

含地层交错的第四纪覆盖层工程地质剖面图 生成方法

花卫华^{1*}, 韦文成¹, 刘修国¹, 伍昕颖¹, 李浩¹, 肖海清¹, 朱玉华¹

中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院, 湖北武汉 430078

摘要: 针对第四纪覆盖层中常见的沉积相地层交错、透镜体等地层结构复杂性导致的自动剖面绘制精度不足问题, 本文提出了一种基于地层贯通思想的自动化处理算法, 旨在实现复杂地层层序的统一与剖面图的智能化绘制。该方法首先对透镜体进行了分类和识别, 提出了基于特征相似性的透镜体聚合和嵌入方法, 并通过实验验证了其有效性。接着基于地层贯通思想提出了地层分级编码规则以统一地层层序编码, 简化地层连接中的层次结构。本文还探讨了地层尖灭处理、地层分级连接策略以及底部地层连接处理等问题。通过北京市中关村科技园区数据的实验与分析, 表明所提出的算法在自动剖面绘制中获得了高准确率和鲁棒性, 显著提升了地层空间推断的准确性和一致性, 为工程地质勘察和地质建模提供了有效的技术支持。

关键词: 透镜体识别; 地层层序统一; 贯通地层; 自动连层; 地层尖灭; 第四纪地层

中图分类号: P628

收稿日期: 2025-04-17

Method for Generating Engineering Geological Cross-sections of Quaternary Overburden Incorporating Cross-Stratification

Hua Weihua^{1*}, Wei Wencheng¹, Liu Xiuguo¹, Wu Xinying¹, Li Hao¹, Xiao Haiqing¹,
Zhu Yuhua¹

School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China

Abstract: To overcome the limited accuracy of automated cross-section generation for Quaternary overburden, which is often compromised by complex stratigraphic features like interfingering sedimentary facies and lenticular bodies, this paper proposes an automated processing algorithm based on the concept of stratal continuity. This algorithm aims to unify complex stratigraphic sequences and facilitate the intelligent delineation of geological cross-sections. Leveraging the principle of strata correlation, our approach unifies complex stratigraphic sequences through systematic lenticular body identification, aggregation, and embedding (validated experimentally), and a hierarchical coding scheme. The algorithm effectively handles strata pinch-outs, hierarchical connections, and basal terminations. Tested on data from Beijing's Zhongguancun Science and Technology Park, the method demonstrates high accuracy and robustness, substantially improving the precision and consistency of stratigraphic spatial inference for engineering geological exploration and modeling applications.

Key words: Identification of Lens Bodies; Unification of Stratigraphic Sequences; Penetrating Stratum; Automated Profile Layer Connectivity; Stratigraphic Pinch-out; Quaternary Strata

基金项目: 中国铁建股份有限公司 2021 年重大科技研发项目(2021-A02); 中国铁建股份有限公司 2023 年重大科技研发项目(2023-Z03); 陕西省创新能力支撑计划(2024CX-GXPT-10)

作者简介: 花卫华(1977-), 副教授, 主要从事多约束下复杂地质模型快速构建与定量分析研究。ORCID: 0000-0002-2255-7411. E-mail: huaweihua@cug.edu.cn

0 引言

在地质勘察与工程设计领域,地层剖面图是揭示地下构造、评估地质条件、指导施工与决策的重要工具(陈巍璞等, 2010; Hassanzadeh et al., 2022)。通过对钻孔数据的分析、解释和整合,工程人员可在二维平面上构建出地层结构的纵剖面。传统的剖面绘制往往依赖人工解读与经验判断,不仅耗时且易受主观因素影响(Wei et al., 2024)。随着信息技术和数据处理能力的提高,利用计算机算法对复杂地质数据进行自动化处理与剖面绘制的方法逐渐成为研究热点(扶金铭等, 2024; 王丽芳等, 2024; 朱莹等, 2008; Chu et al., 2024; Caumon et al., 2009)。

在自动绘制第四纪覆盖区二维地质剖面图的过程中存在以下三个方面的问题。(1) 地层空间变异性问题: 钻孔间地层缺失、沉积相地层交错、岩性突变及透镜体导致的不连续现象(花卫华等, 2023)。透镜体常表现为不连续、局域性变薄或变厚的地层形态,其出现使得钻孔间的地层序列无法简单对齐,从而增加了剖面绘制的复杂性(Wang et al., 2024)。(2) 复杂层序结构解析困难: 地层的时空演化、多级别层序划分以及局部不整合的存在,使得单纯依据钻孔间的线性插值无法充分反映真实的地质特征(Ichoku et al., 1994; Wu et al., 2024; 冯波等, 2019; 郁军建等, 2024)。地层的尖灭处理、层序的统一编码与分层级别的统一连接策略等技术问题也对自动绘制精准剖面提出了更高要求(朱良峰等, 2008; Zhao L 和 Guo R, 2011; 花卫华等, 2022)。(3) 自动化与人工剖面的地质一致性差异: 自动化生成剖面常出现地层界面几何形态突变,导致地层接触关系与沉积序列或构造演化规律相悖(Wellmann et al., 2010)。

