

doi: 10.12097/gbc.2023.03.030

张永旺, 庞世龙, 花卫华, 张文, 段剑超, 宿紫莹. 2025. 基于地层尖灭的城市地下空间三维地质建模方法及应用——以广西北海市为例[J]. 地质通报, 44(6): 1174–1186.

Zhang Yongwang, Pang Shilong, Hua Weihua, Zhang Wen, Duan Jianchao, Su Ziying. 2025. Research on 3D geological modeling method and application of urban underground space based on stratigraphic pinchout: A case study of Beihai City, Guangxi[J]. Geological Bulletin of China, 44(6): 1174–1186(in Chinese with English abstract).

基于地层尖灭的城市地下空间三维地质建模方法及应用

——以广西北海市为例

张永旺¹, 庞世龙^{2*}, 花卫华², 张文², 段剑超², 宿紫莹²

(1. 河北水文工程地质勘察院有限责任公司, 河北 石家庄 050021; 2. 中国地质大学(武汉) 地理与信息工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘要:【研究目的】城市地下空间的开发利用是当前城市建设的重要组成部分,而三维地质模型是评价地下空间开发利用难度的基础工作之一。针对现有三维地质建模方法中地层分区范围不准确的问题,从模型精度的影响因素出发,设计了一种基于影响因素的地层尖灭位置合理计算方法。【研究方法】该方法通过考虑地层厚度、钻孔间距、地层埋深、单孔控制范围等因素,在追踪地层分区时确定尖灭位置,由此构建出精度更高的地层曲面。【研究结果】以广西北海市为研究区,利用该区域的钻孔、剖面等实际地质数据,首先建立了统一的地层层序并生成了地层分区约束,随后成功构建了北海市精细化的三维地质结构模型。通过钻孔数据回代验证和剖面对比分析对模型质量进行了评价,并与传统建模方法进行了对比。对比分析显示,该方法构建的模型在关键区域的地层形态与实际钻孔揭露情况吻合度更高,地层接触关系处理更为合理。【结论】提出的基于影响因素的地层尖灭位置计算方法,能够有效提高三维地质模型的精度,尤其在处理含复杂地层(如尖灭、不整合接触等)的地质结构时表现出明显优势。与传统建模方法相比,该方法构建的模型与实际地质情况更为吻合,为解决复杂地质条件下的三维地质建模问题提供了一种新的、更可靠的解决思路,对城市地下空间精细化开发利用具有重要的参考价值。

关键词: 城市地下空间; 三维地质建模; 统一地层层序; 地层尖灭; 地层分区; 模型质量评价; 城市地质调查工程; 广西

创新点: 提出了一种新的基于影响因素的地层尖灭位置合理计算方法,通过考虑多种影响因素降低地层尖灭线的计算误差,提升三维地质模型的建模精度。

中图分类号: P628; P634; P64 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2025)06-1174-13

Research on 3D geological modeling method and application of urban underground space based on stratigraphic pinchout: A case study of Beihai City, Guangxi

ZHANG Yongwang¹, PANG Shilong^{2*}, Hua Weihua², ZHANG Wen², DUAN Jianchao², SU Ziying²

(1. Hebei Hydrological Engineering Geological Exploration Institute, Shijiazhuang 050021, Hebei, China; 2. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430070, Hubei, China)

收稿日期: 2023-03-16; 修订日期: 2023-10-19

资助项目: 国家自然科学基金项目《多元数据联合影响下复杂地质模型快速构建方法》(批准号: 41972307)。

作者简介: 张永旺(1979-), 男, 高级工程师, 从事水文地质环境地质调查与应用研究。E-mail: 493959645@qq.com

* 通信作者: 庞世龙(2000-), 男, 在读硕士生, 从事 AI 在地下空间中的应用及三维地质建模研究。E-mail: 845190158@qq.com

Abstract: [Objective] The development and utilization of urban underground space constitutes a significant component of contemporary urban construction, with the three dimensional geological model serving as a foundational element in the evaluation of the complexity involved in the development and utilization of underground space. Addressing the challenge of inaccurate stratigraphic zoning in existing three-dimensional geological modelling methods, this paper proposes a rational calculation method for determining the stratigraphic pinch-out location, taking into account the factors that influence model accuracy. [Methods] The method determines the pinch-out position by considering formation thickness, borehole spacing, formation burial depth, and single-hole control range. This is achieved by tracking the formation partition, thereby constructing a more accurate formation surface. [Results] This study selected Beihai City as the research area. Utilizing actual geological data from the region, including boreholes and profiles, a unified stratigraphic sequence was first established, and stratigraphic zoning constraints were generated. Subsequently, a refined three-dimensional geological structure model of Beihai City was successfully constructed. The model's quality was evaluated through borehole data back-substitution and profile comparisons, and a comparative analysis was conducted against traditional modeling methods. This comparison revealed that the model constructed using the proposed method exhibited a higher degree of conformity with actual borehole-revealed conditions in key areas, and the stratigraphic contact relationships were more reasonably represented. [Conclusions] The proposed method for calculating stratigraphic pinch-out locations based on influencing factors effectively enhances the accuracy of three-dimensional geological models, particularly demonstrating a significant advantage when dealing with complex geological structures involving features such as pinch-outs and unconformable contacts. Compared to traditional modeling approaches, the model developed with this method aligns more closely with actual geological conditions. It offers a novel and more reliable solution for addressing challenges in three-dimensional geological modeling under complex geological settings, and holds important reference value for the refined development and utilization of urban underground space.

Key words: urban underground space; 3D geological modeling; unified stratigraphic sequence; stratigraphic pinchout; stratigraphic division; model quality evaluation; urban geological survey engineering; Guangxi

Highlights: A novel methodology for the calculation of stratigraphic pinch-out locations is proposed, which is based on a range of influencing factors. The calculation error of the stratigraphic pinch-out line is reduced by taking these factors into consideration, thereby improving the modelling accuracy of the three-dimensional geological model.

About the first author: ZHANG Yongwang, male, born in 1979, senior engineer, mainly engaged in hydrogeological and environmental geological survey and applied research; E-mail: 493959645@qq.com

About the corresponding author: PANG Shilong, male, born in 2000, master's candidate, mainly engaged in the application of AI in underground space and 3D geological modeling research; E-mail: 845190158@qq.com

Fund support: Supported by the National Natural Science Foundation of China for the project "Rapid Construction Method of Complex Geological Model under the Joint Influence of Multiple Data" (Grant No. 41972307).

由于原始地质数据获取的艰难性、地质体空间关系的复杂性及地质体属性的不确定性,三维地质建模一直是地学空间模拟的难点问题(方海东等, 2002; 屈红刚等, 2015; 刘飞, 2024; Hao et al, 2024)。地层尖灭是指岩层的厚度在沉积盆地边缘变薄乃至消失的现象。当相邻钻孔之间出现地层缺失时,缺失地层在钻孔之间必然形成尖灭(王军等, 2011)。在构建三维地质模型时,地层尖灭线的位置确定了地层分区,用于约束三维地质模型的构建。通过专家经验(Abdollahifard, 2016; Tahmasebi et al, 2012)推测、周围地质特征及对地质规律的认识和分析,确定合理的尖灭位置才能够构建出精度更高的三维地质模型(王艳美和刘星, 2024)。在确定地层尖灭线时,主流的技术思路可以归纳为两大类:一类是基于专

