



山东省聊城市中心城区 三维可视化地质模型建设

姜亦阳¹, 吴启琛¹, 王丽¹, 范开放¹, 陈瑶^{2*}

(1. 山东省地质矿产勘查开发局第一地质大队(山东省第一地质矿产勘查院), 山东 济南 250010; 2. 聊城市地质矿产调查监测中心, 山东 聊城 252000)

摘要:随着城市的发展, 查清城市三维地质结构、地质资源及环境状况, 拓展城市发展空间, 成为当前聊城市中心城区城市地质工作的重要任务, 构建聊城市中心城区三维可视化地质模型成为这一任务的关键载体。本文依托聊城市中心城区城市地质调查项目展开研究, 在建模方法上, 综合考虑多种现有方法后, 采用以 2 000 余眼钻孔数据, 覆盖聊城市中心城区全域的数字高程数据和多年来聊城中心城区地质报告, 区域地质图作为数据资料 and 主要依据, 使用交互式建模方式为主、自动建模方式为辅的方法进行三维可视化地质模型建设, 在保证数据准确与可视化表达的前提下, 提高了建模效率。首次在聊城市中心城区完成了 100 m 以浅的三维可视化地质模型构建。模型建成后, 通过场景设置等功能应用于城市建设规划, 可分析线路、基坑、隧道等地质情况, 为城市管理提供地质服务, 也为黄河中下游同类建模提供了范例。

关键词:三维可视化; 地质模型; 单元格建模; 聊城市; 山东省

中图分类号: U455.47

文献标识码: A

doi: 10.12128/j.issn.1672-6979.2025.07.008

0 引言

随着地质大数据的应用和城市对地下空间开发的需求, 三维可视化地质模型的构建成为科学合理利用地下空间的基础前提^[1-4]。依据聊城市矿产资源总体规划(2021—2025 年), 要全面推进聊城市中心城区城市地质调查工作, 建设中心城区三维地质结构模型, 服务聊城市国土空间规划和重点工程建设。聊城市水资源丰富, 被誉为江北水城^[5-8], 地质工作程度相对较高, 多年来各部门在中心城区及周边开展了大量的不同目的、不同精度的基础地质、矿产地质、水文地质、环境地质、工程地质、地球物理及地球化学调查等工作, 尤其是城市建设过程中的工程地质勘探工作, 积累了丰富的地质研究成果资料及大量的测试、分析、监测数据和钻孔资料, 为本次三维可视化地质建模工作打下良好的资料基础。

因此, 作为整合基础地质数据的载体, 在深入开展城市地质调查的基础上, 建立一套聊城市中心城区三维可视化地质模型的工作势在必行。本文依托“聊城市中心城区城市地质调查项目”, 在聊城市中心城区首次建立起了 100 m 以浅的三维可视化地质模型, 填补了聊城市中心城区三维可视化地质模型建设的空白。此模型集成了聊城市中心城区历史以来形成的各类地质资料信息, 直观立体地展示了城市地下地质体、地质结构、地质构造、地质资源和地质环境等地质信息, 实现了对聊城市中心城区本次城市地质调查工作可量化的工程地质环境适宜性评价, 地下空间开发利用适宜性评价等, 将为聊城市城市精细化管理提供可靠的地质服务。

1 三维地质建模方法综述

地质数据的多元异构性, 决定了三维模型的构

收稿日期: 2024-12-30; 修订日期: 2025-02-28; 编辑: 陶卫卫

基金项目: 聊城市中心城区城市地质调查(No.SDGP371500000202202000055)

作者简介: 姜亦阳(1986—), 男, 山东五莲人, 工程师, 主要从事地理信息应用及地质信息应用工作; E-mail: jiangyiyang05@126.com

* 通信作者: 陈瑶(1991—), 女, 重庆合川人, 高级工程师, 主要从事地质矿产调查监测工作; E-mail: 271685169@qq.com

建关键在于建模方法的选择,目前对三维地质模型的构建方法已有了不少研究,但由于地质科学的特殊性 & 复杂性,没有一种通用的方法,需要根据具体地质情况及任务需求选择合适的方法^[9-10]。

