

DOI: 10.12401/j.nwg.2023091

地质结构约束下的城市多要素三维属性建模方法研究 ——以西咸新区为例

李林^{1,2}, 王涛^{1,2,*}, 董英^{1,2}, 曾磊^{1,2}, 张戈^{1,2}, 张新社^{1,2}

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710119; 2. 自然资源部黄土地质灾害重点实验室, 陕西 西安 710119)

摘要: 支持结构——属性一体化表达的建模方法是三维建模研究的重点和难点之一。已有三维地质建模技术往往存在结构与属性建模过程的割裂, 难以实现对地质结构先验知识与属性分析模拟的融合表达。笔者以西咸新区工程地质建模为例, 基于多要素精细化探测成果, 建立区域统一的地质构造框架模型; 在地质构造约束下, 充分考虑地质单元特征, 精细剖分建模网格, 采用随机模拟算法开展属性建模研究, 从而实现地质结构约束下的三维属性模型构建。本方法既保留了构造建模对层面的清晰划分, 又可以在地层内部更加合理地展现地质属性的空间分布和变化, 能够在工程地质勘察和城市地下空间开发等领域得到应用。

关键词: 城市地质; 多要素属性建模; 三维地质建模; 西咸新区

中图分类号: P546

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)03-0169-09

Multi-Factor Attribute Modeling Method Constrained by Geological Structure: A Case Study in Xixian New Area

LI Lin^{1,2}, WANG Tao^{1,2,*}, DONG Ying^{1,2}, ZENG Lei^{1,2}, ZHANG Ge^{1,2}, ZHANG Xinshe^{1,2}

(1. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory for Geo-hazards in Loess Area, MNR, Xi'an 710119, Shaanxi, China)

Abstract: The 3D geological modeling method that supports the structure-attribute integrated representation is one of the keys and difficulties in the research of 3D modeling. Existing 3D geological modeling technology is difficult to realize the integration and expression of the prior knowledge of geological structure and attribute analysis and simulation. Taking Xixian new area as an example, a unified regional geological structure framework model is established. Under the constraint of geological structure conditions, three-dimensional structure-attribute integrated expression are realized. This method not only retains geology structural modeling, but also can more reasonably show the spatial distribution and change of geological attributes inside the strata. It has been applied in engineering geological investigation and urban underground space development.

Keywords: urban geology; multi-factor attribute modeling; 3D geological modeling; Xixian New Area

收稿日期: 2023-03-17; 修回日期: 2023-05-10; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 中国地质调查局项目“西安多要素城市地质调查”(1212011220031)和“西安市地质安全体检与风险评估示范”(DD20211317)联合资助。

作者简介: 李林(1976-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地学空间分析及地学信息化建设工作。E-mail: llin@mail.cgs.gov.cn。

* 通讯作者: 王涛(1987-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水工环地质调查与研究。E-mail: 476644953@qq.com。

三维地质模型通过真三维空间中对地质实体几何形态和地质实体内部属性参数建模,直观表达地质体空间形态和地质体内部非均匀属性场的分布和变化规律,将地质构造、物理力学、地球化学等三维空间分布特征及相互关系以三维可视化的形式展现(武强等,2004;杨东来等,2007;魏嘉,2007)。

近年来,国内外专家学者在三维地质建模领域开展了大量研究工作,提出了多种三维地质建模方法(潘懋等,2007;孙波等,2015;李青元等,2016)。按照建模方式上,总体可分为三维地质结构建模和三维地质属性建模。前者主要关注地质体空间位置、几何形态和空间关系的表达,较少顾及复杂地质结构内部细节表达,以及地质体内部的非均质性、非连续性及其地质学内涵,简单认为地质体内部属性是均一的,从而无法对地质体内部的各种物理化学过程进行属性插值和数值模拟。后者则通过对地质体内属性非均一性的表达和属性参数值动态变化的模拟,直观展示地质体内部属性参数的空间分布、变化规律及其关联关系,但常规的属性建模又往往通过大量简化地质条件来降低建模复杂度,从而无法精确描述断层等复杂特殊地质现象。

已有三维地质建模方法缺少地质语义约束和属性模型的耦合及集成,割裂了结构与属性的建模过程,难以实现对地质先验知识的融合和表达(陈麒玉,2020)。随着研究的深入,支持结构——属性一体化表达的建模方法受到越来越多的关注,是目前三维建模研究的重点和难点之一。笔者以西咸新区工程地质建模为例,基于多要素精细化探测成果,建立区域统一的地质构造框架;在顾及地质构造条件约束下,充分考虑地质单元特征,构建精细网格模型,采用序贯指示、序贯高斯等随机算法开展属性建模研究,从而实现地质结构约束下的三维属性模型构建。本方法能够融合地质先验知识,保留构造建模对层面的清晰划分,同时还可以在地质体内部更加合理地展现地质属性的空间分布和变化。

1 地质结构约束下三维属性建模方法

地质结构约束下的三维属性建模流程如图1所示,包括①开展区域构造、地层研究,统一地质构造框架,确立地质概念模型。②以构造区划为建模单元,还原地质体三维空间展布,构建三维地质结构模型。