在地层剖面图自动生成领域,陈建宏(陈建宏等, 2005)等人采用拓扑学方法构建层次型钻孔数据库,并通过倾斜钻孔计算和地质界线追踪,实现了矿山散乱数据的有效可视化。李晓娟(李晓娟等, 2017)等人提出的地层分布模型自匹配算法,通过定义地层分布模式和剖面线生长策略,显著提升了对地

层尖灭、透镜体和地层缺失等复杂情况的处理能力。王家伟(王家伟等, 2012)等人结合虚拟地层预处理和三维可视化技术,开发了含尖灭地层的地质剖面图自动生成与绘制方法,提高了剖面图的直观性和解释准确性。上述研究虽在自动化剖面生成方面取得了显著进展,但鲜有研究深入探讨第四纪地质体的特殊性。

针对第四纪地层层状分布特征,部分学者已开展了三维地质建模探索。王义梅(王义梅等, 2022)等人,针对第四纪层状分布的特点,采用了地质分区建模法,并结合平行剖面多元数据联合建模法,成功揭示了1500m 以浅的第四纪地层结构。李亦纲(李亦纲等, 2005)等人针对城市第四纪地质特点进行软件开发,强调层序分层和二维三维结合的思路,但软件在复杂地质体建模、多元数据融合和模型验证方面仍有局限性。然而,现有研究在第四纪地质条件下的二维地质剖面自动生成方面仍显不足。目前,基于第四纪地质数据构建的地质模型在一定程度上简化了第四纪地层的复杂性,导致生成的剖面精细度不足,难以准确识别和有效解决透镜体等地质体的精细刻画问题。

本文提出了一种基于贯通地层思想的地层层序统一与自动剖面绘制算法。通过该算法,可以对多钻孔数据中出现的公共地层进行标记和统一编码,从而在复杂地层体系中建立可靠的对照关系。同时,本文针对透镜体识别与分类、地层缺失处理、地层交错处理以及厚度敏感的尖灭位置确定方法进行了探讨与实践。实验结果表明,该算法在第四纪覆盖区的自动剖面绘制中获得较高的高准确率与强鲁棒性,为工程地质勘察与地质建模工作提供了有效技术支持。

1 基于地层贯通思想的地层剖面图生成方法概述

本文提出了一种基于贯通地层思想的剖面图生成方法,旨在实现地层层序的统一与自动化剖面绘制。贯通地层是指在所有钻孔中均为同一地层,且其相对高程差异在容许范围内的地层单元,可将其识别为贯通地

层并进行统一编码。贯通地层强调地层在区域尺度上的连续性,克服了离散钻孔数据带来的局限性,在保证地质合理性的前提下,突出主要的、连续的地层单元,避免不必要的细节干扰,使剖面图更清晰、更实用。

首先,对研究区域内的钻孔数据(包括钻孔编码、深度、分层信息及孔口标高等基础地质数据)进行收集与预处理,剔除异常值和噪声,确保数据的完整性与准确性。随后,采用透镜体识别算法,自动识别地层中的普通透镜体、嵌套透镜体、顶层透镜体及底层透镜体,并通过聚类处理合并同一母层的透镜体,再剔除透镜体以减少其对地层层序统一与连接的干扰。接着,基于贯通地层的层序统一方法,制定分级编码规则,实现不同钻孔间地层层序的一致性与连贯性。在地层连接阶段,采用分级连接策略,包括贯通地层连接、分级连接以及地层尖灭处理,确保地层线条的光滑性与自然性。通过上述步骤,本文的方法有效提升了剖面图生成的精度和一致性,所生成的剖面图与人工连成的剖面高度吻合,并在地层的完整性、平滑性以及地层尖灭处理方面表现出色,甚至优于人工连成的剖面图。

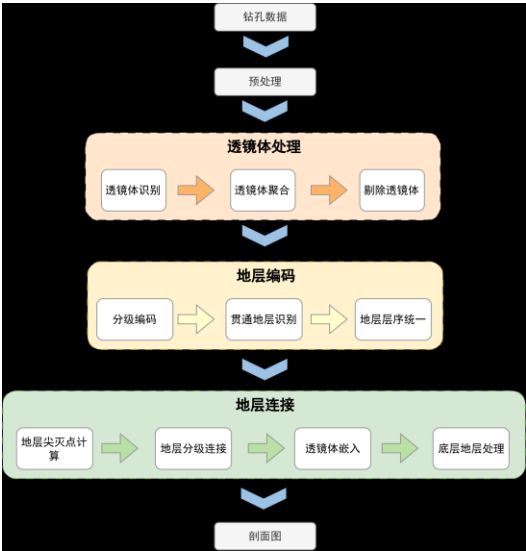


图 1 技术路线图

Fig. 1 Technology Roadmap

2 透镜体处理

2.1 透镜体类型

透镜体指的是具有透镜形状的岩体或

地层单元,在剖面图上的表现通常是呈薄层状或局部厚度变化较小的区域(Koltermann and Gorelick, 1996)。由于透镜体和周围岩层的接触面较为模糊,边界并非清晰的线性平面,而是具有一定程度的曲折性或渐变性,计算机难以识别。因此,本研究对透镜体进行类型划分,以便于后续识别和处理。