三维地质模型的概念最早是由加拿大学者 Simon Houlding 于 1993 年提出的^[11],三维地质可视化的技术方法研究在国外开展较为成熟^[12],英国、德国等国家三维地质建模技术成型度较好。韩征等^[13]指出,英国已经完成的国家地质模型和不同比例尺的基岩地质模型最具完整性和系统性,其主要采用的方法为多比例尺的地理空间模型构建。德国采用了精细化三维地质模型构建的方法,通过统一的软件对模型进行集成和显示。

20 世纪 90 年代,国内开始三维地质可视化技术的研究。朱良峰等^[14]提出的以钻孔数据为基础构建三维地质实体模型,此种方法快速易实现,适合计算机自动建模,但此方法是需要获取大量的地质钻孔数据,并且需要对数据进行有效的筛选,需要进行虚拟钻孔布设。屈红刚,潘懋,明镜等^[15]提出的利用折交叉剖面进行地质三维结构建模的方法,此种方法结合传统地质剖面构建,适合不规则区域的三维地质建模,此方法构建模型速度快,结合地质知识的融入,可以较为准确地通过人机交互的模式完成三维地质模型构建。马仁安、王焕弟等^[16-17]提出的石油物探三维地质模型构建,其应用范围主要是利用地震物探三维场数据,对油气地层进行建模。周良辰等^[18]提出的多源数据融合建模法,其融合了基础地理信息数据,物探数据,钻孔数据,用空间插值法来构建地质三维模型,建模过程中需将建模数据统一到钻孔数据上来,建立虚拟钻孔数据,利用钻孔数据进行有效的插值计算,此方法建模速度较快,为保证准确性也需引入专家知识库。

相比于此前国内外三维地质模型的建模方法,本次以交互式建模方式为主、自动建模方式为辅的建模方法更为符合聊城市城市地质的实际情况,既有效利用了软件内置算法对建模数据的快速筛选,快速构建,又结合专家经验对算法进行即时修正,进而对数据的现势性及准确性有了全面的把握,克服了此前三维地质建模方法研究性大于应用性的缺点。建模完成后通过对模型的实地验证,也证实了此次建模建设方法的先进性、全面性和准确性。

2 区域概况、地质背景及研究现状

2.1 区域概况

本次研究区范围为聊城市中心城区,北至规划北苑路、西至德商高速公路,东至机场东路,南至规划南苑路,建模区面积 402 km²(图 1)。聊城市中心城区地貌类型单一,为黄河冲积平原,地形平坦。微地貌形态主要为浅平洼地和缓平坡地。全区被第四系覆盖,浅部为黄河泛滥冲积形成的松散沉积层,深部沉积物来自南部的泰山山脉。

2.2 地质背景

二级构造断裂聊城-兰考断裂在中心城区东部呈 SW—NE 走向穿过,将聊城中心城区新生代沉积基底切割成东西两部分。东部缺失古近纪沉积地层,新近纪地层也相对较薄,基岩为晚古生代碎屑岩和早古生代碳酸盐岩,西部古近纪地层下部为中生代侏罗纪、白垩纪碎屑岩。