③顾及地质结构约束条件下,选择合适三维网格剖分方案,建立精细的体元(网格)框架模型。④采用地质统计学方法开展多要素属性随机建模。

1.1 构建地质概念模型

立足于实际地质调查中获得的露头、钻孔、剖面资料和多要素精细化探测等多源成果,首先开展研究区地质构造条件研究,根据不同深度的地震反射、钻孔勘探等探测成果,进行区域构造层序、界面构造形态分析,结合重磁等地质地球物理资料,进行构造区划,建立统一的地质构造框架。

地层是地质实体和地质构造赋存的物质基础,地层建模需要首先建立研究区区域地层层序。由于地质体空间分布的不连续,地层之间相互交叉,空间关系错综复杂,因此要以钻孔、地质剖面等为主要数据来源进行地层构建(王波,2021)。在地质、水文地质和工程地质条件分析的基础上,根据工作区已有钻孔资料,对地层岩性进行概化,并按照一定的纵横间隔绘制地质剖面图,并根据研究区内的地质规律和相关地质属性特征,将各类地质界面、钻孔根据不同深度赋予相应的属性(岩性、年代、孔隙度、渗透率等)。

1.2 三维地质结构建模

地质结构建模的重点是对地质体的分析、模拟和表达(朱良峰,2006;明镜,2009)。在具体的建模策略上,可以采用以构造分区为单元的“构造镶嵌”方法,将区域三维建模工作分而治之(李林,2022;马朝阳,2022)。在地质构造框架基础上划分构造单元,以构造单元为边界将建模区域划分为多个封闭的区域,构造单元内部具有相近或相同的地质特征,因而可利用相同的数据源和统一的建模过程,能够大大提高建模效率。在单一构造单元限定的区块内部,将岩层地表出露线和岩层产状作为地层面的形态要素,以钻孔和剖面数据作为层面的控制要素,建立区块地层展布模型,地层建模一般采用多层三角网模型,对各个地层进行插值和拟合(Mallet,1992;李良平,2007);形成三维地层骨架结构。根据地质体的空间关系,进行三维拓扑分析,搜索每个地质体的边界地质面,并进行闭合处理,形成含有完整外轮廓的复杂地质体模型,将每一地质体附加属性则形成最终的三维地质体模型。