本文将透镜体分为4类:①普通透镜体:识别出的上下地层为同一地层(图 2a);②嵌套透镜体:识别出的上下地层相同,并且母层的上下地层亦相同,可能存在多个透镜体相互嵌套的地质体结构(图 2b);③顶层透镜体:在相邻钻孔中存在透镜体,且在本钻孔的母层范围内,存在与透镜体相同的地层,其顶部与母层重合(图 2c);④底层透镜体:在相邻钻孔中存在透镜体,且在本钻孔的母层范围内,存在与透镜体相同的地层,底部与母层重合(图 2d)。

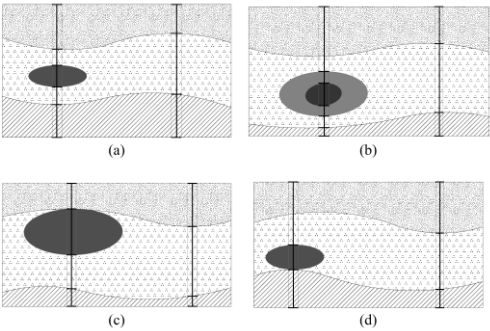


图 2 地层中的透镜体类型

Fig. 2 Types of Lens Bodies in Stratigraphy

2.2 透镜体识别方法和聚合

透镜体的识别过程包括普通透镜体、嵌套透镜体、顶层透镜体和底层透镜体四类。首先对于每个钻孔数据,均自上而下逐层检测地层。若检测到某地层的上下地层为同一地层,则初步将其标记为透镜体。针对嵌套透镜体,则采用迭代循环识别法,即重复检测直至上下地层不再相同,最终将所有连续识别出的地层合并为一个完整的嵌套透镜体单位。完成上述普通透镜体和嵌套透镜体的识别后,将进一步针对母层范围内的相邻钻孔进行顶层透镜体和底层透镜体的识别。具体而言,若在相邻钻孔的相同母层层位中皆出现透镜体,则持续标记,直至相邻钻孔中不再出现相同母层的透镜体为止。

完成透镜体判识后，进行后处理操作。将已标记的透镜体从钻孔的分层数据中剔除，并将透镜体的顶、底地层单元进行整合。通过这一操作，可以有效减少透镜体对地层层序统一和地层连接的影响，使之更符合区域地层的宏观演化格架。随后，进行聚合操作，判断相邻钻孔中相同地层的透镜体：若透镜体的母层相同且相对高差在阈值 ΔH 范围内，则进行聚合，并循环迭代此分析判别步骤，直至不再存在可聚合的透镜体。高差阈值的计算公式为：

$$\Delta H = k \times |H_{\max} - H_{\min}| \quad (1)$$

其中， $H_{\max}$ 、 $H_{\min}$ 分别为母层中透镜体的最大顶板标高和最小底板标高， k 为调整系数，用于控制高差灵敏度。若 k 值设置过高($k>0.1$)，则 ΔH 容许的垂向高差较大，易导致空间上实际垂向跨度较大的独立透镜体被错误聚合，甚至出现聚合后的透镜体垂向厚度接近其母层厚度的情况，从而过度

简化地层结构，掩盖必要的地层细节。反之，若 k 值设置过低($k<0.01$)，则 ΔH 对垂向高差的约束过于严格，即使高程差异微小的相邻透镜体也可能无法聚合，导致剖面图中出现数量过多的、孤立的小型透镜体，使得地质解释复杂化，降低剖面图的实用性。考虑到第四纪松散地层的固有复杂性以及工程地质剖面图对精度的特定要求，本研究在综合分析和经验判断的基础上，将调整系数 k 设定为 0.05。此取值旨在寻求一个平衡点：既能有效避免因 ΔH 过大造成的透镜体过度聚合，确保主要地质体的准确识别；又能保留必要的地层细节信息，避免因 ΔH 过小导致的地层结构过度破碎化，从而提升地质剖面图的解释性和应用价值。

在透镜体聚合过程中，需对合并后的透镜体进行顶底界面插值构建，以确保聚合后地质体的空间展布连续性。最终将这些透镜体标记为一个完整的透镜体。透镜体识别与聚合算法的详细步骤与流程，已于图 3 流程图中清晰展示。

