数据密度的不足，满足各层级数据精度原则，从而有效提高岩溶场地三维建模精度.下文将具体针对武江某船闸，分别应用传统属性建模法与融合法建立岩溶场地三维模型并做对比.

2.1 武江某船闸地震跨孔CT反演波速三维数据体创建

建立地震跨孔CT反演波速三维数据体是传统属性建模法和融合法的共同基础.本次武江某船闸下闸首岩溶建模区域全长52 m，宽39.5 m，高31.5 m的长方体，共采集7条跨孔地震CT剖面数据.为建立反演波速空间数据体，需要将剖面反演波速数据展布于建模空间区域.由于本研究仅获取到地震跨孔CT剖面反演波速成果云图，因此需通过提取反演波速云图的色阶界线节点作为数据样本点.而在反演波速云图中，色阶界线是云图中能准确标定的等值线，其波速数值在图中已准确标定，同时，界线上各处节点坐标可从图中准确获取.因此，通过该方法反向获取的数据样本点，其数据是准确可靠的.本文通过该方法共获取研究区离散波速样本数据点28 985个，将获取的全部样本数据经过坐标转换、拼接和碰撞检查等处理，在剖面交叉部位仅保留相同坐标位置的波速均值，并删除重复坐标多余数据，最终将数据样本展布于空间区域中，如图5所示.

为建立反演波速数据体，需基于上述离散样本数据点进行空间插值，从而补全建模区域中的空白空间.选取不同的插值方法对建模结果有显著影响，在工程地质三维建模中，反距离加权平均和克里金插值法都是常用的具有代表性的空间插值方法，反距离加权插值法仅以待插值点与样本点的距离作为唯一权重依据，因此计算速度快、原理简单，但精度有限.而克里金插值法则以基于半变异函数模型进行加权插值，权重由空间协方差结构决定，

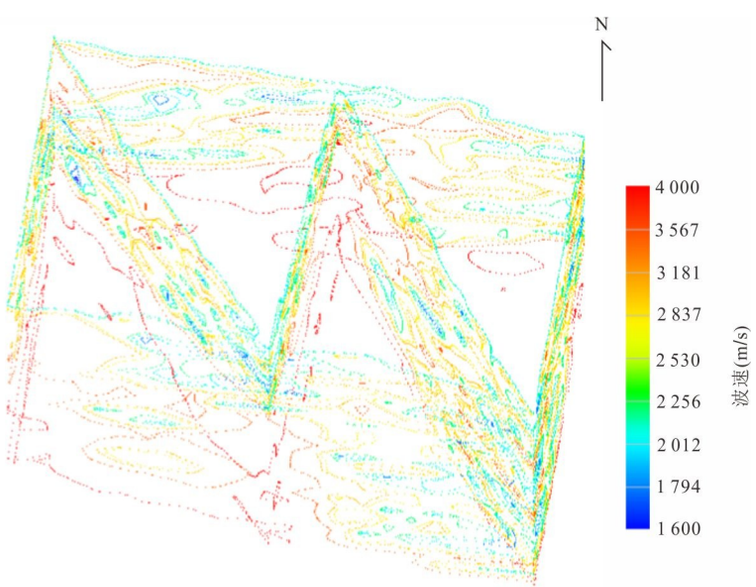

图5 地震跨孔CT反演波速数据样本

Fig.5 Seismic cross-hole CT inverted velocity data sample

确保预测结果是最优线性无偏估计.它利用了采样点之间的空间相关性结构信息,因此插值精度高,但计算方法较为复杂,速度较慢.本文分别选取反距离加权法和普通克里金法对反演波速数据进行空间插值和结果对比,用以探究不同插值方法所建模型的精度差异.

对本区域波速数据进行反距离加权插值时,x,y,z方向分别设置网格数为121, 121, 100,共划分1 464 100个长方体规则网格,单个网格尺寸为0.49 m×0.33 m×0.32 m.搜索领域采用球形,领域半径取34.3 m,最大使用数据量取64,最小数据使用量取8,创建的波速数据体F如图6所示.

采用普通克里金法对本区域波速数据进行空间插值时,首先要对样本数据进行空间相关性分析,拟合其变异函数,变异函数拟合模型采用球状模型,获得拟合结果如图7所示.采用普通克里金法创建的波速数据体F'如图8所示.

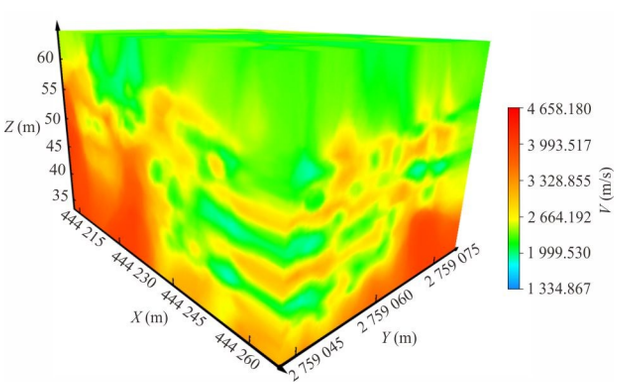

图6　反距离加权法地震跨孔CT波速数据体F

Fig.6　IDW interpolated seismic cross-hole CT velocity data volume F

对比图6和图8可以看出,两者都反映了低波速区呈近水平层状分布特征,由于地震低波速区与溶洞对应,高波速区域与灰岩岩体相对应,因此低波速区域的分布特征基本代表了该区域溶洞发育特征.在Z轴方向由上至下数据体低波速区域体积占比逐渐减少,对应于灰岩层自上而下风化程度逐渐减弱.X轴正方向上由左至右低波速区体积占比逐渐增多,对应于研究区域靠近武江一侧受水体侵蚀影响显著.因此两者都正确反映了研究区域溶洞发育规律.不同在于图6所示数据体"牛眼效应"较为明显,低速与高速区域相互穿插混杂的情况较多,溶洞和岩桥之间相互关系较为模糊.相比而言,图8所示低波速区层状分布特征更为明显,高波速区域的岩桥部分刻画更突出,更符合该区域溶洞发育的地质规律,体现了克里金插值法考虑数据空间相关性的优势.

2.2　基于峰值法的阈值划分与传统岩溶物探属性模型构建

传统物探属性建模方法主要采用峰值法进行阈值划分与岩溶模型创建,本文将分别采用反距离加权峰值法和克里金峰值法进行岩溶模型创建,并与融合法结果进行对比.