1.3 结构约束下属性网格剖分

网格化技术可以自动地将具有复杂形态的地质体分解为一定数量的简单几何体,是实现地质结构内部非均质属性特征三维可视化表达的有效途径(陈麒

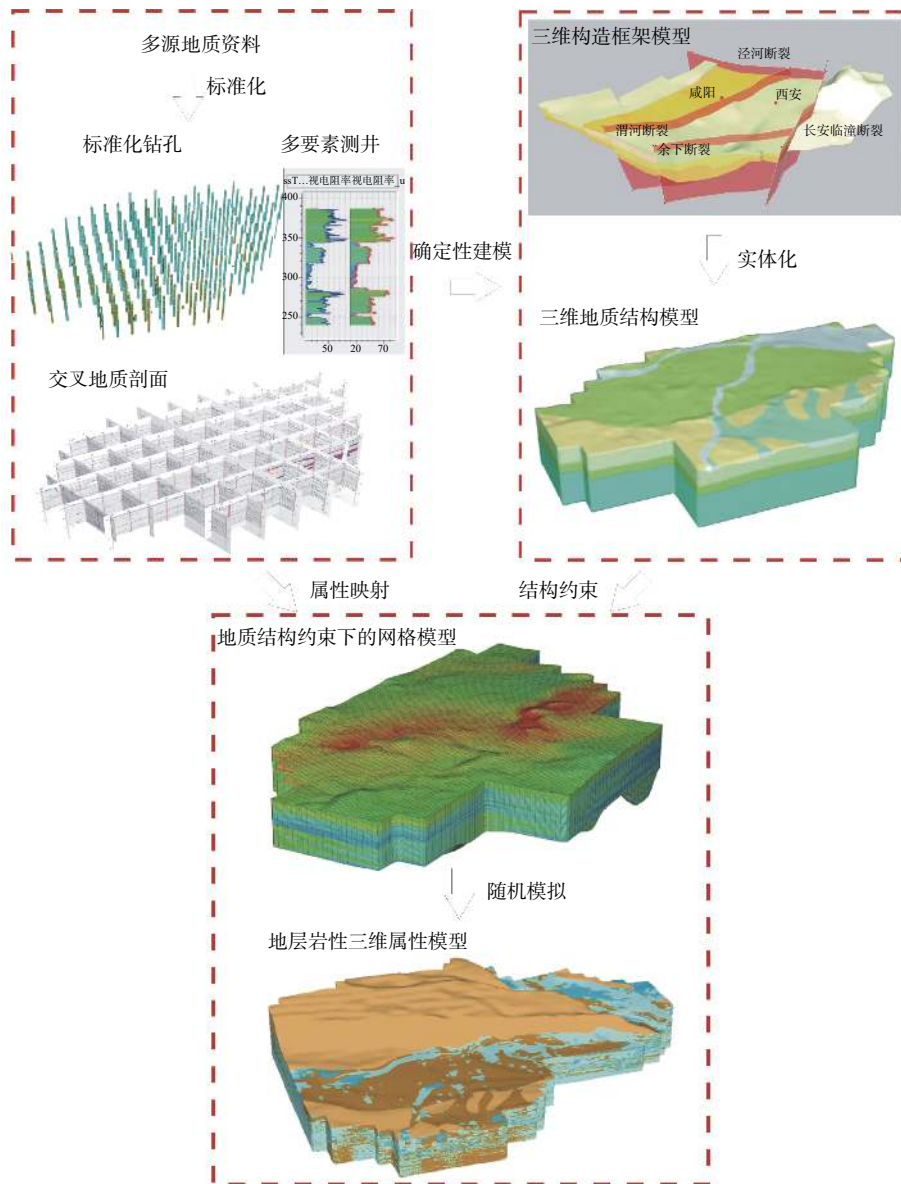


图 1 三维地质建模流程图

Fig. 1 Construction process of 3D geologic modeling

玉, 2020)。网格的空间划分应受到地质构造条件的约束, 才能正确表达地质属性的空间分布特征。因此需要根据各个地质单元的顶、底板位置生成结构约束, 而不能跨过地质体的边界。地质体有复杂的形态、地质属性的分布也具有强烈的各向异性。网格在属性变化快速的方向尺度小、在属性变化较慢的方向尺度较大。在网格数目一样的前提下, 选择合适的体元剖分模式可以最大程度保证属性模型的准确性。

网格剖分方式的选择一定要结合所建地层的沉积规律, 按照沉积方式选用相应的剖分方式, 若剖分方式选择不恰当则会影响后续的属性插值结果。网格剖分包含以下几种方式(图 2), 立方体网

格按照固定间隔进行剖分, 有统一大小的体元网格, 属性计算简单方便, 却不可避免造成在顺地层和断裂方向上的跨界面精度损失; 顺层阶梯网格解决顺地层方向上的精度损失问题, 但在垂直方向上仍旧是阶梯状跨越断裂面, 对断层刻画不够精细; 顺层截断网格是一种比较好的选择, 这种网格在顺着地层的方向尺度较大, 在垂直于地层的方向尺度较小, 可以很好的满足各向异性的要求。在出现地层尖灭、侵入和断裂的位置, 可以被地质体的界面截断, 避免出现跨过地质界面的网格, 在同等网格数量下, 可以极大地提升描述地质体几何形状和属性分布的精确度。

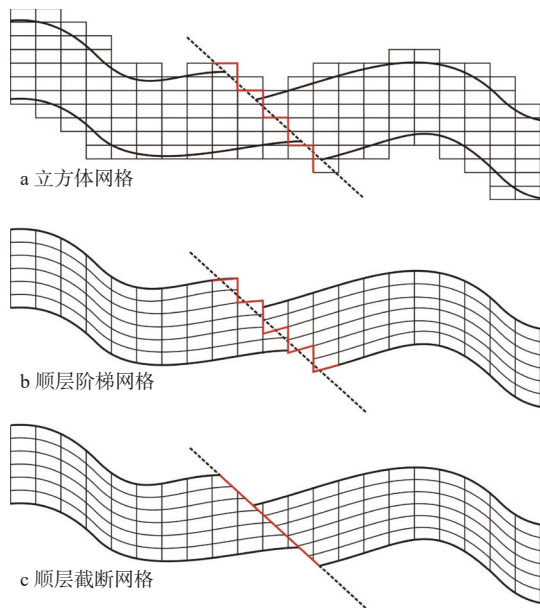


图2 网格化方法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of gridding methods

网格剖分精度的选取也十分重要。如果剖分过粗,插值结果将不会显示相关规律性,有时甚至是杂乱无章的属性分布;若剖分过细,则运算量将会成倍增加,可能会超出计算机内存导致程序崩溃。所以剖分网格大小要根据钻孔密度,沉积方式,计算机硬件条件,属性数量等综合考虑决定(吴宇龙, 2020; 解博, 2021)。

1.4 多要素属性随机建模

随机建模技术是通过地质统计学理论,分析已有数据的空间变异特征,采用随机模拟方法再现要素的空间非均质性。多要素属性模型的构建是在精细的网格框架模型的基础上进行的,根据所要建立的属性目标(包括岩性、各类水文地质参数、工程地质参数等)对钻孔或测井数据进行离散化和概化,通过直接赋值的方法输入到网格框架中。在参考属性空间分层结构的情况下,对每一地层属性参数进行数据分析,选择合适的理论变差模型,拟合模型各项参数,确定其空间相关性或变异性。根据研究区的实际地质条件以及属性数据的类型综合考虑,选用合适的插值方法把网格模型中每个网格都赋予相应的属性值。插值算法包括:离散属性的插值算法有序贯指示模拟(随机插值)、克里金插值(确定性插值);连续属性的插值算法有序贯高斯模拟(随机插值)、克里金插值(确定性插值)等。

