

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2023.03.013

基于多源数据的三维地质建模——以东莞市 滨海湾新区为例

肖艳云, 刘 敬, 李文敬, 张 源

XIAO Yan-Yun, LIU Jing, LI Wen-Jing, ZHANG Yuan

广东省地质调查院, 广东 广州 510080

Guangdong Geological Survey Institute, Guangzhou 510080, Guangdong, China

摘要: 由于地质结构的复杂性、地质数据的多源异构性, 复杂地质体的快速自动化建模一直是三维地质建模领域的研究难点。本文以东莞市滨海湾新区为例, 使用MAPGIS 10.0软件, 采用基于多源数据约束的钻孔自动建模和基岩产状下推建模融合的建模方法, 并在区域分界面-基岩顶面的约束下实现第四系地质体与基岩地质体的无缝拼接, 实现了复杂层状地质体的快速自动构建。对于建模区域第四系地质体的构建, 采用针对层状地质体建模的多源数据约束钻孔自动建模方法, 以钻孔为基础数据, 采用不规则三角网构建第四系地质界面, 同时加入地质剖面、地质图、数字高程模型等多源数据作为约束, 弥补了钻孔分布的不均匀性, 使建立的模型更加符合实际地质情况。对于浅层基岩地质体的构建, 使用基于基岩地质图、断层和产状信息的基岩产状下推建模方法, 在保证建模效果的前提下, 提高了建模效率和自动化程度, 并能准确地反映断层等地质现象。计算的实际孔与模型孔的地层厚度差值表明构建的三维地质模型精度较高, 可为东莞市滨海湾新区城市地质工作提供重要的基础数据支撑。

关键词: 三维地质建模; 钻孔自动建模; 基岩产状下推建模; 多源数据

中图分类号: P285

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2023)03-0548-10

Xiao Y Y, Liu J, Li W J and Zhang Y. 2023. 3D Geological Modeling Based on Multi-source Data: Taking Binhai Bay New Area of Dongguan City as an Example. *South China Geology*, 39(3): 548–557.

Abstract: As the complex geological structure and multi-source heterogeneous data, the rapid automatic modeling of complex geological body is the challenge in 3D geological modeling. Taking Binhai Bay New Area of Dongguan City as an example, using MAPGIS 10.0 software, adopting the modeling method of integrating the automatic borehole modeling based on multi-source data constraints and the downward modeling of the bedrock attitude, the seamless splicing is realized of the Quaternary geological body and the bedrock geological body under the constraints of the regional interface - the top surface of the bedrock, and the rapid automatic construction of the complex layered geological body is also completed. For the construction of part of the Quaternary geological body in the modeling area, the multi-source data constraint boreholes automatic modeling method for the modeling of layered geological body is adopted. Based on the boreholes data, the triangular irregular networks is used to construct the Quaternary geological interface, and the multi-source data such as geological section, geological map, digital elevation model and so on are added as constraints to compensate for the uneven distribution of the boreholes, so that the established model is more in line with the actual geological situation. For the construction of some geological bodies of shallow bedrock, downward modeling of bedrock attitude based on bedrock geological map, fault and attitude information is used to improve the modeling efficiency and automation degree, and accurately reflect geological

收稿日期: 2023-1-11; 修回日期: 2023-3-1

基金项目: 广东省自然资源厅城市地质信息管理服务平台建设(项目编号: [2021]-2)

第一作者: 肖艳云(1995—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事地质信息化和三维地质建模工作, E-mail: xiaoyanyun1995@163.com

phenomena such as faults, on the premise of ensuring the modeling effect. The difference of stratum thickness between the calculated actual hole and the model hole shows that the 3D geological model built has a high precision, which can be important basic data support for urban geological work in Binhai Bay New Area, Dongguan City.

Key words: 3D geological modeling; automatic borehole modeling; downward modeling of bedrock attitude; multi-source data

三维地质建模是依托计算机技术,在虚拟三维空间环境下,实体化构建各类地学信息与地质认识,并进行立体、直观展示各类地质体及其形态构造的研究方式,其概念由 Houlding (1994) 首次提出。常见的三维地质建模方法有基于钻孔建模、基于剖面的三维地质建模、地质图分区建模、基于多源数据建模等。前人 (Lemon and Jones, 2003; 朱良峰等, 2004; 张渭军和王文科, 2006; 罗智勇和杨武年, 2008; 明镜, 2012; 唐丙寅等, 2015) 基于钻孔数据构建了三维地层模型,该方法效率最高,能够较好地表达层状地层,但是建模精度受钻孔密度及分布的影响,且对复杂地质构造(如侵入体、透镜体、复杂褶皱)未能很好地表达。为解决断层、倒转褶皱、透镜体、地层尖灭等复杂地学现象表达问题,部分学者提出基于剖面的三维地质建模方法(屈红刚等, 2006; Ming J et al., 2010; 陈建平等, 2014; 吴志春等, 2016a; 万晓明等, 2020),实现了复杂地质模型的构建,但由于剖面交互建模未能实现计算机自动构建,其效率较低。许珂和徐亚杏(2018)、邓超(2020)、邓超等(2020)采用地质图分区建模方法建立了三维地质模型,取得了较好的实践效果,但其应用范围也是层状地层,无法表达地层之间的特殊接触关系,具有一定的局限性。王义梅等(2022)运用地质分区建模法与平行剖面多元数据联合建模法分别构建了皖北第四系盖层、深部基岩层地质结构,弥补了地质图分区建模法无法表达地层之间的特殊接触关系的不足。前人 (Wu Q et al., 2005; 李晓军等, 2014; 陈麒玉等, 2016; 杨波等, 2019; 毛寅等, 2020; Pan D D et al., 2020; 雷传扬等, 2022; 曾敏等, 2022; 薛涛等, 2023) 综合地质、钻探、物探、遥感等数据构建三维地质结构模型;多源数据融合建模方法实现了建模数据的多样化,能处理各类复杂地质现象,可以有效提高模型的精度,但对建模算法要求较高,数据之间的融合难度较大(吴志春等, 2016b; 张源, 2021)。总之,由于地质体结构的复杂