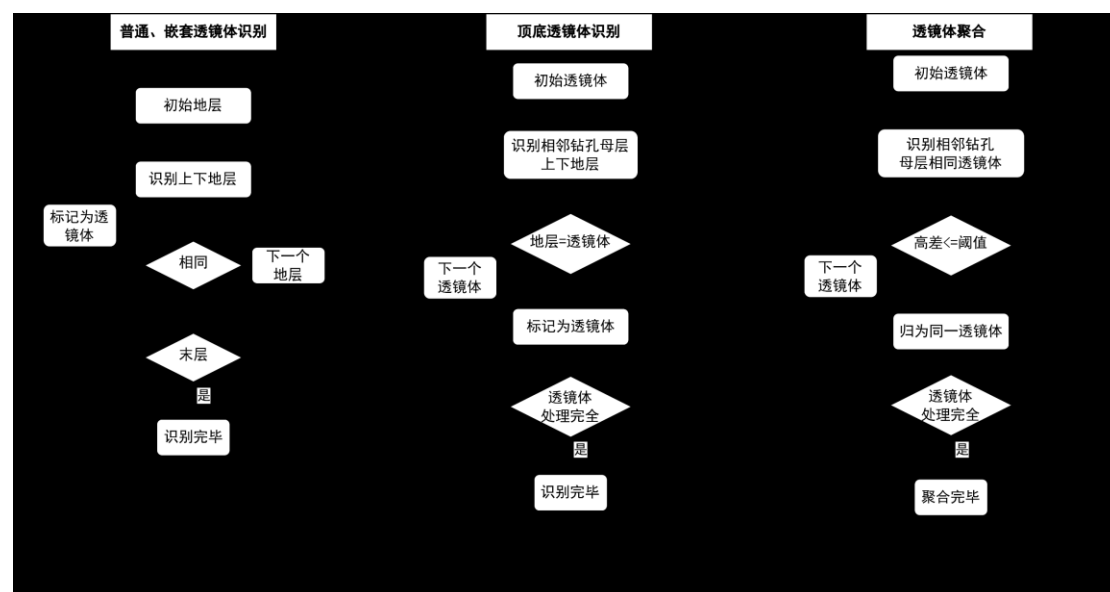


图 3 透镜体识别和聚合的算法流程图

Fig. 3 Algorithm Workflow for Identifying and Aggregating Lens Bodies

2.3 透镜体的嵌入

在透镜体的嵌入过程中，首先处理孤立的透镜体的情况。针对仅在单一钻孔中出现的透镜体，可通过对其两端进行 1/n 比例（默认 1/2）的尖灭处理。对于相邻多孔均有揭示的透镜体，需根据其在剖面图上的展布特

征，采取差异化的嵌入策略：若透镜体横向贯穿整个剖面图，则应将透镜体两端合理延伸至剖面图边界，以保证地质体的连续性；若透镜体仅为局部展布，未贯穿整个剖面图，且其尖灭边缘恰好位于母层中部，则宜对其两端进行 1/2 比例的尖灭处理，使其自然收

缩；反之，若透镜体虽贯穿剖面，且其尖灭边缘却位于母岩层顶部或底部，则需对其两端进行 1/1 比例的尖灭处理，以维持其与顶底界面的合理接触关系。上述透镜体嵌入过程，通常在地层连接阶段进行，其根本目的在于实现透镜体地质体的合理嵌入，精确表达透镜体与地层间的空间接触关系，进而确保地层结构在剖面图上的连续性与地质结构的完整性。

3 含地层交错的地层层序统一

3.1 分级编码规则

为确保地层层序的统一性和规范性，本研究提出了一种基于地层分级划分的编码方法。该方法按照标准地层表中大到小逐级扩展的层次结构进行编码，从大层（系）开始，逐步细分至次亚层（组）。具体步骤是：首先构建大层（系），即一级地层；在确定一级地层的上下界面后，进一步划分出亚层（统），并在其上下界面之间构建次亚层（组），以此类推，直到级别无法继续细分为止。

编码过程从大层、亚层、次亚层等大范围地层开始，逐步向下细化。在逐级编码过程中，每个地层单元的编码，务必精确锚定其上级地层单元的层序界线范围，并确保编码过程自上而下，逐层界定，逐级施码。通过构建上述地层分级编码体系，可有效确保地层在空间展布序列和地质时间序列上的层序关系，均能得到科学、准确且规范的地质表达与有效反映。

3.2 贯通地层

在地层层序统一的过程中，无法进一步细分的地层需要进行贯通地层的识别与编码。贯通地层通常空间尺度较大，横向广泛分布，常跨越多个钻孔，构成区域地层结构的主体框架。允许的高程差范围则依据地层厚度计算，具体公式如下：

$$\Delta H_{\text{allowed}} = k \times T_{\text{max}} \quad (2)$$

其中， $\Delta H_{\text{allowed}}$ 是最大的相对高程差， T_{max} 为最厚地层厚度， k 是比例系数。贯通地层识别侧重于区域连续性，容忍一定的垂