2 建模实例

2.1 研究区地质概况

西咸新区是关中-天水经济区的核心区域,位于陕西省西安市和咸阳市建成区之间,规划控制面积为 882 km²(图 3)。西咸新区地形平坦开阔,地貌类型简单,根据地貌形态、物质组成和成因类型,可划分为平原、黄土台塬两大地貌类型。研究区第四系分布广泛,岩性厚度变化较大,主要成因类型有冲积、洪积、风积、湖积及其过渡类型,岩性以砂砾、卵石、砂、亚砂土、亚黏土、黄土等为主,厚数十至数百米不等。

2.2 建模平台及数据来源

本次建模使用网格天地公司的深探地学建模软件,其特点是可采用多源数据建立复杂的高精度三维地质模型,支持大工区整体建模,并提供丰富的属性插值算法。

本次建模资料主要包括工作区的各类平面图、工程地质钻孔及连孔剖面图。平面图包括遥感影像图(2 m)、数字高程模型(5 m)、地貌图(1:50 000)、地质构造图(1:100 000)等;工程地质钻孔共计 280 孔,按地貌单元布设,控制深度 100 m;连孔剖面呈“井”字型布置,平行或垂直于区域内主要构造方向,结合地质专家的先验知识绘制而成。属性建模主要用到的多要素测井数据共计 167 孔,包括孔隙度、渗透率、密度等力学参数和视电阻率、自然伽马、放射性铀等地球物理参数,具体的数据源见表 1。

2.3 建模过程及成果

结合西咸新区构造特点,考虑泾河断裂、渭河断裂 2 条主要断层,按照断裂期次与空间关系将建模区划分为 3 个构造单元(谢振乾, 2010; 王斌, 2013)。在每一建模单元内部,根据数据来源情况及建模范围确定建模精度,提取钻孔点位及分层信息生成地层强约束点,从工程地质剖面中提取地层边界信息,插值计算各层面模型;根据地层之间的叠覆关系生成地层实体,最终以构造边界组合为地质构造模型。模型总面积为 1 330 km²,建模深度为 150 m,共划分了 7 个地层,从老到新分别是中更新统早期冲湖积层(Q_{p2-1}^{al+1})、中更新统晚期冲积层(Q_{p2-2}^{al})、上更新统冲积层(Q_{p3}^{al})、上更新统风积层(Q_{p3}^{col})、全新统下部冲洪积层

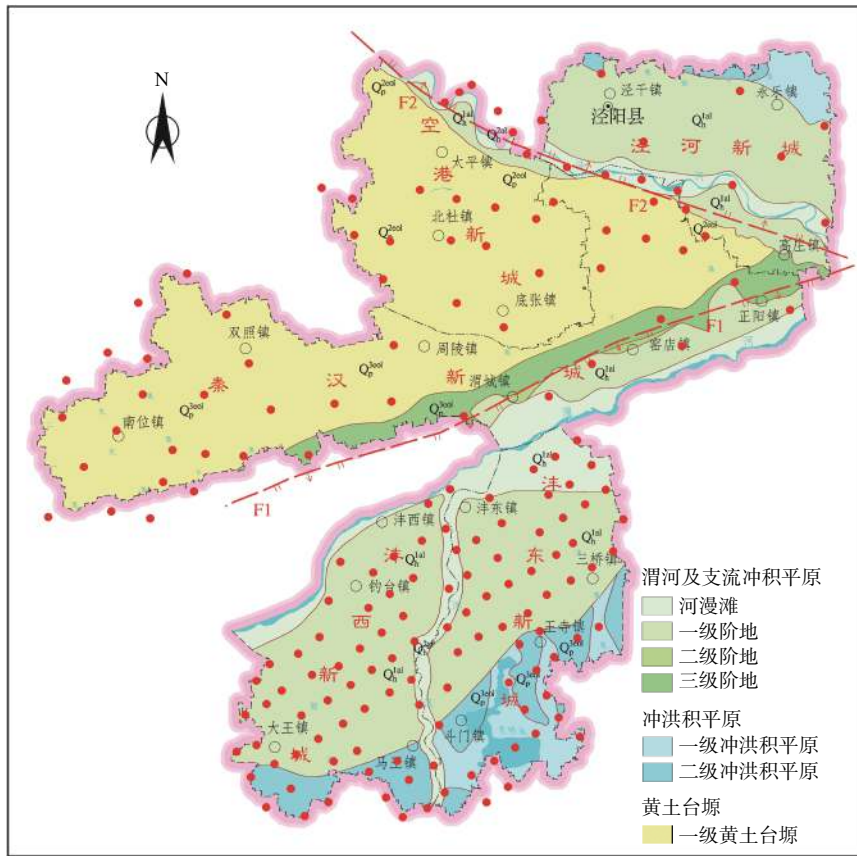


图3 西咸新区地质地貌图

Fig. 3 Geomorphological map of Xixian New Area

表1 建模数据源

Tab. 1 Data source for 3D geological modeling

编号	数据源	精度
1	大西安地区遥感影像图	2 m
2	西咸新区数字高程模型	5 m
3	西咸新区地貌图	1 : 50 000
4	西咸新区构造地质图	1 : 100 000
5	工程地质钻孔	280孔
6	工程地质剖面图	1 : 5 000
7	多要素测井曲线	167孔