性、地质数据的多源异构性,通用的建模方法较难建立,因此对于复杂地质体的快速自动化建模一直是国内学者的研究重点(潘懋等, 2007; 韩征等, 2022)。

本文针对东莞滨海湾新区的小区域浅层城市地质建模的特点,利用 MAPGIS 10.0 软件,提出一种基于多源数据约束的钻孔自动建模和基岩产状下推建模两种方法融合的建模方法。对于建模区域第四系部分,采用针对层状地质体建模的多源数据约束钻孔自动建模方法,以钻孔、地质剖面提取虚拟钻孔的标准化数据作为主要数据源,在地质图地表基岩范围、地表高程等数据约束下,实现第四系层状地质体的自动构建。该方法弥补了钻孔分布的不均匀性,使建立的模型更加符合实际地质情况,提高了建模精度。对于浅层基岩部分,选用基于基岩地质图、断层和产状信息的基岩产状下推建模方法,根据产状数据对基岩区块分界面形态进行合理计算推断,模拟出浅部基岩断块状的特殊形态。另外,在两部分建模过程中都使用共用的区域分界面——基岩顶面作为强约束,保证两部分模型的正确融合。

1 研究区概况

东莞滨海湾新区面积约 84 km², 范围为 113°36′15″~113°46′06″ E, 22°42′56″~22°50′18″ N, 毗邻港澳,连接穗、深,与广州南沙、深圳前海等国家级自贸区紧密连接,由交椅湾、沙角半岛和威远岛组成。

研究区的地层区划属华南地层区东江地层分区之惠州地层小区(南颐和周国强, 1996)。区内地表出露有中-新元古代、侏罗纪及古近纪地层。中-新元古代云开岩群(Pt₂₋₃Y)主要分布于东莞滨海湾新区西部威远岛以及南部大岗山-沙角一带。早侏罗世金鸡组(J_{1j})主要出露于区内西部威远岛海战博物馆-虎门发电厂,该地层呈北东向展布,地貌上为长条状山体,受东北向、南北向断裂影响强烈,产

状变化较大。古新世莘庄村组(E_{1x})仅在区内西部威远岛北面村和南部坑塘村-信义玻璃厂附近有少量分布。研究区内仅在西北角出露少量早白垩世石英斑岩($\lambda o\pi K_1$),呈长条状东西向展布。

研究区的第四系松散沉积层划分为2个组级岩石地层单位,即礼乐组和桂洲组,并进一步划分为7个段:灯笼沙段、横栏段、杏坛段、三角层、西南镇段、石排段、光明村层,另据成因类型划分了人工填土、残积层。桂洲组的灯笼沙段、横栏段和杏坛段在研究区内分布较广泛,除基岩区及其周边地势较高地段,其余地方均有分布,表明全新世海侵基本到达滨海湾新区全区。三角层主要分布在虎门水道东侧、太平水道两侧以及在滨海湾新区管委会附近。西南镇段岩性为灰黑色淤泥,为晚更新世海侵沉积,整合于石排段之上,上覆三角层花斑黏土。石排段主要分布于滨海湾新区管委会一带,少量分布于太平水道东侧。光明村层在区内岩性为浅灰白、

褐黄、褐红、黄白、红黄等杂色花斑黏土,为晚更新世中期低海面风化产物。人工填土主要有杂填土及素填土。杂填土主要分布于建成区,为含有建筑垃圾、工业废料、生活垃圾等杂物的填土;素填土系由碎石土、砂土、粉土、黏性土等组成的填土,主要分布于交椅湾填海造地区。残积层的分布较广泛,按其母岩性质可分为沉积岩风化土、岩浆岩风化土、变质岩风化土三大类。

东莞滨海湾新区构造以断裂为主,褶皱不发育。断裂构造较为复杂,主要有北西向狮子洋断裂束和北东向紫金-博罗断裂带从本区通过。北西向狮子洋断裂束在区内主要由文冲-珠江口断裂(F_{2-8})、威远-沙角断裂(F_{2-9})、南岗-太平断裂(F_{2-10})及交椅湾断裂(F_{2-11})等组成。北东向紫金-博罗断裂带主要由威远-高排仔断裂(F_{1-4})、南坑-虎门断裂(F_{1-5})、交椅湾-大朗-三和断裂(F_{1-6})及大岗山-松山湖断裂(F_{1-6-1})等组成(图1)。