聊城市中心城区 100 m 以浅地层分布简单,地面全被第四纪黄河组覆盖。从上至下,由新到老,地层分布为:黄河组、黑土湖组、平原组。

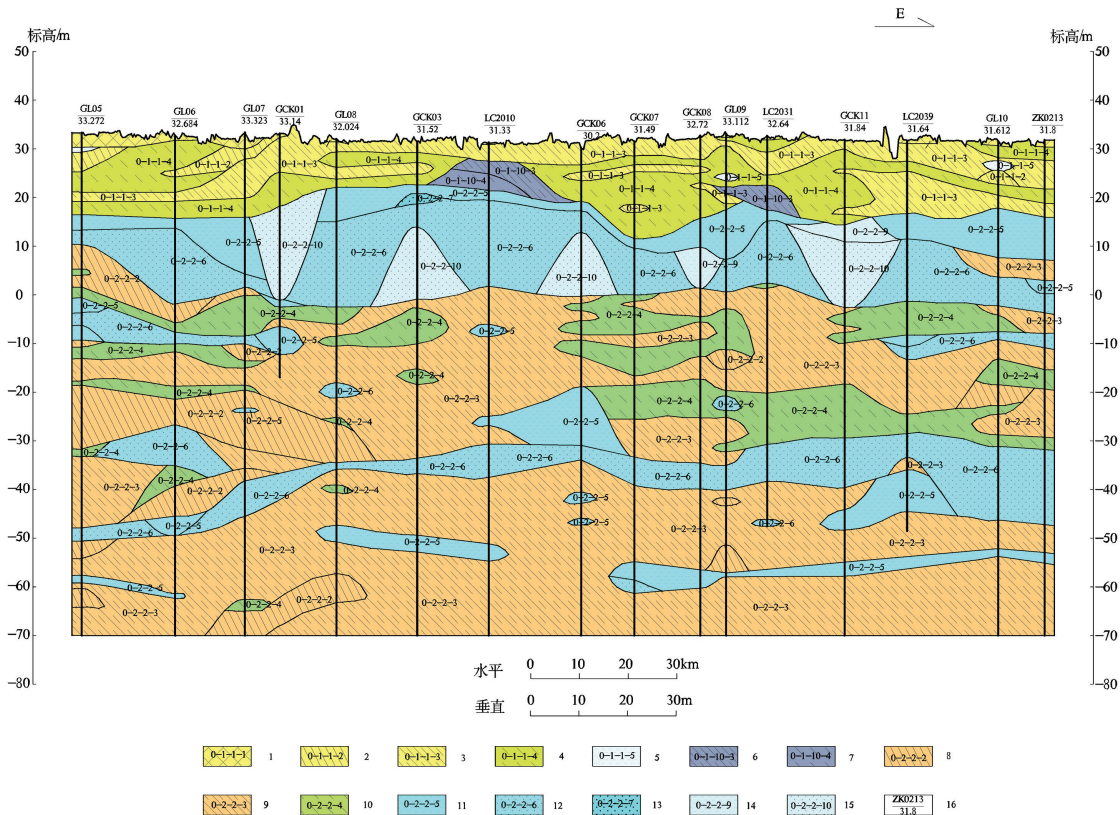
黄河组和黑土湖组穿插分布,总厚度一般 10~20 m,属第四纪全新统河湖相沉积,下部均为平原组,为第四纪中上更新统河流沉积。地层成层性良好,黏性土层(黏土、粉质黏土)和砂层(砂、粉土)相间分布。

从东西剖面(图 1)可知,地层延续性及完整性相对较好,砂层完整,厚度大;从南北剖面(图 2)可知,地层相对较零碎,砂层不够完整,厚度相对较小,表现多层性。

2.3 研究现状

2015 年,开展了“聊城市城市地质调查”工作并提交成果报告及相关图件、数据库。施工了 60 眼 50 m、10 眼 100 m 的工程地质勘探孔,并获取了工程地质物理力学参数,初步建立了聊城城市地质信息管理系统。

2020 年起,山东省自然资源厅开展“透视山东—地质信息集成与综合利用”项目,建立了全省 1:25 万精度 1 000 m 深度的三维可视化地质结构模型,编制了全省城市地质调查工作系列技术要求,为三维地质建模提供了经验和可借鉴的成果。



1—人工回填土;2—黄河组黏土;3—黄河组粉质黏土;4—黄河组粉土;5—黄河组粉砂;6—黑土湖组粉质黏土;7—黑土湖组粉土;8—平原组黏土;9—平原组粉质黏土;10—平原组粉土;11—平原组粉砂;12—平原组细砂;13—平原组中砂;14—平原组灰粉砂;15—平原组灰细砂;16—钻孔编号/钻孔标高(m)。