(Q_{h1}^{al+pl})、全新统下部冲积层(Q_{h1}^{al})、全新统上部冲积层(Q_{h2}^{al}),其中全新统冲积冲洪积物、上更新统风积物在地表均有出露(图4a)。

在地质结构模型框架下进行网格划分,根据研究区大小、数据密度、计算机运行能力等综合考虑,将研究区划分为 $300\text{ m} \times 300\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 网格;从测井岩性译解成果中提取岩性数据,使用变差函数对数据进行预处理,选择序贯指示模拟插值方法,建立西咸新区岩性随机模型(图4b)。可以看出,地表的岩性以黄

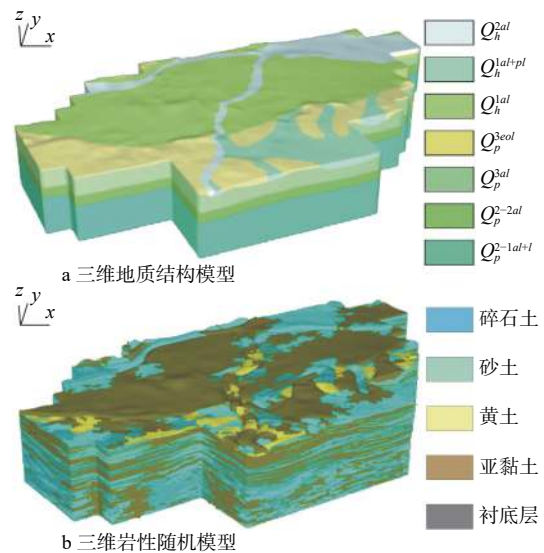


图4 西咸新区三维地质结构与岩性随机模型

Fig. 4 3D geological structure and lithology model of Xixian New Area

土、砂土、亚黏土为主,局部地区有碎石土。其中黄土主要分布在西北方向的咸阳塬上,南部秦岭冲洪积带和东北部有少量黄土;砂土和碎石土主要分布在渭

河、沔河以及泾河河漫滩附近;亚黏土主要分布在河漫滩两侧的冲积层中。地表以下以砂土和亚黏土呈二元层状交错分布。

提取视电阻率、孔隙度、渗透率、密度、自然伽

马、放射性钍等多要素测井数据,选择序贯高斯模拟插值方法,完成多要素属性随机模型的构建(图 5a~图 5f),随机模型所展现的各要素分布特征与岩性模型相吻合。

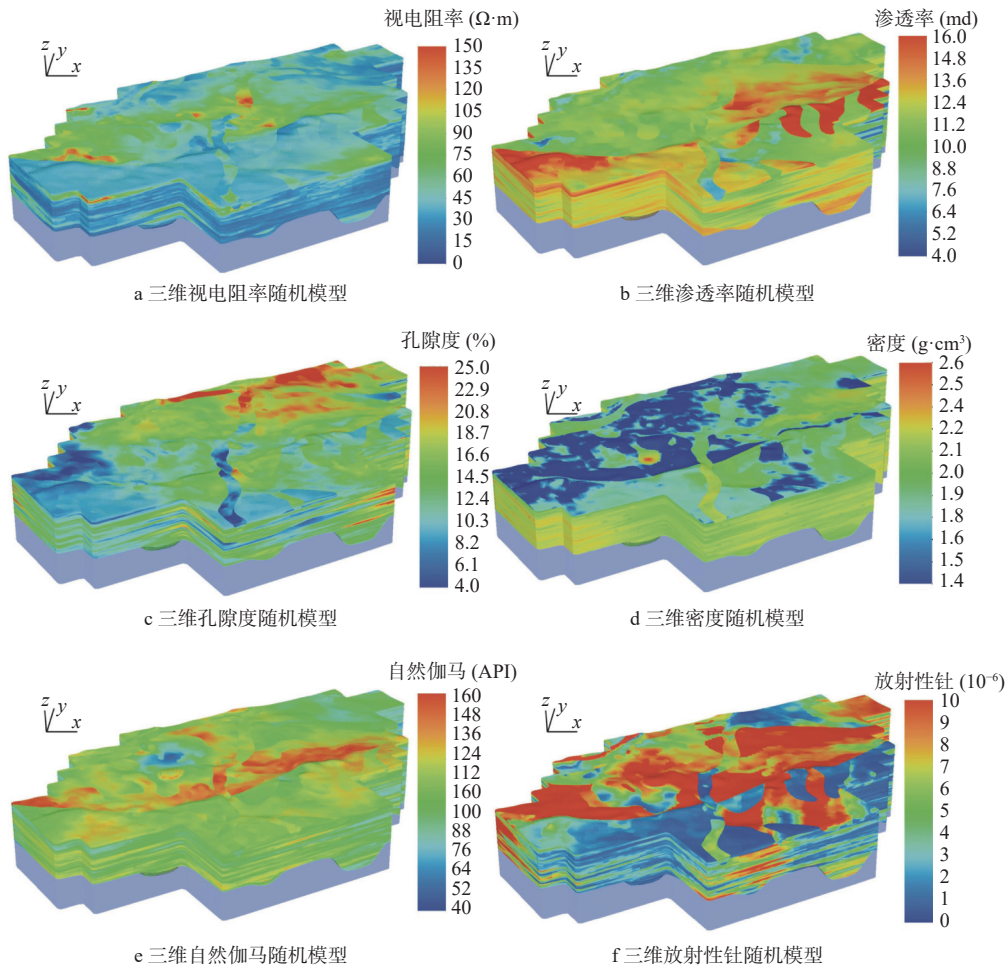


图 5 西咸新区三维属性随机模型图

Fig. 5 3D geological attribute stochastic model of Xixian New Area

3 三维地质模型应用

综合采用工程地质钻探、多要素测井等探测手段,构建三维地质结构约束下的西咸新区工程地质属性模型,利用该模型能够深入了解模型内部的地质状况,可进行多种三维空间分析和应用。例如,虚拟钻孔或剖面分析、工程地质稳定性评价、地下空间适宜性评价等。

3.1 虚拟钻孔(剖面)分析

精细化工程地质模型建立完成后,在模型区域内任意位置、任意方向提取地层剖面,能够展示地下空