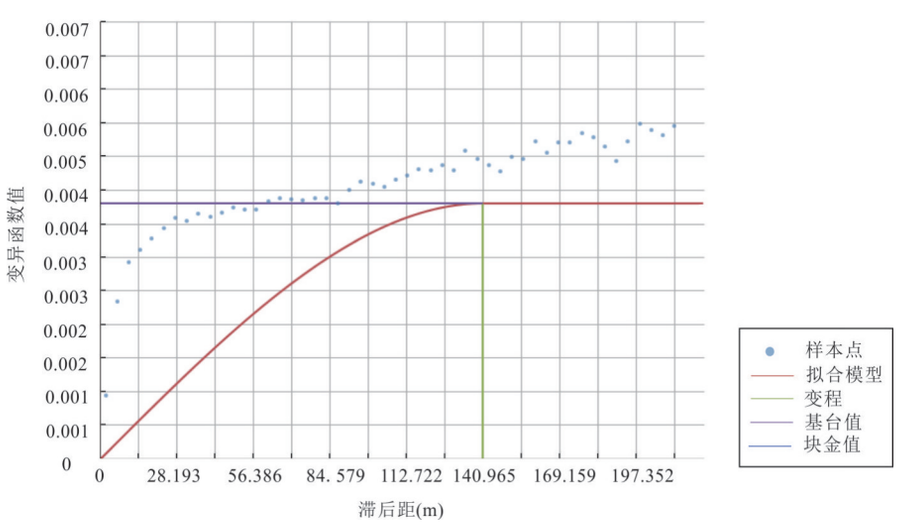

图7　地震跨孔CT波速样本变异函数

Fig.7　Seismic CT velocity variogram

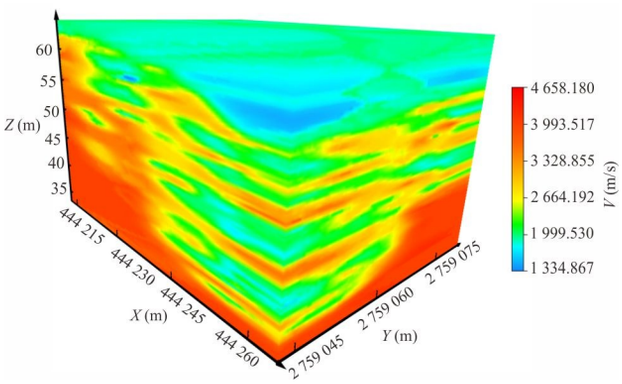

图 8 普通克里金法地震跨孔 CT 波速数据体 F'

Fig.8 OK interpolated seismic CT velocity data volume F'

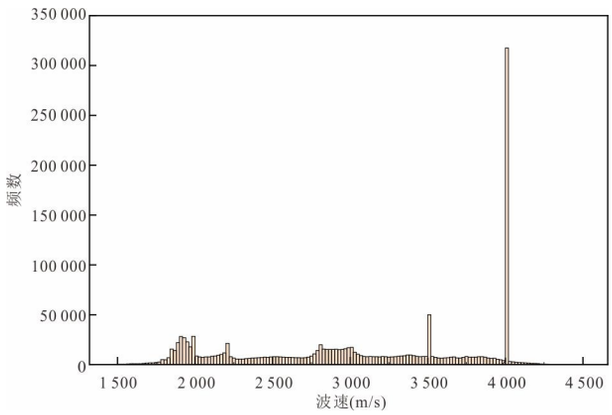

图 9 波速数据体节点数据直方图

Fig.9 Velocity data node histogram

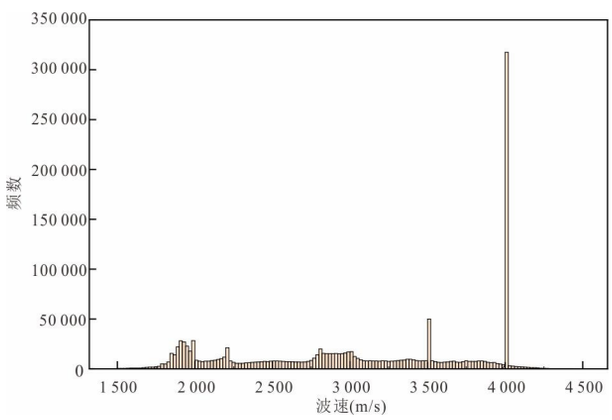

图 10 地震跨孔 CT 反演波速样本分布

Fig.10 Inverted velocity sample distribution from seismic CT

为建立准确的岩溶场地三维模型,在反演波速数据体上,如何确定物性参数阈值、判识溶洞范围是关键问题.已有研究采用峰值法对地震波速数据体进行阈值划分,王启明等(2019)基于理想溶洞模型,在有限元跨孔 CT 仿真切片采样基础上进行波速数据体三维属性建模和阈值划分.在理想状态下,溶洞和灰岩两种材料物性差异明显,是典型的连续二值化划分问题,根据反演波速数据体各节点波速数值,绘制波速统计直方图,由于 2 种材料物性差异,因此拟合得到频数曲线有 2 个分离的峰值分别对应于溶洞和灰岩两种材料,而两峰之间的谷底对应的值就是分割阈值 t.

但在该船闸实际案例分析过程中笔者发现,数据体 F'的网格节点数据统计直方图并未明显呈现双峰特征,如图 9 所示.这是因为实际的岩溶场地与理想模型相比更为复杂,实际建模场地中溶洞空间分布极不均匀,一方面,从模型总体区域来看,由于模型涵盖的深度范围较大,相对的溶洞体积分数占比较小,从而导致溶洞峰值减小;另一方面建模区域陆域深部中风化灰岩体积分数占比较高,则导致了高波速样本点频数峰值的集中,致使直方图双峰特征不明显,因此本文并未采用双峰峰值法对某船闸模型进行阈值划分.

值得注意的是,将全部跨孔 CT 反演波速云图上获取的各色阶界线样本节点波速值进行统计,绘制直方图并进行正态拟合,如图 10 所示,可看出样本点波速数值明显呈正态分布,经拟合得到其正态分布均值为 2 551.32 m/s.从图 2 中可以看出,溶洞区域在剖面上为灰岩材料完全包围或者半包围,因此溶洞与灰岩的材料界线处其等值线在剖面上总长度应当最长,并向溶洞以及灰岩两种材料核心区域,各波速等值线总长度逐渐缩短,体现为等值线节点数量由材料分界面向溶洞和灰岩材料核心逐渐减少,因此在引入等值线节点频数统计直方图后,拟合获得的其频数最大峰值处所对应的波速值,亦即正态均值即可作为分割阈值 t.本文采用该峰值法作为地震跨孔 CT 反演波速属性建模法的阈值获取方法,在本文案例中 t 为 2 551.32 m/s.

将 2.1 中分别基于反距离加权法和普通克里金法建立的数据体 F 和 F'的节点数据 $F(i, j, k)$和 $F'(i, j, k)$导出(i, j, k 为节点坐标),并进行二值化,即:

$$C(i,j,k)=\begin{cases}0,(F(i,j,k)\leqslant t,\ t=2551.32(\mathrm{m/s}))\\1,(F(i,j,k)>t,\ t=2551.32(\mathrm{m/s}))\end{cases},$$
$$C'(i,j,k)=\begin{cases}0,(F'(i,j,k)\leqslant t,\ t=2551.32(\mathrm{m/s}))\\1,(F'(i,j,k)>t,\ t=2551.32(\mathrm{m/s}))\end{cases},\quad(2)$$

式中:$C(i,j,k)$,$C'(i,j,k)$分别为二值化后反距离加权峰值法和克里金峰值法模型节点数据,$C(i,j,k)$,$C'(i,j,k)=0$处表示溶洞或覆盖层,$C(i,j,k)$,$C'(i,j,k)=1$处表示灰岩,基于节点数据二值化结果进行三维重构,从而分别建立反距离加权峰值法和克里金峰值法岩溶场地三维实体模型C与C'(图 11).

由图 11 可看出C与C'模型溶洞分布差异明显,克里金峰值法创建的模型C'溶洞水平向发育特征更为明显,这与该地区没有明显下切的近河岸覆盖性岩溶发育特征即规律更为符合,体现了普通克里金法考虑数据空间相关性插值方法的优势.