图 1 东西向地质结构剖面图

3 聊城市中心城区三维地质模型建模

聊城市中心城区三维可视化地质模型建设工作充分考虑了国内外各种三维地质模型建模方法,根据聊城市中心城区的地质构造特征,采用了以钻孔的分层、高程和坐标资料为主要依据,结合标准比例尺的区域地质图,现势性较好的 DEM 数据和其他相关地质资料,利用由地质专家经验知识构建的交叉剖面,使用 MapGIS 三维建模软件,以交互式建模方式为主、自动建模方式为辅的建模方法。

3.1 建模步骤

首先对已有的钻孔数据、二维地质数据库进行甄别选用,确定三维地质模型建设所需数据的类型、精度;统一拟建三维地质体的地层划分标准,该标准是标准化处理钻孔分层、标准化绘制地质剖面图的重要依据;在研究区范围合理布置地质剖面线,确定地质剖面线的走向、间距,确定用于绘制剖面图的钻孔筛选原则。然后应用自动生成地质剖面图的软件

功能,及地质专家的人工干预绘制标准地质剖面图;在三维视图中,结合带 DEM 的地表地质图、一定网度的地质剖面图,采用交互式建模方式为主、自动建模方式为辅的方法构建三维地质模型。

3.2 数据准备

3.2.1 钻孔资料的准备

钻孔资料是三维地质模型建设的基础数据^[19],本次具有确定地层分层,且符合标准化的钻孔共有 2 094 个,对符合标准的钻孔数据、进行甄别选用,确定三维地质模型建设所需钻孔数据的类型、精度。由于钻孔来源于不同的勘探单位,分布不均,有些地方钻孔密集,有些地方钻孔稀疏,这给如何选择钻孔来参与建模带来难度。在选择钻孔时,不仅要考虑钻孔的重要性,还要兼顾钻孔的密度分布。