间的层分布情况(何静, 2019; 周念清, 2020)。选取相同位置的手绘钻孔剖面图与虚拟剖面图作对比,左侧上部为黄土,下部为亚黏土;中间为砂土与亚黏土互层,主要岩性为厚层砂土;右侧也是亚黏土和砂土互层,但以亚黏土为主(图 6)。总体规律上虚拟剖面的模拟结果与手绘剖面比较接近,可以为任意位置的工程勘察提供基本的资料支撑。

3.2 工程地质稳定性评价

采用数值模拟方法对城市地下空间的稳定性开展研究,能够科学地评价地下空间稳定性,模拟不同地下空间工程的组合以及施工前后相互影响,开启多层位地下空间开发新模式(李宁, 2006, 2014)。利用

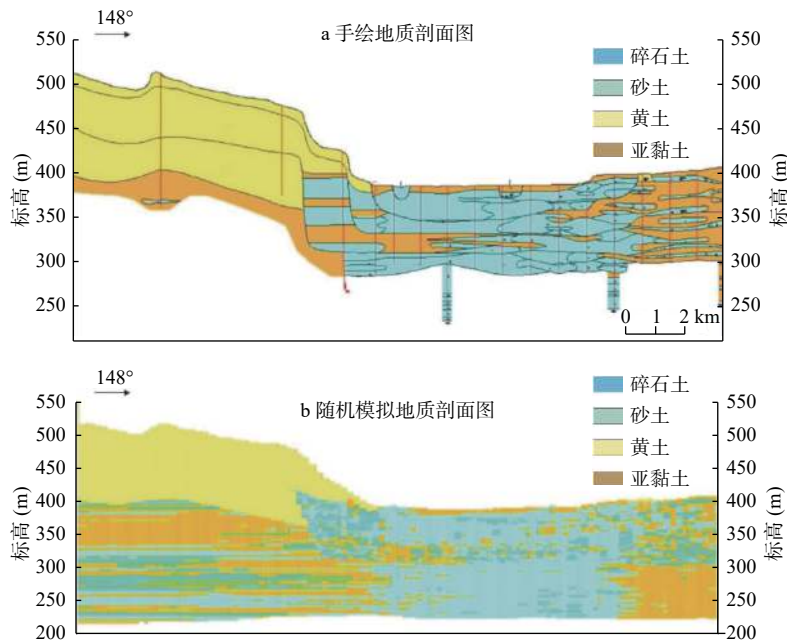


图 6 结构与属性模型虚拟剖面对比图

Fig. 6 Profile comparison of structure and attribute model

测井参数三维随机模型计算工程地质力学参数三维展布, 构建城市地下空间三维工程地质属性模型, 建立三维属性框架模型与有限元模拟网格之间的映射关系, 将属性嵌入有限元框架模型。基于有限元框架, 可构建面向不同应用需求的多尺度数值模拟模型。

如城市地铁隧道开挖对上部既有建筑物的影响, 主要通过地铁隧道施工对上部既有建筑物产生影响, 其中包括: 地基土体的竖向位移(沉降)、基础不均匀沉降, 甚至发生水平位移、压缩应变、拉伸应变等(图 7)。通过地下空间三维工程地质属性模型提取岩土体物理力学参数, 嵌入有限元数值模型, 以组合权的形式对岩土体稳定性影响指标赋予权重, 进行地下空间稳定性判别与评价, 解决评价过程中信息不确定性, 为城市地下空间开发利用提供技术支撑, 对城市地下空间协同开发规划建议。

3.3 地下空间适宜性评价

地下空间资源是人类宝贵的资源, 是城市集约化发展、实施城市立体化开发的重要保障。近年来, 国内外学者利用 GIS 软件开展了大量的城市地下空间适宜性评价工作(方寅琛, 2017; 张茂省, 2018; 孟天宇, 2022)。这些研究通常将地下空间在垂向上根据深度上划分为不同的层次, 每层再以二维平面方式, 利用 GIS 空间分析功能分别计算地下空间适宜性。这种方法没有考虑地下空间复杂的垂向变化, 无法匹配地质数据的三维属性, 因而无法满足越来越精确的地下空间规划要求。