直起伏，采用相对较大的 $k = 0.1$ ，放宽高程差异的限制。

贯通地层的识别与编码有助于简化地层层序结构，避免过度细分，确保地层数据的一致性，并提高地层连接的横向连续性。

3.3 统一层序编码规则

从上往下对每个亚层中的地层进行编码，对每个亚层中进行完贯通度识别结束对未编码地层进行编码，具体流程（图 4）所示。

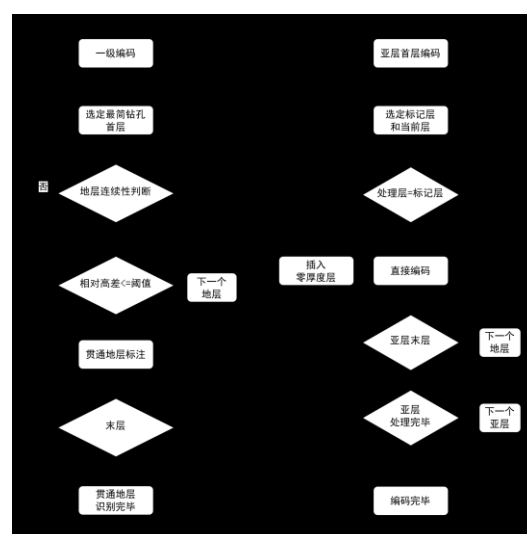


图 4 统一层序流程图

Fig. 4 Workflow for Unifying Stratigraphic Sequences

①针对亚层中尚未完成编码的地层单元，以亚层第一层地层为起始，向下遍历尚未编码的首个地层单元，并将其指定为当前层，当前层中顶板标高最大的地层作为标记层。如图 5（a）所示，集合{1-1, 1-1, 1-1}、{1-3, 1-3, 1-3}、{2-1, 2-1, 2-1}已完成贯通地层编码，以集合{1-4, 1-5, 1-4}为当前层，当前层中顶板标高最大的地层为 1-5，则含有 1-5 的当前层为标记层。从左往右，对当前层中每个地层进行编码，被处理的地层记为处理层。此时分为三种情况：

（1）如果处理层的原始编码和标记层相同，如图 5（b），直接将处理层进行编码。

（2）如果处理层的原始编码和标记层不相同，如图 5（c），则在处理层的上方插入零厚度的标记层，并对零厚度层进行编码。

（3）如果处理层不存在，如图 5（d），则直接插入零厚度的标记层，并对零厚度层

进行编码。

②该地层处理完毕后，将当前层向下移动一个地层，重复步骤一，直到当前亚层中的所有地层都完成编码。

③该亚层处理完毕后，处理下一个亚层，重

复步骤一和步骤二，直到所有亚层中的地层都完成编码。最后取所有钻孔分层编码并按照排序的并集，如果图 5 (e) 所示，完成统一的地层层序为{1-1, 1-2, 1-3, 1-4, 1-5, 1-6, 2-1}。

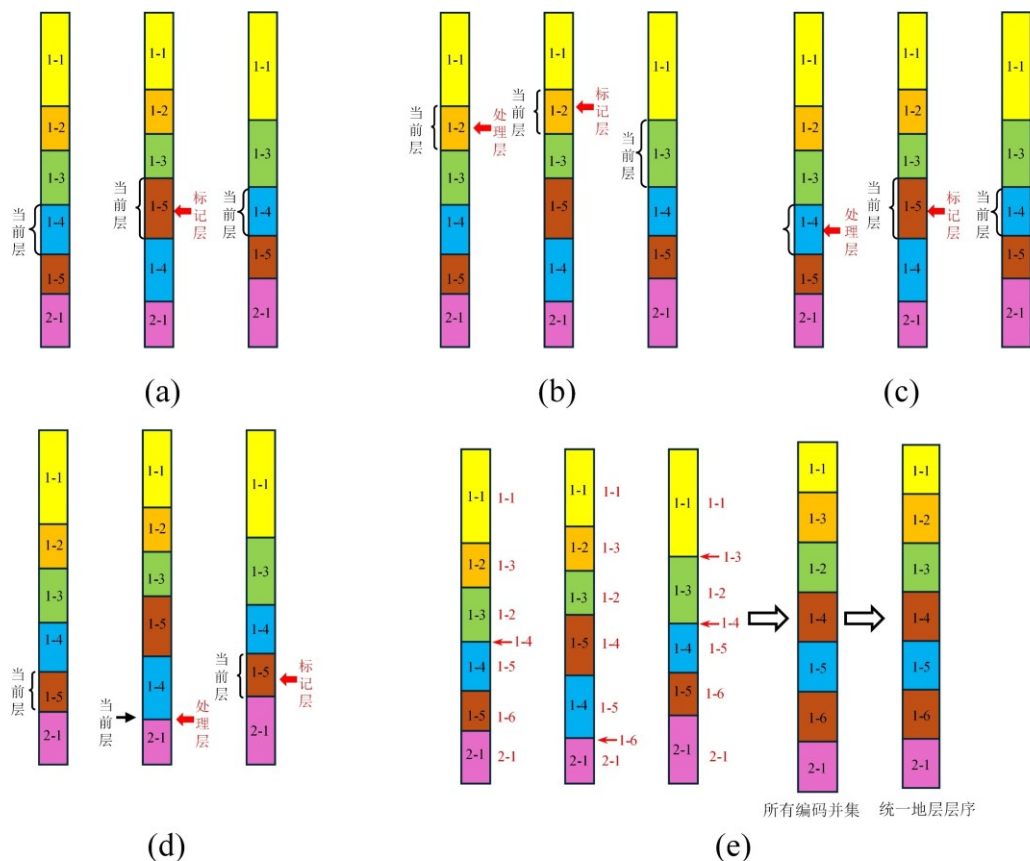


图 5 统一地层层序

Fig. 5 Unified Stratigraphic Sequence

(a)初始状态与标记层选定; (b)编码一致示意图; (c)编码不一致处理图;
(d)地层缺失示意图; (e)统一层序;