家经验的综合推测方法,另一类是基于计算机的统计分析与地学模拟方法。①专家经验推测:朱莹等按照地层沉积年代的规律,以地层尖灭时新地层向上尖灭、老地层向下尖灭的原则与地层厚度处理原则确定尖灭位置(朱莹等, 2007; Abdollahifard, 2016; Tahmasebi et al, 2012)。该类方法考虑了地层厚度对尖灭点位置的影响,在钻孔分布均匀地区和钻孔间距适当区域较适用,但在钻孔分布不均匀区域,计算的尖灭线误差相对于真实尖灭线具有一定的误差。②计算机统计分析:熊冉等(2010)应用正演模拟及地震属性分析、频谱成像、时频分析等技术对尖灭点位置进行了推测;王军等(2010, 2011)以薄层调谐理论为依据,利用基于 S 变换的时频分析方法,有效刻画了低位楔形三角洲砂体的岩性尖灭线;王志杰

(2012)在小层对比、钻井和测井资料统计分析的基础上,通过频谱成像、相位属性分析等技术对主力含油砂体尖灭线进行了精细描述;邓锋等(2018)利用主成分分析法去除地震发射中不整合面的强屏蔽信号,使尖灭点的信息在地震剖面上更清晰,从而获得地层尖灭线较精确的位置,使沿其发育的一批地层圈闭边界刻划的更精确,为地层圈闭类油藏储量的精确计算打下坚实的基础。

综合以上分析可以看出,目前针对地层尖灭线的计算方法有以下不足:①通过专家经验推测计算出的尖灭线在钻孔分布不均匀的区域误差较大;②计算机统计分析方法大多基于物探数据,缺少针对钻孔数据和剖面数据的建模方法;③仅根据地层厚度追踪出的尖灭线与实际尖灭线常常存在较大误差,未过多考虑地质环境中的多种影响因素。

鉴于此,本文研究建模数据中相邻地层的尖灭边界影响因素与计算方法,为提高含不整合接触地层的三维地质建模结果合理性和精度提供技术支持。

1 多因素地层尖灭位置计算原理与方法

在进行三维地质建模时,寻找合理的地层尖灭位置是解决地层缺失现象的关键,也是划分地层分布范围的关键。将地层尖灭位置点进行连接,即可构成地层分布范围的边界,因此,地层尖灭位置就是地层分区图的边界线。地层尖灭位置的影响因素很多,地层尖灭位置可能受相邻钻孔的地层类型、缺失地层的厚度、地层的埋深(标高)、钻孔之间的距离、2个钻孔中缺失地层的高程差、单个钻孔控制的范围、地层分布等诸多因素的影响。考虑到这些影响因素,本文设计了一套地层尖灭位置计算方法,在追踪地层分区时利用该方法确定尖灭位置,由此构建出精度更高的地层曲面,解决三维地质建模中地层分区范围不准确的问题。

1.1 角度不整合地层的尖灭系数计算方法

合理的地层尖灭算法是实现地层准确生成,建立可靠的三维地质模型和专业地质剖面图件的前提条件。角度不整合地层的尖灭系数计算方法应充分考虑地层厚度、钻孔间距、单孔控制范围、地层埋深等因素的影响,遵循“地层厚度越大,距离该孔的尖灭距离越远”等实际地质规律。本文的地层尖灭位置计算步骤如下。

(1)依据标准地层分层规则,对建模区域内的钻

孔数据进行标准化处理,建立标准钻孔数据库,读取钻孔数据库中的分层信息。

(2)根据地层缺失判别规则检测地层缺失信息,结合“先大层、后亚层、再次亚层”的三维地质建模思路,分步、分级标记各钻孔缺失地层。

(3)利用钻孔数据库,提取地层厚度、钻孔间距、地层埋深等信息(李新生和刘超,2011),统计、分析各地层的平均厚度、地层厚度中位数、钻孔平均控制面积等参数。

(4)尖灭位置计算

①地层尖灭按“先大层、后亚层、再次亚层”的次序逐级尖灭,兼顾考虑模型顶底 DEM 界面、建模平面边界、各个大层底板 DEM 面的约束。

②计算建模区域内平均钻孔距离 D_h 。设建模范围的面积为 A ,钻孔数量为 N ,则单个钻孔的控制面积为:

$$A_h = \frac{A}{N} \quad (1)$$

单个钻孔控制的直径(适用于钻孔分布均匀的情况),即2个钻孔之间的平均距离为:

$$D_h = 2 \times \sqrt{\frac{A_h}{\pi}} \quad (2)$$

③选择待尖灭钻孔(某一级别下无地层缺失钻孔)和尖灭钻孔(某一级别下有地层缺失),通过比较两孔的实际距离 D_{ac} 和平均距离 D_h ,确定待尖灭地层尖灭计算方法。

④若两孔的实际距离 D_{ac} 大于平均距离 D_h ,则尖灭点选择距离待尖灭钻孔 D_h 位置处。若两孔的实际距离小于等于平均距离,则进入步骤⑤。

⑤设有尖灭点系数 $\text{PinchCoef}(pc)$,建模区域内该尖灭地层的最小厚度为 $t_{\min}$ 、最大厚度为 $t_{\max}$,平均层厚为 $\text{thick}_{ave}(t_{ave})$,层厚中位数为 t_m ,比较 t_{ave} 和 t_m 的大小,将两者中的较小项记作 t_a 。假设当前地层尖灭的厚度为 t ,则尖灭系数计算分为2种情况:

若 $t_{\min} \leq t < t_a$, 则

$$\begin{cases} pc = \frac{1}{n} + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{n}\right) \times \frac{t - t_{\min}}{t_a - t_{\min}} = \frac{1}{n} + \frac{n-2}{2n} \times \frac{t - t_{\min}}{t_a - t_{\min}} \\ n = \left\lceil \frac{t_{\max}}{t_a} \right\rceil + 1 \end{cases} \quad (3)$$

pc 取值 $\left(\frac{1}{n}, \frac{1}{2}\right)$;

若 $t_a \leq t \leq t_{\max}$, 则:

$$pc = \frac{1}{2} + \left(1 - \frac{1}{2}\right) \times \frac{t - t_a}{t_{max} - t_a} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \times \frac{t - t_a}{t_{max} - t_a} \quad (4)$$

pc 取值 $\left(\frac{1}{2}, 1\right)$ 。

相应的待尖灭地层尖灭点, 其位置为从待尖灭钻孔出发, 沿其与尖灭钻孔的连线方向, 距离待尖灭钻孔的距离 L_{pinch} 计算如下:

$$\text{当 } t_{min} \leq t \leq t_a \text{ 时, } L_{pinch} = \left(\frac{1}{n} + \frac{n-2}{2n} \times \frac{t - t_{min}}{t_a - t_{min}}\right) \times D_{ac} \quad (5)$$

$$\text{当 } t_a \leq t \leq t_{max} \text{ 时, } L_{pinch} = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \times \frac{t - t_a}{t_{max} - t_a}\right) \times D_{ac} \quad (6)$$

(5) 尖灭方向判别。如图 1 所示, 对于某一级别需要进行尖灭关系处理的尖灭钻孔缺失地层 D_i , 在相邻待尖灭钻孔中存在:

①若由上往下 $D_1 \dots D_{i-1}$ 、 D_i 、 $D_{i+1} \dots D_n$, 其中地层序列中 $i=1$, 此时, 尖灭方向为由待尖灭钻孔中该地层底板向上尖灭至(4)中计算的尖灭位置。

②若由上往下 $D_1 \dots D_{i-1}$ 、 D_i 、 $D_{i+1} \dots D_n$, 其中地层序列中 $i=n$, 此时, 尖灭方向为由待尖灭钻孔中该地层顶板向下尖灭至(4)中计算的尖灭位置。

③若由上往下 $D_1 \dots D_{i-1}$ 、 D_i 、 $D_{i+1} \dots D_n$, 其中地层序列中 $i \neq 1$ 且 $i \neq n$, 此时, 尖灭方向为由待尖灭钻孔中该地层顶板、底板分别平推相交于上一步计算的尖灭位置。