结构约束下的三维地质模型包括三维空间上精细的力学性质参数及地球物理参数, 各种评价因素能够从三维空间中进行提取, 可以充分结合地质条件、自然条件、经济条件等各方面因素, 对任意深度或深

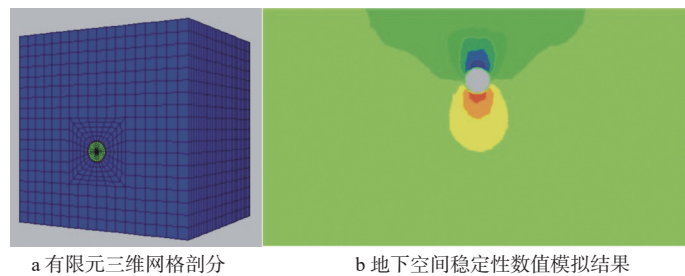


图 7 地下空间开发三维稳定性评价图

Fig. 7 3D Stability evaluation map for underground space development

度范围内的地下空间开发适宜性进行评价,能够改变以往常规的地下空间评价模式(谭飞, 2021)。与传统评价方法相比,三维评价可以更好地描述地下空间资源在不同深度的空间差异,同时评估过程与结果的透明表达,也是城市地上地下整体规划、地下空间设计建造的重要手段,能够定性、定量的为地下空间开发利用提供前期的辅助决策。

4 结论

(1)结构属性一体化模型能够融合地质结构先验知识,还能对内部属性进行精细的刻画与描述,解决了多源数据精度不一致问题,既能进行层面间的结构架构展示,又能详细查看特定属性的三维空间展布。

(2)根据三维地质结构模型划分属性模型的结构约束,考虑地质单元特征采用顺层截断网格剖分技术,可为多源属性信息的融合和集成提供载体,建模成果可服务于数值模拟与分析评价。

(3)属性建模采用序贯指示、序贯高斯等随机建模技术,可以构建具有统计学意义的多个随机结果,用于评估研究区的不确定性,也能够更加合理地展现地质属性的空间分布和变化。

参考文献(References):

- 陈麒玉,刘刚,何珍文,等.面向地质大数据的结构-属性一体化三维地质建模技术现状与展望[J].地质科技通报,2020,39(04):51-58.
- CHEN Qiyu, LIU Gang, HE Zhenwen, et al. Current situation and prospect of structure-attribute integrated 3D geological modeling technology for geological big data[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(04): 51-58.
- 方寅琛,龚日祥,李三凤,等.基于三维地质模型的地下空间开发适宜性评价—以嘉兴城市地质调查工作为例[J].上海国土资源,2017,38(2):43-45.
- FANG Yinchen, GONG Rixiang, LI Sanfeng, et al. Suitability evaluation of underground space development based on a three-dimensional geological model, using the Jiaxing urban geological survey as an example[J]. Shanghai Land & Resources, 2017, 38(2): 43-45.
- 何静,何晗,郑桂森,等.北京五环城区浅部沉积层的三维地质结构建模[J].中国地质,2019,46(2):244-254.
- HE Jing, HE Hanhan, ZHENG Guisen, et al. 3D geological modeling of superficial deposits in Beijing City[J]. Geology in China, 2019, 46(2): 244-254.
- 李良平,胡伏生,尹立河.鄂尔多斯盆地白垩系三维地质建模研究[J].西北地质,2007,40(02):109-113.
- LI Liangping, HU Fusheng, YIN Lihe. Research on 3D geological modeling of cretaceous in ordos basin[J]. Northwestern Geology, 2007, 40(02): 109-113.
- 李林,朱立峰,李政国,等.复杂断裂构造条件下城市地质三维建模方法研究[J].西北地质,2022,55(03):133-139.
- LI Lin, ZHU Lifeng, LI Zhengguo, et al. Technology Research on the Constructing of Urban Geological 3D Model in Condition of Complex Faults[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(03): 133-139.
- 李宁,陈蕴生,陈方方,等.地下洞室围岩稳定性评判方法新探讨[J].岩石力学与工程学报,2006,25(9):1941-1944.
- LI Ning, CHEN Yunsheng, CHEN Fangfang, et al. Research on tunnel stability criterion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1941-1944.
- 李宁,刘乃飞,李国峰.软岩及土质隧洞围岩稳定性评价新方法[J].岩石力学与工程学报,2014,33(9):1812-1821.
- LI Ning, LIU Naifei, LI Guofeng. New method for stability evaluation of soil and soft rock tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(9): 1812-1821.
- 李青元,张洛,曹代勇.三维地质建模的用途、现状、问题、趋势与建议[J].地质与勘探,2016,52(4):759-767.
- LI Qingyuan, ZHANG Luo, CAO Daiyong, et al. Usage. Status. Problems, Trends and Suggestions of 3D Geological Modeling[J]. Geology and Exploration, 2016, 52(4): 759-767.
- 马朝阳,王占昌,张立海,等.新型三维地质建模方法及其在成都-昌都区域建模的应用[J].西北地质,2022,55(02):82-92.
- MA Zhaoyang, WANG Zhanchang, ZHANG Lihai, et al. A New 3D Geological Modeling Method and Its Application in Chengdu-Changdu Region Modeling[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(02): 82-92.
- 孟天宇,王睿,葛伟亚,等.基于三维建模的南京江北新区地下空间资源质量评价[J].地理信息世界,2022,29(5):94-100+105.
- MENG Tianyu, WANG Rui, GE Weiya, et al. Quality Evaluation of Underground Space Resources in Jiangbei New Area of Nanjing Based on 3D Modeling[J]. Geomatics World, 2022, 29(5): 94-100+105.
- 明镜,潘懋,屈红刚.北京市新生界三维地质结构模型构建[J].北京大学学报(自然科学版),2009,45(1):111-119.
- MING Jing, PAN Mao, QU Honggang. Constructing three dimensional geological structure model of Cenozoic Erathem in Beijing[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2009, 45(1): 111-119.
- 潘懋,方裕,屈红刚.三维地质建模若干基本问题探讨[J].地理