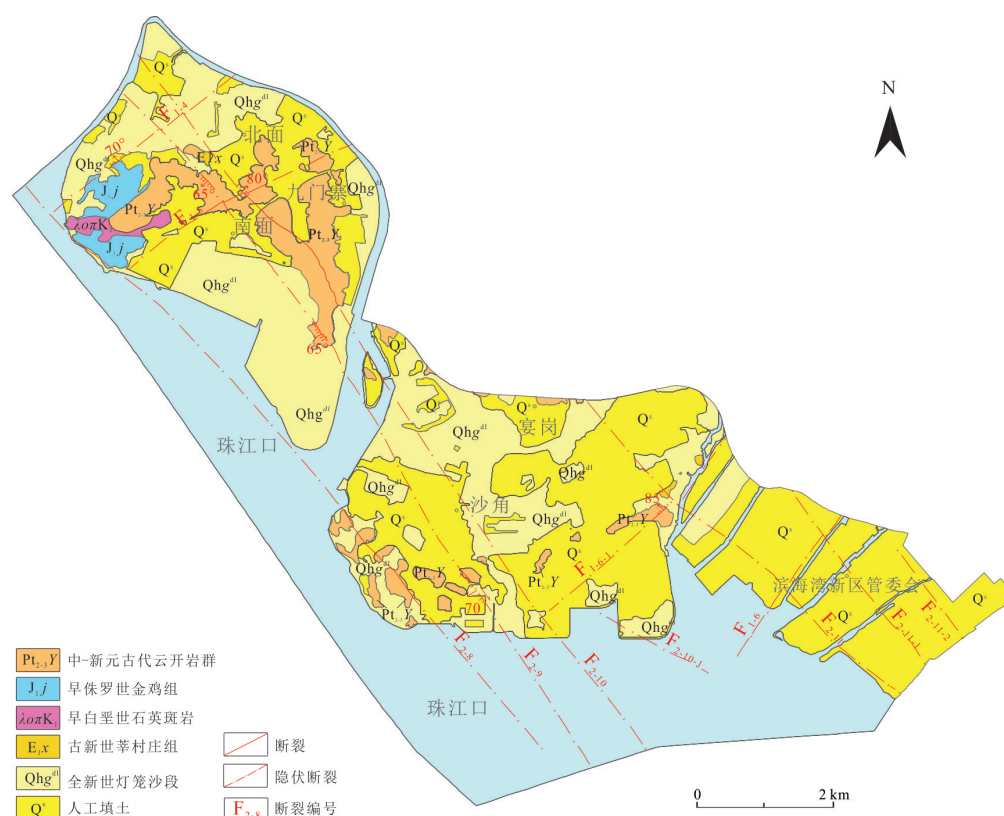


图1 东莞滨海湾新区地质构造图

Fig. 1 Geological structure map of Binhai Bay New Area, Dongguan City

F_{1-4} —威远-高排仔断裂; F_{1-5} —南坑-虎门断裂; F_{1-6} —交椅湾-大朗-三和断裂; F_{1-6-1} —大岗山-松山湖断裂; F_{2-8} —文冲-珠江口断裂; F_{2-9} —威远-沙角断裂; F_{2-10} —南岗-太平断裂; F_{2-10-1} —鸡公咀断裂; F_{2-11} —交椅湾断裂; F_{2-11-1} —农裕围断裂; F_{2-11-2} —沙区断裂

2 建模数据

本次东莞市滨海湾新区三维地质建模面积84 km²,控制深度 100 m,参与模型构建的数据源有钻孔数据、地质剖面、数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)、数字地质图、基岩地质图等。

2.1 钻孔

钻孔数据记录了真实的地质信息,是三维地质建模过程中主要的数据源。钻孔数据主要包括钻孔基本信息、分层信息。钻孔基本信息记录了各个钻孔的编码、坐标、高程、孔深等内容。钻孔分层信息记录了钻孔的编码、地层代号、地层名称、顶底板埋深、地层厚度等内容。本次建模收集了东莞市滨海湾新区 509 个钻孔数据。由于钻孔资料存在岩石命名标准不统一的问题,根据地层统一划分标准体系,对钻孔数据进行标准化处理。以地质时代及岩性为地质单元划分的基本框架,按地质时代的先后顺序统一地层及代号、岩石名称等信息,共形成 14 个标准化地质单元,分别是人工填土、灯笼沙段、横栏段、杏坛段、三角层、西南镇段、石排段、光明村层、残积层、中-新元古代云开岩群、早侏罗世金鸡组、早白垩世石英斑岩、中三叠世黑云母二长花岗岩。另外需保证钻孔的位置、

深度等信息与 DEM、剖面数据相对应,完成标准化后的钻孔数据可用于东莞市滨海湾新区三维地质模型的构建。

2.2 地质剖面

地质剖面图是反映地层分层和地质构造信息的二维图形,是钻孔的补充数据,用来辅助三维地质建模。东莞滨海湾新区共绘制了 20 条三维地质剖面图(图 2),长度达 107.22 km。通过钻孔数据自动生成剖面框架后,再由专业地质人员结合滨海湾新区的地质特点及自身丰富的地质工作经验做出合理的地质剖面图,形成较为真实的剖面边界数据,能真实地反映区域地形、地貌特征、地质构造特征。此外,需对二维剖面进行剖面区赋属性、钻孔中心线赋属性、拓扑检查等操作。二维剖面绘制完成后,在 MapGIS 软件的剖面导入模块中将二维剖面转换成三维剖面,生成的三维剖面会出现经过同一个钻孔的不同剖面地层有误差的现象。为解决这一问题,针对相交的剖面之间进行检查,确保属性结构一致、相交剖面处的剖面厚度一致、分层界线一致。检查无误后再使用转换工具从三维剖面提取虚拟钻孔,提取钻孔间距为 100 m,共提取出 344 个虚拟钻孔数据(图 2)。将虚拟钻孔数据标准化处理后,补充到标准钻孔数据中参与建模。