通过上述方法得到了统一的地层层序，但在每个钻孔中，钻孔的分层尚未与统一地层层序完全一致。为确保各钻孔分层数据与统一地层层序的严格一致性，需依据统一地层层序表，对各钻孔柱状剖面进行标准化更新。具体方法是：基于已建立的统一地层层序格架，在各钻孔柱状图中，针对缺失的地层层段，在相应的层序位置插入零厚度层地层单元，以确保所有钻孔的地层层序均与统一地层层序严格对齐，并使任意钻孔的每一地层单元，均能在统一地层层序表中找到与之唯一对应的地层分层。更新钻孔分层的具体实施过程，已在图 6 中以示例形式清晰展

示。

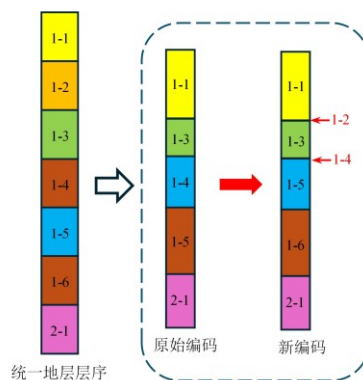


图 6 更新地层编码

Fig. 6 Updated Stratigraphic Coding Scheme

4 含地层交错与透镜体的第四纪

地层的地层连接方法

4.1 地层尖灭处理

本文对陈小芳等人(陈小芳等, 2023)提出的基于三维地质模型的地层尖灭处理方法进行改进, 并将其应用于剖面图的地层尖灭处理。具体而言, 首先将需进行尖灭计算的地层定义为处理地层, 对包含处理地层的钻孔, 收集其空间位置和地层厚度数据, 并利用薄板样条插值法对地层厚度进行插值处理, 生成反映地层厚度变化的光滑曲线。对于含有零厚度层的钻孔, 从曲线上提取相应的厚度值记为 H_1 。计算剖面图范围内所有含有处理地层的钻孔的处理地层的平均厚度 H_2 。鉴于 H_1 侧重于局部钻孔的厚度变化, 而 H_2 反映了剖面范围内的整体厚度变化, 为减小二者之间的偏差, 最终厚度取 H_1 与 H_2 的算术平均值, 并将该值乘以-1 以表示零厚度层的地层厚度。在计算尖灭系数时, 再次对地层厚度(包括零厚度层)进行插值, 生成目标地层的新曲线。随后, 对地层底板进行插值连接, 确定两条曲线的交点, 将交点作为目标地层的尖灭位置。

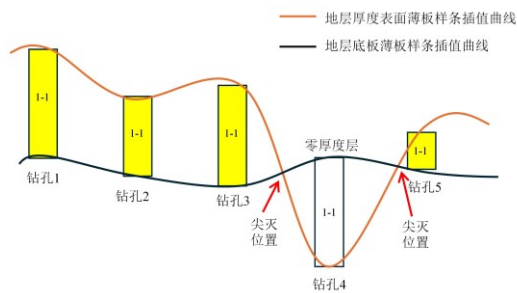


图7 考虑地层厚度的尖灭位置处理

Fig. 7 Processing of Extinction Locations Considering Stratigraphic Thickness

4.2 地层分级连接策略

统一地层层序保证了钻孔分层信息的一致性, 为剖面图的连层提供了坚实的基础(Groshong, 2006)。在标准地层表中, 地层具有明确的级别结构。传统的地层连接方法通常仅考虑相邻钻孔的分层信息进行直接连接, 但这种方法可能导致剖面图中的地层线无法准确反映地层的级别结构, 尤其在地层缺失等特殊情况下, 地层的构建往往不够合理。因此, 本文提出了一种基于分级划分的地层连接策略。

该策略依据地层层序统一中的层次结构, 首先构建高层(系)的上界面和下界面, 确定高层的连接后, 依次构建亚层(统)的上界面和下界面, 如图 8(c)中的红线所示。随后, 构建贯通地层的下界面, 即图 8(c)中的黑线部分, 进而进行所有地层的自上而下连接。在连接过程中, 对于需要进行尖灭处理的地层, 利用上一个地层的下界面和下一个地层的上界面进行构建。具体而言, 上一个地层的下界面和下一个地层的上界面需将本地层的尖灭位置纳入插值过程, 但下一个地层上界面只保留尖灭位置左侧的部分。如图 8 所示, 本研究对比分析了三种地层连接方法的剖面图表现: (a)传统直接连接法, (b)不分级连接法, 以及 (c)分级连接法。通过重点观察 {1-6, 1-5, 1-6} 地层序列的连接特征可以发现, 传统直接连接法会产生不自然的折线状态, 不分级连接法虽然改善了连接平滑度, 但是主层间的地层界限表达不准确。而分级连接的剖面图曲线更加光滑, 对主层之间的界限更加精确, 更符合沉积地层的自然展布规律。