1.2 考虑地层尖灭系数的地层分区计算

本文基于已有样本点, 根据地层的缺失情况, 采用上述地层尖灭系数计算方法, 快速追踪地层分区。地层分区的追踪具体步骤如下。

(1) 确定采样点的属性。对建模区域内的钻孔分层信息进行预处理, 将钻孔分为含有该层和不含该层两类, 每个钻孔位置作为一个采样点, 每个采样

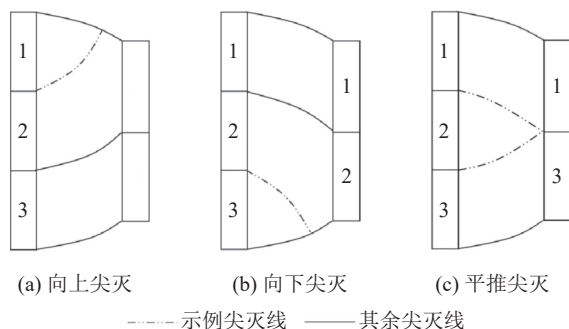


图 1 地层尖灭方向判别
(1、2、3 表示不同地层)

Fig. 1 Discrimination of pinch-out direction of strata

点的属性值只有 2 种可能情况(缺失与未缺失), 对于缺失的钻孔赋予属性值 0, 未缺失的钻孔赋予属性值 1。如图 2 所示, 其中黑点代表属性值为 1, 白点代表属性值为 0。

(2) 确定边界点的属性。由于地层分区需要用来约束建模, 因此建模边界点也需要作为采样点进行地层分区计算, 所以需要确定建模边界点的属性, 如图 3 所示。建模边界点属性值可通过插值已有属性值的样本点进行确定, 也可通过寻找周围最近的样本点, 将周围最近的样本点的属性值作为当前边界点的属性值。

(3) 对建模范围内的采样点进行三角剖分, 形成不规则三角网。三角剖分算法可结合 Delaunay 三角剖分的原理, 在多边形顶点关系的基础上, 通过对多边形从外向内间隔相邻环间的三角剖分, 实现多边形的剖分算法(芦军军和田正华, 2016)。地层分区常出现“岛多边形”, 因此在进行三角剖分时要考虑“岛多边形”的三角剖分算法, 结果如图 4 所示。

(4) 确定尖灭位置。根据三角剖分得到的不规则三角网, 遍历每个三角形, 根据当前三角形 3 个点的属性值来选择是否需要尖灭。如果 3 个点的属性值都为 0 或都为 1, 则无需确定尖灭位置。如果 3 个

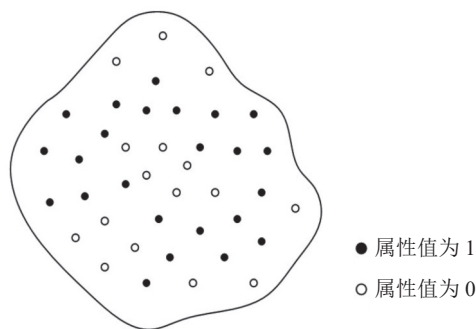


图 2 采样点范围

Fig. 2 Sampling point range

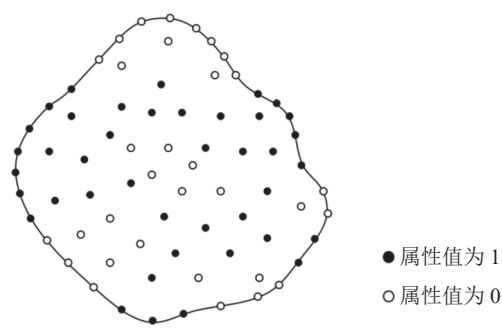


图 3 边界点属性确定

Fig. 3 Determination of boundary point properties

点的属性中既存在 1, 又存在 0, 则需要进行尖灭处理。根据 1.1 小节中的方法, 计算存在地层的边上的尖灭系数, 然后根据尖灭系数准确确定尖灭点位置。当所有的三角形遍历完成后, 即对建模范围内所有存在缺失地层的地方计算了尖灭位置。如图 5 所示, 红色点即为地层尖灭位置点。

(5) 追踪地层分区。将以上计算的尖灭位置加入到采样点集合中, 并将尖灭位置点的属性值赋 1。过滤属性值为 0 的采样点, 留下属性值为 1 的采样点集合, 再一次使用三角剖分算法, 对属性值为 1 的采样点进行三角剖分, 三角剖分得到的不规则三角网即为该地层的分区。抽取出不规则三角网中的边界, 即为地层分区的外边界, 如图 6 所示。如果地层分区边界不够光滑, 可使用光滑算法, 将地层分区进行光滑处理。

2 实验验证

本次建模采用武汉智图云起科技有限公司自研软件 Smart3dMap 模型构建平台, 在原有建模算法的基础上, 优化了不整合地层的尖灭处理算法, 将尖灭点计算方法用于地层分区追踪, 并将其加入建模算法中, 同时统一地层层序, 然后使用该软件进行模型

构建。在地质建模领域, Smart3dMap 建模平台相比其他三维地质建模软件具有明显的优势, 主要体现在地质数据管理、海量数据快速建模、海量数据分块建模、模型构建精度、模型可视化等方面。

2.1 数据准备与分析

本次建模使用的主要数据有钻孔数据、剖面数据、DEM 数据和遥感数据。北海城市地质调查项目中收集了北海银滩新城区丰富的钻孔、剖面等地质数据并已经建立成库, 且其中有大量的地层尖灭需要处理, 非常适合本文算法的研究测试。钻孔数据主要来源于地基、路基、管道等工程勘察报告, 共收集到北海市域内的钻孔 186 个。经数据检查发现, 有 174 个钻孔存在地层缺失, 32 个钻孔存在地层倒转, 57 个钻孔存在地层重复, 使用这些钻孔数据作为建模数据源与本次研究的内容契合度较高。剖面图数据包括 3 条横剖面和 3 条纵剖面数据, 用于约束地层建模。采用 50 m 分辨率的 DEM 数据约束地质模型地表, 遥感影像作为地表的纹理, 贴上纹理使得模型从视觉上更加接近于现实。建模数据源的分布如图 7 所示, 点为钻孔数据, 红色线为 6 条剖面位置, 背景为 DEM 数据, 黑色线为建模范围。