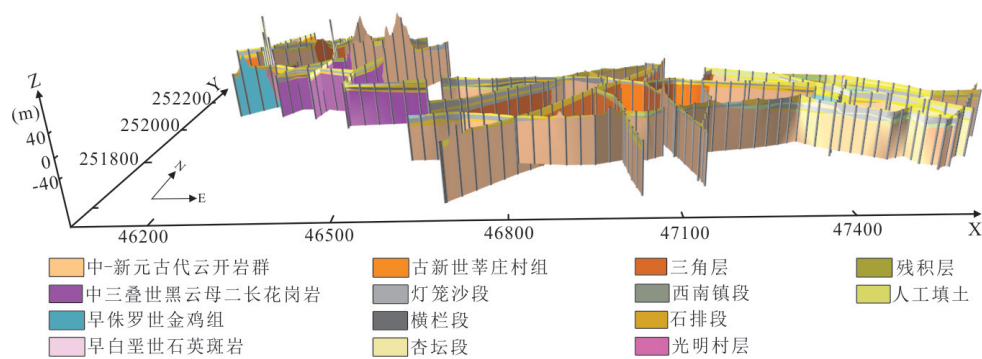


图 2 东莞滨海湾新区三维剖面 and 虚拟钻孔分布图
Fig. 2 3D section and virtual borehole of Binhai Bay New Area, Dongguan City

2.3 数字高程模型

从现有 1:10000 地形图获取数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据,作为第四系层状

地质体自动建模的地表形态约束。

2.4 数字地质图

数字地质图是通过野外地质调查实测编绘形

成的二维图件,客观反映地质体及各类构造在平面区域内的分布和交切关系,是约束三维地质模型地表部分的重要数据源。本次建模通过东莞滨海湾新区地质图提取基岩出露区,约束第四系建模范围,使建模成果更符合地质认识。另外,地质图中的断层线、基岩产状点数据作为基岩产状下推建模的约束图层,记录了走向、倾向、倾角等信息。其中,走向

和倾向信息表示岩层的延伸方向,倾角表示岩层的倾斜程度。

2.5 基岩地质图

基岩地质图是在覆盖或半覆盖下,反映松散覆盖层下基岩地质情况的地质图。本次收集了东莞滨海湾新区 1:10000 基岩地质图(图 3),作为构建基岩模型的重要数据源。

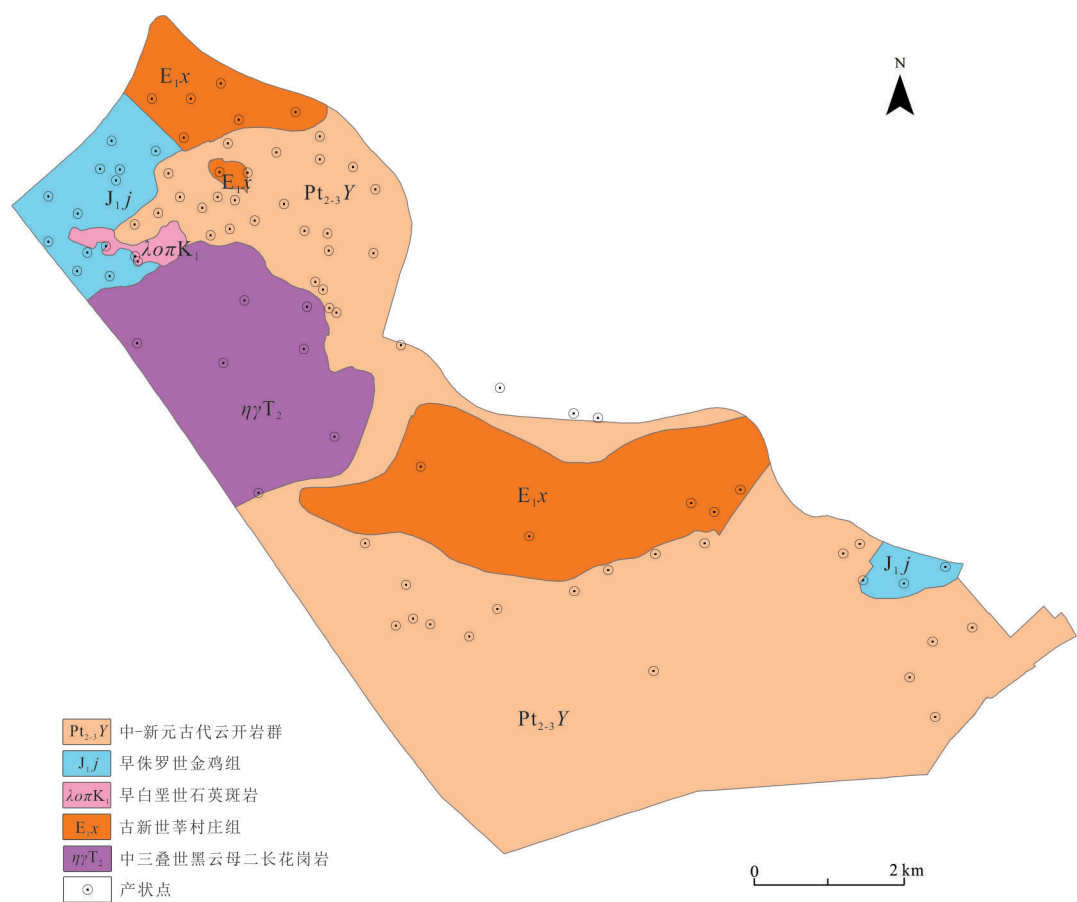


图 3 东莞滨海湾新区基岩地质图

Fig. 3 Bedrock geological map of Binhai Bay New Area, Dongguan City

3 建模流程与方法

3.1 建模流程

东莞市滨海湾新区三维地质模型构建流程主要分为三部分:基于多源数据约束的钻孔自动建模、基岩产状下推建模、第四系层状地质体与浅部基岩地质体无缝拼接得到完整三维地质结构模型。

详细的建模流程见图 4。

3.1.1 基于多源数据约束的钻孔自动建模

本次建模的多源数据包括钻孔数据、剖面数据、DEM 数据和地质图数据。由于数据来源不相同、规范不统一,使得数据的格式、坐标系统、投影参数、比例尺不完全一致。为了能够充分利用已有数据,实现软件自动建模,必须具有统一的数据格式、坐标系统、比例尺、投影参数。本次建模数据主