2.3　融合法阈值数据体创建、溶洞判识与模型重构

针对武江某船闸具体案例,结合图 4 可知,融合法阈值数据体创建、溶洞判识与模型构建的主要步骤主要有:(1)基于跨孔 CT 波速数据体F,设置虚拟钻孔提取阈值样本;(2)基于实测钻孔溶洞边界空间位置和数据体F中对应位置的波速值,创建阈值数据体;(3)进行溶洞判识,并对节点数据进行二值化,如公式(1)所示;(4)依据判识结果三维重构岩溶模型.本文分别基于反距离加权和普通克里金插值创建的反演波速数据体F和F',进行融合法阈值划分与岩溶模型创建,具体过程如下.

2.3.1　提取阈值样本　首先,在F和F'中,与实测钻孔相同坐标位置处设置虚拟钻孔,提取虚拟钻孔上波速数值,如图 12 所示,获取虚拟钻孔在实测钻孔各溶洞－灰岩界面相同位置处的波速值作为该界面点位处的阈值样本.针对克里金方法,需统计建模区域内所有阈值样本,进行空间相关性分析并采用球状模型拟合其变异函数,获得拟合结果如图 13 所示.

2.3.2　创建阈值数据体　基于上述获取的模型区域内所有阈值样本,分别采用反距离加权法和普通克里金法分别在模型全空间域创建阈值数据体T和T',其中,T和T'的网格设置分别与F和F'保持一致,便于后续二值化赋值操作.T和T'如图 14 所示.

2.3.3　进行阈值划分并和岩溶模型创建　分别将T和T'节点数据$T(i,j,k)$和$T'(i,j,k)$与波速数据体F和F'节点数据$F(i,j,k)$和$F'(i,j,k)$进行比较,并进行二值化,即:

$$C_r'(i,j,k)=\begin{cases}0,(F'(i,j,k)\leqslant T'(i,j,k))\\1,(F'(i,j,k)>T'(i,j,k))\end{cases},$$
$$C_r(i,j,k)=\begin{cases}0,(F'(i,j,k)\leqslant T(i,j,k))\\1,(F(i,j,k)>T(i,j,k))\end{cases},\quad(3)$$

式中:$C_r(i,j,k)$,$C_r'(i,j,k)$分别为二值化后反距离加权融合法与克里金融合法模型节点数据,此时$C_r(i,j,k)$与$C_r'(i,j,k)$中等于 0 处节点为溶洞或覆盖层,值为 1 处为灰岩.基于节点数据二值化结果进行三维重构后,分别获得反距离加权融合法与克里金融合法岩溶三维实体模型C_r与C_r',其可视化结果如图 15 所示:

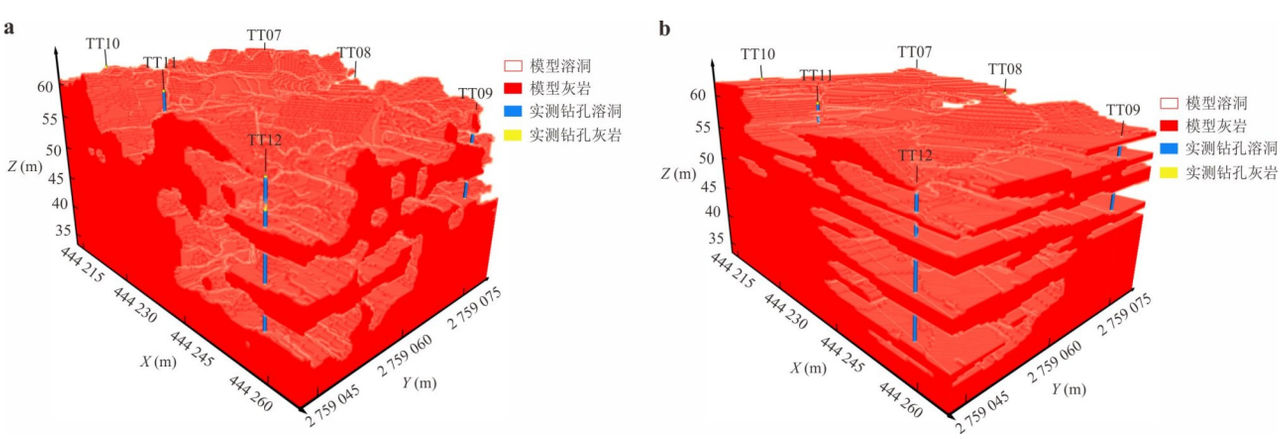

图 11　峰值法岩溶模型

Fig.11　Karst site model using peak method

a. 反距离加权峰值法岩溶模型C; b. 克里金峰值法岩溶模型C'

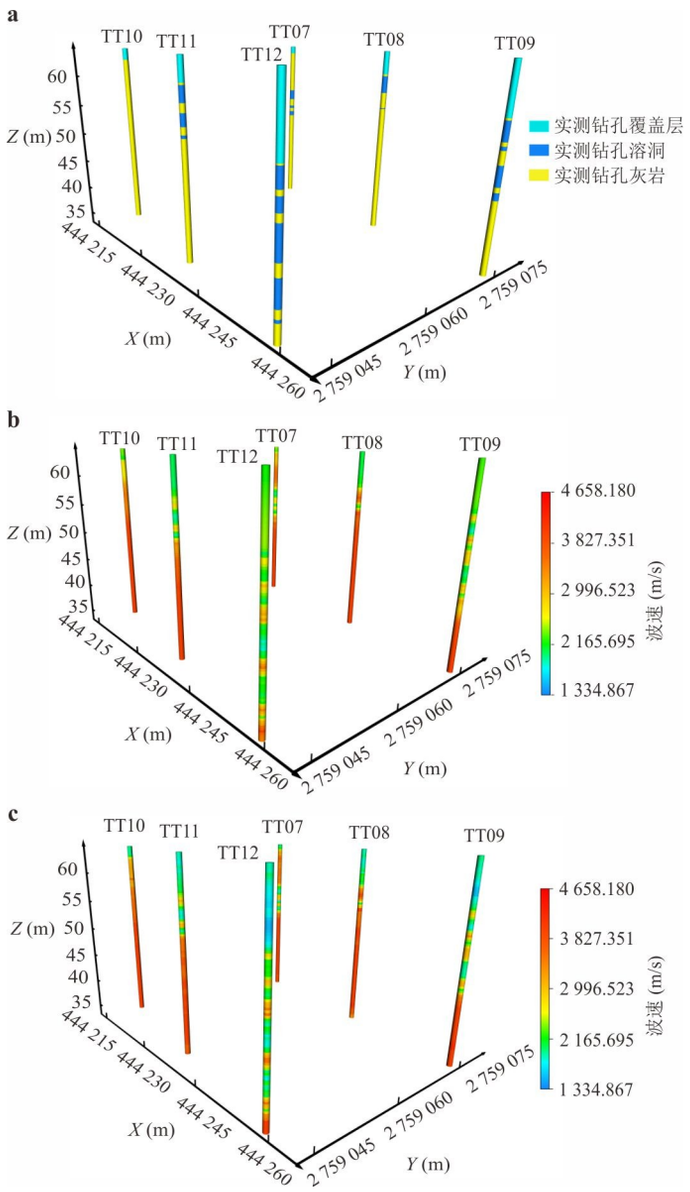

图 12 波速数据体阈值样本

Fig.12 Velocity data volume threshold samples

a.实测钻孔三维柱状图;b.数据体 F 中提取的虚拟钻孔;c.数据体 F' 中提取的虚拟钻孔

2.4 误差分析

上文结合武江某船闸案例,分别应用反距离加权峰值法、克里金峰值法、反距离加权融合法和克里金融合法建立了场地岩溶三维地质模型,即 C、C'、C_r 和 C_r'.各方法建立的模型精度与准确性需通过误差分析验证其准确性以及各方法的效果优劣.本文将各方法建立的模型结果,通过提取虚拟钻孔与对应实测钻孔对比进行误差分析.