为了保证建模软件接受的建模数据源的准确性

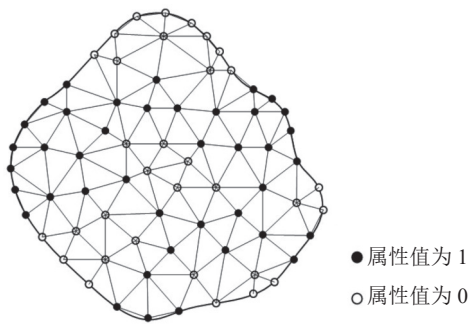


图 4 三角剖分结果

Fig. 4 Triangulation results

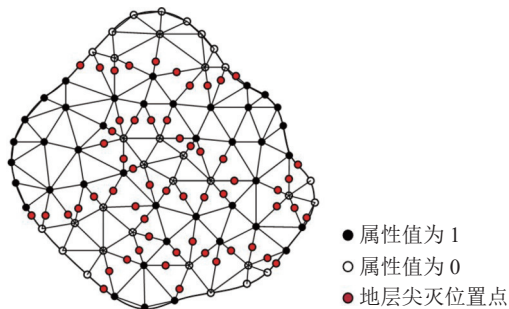


图 5 尖灭位置确定

Fig. 5 Determination of pinchout position

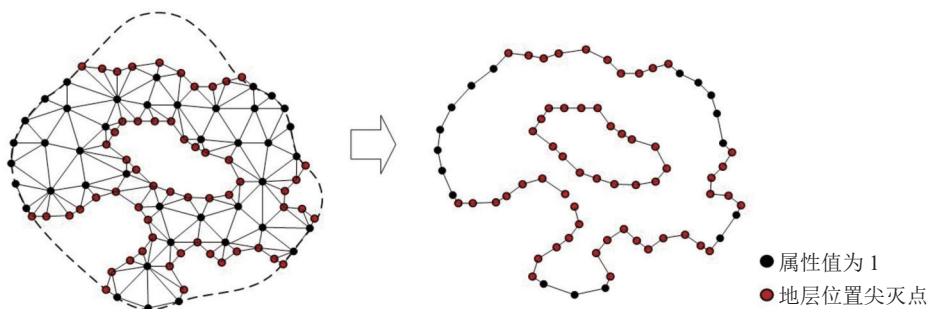


图 6 地层分区

Fig. 6 Division of strata

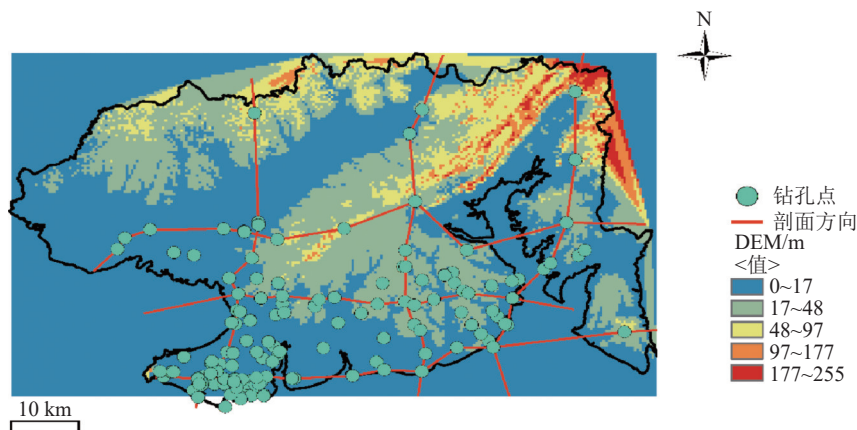


图 7 建模数据源分布

Fig. 7 Modeling data source distribution

和数据格式的规范性,建模前需要对数据进行预处理。Smart3dMap 建模软件平台提供了良好的数据检查工具,能够对接入建模平台的建模数据进行全方位检查,保证各项数据的准确性。数据检查工具包含钻孔数据检查、剖面数据检查等,其中钻孔数据检查分为钻孔基本信息检查和钻孔分层信息检查,每个检查项又包含多项检查内容。同时提供了数据修复功能,对于检查结果中出现的部分错误信息,可对其进行自动修复,对于无法修改的信息,则进行人工修改,保证建模数据无误后即可参与三维地质建模。

2.2 三维地质模型构建

本次建模过程主要分为以下几部分(图 8)。

(1) 复杂地层的层序统一编码

从基础数据中提取建模区域内的钻孔数据、剖面数据,经过统计地层信息发现,地层分布并不连续,存在地层倒转(李璐等, 2018)、地层缺失(陶晓风和吴德超, 2007)、地层重复等复杂情况,为了保证每个钻孔的分层信息能够找到与周围分层信息一致的情况,需要对复杂的地层进行层序统一。

将同一岩性中地层倒转与正常情况加以区分,通过添加零厚度层,统一钻孔的地层序列,构建各钻孔分层间的对应关系。该类方法可以解决简单的地层倒转与缺失情况,对于复杂的倒转现象存在零厚度层插入位置的二义性和倒转地层判定的二义性(杜子纯等, 2019; 花卫华等, 2023)。

若发生地层倒转,钻孔 Z3 相对于钻孔 Z1、Z2, B、C 层倒转,则将钻孔 Z3 的 C 地层作为异常层,在钻孔 Z1 和 Z2 的 B 地层上方插入零厚度层 C,统一后的地层层序为 [A, C, B, C, D] (图 9-a)。若发生

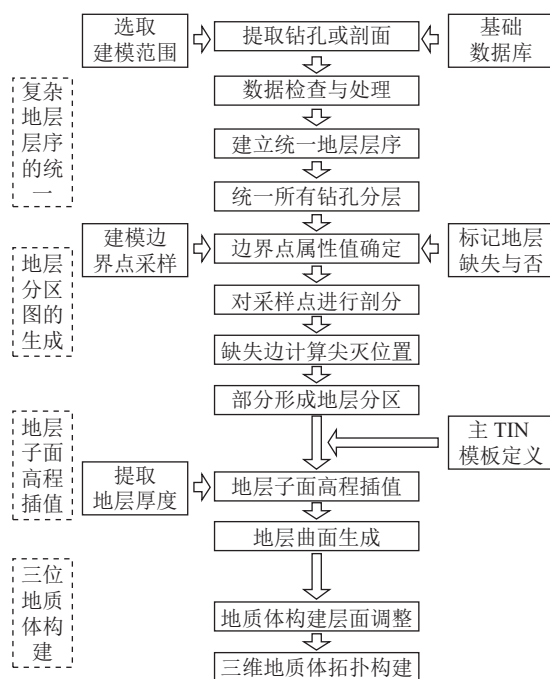


图 8 三维地质建模流程

Fig. 8 3D geological modeling process

地层重复,钻孔 Z2 存在重复地层 B,钻孔 Z1、Z3 只有一个地层 B,在钻孔 Z3 的 C 地层上方插入零厚度层 B,在钻孔 Z1 的 D 地层上方插入零厚度层 B,将所有的钻孔统一地层层序为 [A, B, C, B, D] (图 9-b)(花卫华等, 2023)。

图 9 中统一地层层序的钻孔数据示意图中各钻孔右侧标识的字母 C、B 与钻孔内字母 C、B 所指代意义相同,均代表不同地层。

根据地层的沉积规律,自上而下按照沉积年代由新到老(王鹏和江南, 2007),在地层内部,按照地层

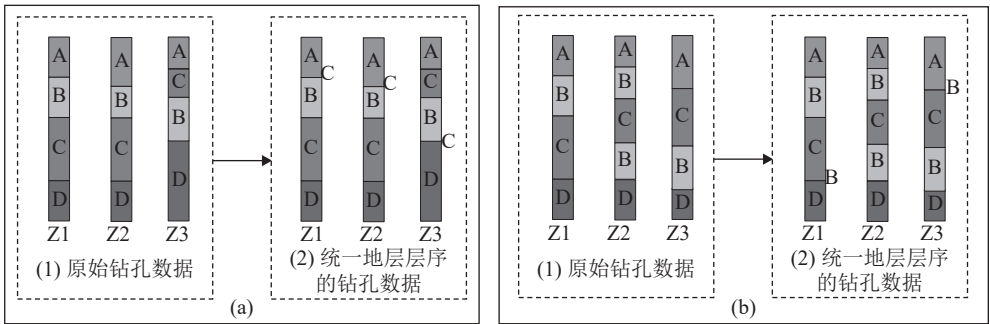


图 9 地层序列统一方法

Fig. 9 Unified method of stratigraphic sequence

系、组、岩性的顺序 (程万强等, 2014; 夏艳华和白世伟, 2012), 结合建模范围内钻孔的原始分层信息、地质和区域内整体地质结构特征, 对每一个地层近级别细分, 建立标准地层层序表 (陈安泽, 2013)。表 1 为建模区域内第四系标准地层层序表的部分内容。

对该建模范围内的钻孔分层进行分析统计, 使用统一地层层序编码方法总计建立了 38 个统一地层层序 (原始标准地层层序为 21 个)。统一地层层序确定后, 对于和统一地层层序不一致的原始钻孔分层, 插入相应的零厚度层, 使每个钻孔的分层和统一地层层序的分层保持一致, 方便建模时进行地层连接。