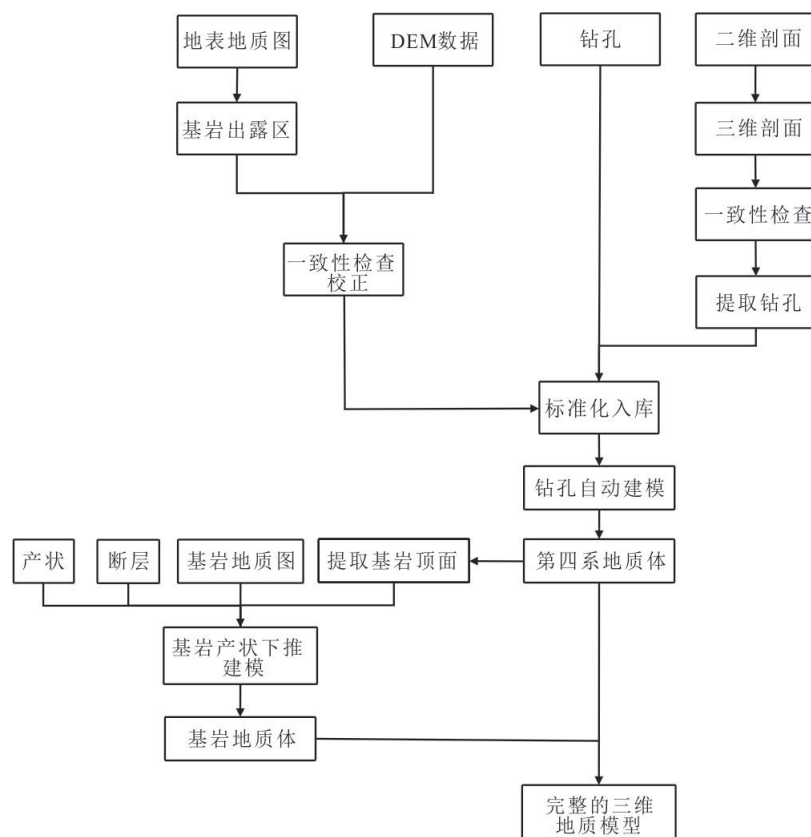


图4 建模流程图

Fig. 4 Modeling flow chart

要有矢量数据、栅格数据及文本数据,其中,剖面、地质图等矢量数据格式统一为 WT、WL、WP 等 MapGIS 格式,DEM 等栅格数据为 TIF 格式,钻孔等文本数据统一导入 Access 数据库中。参与建模数据坐标系统一为 2000 国家大地坐标系,投影类型为高斯-克吕格(等角横切椭圆柱投影),投影分带为 3°带,带号为 38,比例尺 1:10000。

本次三维地质模型主要分为两部分构建,一部分是第四系地质体的构建,另一部分是基岩地质体的构建。第四系地质体构建采用基于多源数据约束的钻孔自动建模方法。其中,基于钻孔的自动建模是对钻孔进行地层划分处理、层面插值生成地层面、地层面生成地质体的过程。考虑到本次建模区域内钻孔数量有限,深度不一,分布不均匀的情况,使用单一数据的钻孔自动建模,无法构建复杂的地质体,对于夹层、倒序、透镜体等非标准层序地质情况不能准确表达,难以满足区域建模的要求。因此,将地质剖面引入建模数据中,根据区域范围、地貌、

地层情况和钻孔分布情况,绘制较为均匀的剖面布置线,使用钻孔数据自动生成剖面框架,再由地质人员进行人工修正。剖面绘制完成后使用转换工具将剖面离散为钻孔,补充到标准钻孔数据中,并对其进行标准化。钻孔数据标准化后和原始钻孔结合自动构建地层顶底板、透镜体等地质约束体,并采用不规则三角网(TIN)构建地层界面,并基于克里金插值法(Kriging)对生成的地层曲面进行平滑,使构建的地质界面更符合实际情况。最后,根据地层之间的叠覆关系构建地质实体。在插值计算时将地质认识加入建模中,减少了地层信息和地质结构的不确定性,大大提高了模型的准确度。在建模过程中,同时加入 DEM 数据进行地表形态约束。另外,对于少量基岩出露地表的情况,鉴于钻孔自动建模难以较好控制第四系分布范围,因此将地表地质图添加到约束数据中,使第四系分布范围与地质图基本一致,建模成果更符合地质认识。

东莞滨海湾新区第四系地质体模型爆炸视图

(图5)显示,地层分别为人工填土(Q^s)、灯笼沙段(Qp^{ls})、西南镇段(Qp^{ls})、石排段(Qp^{sp})、光明村层(Qhg^{dl})、横栏段(Qhg^{hl})、杏坛段(Qhg^{xt})、三角层(Qp^{gm})、残积层(Q^{cl})。