- 与地理信息科学, 2007, 23(3): 1-5.
- PAN Mao, FANG Yu, QU Honggang. Discussion on several foundational issues in three-dimensional geological modeling[J]. Geography and Geo-information Science, 2007, 23(3): 1-5.
- 孙波, 刘大安. 复杂地质界面三维重构与评价方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(3): 556-564.
- SUN Bo, LIU Da'an. Three-dimensional reconstruction of complex geological interfaces and its evaluation method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(3): 556-564.
- 谭飞, 汪君, 焦玉勇, 等. 城市地下空间适宜性评价研究国内外现状及趋势[J]. 地球科学, 2021, 46(05): 1896-1908.
- TAN Fei, WANG Jun, JIAO Yuyong. Current Situation and Development of Urban Underground Space Suitability Evaluation[J]. Earth Science, 2021, 46(05): 1896-1908.
- 王斌, 郑洪波, 王平, 等. 渭河盆地新生代地层与沉积演化研究: 现状和问题[J]. 地球科学进展, 2013, 28(10): 1126-1135.
- WANG Bin, ZHENG Hongbo, WANG Ping, et al. The Cenozoic strata and depositional evolution of Weihe Basin progresses and problems[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(10): 1126-1135.
- 王波, 雷传扬, 刘兆鑫, 等. 三维地质建模过程中综合地质剖面构建方法研究[J]. 沉积与特提斯地质, 2021, 41(01): 112-120.
- WANG Bo, LEI Chuanyang, LIU Zhaoxin, et al. A geological 3D modeling method of comprehensive geological section for Chengdu[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2021, 41(01): 112-120.
- 魏嘉. 地质建模技术[J]. 勘探地球物理进展, 2007, 30(1): 1-6.
- WEI Jia. Review of geologic model building techniques[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2007, 30(1): 1-6.
- 武强, 徐华. 三维地质建模与可视化方法研究[J]. 中国科学(D辑)-地球科学, 2004, 34(1): 54-60.
- WU Qiang, XU Hua. Study on 3D geology modeling and visualization method[J]. Science in China (Series D), Earth Sciences, 2004, 34(1): 54-60.
- 吴宇龙. 基于测井数据的三维工程地质属性建模方法研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- WU Yulong. Research on 3D Engineering Geological Attribute Modeling Method Based on Logging Data[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- 解博. 基于多源测井数据融合的三维随机属性建模[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- XIE Bo. 3D Stochastic Attribute Modeling Based on Multi Source Logging Data Fusion[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021.
- 谢振乾, 杨建军, 郑宁平. 论渭河盆地断块运动及地震活动特征[J]. 陕西地质, 2010, 28(2): 59-65.
- XIE Zhenqian, YANG Jianjun, ZHENG Ningping. Characteristic of fault-block movement and seismicity in the Weihe Basin[J]. Geology of Shaanxi, 2010, 28(2): 59-65.
- 杨东来, 张永波, 王新春, 等. 地质体三维建模方法与技术指南[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- YANG Donglai, ZHANG Yongbo, WANG Xinchun, et al. The geological body and the technology of 3D modeling method guide[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007.
- 张茂省, 王化齐, 王尧, 等. 中国城市地质调查进展与展望[J]. 西北地质, 2018, 51(4): 1-9.
- ZHANG Maosheng, WANG Huaqi, WANG Yao, et al. Progress and prospects of urban geological survey in China[J]. Northwestern Geology, 2018, 51(4): 1-9.
- 周念清, 杨浩博, 杨磊, 等. EVS耦合地层-岩性三维地质建模方法在南宁地铁工程中的应用[J]. 隧道建设, 2020, 40(2): 238.
- ZHOU Nianqing, YANG Haobo, YANG Lei, et al. Application of EVS coupled stratigraphic-lithologic three-dimensional geological modeling method in Nanning Metro Project[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(2): 238.
- 朱良峰, 吴信才, 潘信. 三维地层模型误差修正机制及其实现技术[J]. 岩土力学, 2006, 27(2): 268-271.
- ZHU Liangfeng, WU Xincan, PAN Xin. Mechanism and implementation of error correction for 3D strata model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(2): 268-271.
- Mallet J L. Discrete smooth interpolation in geometric modeling [J]. Computer-Aided Design, 1992, 24(4), 177-191.