在模型 C、C'、C_r 和 C_r' 上,对应实测钻孔 TT07、TT08、TT09、TT10、TT11 和 TT12 位置,分别提取虚拟钻孔 TT07′、TT08′、TT09′、TT10′、TT11′ 和 TT12′,各模型提取所得虚拟钻孔柱状图与实测钻孔柱状图对比,如图 16 所示.

对比每对柱状图的左右两条可以看出虚拟钻孔中每段溶洞或灰岩段与实测钻孔相比都存在不相符的差异段,记这些差异段为误差段 d_i,对于钻孔 z,定义单孔误差率为:

$$d_{rz}=\sum_0^{D_z} d_i \Big/ L_z \ , \tag{3}$$

式中:d_{rz} 为钻孔 z 单孔误差率,d_i 为单段误差段长度,L_z 为钻孔 z 的单孔孔深.单孔误差率即为单孔各误差段长度总和与钻孔深度的比值.将各模型单孔误差率计算后绘制柱状图,如图 17 所示.

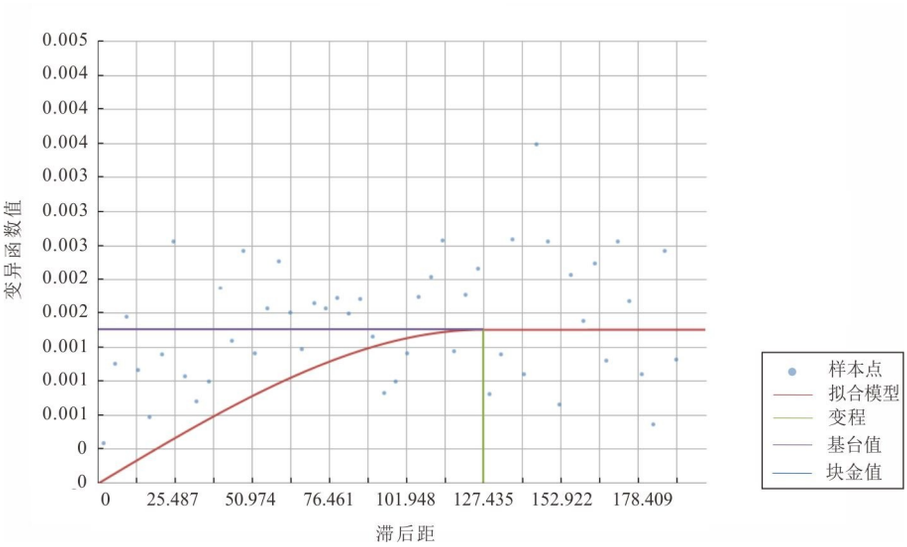

图 13　克里金法数据体 F' 获取阈值样本变异函数

Fig.13　Threshold velocity variogram based on F'

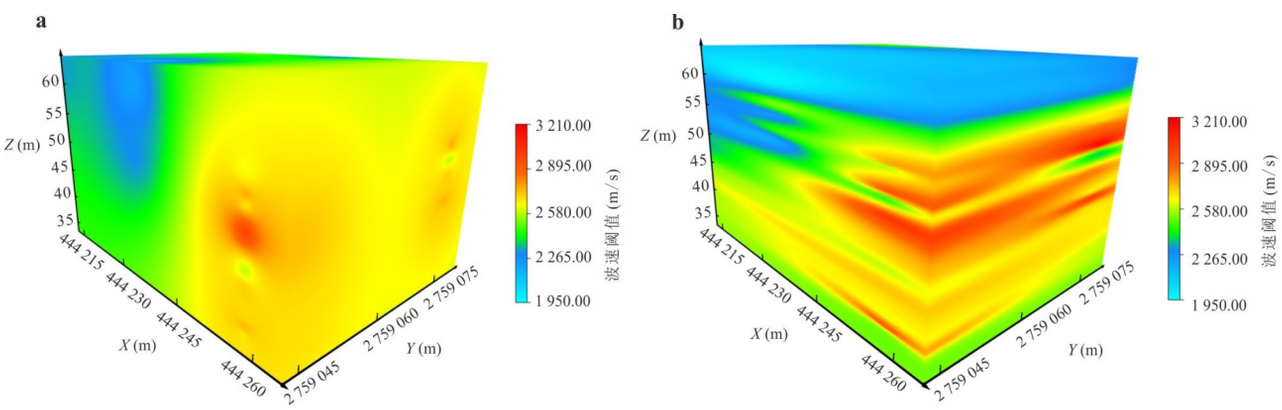

图 14　波速阈值数据体

Fig.14　3D velocity threshold data volume

a. 反距离加权阈值数据体 T; b. 克里金阈值数据体 T'

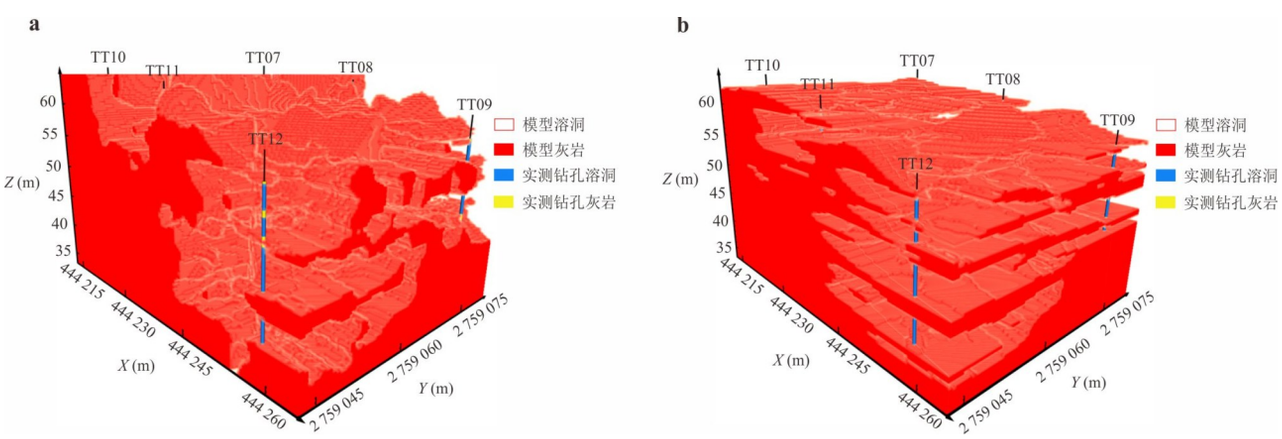

图 15　融合法岩溶模型

Fig.15　Karst site model using fusion method

a. 反距离加权融合法岩溶模型 C_r; b. 克里金融合法岩溶模型 C_r'