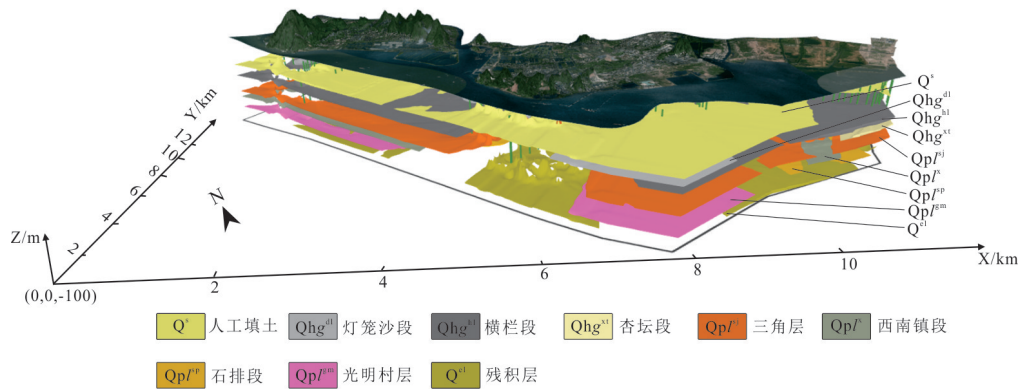


图5 东莞滨海湾新区第四系地质体模型爆炸视图

Fig. 5 Explosion display of Quaternary geological body model in Binhai Bay New Area, Dongguan City

3.1.2 基岩产状下推建模

由于东莞滨海湾新区建模区域范围不大,深度较浅,在当前建模要求的地层级别下,浅部基岩形态呈现类似分区的断块状形态,因此使用基岩产状下推建模方法构建基岩模型。参与建模的数据有基岩地质图、产状、断裂、区域分界面-基岩顶面。其中,基岩地质图和产状信息在建模过程中用来控制基岩地质体的走向、大小、形态,断裂数据用于构建建模范围内的断层。另外,将钻孔自动建模生成的第四系地质体最底层地层的底面作为区域分界面-

基岩顶面。通过MapGIS软件三维建模模块对第四系地质体进行图元展开、删除体、体转面、删除面一系列操作可得到三维的基岩顶面,其作为约束面参与基岩模型的构建,保证第四系地质体与基岩模型的无缝拼接。然后,基于基岩地质图、基岩顶面、产状数据和断裂数据实现软件自动构建基岩模型。最后,利用有限的产状数据提供的向量信息,推算出地层分界面各个区域的产状形态,模拟出浅部基岩地层边界连续,平滑的断块状形态特征。

基岩产状下推建模结果如图6所示,从基岩模

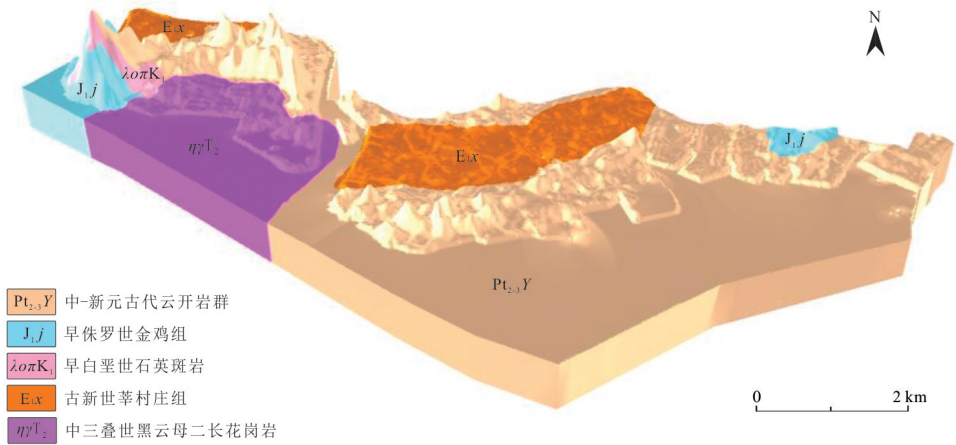


图6 东莞滨海湾新区基岩模型

Fig. 6 Bedrock model of Binhai Bay New Area, Dongguan City

型可以看出东莞滨海湾新区基岩地质单元有中-新元古代云开岩群($Pt_{2-3}Y$)、早侏罗世金鸡组(J_1j)、古新世莘庄村组(E_{1x})、早白垩世石英斑岩($\lambda o\pi K_1$)、中三叠世黑云母二长花岗岩($\eta\gamma T_2$)。

3.1.3 第四系地质体模型与基岩模型合并

在进行第四系地质体模型与基岩模型合并之前,需确保两个模型之间的空间坐标系统统一、属性字段统一、建模范围统一,然后通过 MapGIS 软件中的三维编辑工具将钻孔自动建模构建的第四

系地质体模型与产状下推建模构建的基岩模型进行合并处理,最终得到一个完整的东莞市滨海湾新区三维地质模型。在两部分建模过程中都使用共用的区域分界面—基岩顶面作为强约束,保证两部分模型建成后的正确融合,实现两个地质体之间的无缝拼接。东莞滨海湾新区三维地质结构模型(图7)可直观地在空间上展示出各地层的展布形态及厚度变化情况,也可以在空间上对比各地质单元和岩性的变化。

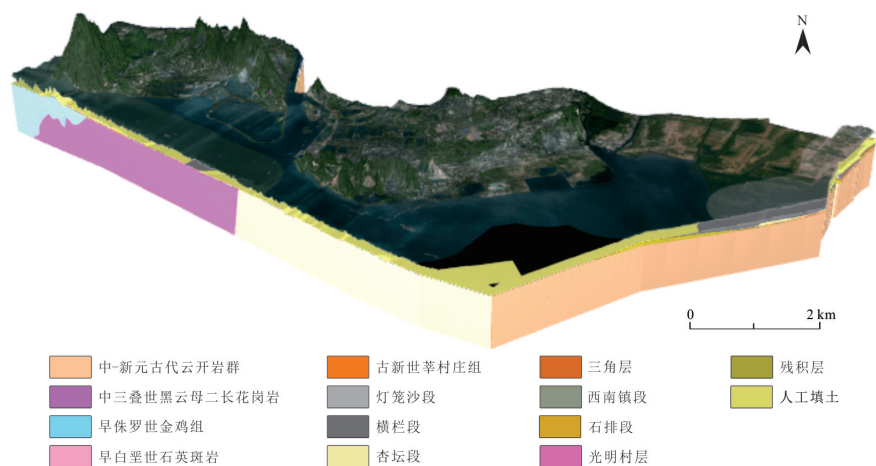


图7 东莞滨海湾新区三维地质结构模型叠加遥感影像

Fig. 7 Display of 3D geological structure model superimposed remote sensing image in Binhai Bay New Area, Dongguan City