3.2.2 高精度区域地质图的准备

高精度的区域地质图数据库是建立三维地质模型时约束地表地层分布范围、分析地层产状、分析地质构造的重要数据基础。在实际工作中,当钻孔揭

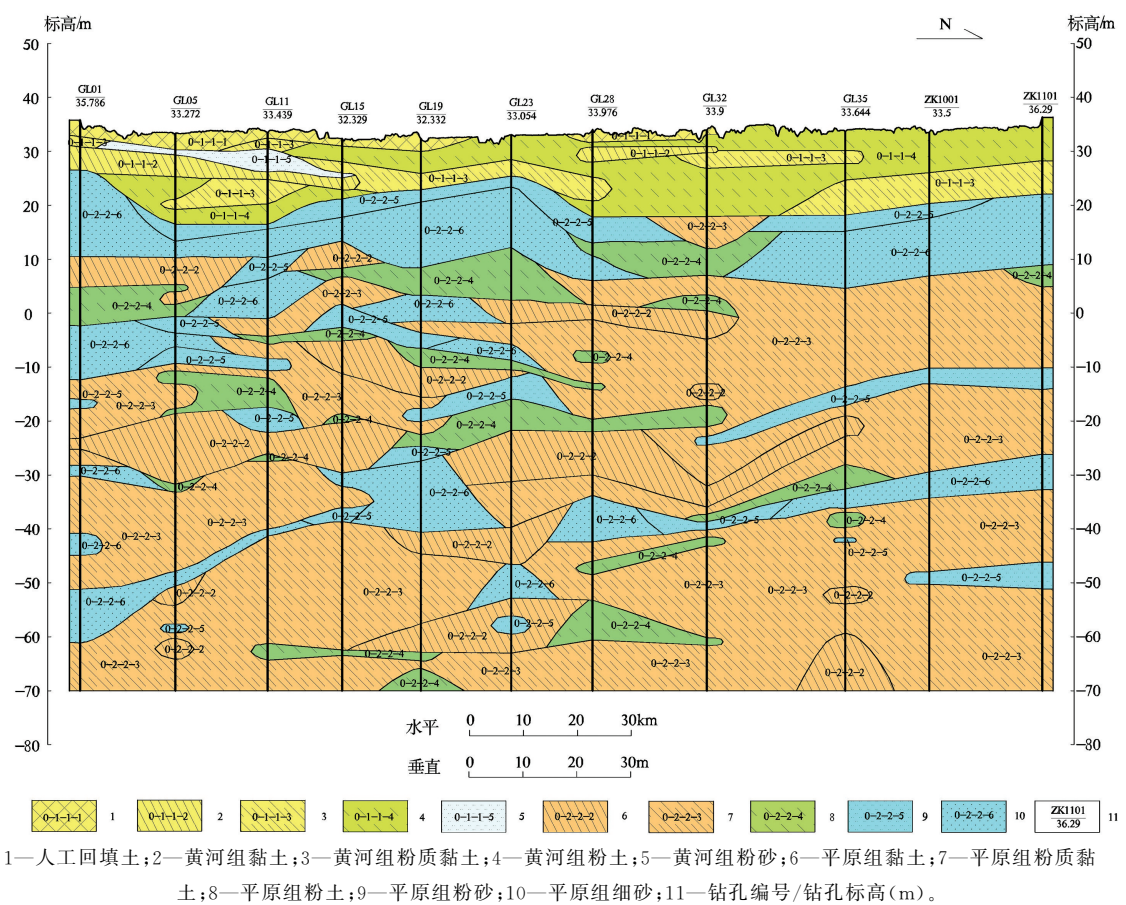


图 2 南北向地质结构剖面图

露的地层与区域资料矛盾时,引入地质专家知识将钻孔信息与地质图进行了对比分析、相互校正。

3.2.3 DEM 数据的准备

DEM 高程数据库是控制三维地质模型地形起伏的地表约束条件。选取的数字高程数据库要求完全覆盖本次聊城市中心城区建模范围、比例尺合适、时效性最新。

3.3 数据处理

3.3.1 地层分层标准划分

建立三维地质构造模型之前,需明确地层划分方式、划分级别、命名规则等,即建立聊城市中心城区工作范围内的三维地质模型地层划分标准表(表 1)。利用这个标准有序、规范地建立三维地质体,该标准也是标准化处理钻孔分层、绘制标准地质剖面图的重要依据。通过统计覆盖聊城市中心城区建模区平面和 100 m 深度可能出现和所有地层名称,然后再按现有地层划分及命名规则进行对比较正,最终将地层时代划分和命名进行统一。

表 1 聊城市中心城区 100 m 以浅地层标准化分层表				
一级	二级	三级	四级	标准化编号
第四系	全新统	人工填土	人工填土	0-1-1-1
		黄河组	黏土	0-1-1-2
			粉质黏土	0-1-1-3
			粉土	0-1-1-4
			粉砂	0-1-1-5
		黑土湖组	粉质黏土	0-1-10-3
			粉土	0-1-10-4
	中上更新统	平原组	黏土	0-2-2-2
			粉质黏土	0-2-2-3
			粉土	0-2-2-4
			粉砂	0-2-2-5
			细砂	0-2-2-6
			中砂	0-2-2-7
			粗砂	0-2-2-8

3.3.2 钻孔的标准化

钻孔的标准化实现了地质大数据对钻孔数据的要求^[20],将钻孔数据进行有效应用是生产建设等各方面工作的前提^[21],三维地质建模采用的钻孔越多越好,其建模精度也越高。本次收集了 3 000 多个钻孔,筛选了 2 094 个钻孔用于绘制标准地质剖面

图,建立单元格模型。选择本次城市地质调查施工的钻孔(现势性好),地层分层信息明确的控制性钻孔,深度较大的钻孔开展抽水试验、土工试验、样品采集、光释光测年等重要试验的钻孔,钻孔资料稀少的相对空白区域内的钻孔作为基准孔。将钻孔分层信息统一标准,即按照三维地质模型地层分层标准处理钻孔,再利用标准化的钻孔绘制标准地质剖面。