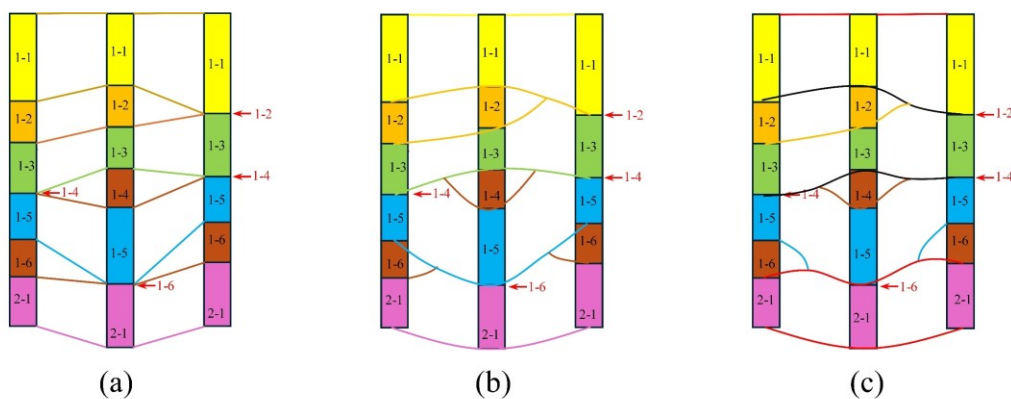


图 8 不同地层连接方法的效果对比

Fig. 8 Comparative Effects of Different Stratigraphic Connection Methods

(a)传统连接方式; (b)不分级连接方式; (c)分级连接方式

4.3 底部地层连接处理

在地层连接的底层处理中,通常不对地层向深部进行延展。具体方法为,将钻孔向两侧各延展钻孔间距的一半位置,并在延展的 1/2 位置垂直向上进行连接(见图 9)。这种处理方式能够使地层模型更加美观,减少因深部延展可能引发的连接错误。通过在钻孔间距的中点进行垂直连接,可以有效避免不必要的复杂连接,提升地层模型的整体一致性与准确性。

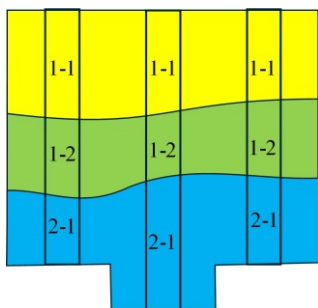


图 9 底部连接效果

Fig. 9 Effect of Bottom Connection

5 实验结果与分析

本文使用武汉智图云起科技有限公司的 Smart3dMap 平台,并采用 C++语言编制了实验算法。该程序能够根据钻孔数据信息(包括钻孔编码、钻孔深度、钻孔分层、孔口标高等)自动绘制二维地质剖面图。算法特别针对透镜体、地层缺失和沉积相地层交错等特殊情况进行了优化,完全满足工程项目对地质剖面图的要求。

北京地区位于华北板块构造活动带,地处阴山纬向构造带南缘,同时处于祁吕-贺兰山字型构造体系东翼反射弧与新华夏系构造带的复合部位,并毗邻延昌弧型构造东翼南缘。从区域构造特征来看,北京市平原区主要发育以北东向断裂构造为主、北西向断裂构造为辅的断裂体系。研究区中关村作为北京市平原区的组成部分,其地质背景具有典型的冲积平原特征:该区域位于永定河冲积扇范围内,受河流沉积作用影响显著,形成了复杂的沉积地层交错分布格局。工程地质勘察揭示,研究区地层主要由粘性土、粉土与砂层组成的互层沉积构成。

本研究以北京市中关村工程项目为依托,共收集了 92 条钻孔数据,这些钻孔数据均匀分布于中关村经济技术开发区。基于这些钻孔资料,建立了研究区的标准地层划分方案(见表 1),其中相同地层名称但编码不同的情况反映了土层组分比例和物理状态的区域性差异。

表 1 标准地层表

Table 1 Standard Stratigraphic Table

主层 编码	地层名称	地层 编码
S1	粉质粘土素填土、粘质粉土	1
	素填土	
	房渣土、碎石填土	1-1
	房渣土、碎石填土	1-2
S2	粉质粘土、重粉质粘土	2
	粉质粘土、重粉质粘土	2-1
	粉质粘土、重粉质粘土	2-2

	粉质粘土、重粉质粘土	2-3		粉质粘土	5-3
	粘质粉土、粉质粘土	3	S6	粉质粘土、粘质粉土	6
S3	粘质粉土、砂质粉土	3-1		细砂、中砂	7
	粘土、重粉质粘土	3-2		细砂、中砂	7-1
S4	粘质粉土、砂质粉土	4	S7	有机质粘土、有机质重粉质粘土	7-2
	粘质粉土、粉质粘土	4-1		粘质粉土、砂质粉土	7-3
S5	细砂、中砂	5	S8	重粉质粘土	8
	细砂、粉砂	5-1	S9	粉质粘土、粘质粉土	9
	粉质粘土	5-2			