3.2 建模技术

在三维地质建模过程中,利用钻孔数据以及地质剖面提取的虚拟钻孔信息,依据钻孔分层信息提取地层采样点,采用不规则三角网(TIN: Triangular Irregular Networks)构建地层界面,并基于克里金插值算法平滑地层界面,再由地层面生成地质体。TIN是通过一组离散点形成的连续、不重叠的不规则三角形面片来构面,并可以根据界面的复杂程度调整三角形面片的大小和形态,减少数据冗余,计算效率和拟合精度较高,因此在三维地质建模中具有较大的优势(雷传扬,2022)。不足之处在于不规则三角网生成的地层表面较为粗糙,克里金插值法(Kriging)可以解决该问题,利用克里金空间插值方法进行加密内插,可以生成更加平滑的地

质界面,更能反映真实的地质情况。

本次基岩地质体模型是基于基岩产状下推方法构建,首先对地质图进行信息提取,然后对平面地质图中的地质界线进行离散化处理,离散化的点带有空间位置信息和产状信息,离散点的产状信息控制界面在空间内的延展方向,断层线上的离散点产状由断层线的产状属性值获得,地层界线上的离散点产状值通过地质人员提供产状点数据获得,将产状点数据赋值给地质界线上最邻近的离散点,并通过插值得到地质界线其他离散点的产状信息。然后,根据离散点进行插值并拟合生成断层面、地层面,并设定一定深度的底板面,与此同时采用第四系底面作为基岩顶面。最后根据地层面、断层面、基岩顶面、研究区域边界面、底板面之间的拓扑关系

形成完整的基岩地质体模型。

3.3 三维地质模型分析

基于钻孔、剖面、DEM、地表地质图等多源数据约束的第四系层状地质体自动建模方法解决了钻孔密度不均导致建模精度不高的问题,同时也较好地解决了非标准层序的问题,合理地表达了透镜体、夹层、地层倒序等地质现象。在第四系层状地质体建模过程中,对于夹层、倒序、透镜体等非标准层序地质情况,根据数据标准化构建的标准地层顺序自动识别非标准层序地层,并根据钻孔中相应地层的埋深、厚度及邻近钻孔地层,判断特殊地层延展和连接情况,自动构建出夹层、透镜体等地质体,更合理地表达透镜体、夹层、地层倒序等地质现象。图8为建模区域内西南镇段(Qp^l)局部一个透镜体的构建效果图。对于浅层基岩部分,选用基于基岩地质图、断层和产状信息的基岩产状下推建模方法,相比于基于剖面建模方法,减少了人工交互,提高了工作效率,在保证建模效果的前提下,提高了建模效率和自动化程度。

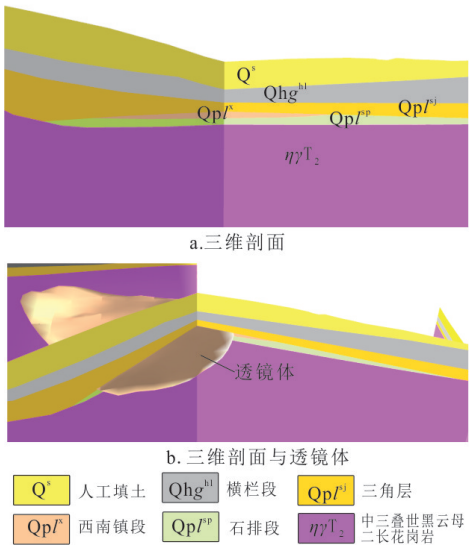


图8 三维剖面与透视镜体叠加显示
Fig. 8 3D section and lens superimposed display

3.4 三维地质模型精度评价

三维地质结构模型通过地层厚度进行质量评价,即计算实际孔与模型孔的地层厚度差值来评价模型精度(邓超, 2020; 毛寅等, 2020; 曾敏等, 2022)。本文根据地层厚度差值统计了各地层误差

的最大值、最小值、平均值、标准差(表1)。标准差是方差的算术平方根,能反映数据的离散程度,标准差越小,数据偏离平均值就越小。由于部分实际钻孔深度未达到基岩底部,因此未列出基岩层的误差值。从表1结果来看,灯笼沙段、杏坛段和光明村段三个地层的厚度误差最大值相对较小,其余地层误差最大值相对较大,但整体误差平均值和标准差均较小,验证了该模型精度较高。在对误差来源分析过程中,造成误差相对较大的原因可能是钻孔间距离的问题,空间距离过远会对建模插值有一定影响。

表1 地层厚度质量评价误差表				
Table 1 Error table of formation thickness quality evaluation				
地层	最大值(m)	最小值(m)	平均值(m)	标准差(m)
人工填土	7.90	0.01	2.43	1.90
灯笼沙段	3.47	0.004	1.12	1.23
横栏段	9.78	0.003	3.51	2.81
杏坛段	3.53	0.18	2.14	1.14
三角层	9.11	0.005	2.70	2.52
西南镇段	9.35	0.002	2.45	2.10
石排段	9.73	0.04	3.30	2.69
光明村段	3.46	0.09	2.81	1.30
残积层	9.57	0.003	1.97	2.26