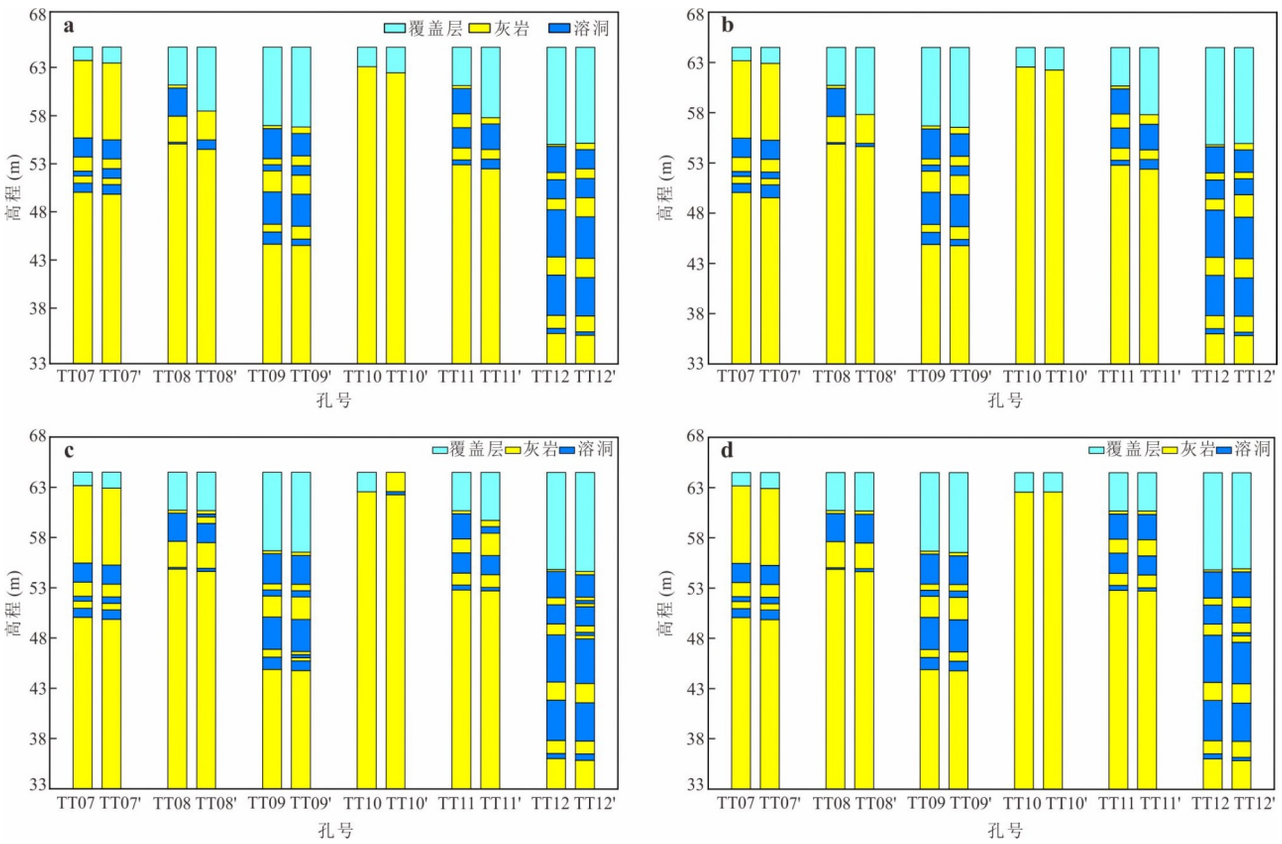

图 16 虚拟与实测钻孔对比柱状图

Fig.16 Virtual vs. measured borehole log

a.反距离加权峰值法对比钻孔柱状图;b.克里金峰值法对比钻孔柱状图;c.反距离加权融合法对比钻孔柱状图;d.克里金融合法对比钻孔柱状图

为综合体现不同方法所得模型在研究区域内整体误差水平,定义平均误差率 d_r:

$$d_r = \sum_1^n d_{rz} \cdot L_z \Big/ \sum_1^n L_z \ , \qquad (4)$$

式中 d_{rz} 为钻孔 z 的单孔误差率,L_z 为钻孔 z 深度,n 为建模区域内钻孔总数,即区域平均误差率为区域内全部钻孔中误差段的总和与区域内全部钻孔深度之和的比值.本文研究区内各建模方法所得模型平均误差率如表 1 所示.

综合图 16 和图 17 可以看出,克里金融合法模型 C_r'所有钻孔的单孔误差率都是最低的,克里金峰值法和克里金融合法模型单孔误差率明显低于反距离峰值法和反距离融合法.而在每种方法生成的模型内部,靠近武江一侧钻孔误差率明显较高,这与溶洞发育密度密切相关,溶洞密度高的钻孔单孔误差率高,这与建模方法和模型纵向网格精度都有一定关系.从表 1 可以看出,克里金插值方法相对反距离插值法在建模精度上有明显优势,而融合法相对峰值法也有明显进度优势,克里金融合法在单孔误差率和平均误差率方面都是最低的,精度优势明显,相对于克里金峰值法,克里金融合法的平均误差率下降了 30.8%,体现了融合法的精度优势,验证了融合法的正确性.

3 岩溶场地三维建模方法验证

为进一步验证本文提出的岩溶场地地震跨孔 CT 与钻孔融合建模方法,将某船闸场地 6 个钻孔分为两组,其中 TT08、TT11 作为验证钻孔,保留 TT07、TT09、TT10、TT12 为测试钻孔,如图 18 所示.这样分组的原因在于,TT07、TT09、TT10、TT12 为建模区域外侧 4 个脚点控制性钻孔,而 TT08、TT11 为区域内部钻孔.缺失 TT08 和 TT10 数据时,模型建模为“内插”从而能够保证模型整体精度不受大的影响,如果缺失脚点控制性钻孔信息,则模型“外插”区域精度会大幅下降甚至不可控.因此选择两个内部钻孔作为预测验证孔,能够真实反映不同插值方法的内插精度差异,而避免精度不可控的外插.