3.3.3 剖面线布置

基于剖面的三维地质建模数据来源较广,便于已经习惯于使用地质剖面图的地质人员理解和使

用^[22]。地质剖面线是建立三维地质模型的基本框架,直接决定三维地质模型质量和准确度。

聊城市中心城区范围内及深度内的地层均为第四系,剖面线的布置需结合已有钻孔的分布及地层资料的完整性,引入地质专家知识形成最终的布设结果。剖面分布密度需要根据项目实际情况酌情考虑,平衡控制。本次布置了 30 条剖面,东西方向 14 条,南北方向 16 条,形成基本正交的网格状(图 3),剖面上利用实际钻孔 197 个,于建模区外围布设虚拟边界控制钻孔 38 个。

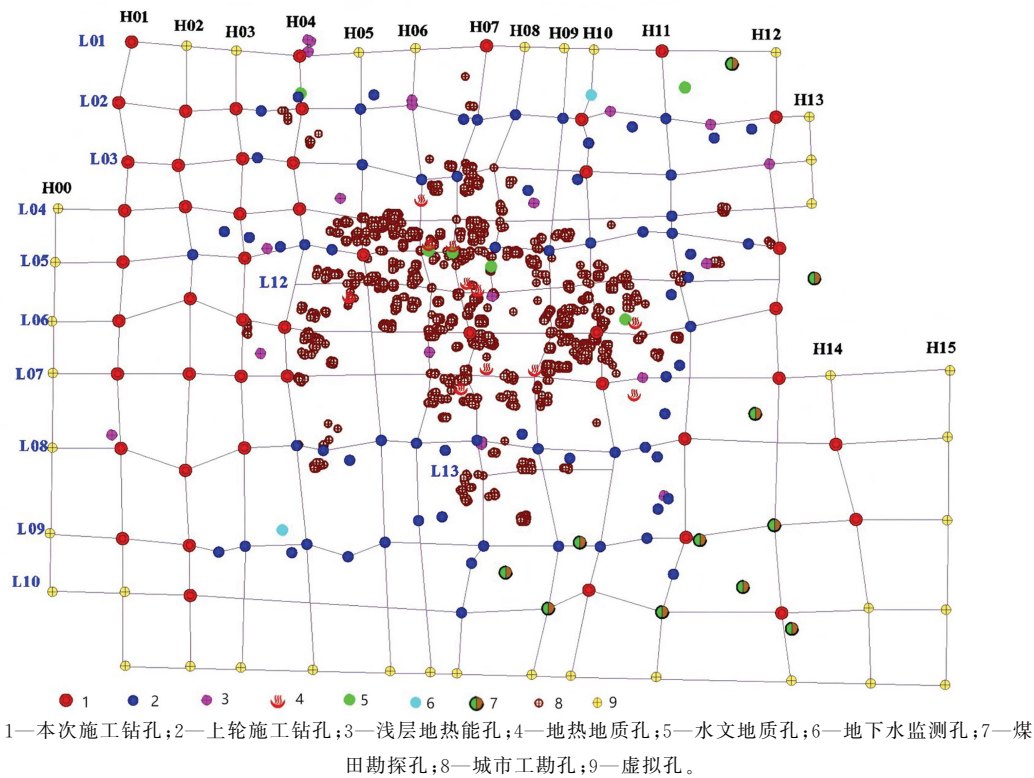


图 3 剖面线及钻孔分布图

3.3.4 标准地质剖面图的绘制

标准地质剖面图和符合精度要求的区域地质图数据库是建立三维地质模型的主体框架。区域地质图数据库控制三维地质模型中地层和地质体在平面上的分布;标准地质剖面图控制三维地质模型中主要地层和地质体在垂向上的空间分布形态。因此标准地质剖面图的绘制是构建三维地质模型的重要环节。首先自动根据标准化后的钻孔和地层一致性处理后的地质图绘制出地质剖面,然后由地质人员根据地质专业知识手动修正剖面。为保证地质剖面图的准确性、合理性,在绘制地质剖面图时需考虑地表

高程的约束,地层分区的约束,标准化钻孔的约束等各种地质条件的约束。

通过最新的地表高程 DEM,保证了地质剖面图地形起伏的时效性;通过分析钻孔数据,挖掘钻孔分层中可利用的信息,进一步提高地质剖面图中地层分界线的准确性;同时在钻孔标准化、剖面附属性过程中严格注重与行业标准规范之间的衔接,如砂层外推不超过两孔之间距离的 1/3,黏性土层外推不超过两孔之间距离的 1/2,并及时运用行业内最新的地质成果数据,保证了标准地质剖面图的规范性、权威性,剖面上每一个标准地层均赋予属性。最终