4 结论

(1)本文针对不同的地质体,实现了不同方法的融合建模。基于多源数据约束的钻孔自动建模实现第四系部分建模,基岩产状下推建模完成浅层基岩部分的建模,并在区域分界面—基岩顶面的约束下实现融合,不仅合理地模拟了特殊形态建模,而且提高了建模效率和自动化程度,可以为复杂层状地质体快速自动建模提供借鉴。

(2)计算的实际孔与模型孔的地层厚度差值表明构建的三维地质模型精度较高,可为东莞市滨海湾新区城市地质工作提供重要的基础数据支撑。

参考文献:
陈建平,于 森,于萍萍,尚北川,郑 啸,王丽梅.2014.重点成矿

- 带大中比例尺三维地质建模方法与实践[J].地质学报, 88(6):1187-1195.
- 陈麒玉,刘刚,吴冲龙,李新川,张志庭.2016.城市地质调查中知识驱动的多尺度三维地质体模型构建方法[J].地理与地理信息科学,32(4):11-16.
- 邓超,何政伟,郝明,王东辉,薛东剑.2020.基于MapGIS的成都市城市三维地质建模[J].地理空间信息,18(7):51-54.
- 邓超.2020.成都市空港新城矢栅一体化三维地质建模研究[D].成都理工大学硕士学位论文.
- 韩征,王文文,李勇.2022.城市区域三维地质结构建模方法综述[J].城市地质,17(2):175-183.
- 雷传扬,刘兆鑫,文辉,范敏,蒋华标,王波,马国玺,谢海洋,陶海江,郝金波.2022.基于多源数据和先验知识约束的复杂地质体三维建模研究[J].地质论评,68(4):1393-1411.
- 李晓军,李培楠,朱合华,刘俊.2014.基于贝叶斯克里金的地下空间多源数据建模[J].同济大学学报(自然科学版), 42(3):406-412.
- 罗智勇,杨武年.2008.基于钻孔数据的三维地质建模与可视化研究[J].测绘科学,33(2):130-132.
- 明镜.2012.基于钻孔的三维地质模型快速构建及更新[J].地理与地理信息科学,28(5):55-59.
- 毛寅,曾玉清,贺安生.2020.城市三维空间地质数据库多元地质信息的构建法研究——以长株潭城市群核心区为例[J].矿产与地质,34(2):391-395.
- 南颐,周国强.1996.广东省岩石地层[M].武汉:中国地质大学出版社.
- 屈红刚,潘懋,王勇,薛胜,明镜.2006.基于含拓扑剖面的三维地质建模[J].北京大学学报(自然科学版),42(6):717-723.
- 潘懋,方裕,屈红刚.2007.三维地质建模若干基本问题探讨[J].地理与地理信息科学,23(3):1-5.
- 唐丙寅,吴冲龙,李新川,陈麒玉,慕洪涛.2015.一种基于钻孔地质数据的快速递进三维地质建模方法[J].岩土力学, 36(12):3633-3638.
- 万晓明,凌丹丹,马国玺,马宇梅,万小红.2020.基于GIS的三维水文地质建模及应用——以咸阳市为例[J].华南地质与矿产,36(1):72-79.
- 王义梅,周春静,杨波,管后春,胡海风.2022.皖北第四系覆盖区三维地质结构建模研究[J].华南地质,38(2):321-329.
- 吴志春,郭福生,姜勇彪,罗建群,侯曼青.2016a.基于地质剖面构建三维地质模型的方法研究[J].地质与勘探,52(2):363-375.
- 吴志春,郭福生,林子瑜,侯曼青,罗建群.2016b.三维地质建模中的多源数据融合技术与方法[J].吉林大学学报(地球科学版),46(6):1895-1913.
- 许珂,徐亚杏.2018.基于MapGIS-K9软件的城市三维地质建模方法探讨——以武汉市为例[J].华南地质与矿产, 34(3):244-252.
- 薛涛,包训栓,朱小弟,黄骁.2023.多源数据三维地质结构模型约束的属性建模方法:以北京通州城市副中心为例[J].地学前缘,30(3):529-536.
- 杨波,胡海风,赵文广,魏国辉.2019.基于多源数据的安徽庐枞盆地三维地质建模[J].地质学刊,43(3):377-384.
- 朱良峰,吴信才,刘修国,尚建嘎.2004.基于钻孔数据的三维地层模型的构建[J].地理与地理信息科学,20(3):26-30.
- 曾敏,赵信文,陈松.2022.基于多源数据融合的广州南沙核心区三维工程地质建模[J].华南地质,38(2):281-291.
- 张渭军,王文科.2006.基于钻孔数据的地层三维建模与可视化研究[J].大地构造与成矿学,30(1):108-113.
- 张源.2021.城市三维地质建模方法研究[J].矿山测量,49(1):65-68.
- Houlding S W. 1994. 3D Geoscience Modeling: Computer Techniques for Geological Characterization[M]. Berlin: Springer Verlag.
- Lemon A M, Jones N L. 2003. Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections[J]. Computers & Geosciences, 29(5): 547-555.
- Ming J, Pan M, Qu H G, Ge Z H. 2010. GSIS: A 3D geological multi-body modeling system from netty cross-sections with topology[J]. Computers & Geosciences, 36(6): 756-767.
- Pan D D, Xu Z H, Lu X M Zhou L Q, Li H Y. 2020. 3D scene and geological modeling using integrated multi-source spatial data: Methodology, challenges, and suggestions[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 100(1):103393.
- Wu Q, Xu H, Zou X K. 2005. An effective method for 3D geological modeling with multi-source data integration[J]. Computers & Geosciences, 31(1):35-43.