(2) 根据尖灭位置追踪地层分区

地层平面分区的边界范围由缺失地层的尖灭位

置确定。地层尖灭位置的连线即为每个地层平面分区的外边界。在建模区域内, 提取该地层的位置信息, 根据每个采样点位置的地层信息, 插值计算边界点的地层信息, 确定边界点是否包含该地层信息。边界点属性确定完成后, 将边界点添加到采样点集合中, 根据采样点是否含有当前地层, 将采样点进行标记。每一个采样点只可能包含该地层和不包含该地层, 将所有采样点进行三角剖分得到不规则三角网。为了确定地层的边界范围, 对于有缺失的地层, 循环遍历每个三角形, 对于三角形的每条边, 根据缺失情况依次确定在三角形的边上是否需要尖灭, 如果需要尖灭, 则依据 1.1 节中不整合地层尖灭点的计算方法进行尖灭位置计算, 并在尖灭点位置赋予包含该地层属性, 所有缺失地层的尖灭位置确定完成后, 删除采样点集合中不含该地层的点, 留下的采样点重新进行三角剖分, 即可得到该地层的平面分区。地层平面分区反映了该区域内每个地层的分布范围, 将每个地层平面分区叠加得到的结果如图 10 所示。

(3) 地层子面高程插值

自上而下建模过程中, 每个地层底面投影到水平面上, 其网格点是一致的, 称为模板网格。根据已知采样点的底部高程, 插值计算模板网格面上各点的高程 (Bamisaiye, 2018), 计算完成后需要对插值结果进行调整处理, 使用地层平面分区进行强约束, 在地层分区外的插值点, 底部高程应该调整为和顶部高程一致, 保证地层分区外的厚度为 0; 地层分区内如果出现底部高程大于等于顶部高程的情况, 则根据周围样本点重新插值, 使底部高程小于顶部高程, 完成地层底部高程的计算。图 11 为地层模板的采样点位置。

表 1 建模区域内第四系标准地层层序表的部分内容

Table 1 Some contents of Quaternary standard stratigraphic sequence table in modeling area

系	编码	组	编码	岩性	编码
第四系	1	人工填土	1-1	素填土	1-1-1
				填土	1-1-2
		海积层	1-2	砾砂	1-2-1
				粗砂	1-2-2
		冲积层	1-3	耕表土/中砂	1-3-1
		三角洲层	1-4	可塑状粉耕表土	1-4-1
	2	北海组	1-5	耕表土	1-5-1
				砾砂	1-5-2
		湛江组	1-6	可塑状粘土	1-6-1
				粉细砂	1-6-2
	基岩	邕宁组	2-1	风化泥质粉砂岩/砾岩	2-1-1
				角砾状细砂岩	2-1-2
		寺门组	2-2	风化炭质泥岩/风化泥岩/泥质灰岩	2-2-1
				粉土/强风化粉砂质泥岩	2-3-1
		黄金组	2-3	中风化泥质粉砂岩	2-3-2
				风化砂岩/泥岩/细砂岩	2-3-3

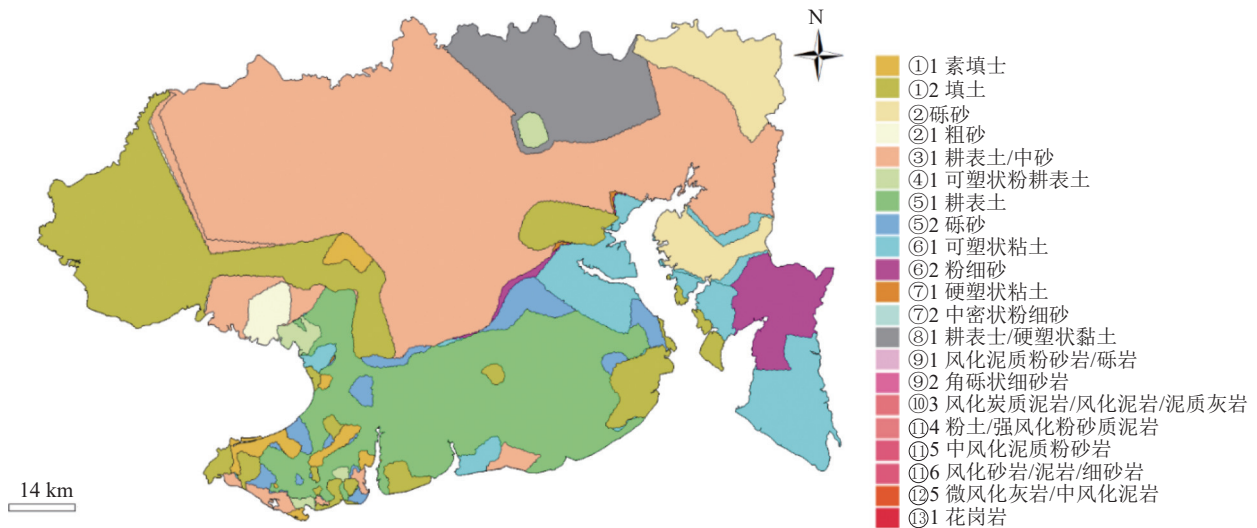


图 10 各层分区叠加效果

Fig. 10 Superposition effect of each layer

地层模板上每个采样点地层的顶部高程和底部高程计算完成后,对每个地层的顶面和底面进行拓扑重建(李璐等, 2018)。拓扑重建时,将该地层的顶部高程和底部高程相等的点去除,然后再进行三角剖分,顶部高程点和底部高程点分别进行三角剖分后即可得到该地层的顶面和底面。如果地层边界上的顶部高程和底部高程不相等,则需要增加一个侧面,然后将顶面、底面和侧面进行缝合处理,即可构成地层曲面。从上到下依次建立每一个地层曲面,即可构建出所有地层的曲面模型(黄诚等, 2021),地层曲面拓扑重建结果如图 12 所示。

(4) 三维地质体构建

使用“主 TIN”模板对每个地层进行高程插值后(Camp and Outlaw, 1993),在水平方向上使每个地层面的公共边界保持严格的拓扑一致。在垂直方向上,按照上述地层子面高程插值方法进行插值,同时对模板点的顶部与底部高程进行调整,避免出现交叉等拓扑错误,这样充分考虑了高程冲突问题,避免了相邻地层曲面相交的情况。当所有地层的曲面构建完成后,只需要将每一个地层从上到下进行重叠,地层之间就不会存在缝隙,即可自动构建出三维地质体模型(周邓等, 2022)。三维地质体模型构建的结果如图 13 所示。

2.3 三维地质模型的质量评价与对比分析

三维地质结构模型主要基于钻孔和剖面进行质量评价(Lelliott et al., 2009)。基于钻孔进行模型质

量评价方法为:建模时预留一部分钻孔(真实孔),然后从三维地质模型上相同位置处提取虚拟孔(模型孔),通过比较真实孔和模型孔的地层埋深差值,将其作为模型对应点的误差。基于剖面的模型质量评

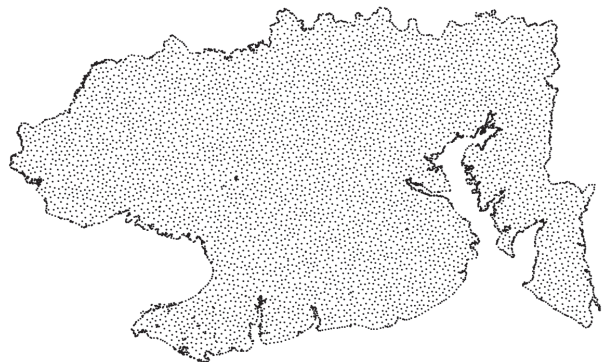


图 11 地层模板采样点位置

Fig. 11 Position of sampling points for stratigraphic template

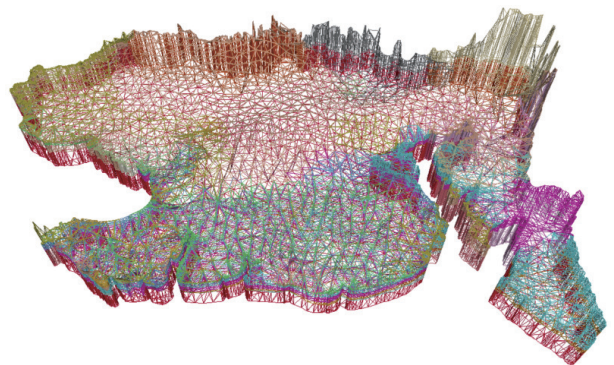


图 12 地层曲面拓扑重建

Fig. 12 Topology reconstruction of stratigraphic surface

价, 方法为: 建模时预留一部分剖面数据(真实剖面), 建模完成后在该剖面的相同位置进行模型切割, 得到切割剖面(模型剖面), 通过比较真实剖面和模型剖面的地层重叠部分和未重叠部分, 将其作为模型对应位置的误差。其中, 预留的真实钻孔与真实剖面不参与建模过程。