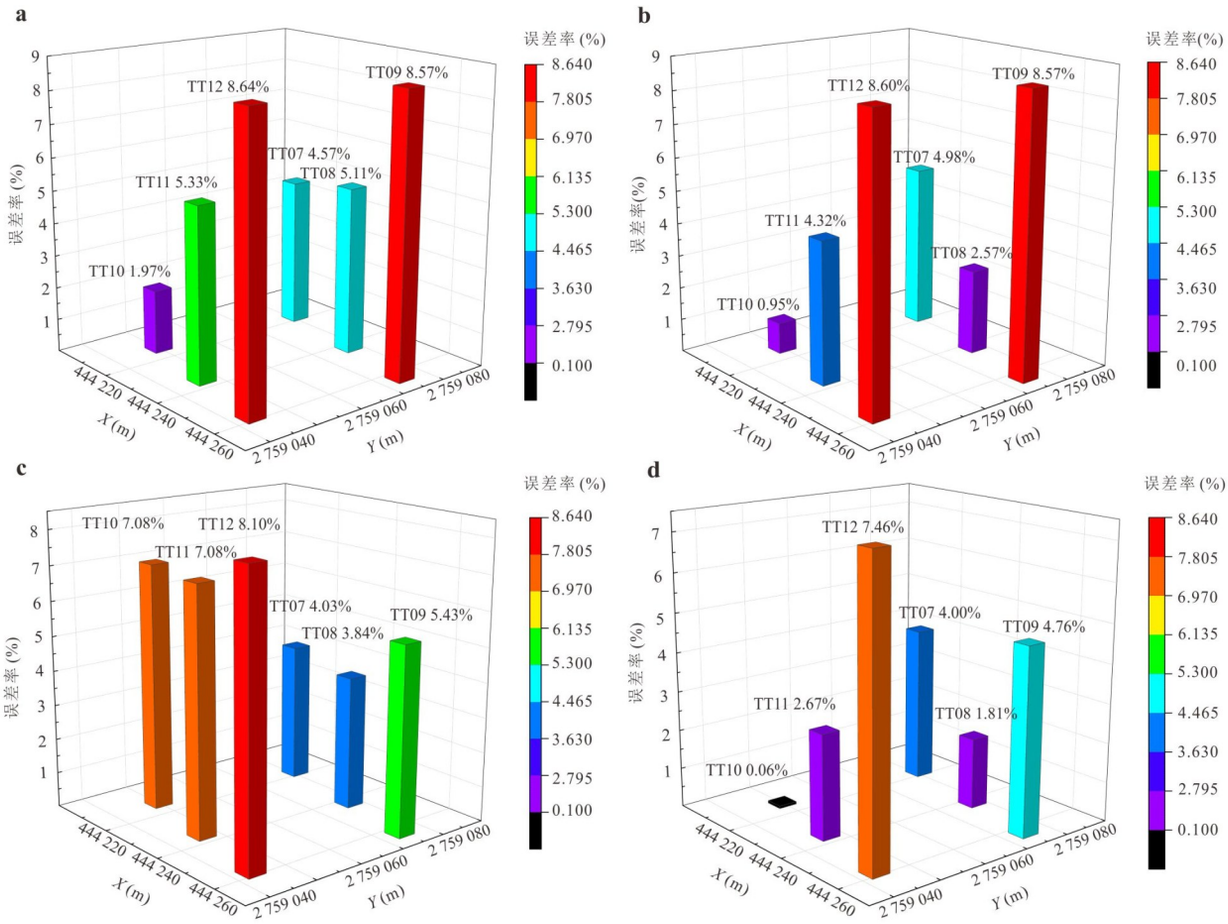

图 17　模型虚拟钻孔单孔误差率柱状图

Fig.17　Column charts of per-borehole error rate for virtual boreholes

a. 反距离加权峰值法单孔误差率; b. 克里金峰值法单孔误差率; c. 反距离融合法单孔误差率; d. 克里金融合法单孔误差率

表 1　平均误差率

Table 1　Mean error rate

	反距离加权峰值法	克里金峰值法	反距离加权融合法	克里金融合法
平均误差率(%)	5.70	5.00	5.93	3.46

方法验证时,依据测试钻孔样本数据分别采用反距离加权法和克里金法建立验证阈值数据体 T_v 和 T_v',从而剔除 TT08 和 TT11 实测数据的影响,T_v 和 T_v' 如图 19 所示. 保持地震跨孔 CT 波速数据体不变,经融合后建立岩溶场地三维模型,从而获得未考虑验证钻孔数据的反距离加权融合法岩溶模型 C_{rv} 和克里金融合法岩溶模型 C_{rv}'. 如图 20 所示.

为验证模型结果,从 C_{rv} 和 C_{rv}' 模型实体中剖切出分别与剖面 B1-B1′ 和 B2-B2′ 相对应的模型剖面,并将他们与实测剖面对比绘制于图 21 中,从图 21 中可以看出,克里金融合法相对反距离加权融合法在剖面 B1-B1′和剖面 B2-B2′处于实测剖面的符合性更好.

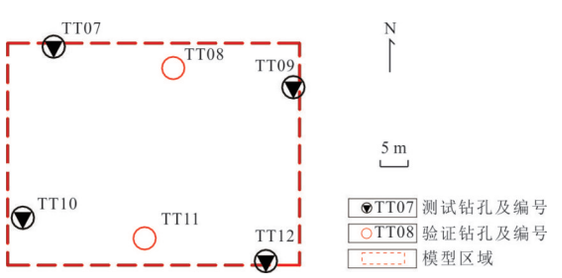

图 18　测试及验证钻孔平面分布

Fig.18　Test and validation boreholes map

为进一步定量评价两种方法的精度差异,在模型 C_{rv} 和 C_{rv}' 实体中与验证钻孔相同坐标处提取虚拟验证孔 TT08′和 TT11′,并与实测验证钻孔 TT08、TT11 对比,计算单孔误差率和这两孔的平均误差率. 反距离加权融合法和克里金融合法提取的虚拟验证孔与实测验证孔对比柱状图如图 22 所示.

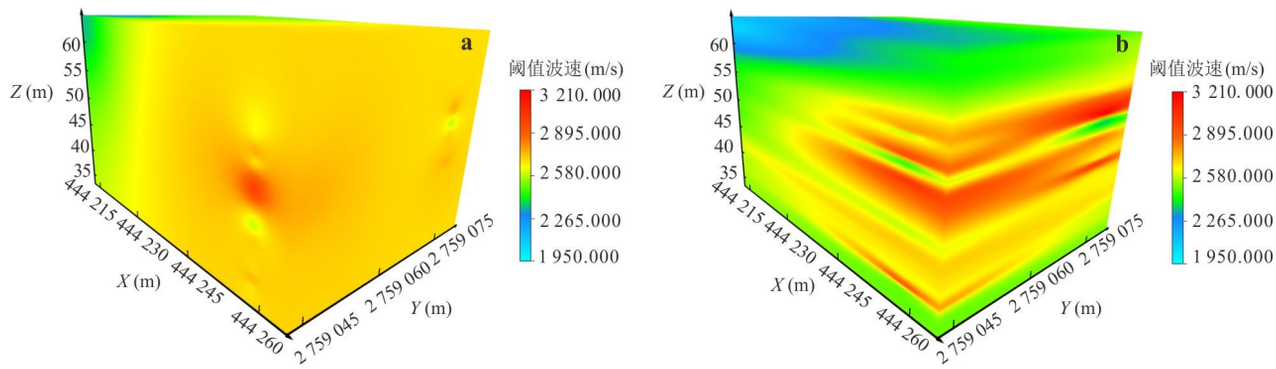

图 19 验证波速阈值数据体图

Fig.19 Validation 3D velocity threshold data volume

a.反距离加权融合法验证阈值数据体 T_v;b.克里金融合法验证阈值数据体 T_v'

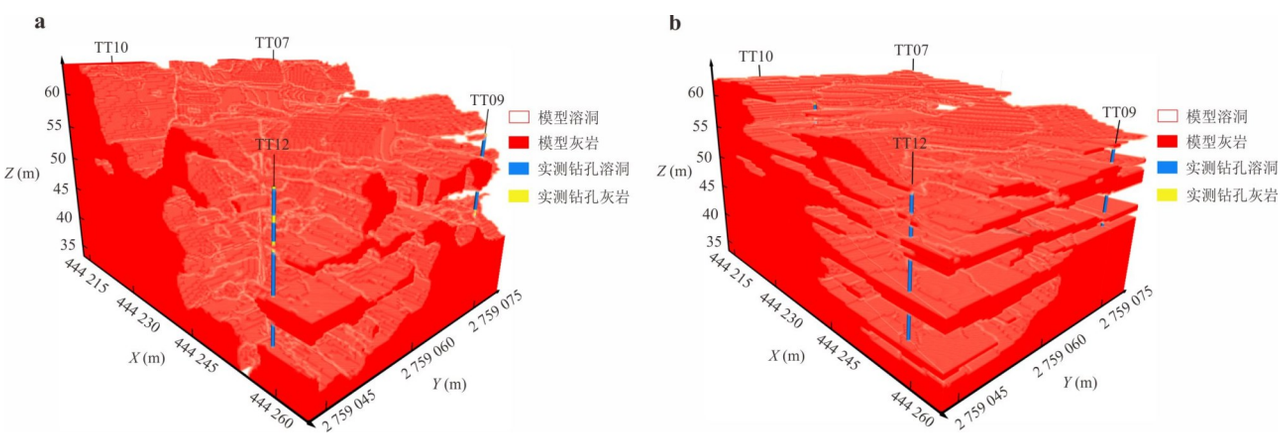

图 20 验证岩溶模型

Fig.20 Validation karst site model

a.反距离加权融合法验证岩溶模型 C_{rv};b.克里金融合法验证岩溶模型 C_{rv}'