绘制的标准地质剖面图不论在区域地质背景上,还是在局部地层接触关系上都经得起推敲,是三维地质建模的主要依据。

4 三维地质模型建设与应用

4.1 三维地质模型建设

将绘制完成的聊城中心城区建模区域内的交叉剖面图导入 MapGIS 三维建模软件,将立体空间分割成多个单元格,建模的最小单元就是一个个单元

格,利用单个单元格内一系列闭合轮廓线建立起曲面片,进而确定该单元格内所有地质体的空间几何形态,形成一个单元格地质块体,最后将每个单元格的地质块体进行合并形成完整的地质体模型。建模过程中除剖面外还可利用游离钻孔、地层厚度等值线等能够揭示地下地质体和地层的信息来控制地层产状,增加模型的准确性,最终建立起聊城市中心城区 100m 以浅的三维可视化地质模型,将不可见的地下结构清晰直观的进行可视化展现(图 4)。

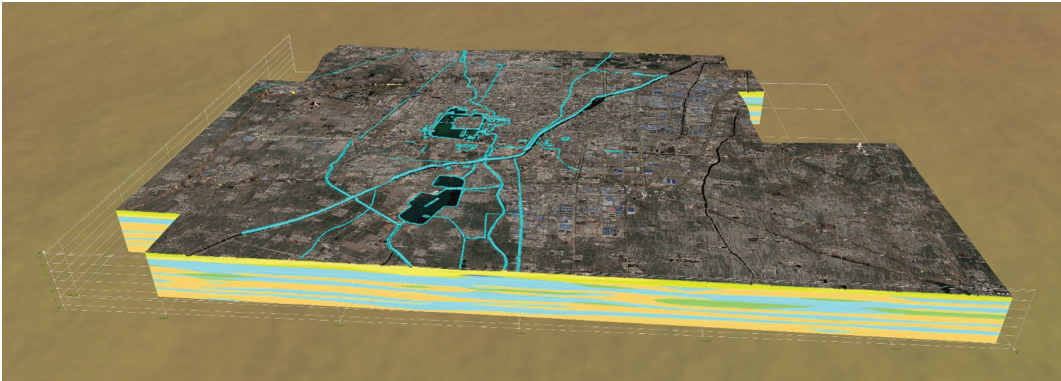


图 4 聊城市中心城区三维可视化地质模型

4.2 三维地质模型应用

聊城市中心城区三维可视化地质模型通过其场景设置、通用拾取、任意切割、爆炸显示与拖拽、基坑开挖与多视角漫游、虚拟钻孔等基本功能,在城市地

面建设、地下空间开发利用规划和建设中,发挥先导性服务或指导性建议。可同时获取多条规划路线的地质剖面图,进行适宜性分析,选取合适线路(图 5)。

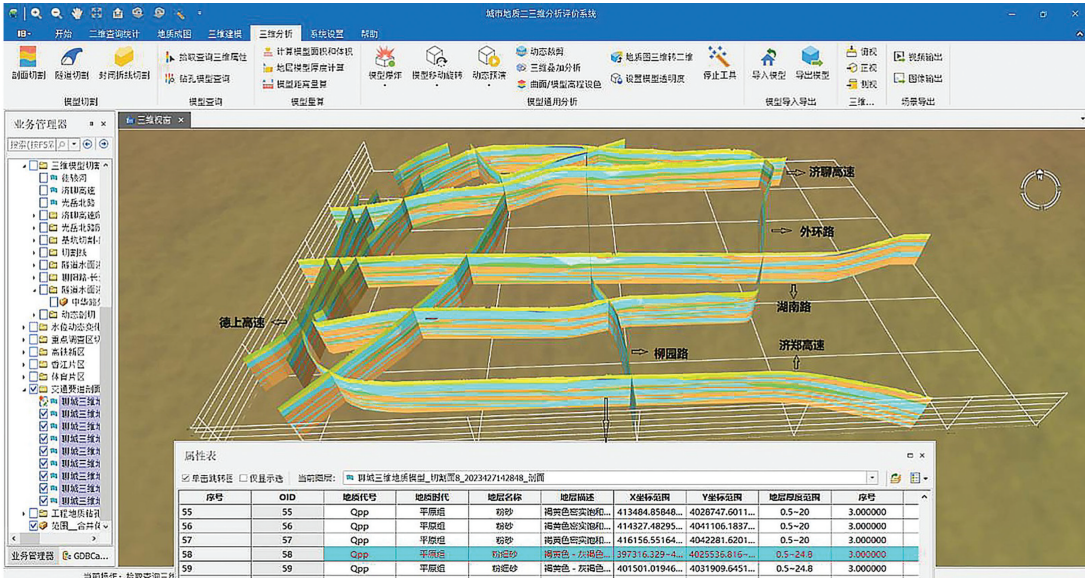


图 5 中心城区交通要道组合剖面图

可进行多个规划片区基坑开挖,掌握规划片区栅格化的地质结构,或地下空间开挖后的边坡结构,

分析边坡稳定性;可通过场地钻孔虚拟,精细掌握场地质结构和工程地质性质;可通过隧道漫游,获取

[17] 马仁安,杨静宇,王洪元.适用于地震数据可视化的体绘制模型与算法[J].计算机工程与应用,2003(22):226-228.

[18] 周良辰,陈锁忠,朱莹.地质结构三维建模及其可视化方法研究[J].计算机应用研究,2007(6):150-151.

[19] 马瑜宏,刘春华,郭晶,等.三维地质模型数据库建设的质量控制:以透视山东项目为例[J].山东国土资源,2021,37(12):73-78.

[20] 史国萍,马瑜宏,朱恒华,等.基于 GIS 的钻孔资料信息化入库工作研究[J].山东国土资源,2023,39(8):63-66.

[21] 秦泗伟,吉烜莹,姜洪胜,等.山东省日照市蓝色经济区城市三维地质结构调查及三维建模[J].山东国土资源,2022,38(4):56-61.

[22] 马洪滨,郭甲腾.基于剖面的面体混合三维地质建模研究[J].金属矿山,2007(7):50-52.

Construction of a 3D Visualization Geological Model

for the Central Urban Area of Liaocheng City in Shandong Province

JIANG Yiyang¹, WU Qichen¹, WANG Li¹, FAN Kaifang¹, CHEN Yao²

(1. No.1 Geological Brigade of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources (No.1 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources), Shandong Jinan 250010, China; 2. Liaocheng Surveying and Monitoring Center of Geology and Mineral Resources, Shandong Liaocheng 252000, China)

Abstract: Accompanying with urban development, investigating 3D geological structures, geological resources and environmental conditions, expanding the development space of the city has become an important task in the current urban geological work in the central urban area of Liaocheng. Constructing a three-dimensional visualization geological model of the central urban area of Liaocheng city has become a key carrier for this task. Relies on urban geological survey project in the central urban area of Liaocheng city, and considering various existing methods comprehensively, by using more than 2000 borehole data which can cover the entire area of Liaocheng central urban area, digital elevation data and geological reports of Liaocheng central urban area over the years, regarding regional geological maps as data materials and main basis, taking interactive modeling as main method, supplemented by automatic modeling, a three-dimensional visualization geological model has been constructed. On the premise of ensuring accurate data and visual expression, the modeling efficiency can be improved. For the first time, a 3D visualization geological model with a depth of less than 100 meters has been constructed in the central urban area of Liaocheng city. It can be applied to urban construction planning through scene settings and other functions. It can analyze geological conditions, such as routes, foundation pits and tunnels. It will provide geological services for urban management. It also can serve as a model for similar modeling in the middle and lower reaches of the Yellow River.

Key words: 3D visualization; geological model; cell modeling; Liaocheng city; Shandong province