基于钻孔的模型质量评价, 即计算真实孔和模型孔的重叠部分和未重叠部分, 使用重叠部分的厚度除以真实孔的实际深度可得到该位置的模型可信度(图 14)。真实孔的深度为 d_1 , 重叠部分为 $a+b+c+d$, 则该钻孔位置处的模型可信度为 $(a+b+c+d)/d_1$ 。

基于剖面的模型质量评价, 即计算真实剖面 and

模型剖面的重叠部分和未重叠部分, 使用重叠部分的面积除以真实剖面的全部面积可得到该条剖面位置处的模型可信度(图 15)。真实剖面的面积为 A , 重叠部分的剖面面积为 C , 则该剖面位置处的模型可信度为 C/A 。

本次建模预留了 5 个钻孔和 2 个剖面, 用其余的钻孔数据和剖面数据进行模型构建。构建完成后, 在预留的钻孔和剖面位置处提取模型钻孔和模型剖面。将真实钻孔和模型钻孔进行对比, 得出每个钻孔的模型可信度分别为 87.3%, 89.7%, 76.8%, 79.7%, 80.4%, 钻孔的平均可信度达到 82.78%。将真实剖面 and 模型剖面进行叠加对比, 得出 2 个剖面

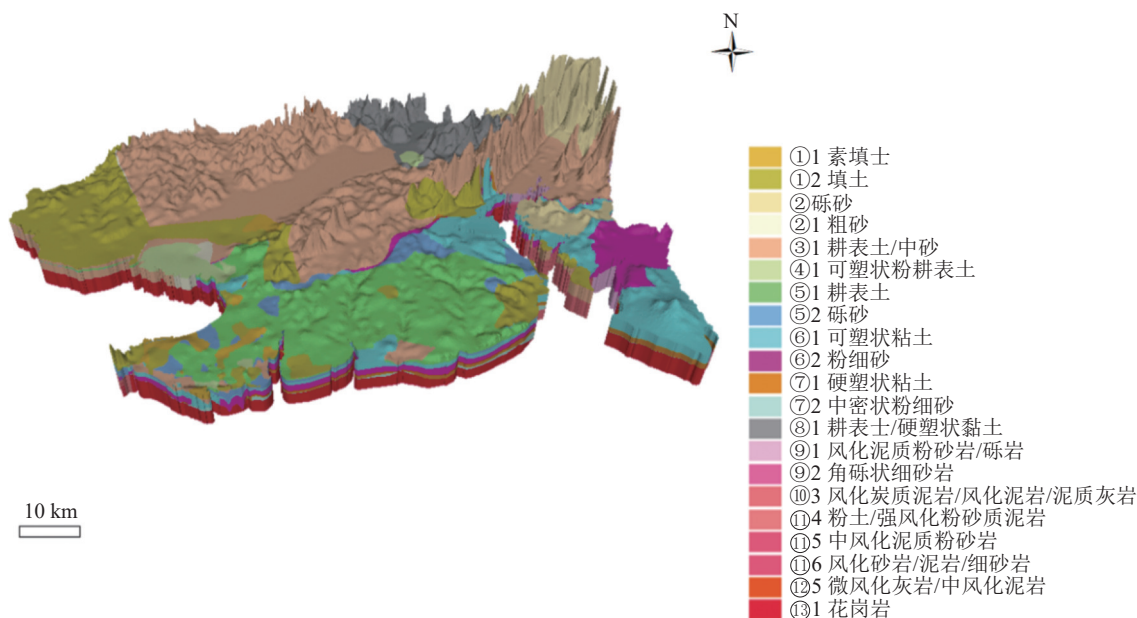


图 13 三维地质体模型

Fig. 13 3D geological model

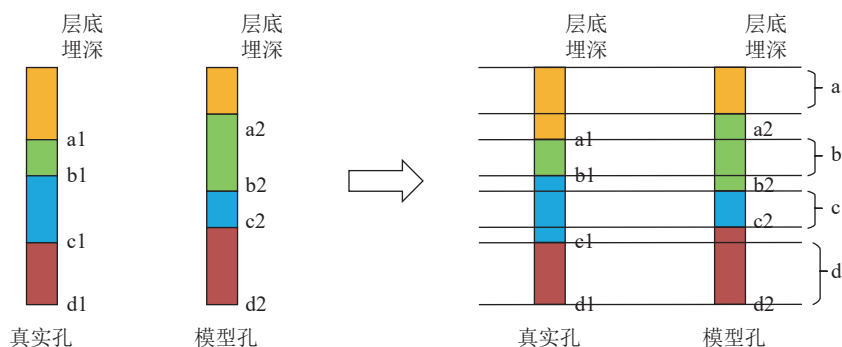


图 14 基于钻孔的模型质量评价

Fig. 14 Model quality evaluation based on borehole

$a_1 \sim d_1$ 分别表示真实孔中各地层单元的底界面埋深; $a_2 \sim d_2$ 分别表示模型孔中各地层单元底界面的埋深; $a \sim d$ 分别表示真实孔与模型孔对比后, 各对应地层单元重叠部分的厚度, 用于模型可信度计算。

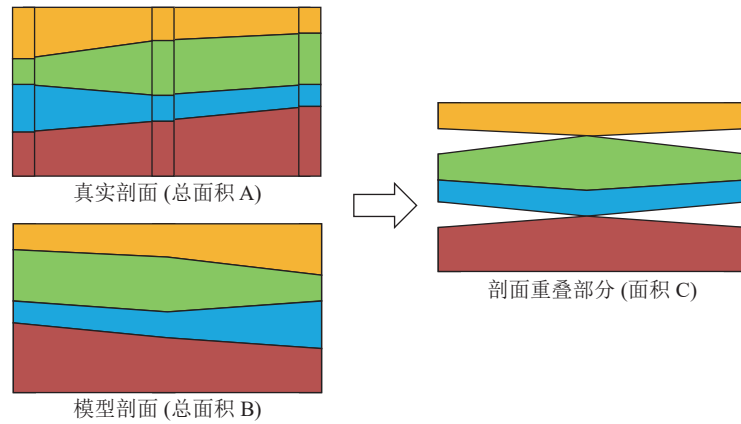


图 15 基于剖面的模型质量评价

Fig. 15 Model quality evaluation based on profile

的模型可信度分别为 85.6% 和 83.7%, 剖面的平均可信度达到 84.65%。综合钻孔和剖面, 可见模型的可信度达到 80% 以上。图 16 为预留的真实钻孔与模型钻孔对比图。图 17 为预留的真实剖面与模型剖面对比图。