计算得到,反距离加权融合法单孔误差率TT08和TT11分别为5.11%和5.33%,平均误差率为5.22%.克里金融合法单孔误差率TT08和TT11分别为3.08%和4.89%,平均误差率为3.98%.两种融合法对验证钻孔的预测误差小于6%,正确率都超过了94%,验证了本文提出的融合方法的正确性.克里金融合法在单孔误差率和平均误差率上均低于反距离加权融合法,平均误差率甚至低于4%,由于考虑了建模数据的空间相关性,因此其在建模精度上具有明显优势.

4 结论

本文基于武江某船闸下闸首区地震跨孔CT探测数据建立波速反演数据体,结合钻孔数据样本,创建溶洞边界波速阈值数据体,实现针对地震跨孔CT反演数据体的溶洞自动判识,融合钻孔数据信息与地震跨孔CT测试数据,建立了岩溶场地三维地质模型,并与传统物探属性建模方法对比,获得主要结论如下:

(1)从武江某船闸下闸首区岩溶场地模型可以看出:溶洞系统复杂,在高程33~64 m范围内溶洞极为发育,特别是水平向溶洞优势发育特征明显,垂向发育特征不明显.近武江河道一侧溶洞密度明显增大,地表径流影响明显.应用克里金融合法建立的武江某船闸下闸首岩溶场地三维模型,准确揭示了该区域溶洞系统发育特征及规律.

(2)提出了基于实测钻孔数据与地震跨孔CT数据的岩溶三维地质建模方法.实现了岩溶场地地震跨孔CT数据自动解译与三维建模一体化,在全空间区域实现了钻孔数据与物探数据的融合,完整

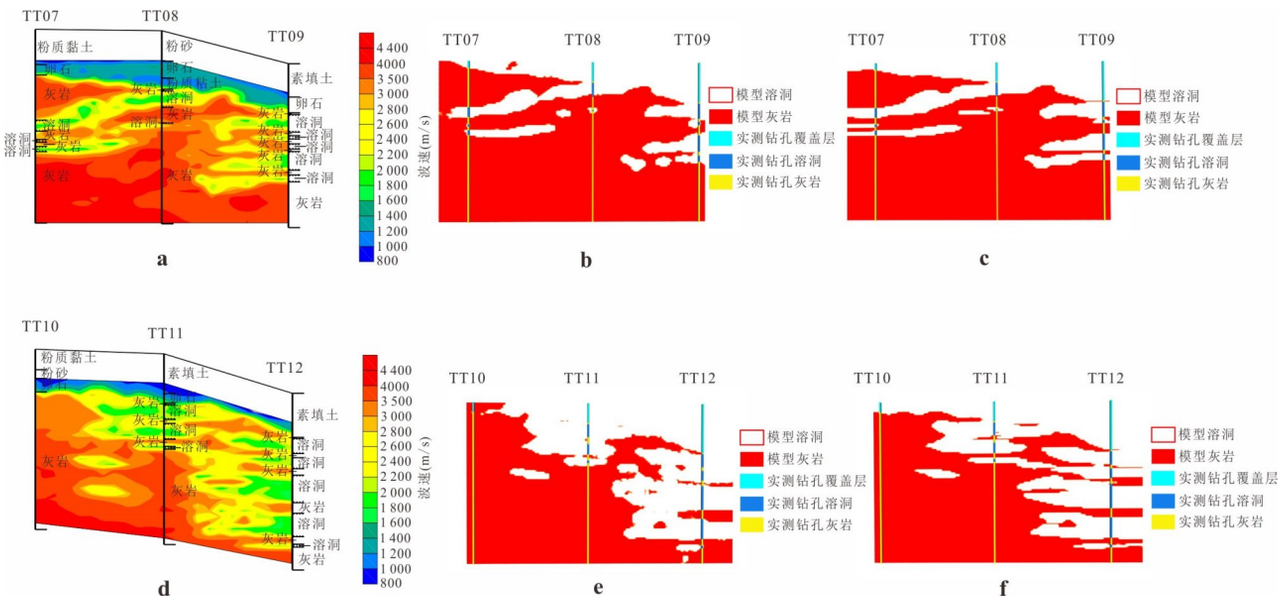

图 21　验证岩溶模型剖面对比

Fig.21　Karst model section comparison

a.实测 B1-B1′剖面;b.反距离加权融合法验证模型 B1-B1′剖面;c.克里金融合法验证模型 B1-B1′剖面;d.实测 B2-B2′剖面;e.反距离加权融合法验证模型 B2-B2′剖面;f.克里金融合法验证模型 B2-B2′剖面

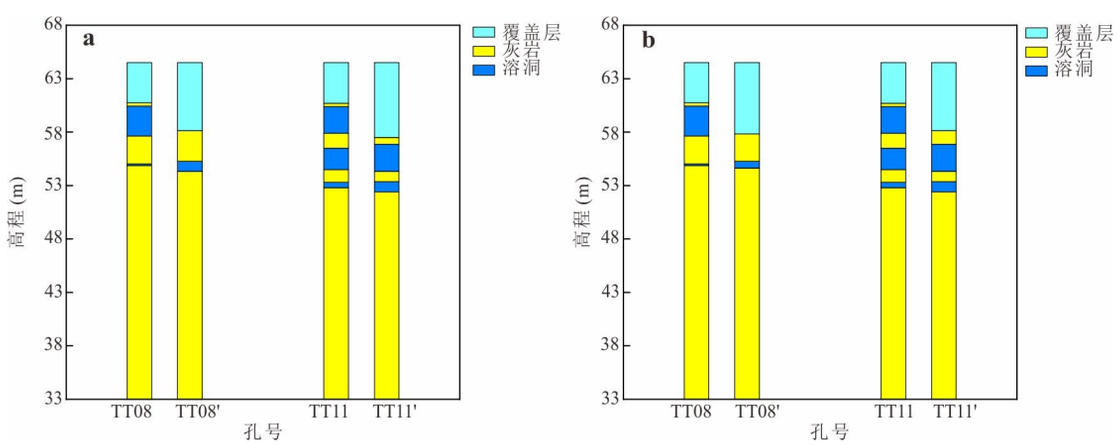

图 22　验证钻孔对比柱状图

Fig.22　Validation borehole logs

a.反距离加权融合法验证钻孔柱状图;b.克里金融合融合法验证钻孔柱状图

准确地建立了武江某船闸下闸首区域复杂岩溶场地三维模型,为岩溶塌陷等灾害风险分析提供支持.