针对建模结果, 本次还选取了均方根误差作为衡量插值精度的指标, 计算方法如公式(7)所示。

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2} \quad (7)$$

其中, n 表示参与建模的钻孔数量, y_i 表示真实钻孔数据, y'_i 表示模型生成的虚拟钻孔数据, $i=1, 2, 3, \dots, n$ 。

对于参与本次建模的所有钻孔, 计算每个地层的层底埋深均方根误差与层厚均方根误差, 结果如表 2 所示。

本文使用传统地质建模插值算法中的反距离加权法与基于本文提出的建模算法进行了建模实验, 并对建模结果进行了误差对比(图 18)。

生成的三维地质模型如图 19 所示。可以看出,

通过本文算法进行地层分区约束后的建模结果具有更小的均方根误差, 生成的虚拟钻孔无论是层底埋深还是地层厚度的误差均较小。同时, 通过本文算法构建的三维地质模型的地层一致性与连续性较好, 地层分区结果更准确并符合实际地质图描述。同时, 得到的结果与地质专家认可的结果匹配度较高, 说明了该算法的优越性。

3 结 语

(1) 本次通过充分分析影响地层尖灭位置的

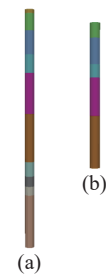


图 16 钻孔结果对比图

Fig. 16 Comparison of drilling results

a—模型钻孔; b—真实钻孔

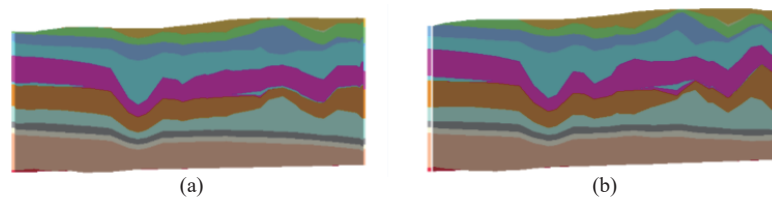


图 17 剖面结果对比图

Fig. 17 Comparison of section results

a—模型剖面; b—真实剖面

表 2 钻孔均方根误差

Table 2 Root mean square error of drilled holes

地层编码	层底埋深均方根误差	地层厚度均方根误差
①1	3.744800	3.014634
①2	0.362730	0.593881
②	0.000000	10.551066
②1	59.540487	1.917560
③1	58.799644	28.269397
④1	0.000000	18.261098
⑤1	3.037502	2.672397
⑤2	1.689583	10.789586
⑥1	17.953234	9.286725
⑥2	6.262616	15.151021
⑦1	2.607139	14.383907
⑦2	0.452502	18.189948
⑧1	0.000000	74.707864
⑨1	0.000000	2.216019
⑨2	0.000000	0.000000
⑩3	0.000000	18.665298
⑪4	0.000000	10.509101
⑪5	0.000000	4.163690
⑫5	0.000000	0.000000
⑬1	32.000410	36.866709

因素,从数据层面出发,考虑地层厚度、钻孔间距、单孔控制范围等因素,提出了一套符合实际的地层尖灭位置算法,并使用该算法追踪地层分区,使用地层分区构建地层曲面模型,提高模型的构建精度。经验证,本文的算法建模精度较高,构建的模型符合地质专家的预期结果,具有一定的应用价值,可为城市地下空间三维地质建模方法提供参考和帮助。

(2)本文算法在第四系具有很强的应用价值,尤其是处理含角度不整合地层的地质条件。但对于第四系下的基岩层,其岩性的规律较复杂,从上到下的规律是随机的,使用该算法构建基岩层的三维地质模型可能会有一些偏差。同时对于含断层的地质建模问题,也需进一步讨论研究。

致谢: 本文地层尖灭算法的研究工作得到河北水文工程地质勘察院的大力支持,在此表示衷心感谢。

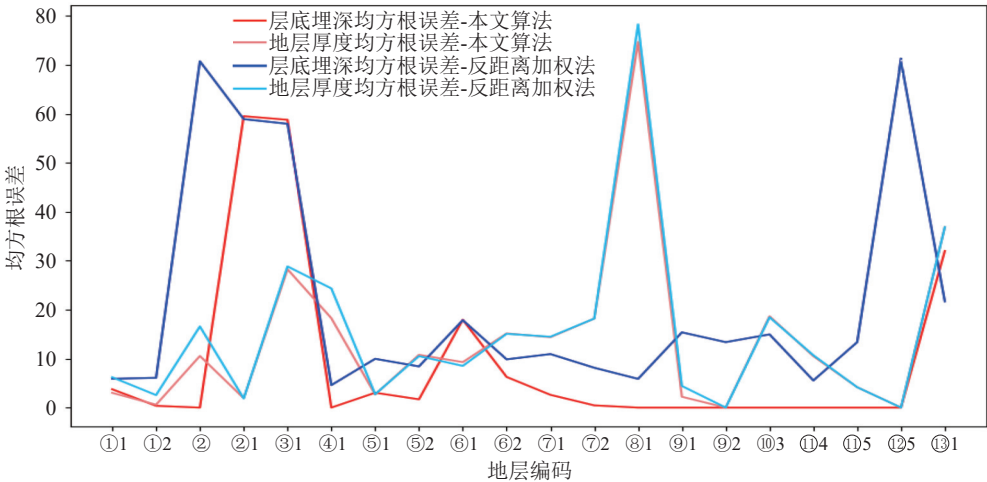


图 18 均方根误差对比图

Fig. 18 Comparison chart of root mean square error

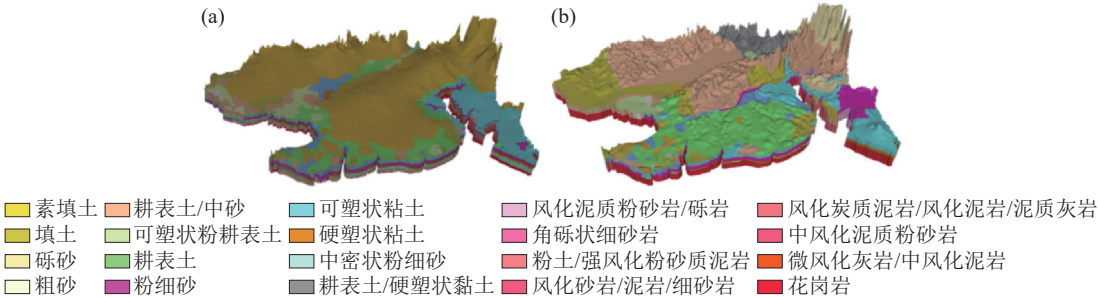


图 19 不同建模算法结果对比

Fig. 19 Comparison of results of different modeling algorithms

a—反距离加权法; b—本文算法

References

- Abdollahifard M J. 2016. Fast multiple-point simulation using a data-driven path and an efficient gradient-based search[J]. *Computers & Geosciences*, 86: 64–74.
- Bamisaie O A. 2018. Subsurface mapping: Selection of best interpolation method for borehole data analysis[J]. *Spatial Information Research*, 26(3): 261–269.
- Camp C V, Outlaw J E. 1993. Constructing subsurface profiles using GIS[J]. *Advances in Engineering Software*, 18(3): 151–158.
- Chen A Z. 2013. Dictionary of Tourism Geology[M]. Beijing: Science Press (in Chinese with English abstract).
- Cheng W Q, Yang K G, Duan W F. 2014. Discussion on engineering geological analysis methods for complex deformation areas: A case study of Danba Hydropower Station[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 41(2): 68–73 (in Chinese with English abstract).
- Deng F, Shi Y, Jiang D. 2018. Identification technology and application of stratigraphic pinch-out lines based on principal component analysis de-shielding: Taking the T50 unconformity shielding in the 678 area of Tahe Oilfield as an example[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 40(1): 24–29 (in Chinese with English abstract).
- Du Z C, Liu Z, Ming W H. 2019. Unified stratigraphic sequence method for urban-scale three-dimensional geological modeling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 40(S1): 259–266 (in Chinese with English abstract).
- Fang H D, Liu Y H, Shi B, et al. 2002. Three-dimensional geological modeling and its engineering applications[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 29(3): 52–55 (in Chinese with English abstract).
- Hao M, Zhang Y, Zhan Q, et al. 2024. Research and application of urban three-dimensional geological modeling technology based on multiple and complex geological structures: A case study of Chengdu, China[J]. *Frontiers in Earth Science*, 12: 1444861.
- Hua W H, Guo D Y, Liu X G. 2023. Unified correction and connection method of stratigraphic sequences with complex inversion[J]. *Earth Science*, 48(4): 1532–1542 (in Chinese with English abstract).
- Huang C, Lang X H, Lou Y M. 2021. Three-dimensional geological modeling and deep visualization of Xiong Village No. 1 orebody in Tibet[J]. *Geological Bulletin of China*, 40(5): 753–763 (in Chinese with English abstract).
- Li L, Liu X G, Wu W B. 2018. Key technologies for three-dimensional stratigraphic modeling based on borehole data[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 39(3): 1056–1062 (in Chinese with English abstract).
- Li X S, Liu C. 2011. Correlation distance analysis and reasonable determination of sampling spacing for investigation boreholes[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 38(4): 74–77 (in Chinese with English abstract).
- Liu F. 2024. Research on three-dimensional geological modeling technology in hydrogeological exploration[J]. *Hydraulic Power Technology and Application*, 6(22): 169–171 (in Chinese with English abstract).
- Lu J J, Tian Z H. 2016. GIS-based island polygon triangulation algorithm[J]. *Surveying and Spatial Geographic Information*, 39(11): 168–170 (in Chinese with English abstract).
- Qu H G, Pan M, Liu X Q, et al. 2015. Urban three-dimensional geological modeling and its application in urbanization construction[J]. *Geological Bulletin of China*, 34(7): 1350–1358 (in Chinese with English abstract).
- Tahmasebi P, Hezarkhani A, Sahimi M. 2012. Multiple-point geostatistical modeling based on the cross-correlation functions[J]. *Computational Geosciences*, 16(3): 779–797.
- Tao X F, Wu D C. 2007. General Geology[M]. Beijing: Science Press (in Chinese with English abstract).
- Wang J, Zhang Z Q, Teng Y B. 2011. Identification technology of delta sandbody pinch-out lines based on seismic instantaneous spectrum analysis[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 18(5): 585–588 (in Chinese with English abstract).
- Wang J, Zhou D H, Zhang Z Q. 2010. Exploration of seismic response characteristics of low-level wedge-shaped delta sandbody lithological pinch-out lines[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 24(5): 33–36 (in Chinese with English abstract).
- Wang P, Jiang N. 2007. Modeling method of inverted stratigraphy based on core sequence priority[J]. *Geography and Geographic Information Science*, 23(5): 52–55 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y M, Liu X. 2024. Research on three-dimensional geological modeling of pinch-out and bifurcation coal seams: Based on geostatistics and symbolic matrix methods[J]. *Science Technology and Engineering*, 24(4): 1402–1409 (in Chinese with English abstract).
- Wang Z J. 2012. Seismic description technology of sandbody pinch-out lines in the Sha 2 Member of Xiaoying Oilfield, Dongying Sag[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 51(2): 305–308 (in Chinese with English abstract).
- Xia Y H, Bai S W. 2012. Research on borehole data preprocessing for three-dimensional stratigraphic modeling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 33(4): 1223–1226 (in Chinese with English abstract).
- Xiong R, Zhao J L, Liu S Z. 2010. Seismic identification and prediction of sandstone pinch-out lines in the Donghe Sandstone of the Caonan area[J]. *Yangtze University Journal (Natural Science Edition, Engineering and Technology)*, 7(4): 57–60 (in Chinese with English abstract).
- Zhou D, Zeng G L, Wang H R. 2022. Three-dimensional geological modeling and ore-forming prediction in the southern part of Taoshan, Jiangxi[J]. *Geological Bulletin of China*, 41(12): 2256–2264 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Y, Liu X J, Chen S Z. 2007. Research on GIS-based software for automatic drawing of geological profile maps[J]. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition)*, 30(4): 104–108 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈安泽. 2013. 旅游地学大辞典[M]. 北京: 科学出版社.
- 程万强, 杨坤光, 段伟锋. 2014. 复杂变形区工程地质解析方法探讨——以丹巴水电站为例[J]. *水文地质工程地质*, 41(2): 68–73.

- 邓锋, 石玉, 姜冬. 2018. 基于主成分分析法去屏蔽的地层尖灭线识别技术及应用——以塔河油田 678 区不整合面 T50 屏蔽为例[J]. 石油天然气学报, 40(1): 24–29.
- 杜子纯, 刘镇, 明伟华, 等. 2019. 城市级三维地质建模的统一地层层序方法[J]. 岩土力学, 40(S1): 259–266.
- 方海东, 刘义怀, 施斌, 等. 2002. 三维地质建模及其工程应用[J]. 水文地质工程地质, 29(3): 52–55.
- 花卫华, 郭丹阳, 刘修国. 2023. 含复杂倒转的地层层序统一修正与连接方法[J]. 地球科学, 48(4): 1532–1542.
- 黄诚, 郎兴海, 娄渝明, 等. 2021. 西藏雄村 I 号矿体三维地质建模与深部可视化应用[J]. 地质通报, 40(5): 753–763.
- 李璐, 刘新根, 吴蔚博. 2018. 基于钻孔数据的三维地层建模关键技术[J]. 岩土力学, 39(3): 1056–1062.
- 李新生, 刘超. 2011. 相关距离分析与勘察钻孔取样间距的合理确定[J]. 水文地质工程地质, 38(4): 74–77.
- 刘飞. 2024. 水利地质勘察中的三维地质建模技术研究[J]. 水利电力技术与应用, 6(22): 169–171.
- 芦军军, 田正华. 2016. GIS 岛多边形三角剖分算法[J]. 测绘与空间地理信息, 39(11): 168–170.
- 屈红刚, 潘懋, 刘学清, 等. 2015. 城市三维地质建模及其在城镇化建设中的应用[J]. 地质通报, 34(7): 1350–1358.
- 陶晓风, 吴德超. 2007. 普通地质学[M]. 北京: 科学出版社.
- 王军, 张中巧, 滕玉波. 2011. 基于地震瞬时谱分析的三角洲砂体尖灭线识别技术[J]. 断块油气田, 18(5): 585–588.
- 王军, 周东红, 张中巧. 2010. 低位楔形三角洲砂体岩性尖灭线地震响应特征探索[J]. 石油地质与工程, 24(5): 33–36.
- 王鹏, 江南. 2007. 基于核心序列优先的倒转地层构模方法[J]. 地理与地理信息科学, 23(5): 52–55.
- 王艳美, 刘星. 2024. 尖灭分叉型煤层三维地质建模研究: 基于地质统计学和符号矩阵的方法[J]. 科学技术与工程, 24(4): 1402–1409.
- 王志杰. 2012. 东营凹陷小营油田沙二段砂体尖灭线地震描述技术[J]. 石油地球物理勘探, 47(2): 305–308.
- 夏艳华, 白世伟. 2012. 三维地层建模钻孔数据预处理研究[J]. 岩土力学, 33(4): 1223–1226.
- 熊冉, 赵继龙, 刘少治. 2010. 草南地区东河砂岩尖灭线地震识别与预测[J]. 长江大学学报(自然科学版)理工卷, 7(4): 57–60.
- 周邓, 曾广亮, 王洪荣. 2022. 江西桃山罗布南部地区三维地质建模与成矿预测[J]. 地质通报, 41(12): 2256–2264.
- 朱莹, 刘学军, 陈锁忠. 2007. 基于 GIS 的地质剖面图自动绘制软件的研究[J]. 南京师大学报(自然科学版), 30(4): 104–108.