(3)对比融合法与传统属性建模法建模结果,分别采用反距离加权峰值法、克里金峰值法、反距离加权融合法和克里金融合法建立该场地岩溶模型,对比虚拟和实测钻孔数据,分析计算单孔和平均误差率,得出克里金融合法的单孔误差率和平均误差率指标均为最小,相对于克里金峰值法,克里金融合法的平均误差率下降了 30.8%,由于钻孔数据提供了溶洞边界处的“真值”,融合法能校正物探反演波速在空间上的局部偏差,从而更符合实际地质情况.因此克里金融合法模型精度优势明显.

(4)通过设置验证钻孔,验证测试了融合建模方法对无钻孔区域的预测能力和建模方法的正确性,结果表明,克里金融合法对验证钻孔的预测误差率小于 6%,相对反距离加权融合法在建模精度上具有明显优势,准确预测了验证钻孔附近溶洞空间分布.

References

Chen, W.X., 2021. Complex Rock Mass in Deep Foundation Pit Based on GPR and Elastic Wave CT 3D Geological Modeling (Dissertation). China University of Mining and Technology, Xuzhou(in Chinese with English abstract).

Hang, Z. Q., Xue, T., Chen, J. P., et al., 2026. A Method for Improving the Efficiency and Accuracy in 3D Geological Modeling of Urban Underground Space: A Case Study of Shanghai. *Earth Science Frontiers*, 33(4): 357－367(in Chinese with English abstract).

Hu, J. J., Xu, H. M., Wang, P., et al., 2022. Application of Cross-Hole Electromagnetic Wave Tomography Based on 3D Visualization in Karst Exploration. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 19(4): 443－449(in Chinese with English abstract).

Hu, X., Hou, J. G., Liu, Y. M., 2024. Construction of Multi-Source Fault-Controlled Karst Cave Training Data Set and Application of Three-Dimensional Modeling of Generating Countermeasure Network. *Petroleum Science Bulletin*, 9(3): 422－433(in Chinese with English abstract).

Li, Z. N., 2018. 3D Modeling of the Seismic Wave CT Karst Rock Characteristics Using Voxler Platform. *Soil Engineering and Foundation*, 32(1): 88－92(in Chinese with English abstract).

Liu, W. X., 2019. Research of the Karst Development Law and Three-Dimensional Visualization in a Construction Site Foundation in Kunming (Dissertation). Kunming University of Science and Technology, Kunming (in Chinese with English abstract).

Lyu, B. R., Wang, Y., Miao, C., et al., 2025. Fusion of Limited Site-Specific Borehole Logs and Geophysical Data from a Different Site for Three-Dimensional Subsurface Geological Modeling Using Multiscale Generative Adversarial Network. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 151(8): 04025087. https://doi.org/10.1061/jggefk.gteng-13369

Pan, Y. J., 2021. Research and Practice on Integrated Modeling of Spatial Information of Complex Geological Bodies Based on GoCAD Platform (Dissertation). Qingdao University of Technology, Qingdao (in Chinese with English abstract).

Sun, H., Liu, Y., Wang, Z., et al., 2022. Constrained Inversion of Audio Magnetotelluric for Identifying Strata: A Case Study in Hami Basin. *Earth Science*, 47(11): 4280－4293(in Chinese with English abstract).

Wang, L. F., Liu, X. L., Xu, K., et al., 2024. Bayesian-MCMC (Markov Chain Monte Carlo) Based Three-Dimensional Geological Model Optimization by Data and Knowledge Fusion. *Earth Science*, 49(8): 3056－3070(in Chinese with English abstract).

Wang, L., Gao, Y., Pan, Q. J., et al., 2025. Coupled Geological Modeling Using Multi-Source Data: A K-Dimensional Tree-Graph Convolutional Neural Process Approach. *Computers and Geotechnics*, 187: 107509. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2025.107509

Wang, P., 2025. Fusion of Geophysical Prospecting and Drilling Data and High-Precision Geological Interpretation (Dissertation). Shandong University, Jinan (in Chinese with English abstract).

Wang, Q. M., Che, A. L., 2019. Reconstruction Method of Three-Dimensional Grid Model of Bad Geological Structure Based on CT Detection Technology. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 38(6): 1222－1232(in Chinese with English abstract).

Wei, H., Zhao, Y. H., Chen, Z., et al., 2026. Application of Elastic Wave CT and 3D Modeling Technologies in Bridge Foundation Investigation in Karst Areas. *Highway*, 71(3): 168－174(in Chinese with English abstract).

Xia, Y. Z., Zhan, C. J., Dai, Z. X., et al., 2026. Combining Hydrologic, Chemical, and Geophysical Deep Learning-Based Inversion for Heterogeneous Aquifer Structure Identification. *Journal of Hydrology*, 665: 134701. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.134701

Yuan, Z. W., 2017. Study on Well Seismic Interpretation Method of Tight Sandstone Reservoir Based on Machine Learning and Multi-Information Fusion. China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).

Zhang, Q., Zhou, J., Zhou, T. X., 2018. The Application of 3D Model Based on Elastic Wave CT (Computed Tomography) Technology in Karst Development Area. *Land & Resources Herald*, 15(3): 90－96(in Chinese with English abstract).

中文参考文献

陈文学, 2021. 基于GPR与弹性波CT的深基坑复杂岩体三维地质建模(硕士学位论文). 徐州:中国矿业大学.

杭振泉, 薛涛, 陈建平, 等, 2026. 城市地下空间三维地质建模效率和精度提升方法: 以上海为例. 地学前缘, 33

(4): 357－367.

胡俊杰, 徐洪苗, 王鹏, 等, 2022. 基于三维可视化的跨孔电磁波 CT 在岩溶勘察方面的应用. 工程地球物理学报, 19(4): 443－449.

胡迅, 侯加根, 刘钰铭, 2024. 多源断控岩溶型溶洞训练数据集构建和生成对抗网络三维建模应用. 石油科学通报, 9(3): 422－433.

李祖能, 2018. 基于 Voxler 平台地震波 CT 岩溶探测三维建模研究. 土工基础, 32(1): 88－92.

刘文祥, 2019. 昆明某建筑场地地基岩溶发育规律及三维可视化研究(硕士学位论文). 昆明: 昆明理工大学.

潘雅静. 2021. 基于 GoCAD 平台的复杂地质体空间信息一体化建模研究与实践(硕士学位论文). 青岛: 青岛理工大学.

孙浩, 刘营, 王正, 等, 2022. 音频大地电磁约束反演在地层识别中的应用: 以哈密盆地为例. 地球科学, 47(11): 4280－4293.

王丽芳, 刘肖莉, 徐坤, 等, 2024. 数据和知识融合的 Bayesian-MCMC 三维地质建模. 地球科学, 49(8): 3056－3070.

王鹏, 2025. 物探与钻探数据融合及高精度地质解译(博士学位论文). 济南: 山东大学.

王启明, 车爱兰, 2019. 基于 CT 探测技术的不良地质构造三维网格模型重构方法. 岩石力学与工程学报, 38(6): 1222－1232.

危皓, 赵玉虎, 陈竹, 等, 2026. 弹性波 CT 与三维建模技术在岩溶区桥梁基础勘查中的应用. 公路, 71(3): 168－174.

袁照威, 2017. 基于机器学习与多信息融合的致密砂岩储层井震解释方法研究(博士学位论文). 北京: 中国地质大学(北京).

张琦, 周杰, 周天喜, 2018. 基于弹性波 CT 技术的三维模型在岩溶发育区的应用. 国土资源导刊, 15(3): 90－96.