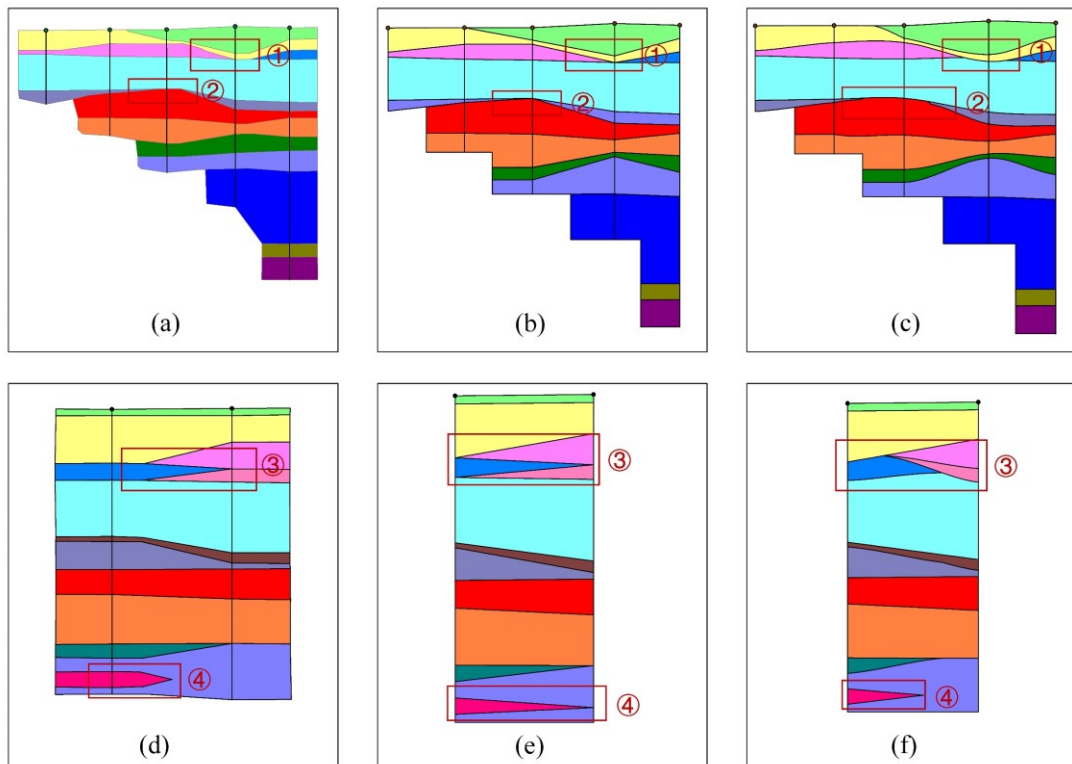


图 10 不同剖面线连接方法的效果对比图

Fig. 10 Comparative Effects of Different Profile Line Connection Methods

(a) 11 号线人工连接剖面图; (b) 11 号线传统方法连接剖面图; (c) 11 号线本文算法连接剖面图

(d) 14 号线人工连接剖面图; (e) 14 号线传统算法连接剖面图; (f) 14 号线本文算法连接剖面图

在收集到的钻孔数据中, 选取了 17 条剖面线, 对比了人工连成的剖面图与程序自动绘制的剖面图。通过计算正确划分的地层界面数与总地层界面数的比值, 评估了算法自动绘制剖面图的准确率, 其正确率均为 97.5% 以上。如图 10 所示, 与人工绘制的剖面图相比, 本研究算法自动生成的剖面地质界线在整体上展现出更优的平滑度。具体而言, 通过对比图 10(a)、图 10(b) 和图 10(c) 中的特征区域①和②, 以及图 10(d)、图 10(e) 和图 10(f) 中的特征区域③, 可以清晰观察到不同方法在地层尖灭处理上的差异。人工方

法对地层进行了完全尖灭处理; 传统自动化方法通常采用预设的完全尖灭模式。与此不同, 本文提出的算法首先利用尖灭识别算法精确确定尖灭位置, 随后将这些位置信息整合到地质界线的插值计算中, 从而生成了更为符合地质规律的地质界线。此外, 对比分析图 10(f)、图 10(e) 以及对应的人工剖面图 10(d) 中的特征区域④可以发现, 传统方法在识别透镜体方面存在不足, 常将其误判为连续地层进行连接。相较之下, 本文算法能够有效识别透镜体, 并将其合理地嵌入到地层结构中, 其最终呈现效果与人工绘制的

剖面图高度一致。

针对含沉积相地层交错的情况，本方法并未采用特殊的子流程，而是将其无缝地整合到基于地层贯通思想的统一处理框架中。剖面图结果（如图 11 所示）表明，该算法有效克服了地层交错带来的结构复杂性，生

成的剖面图在保持地质结构合理性的同时，展现出更强的地层连续性与更高的清晰度，显著提升了其实用价值。这使得该算法能够为复杂的第四纪覆盖区提供连贯且易于解译的地质剖面图。

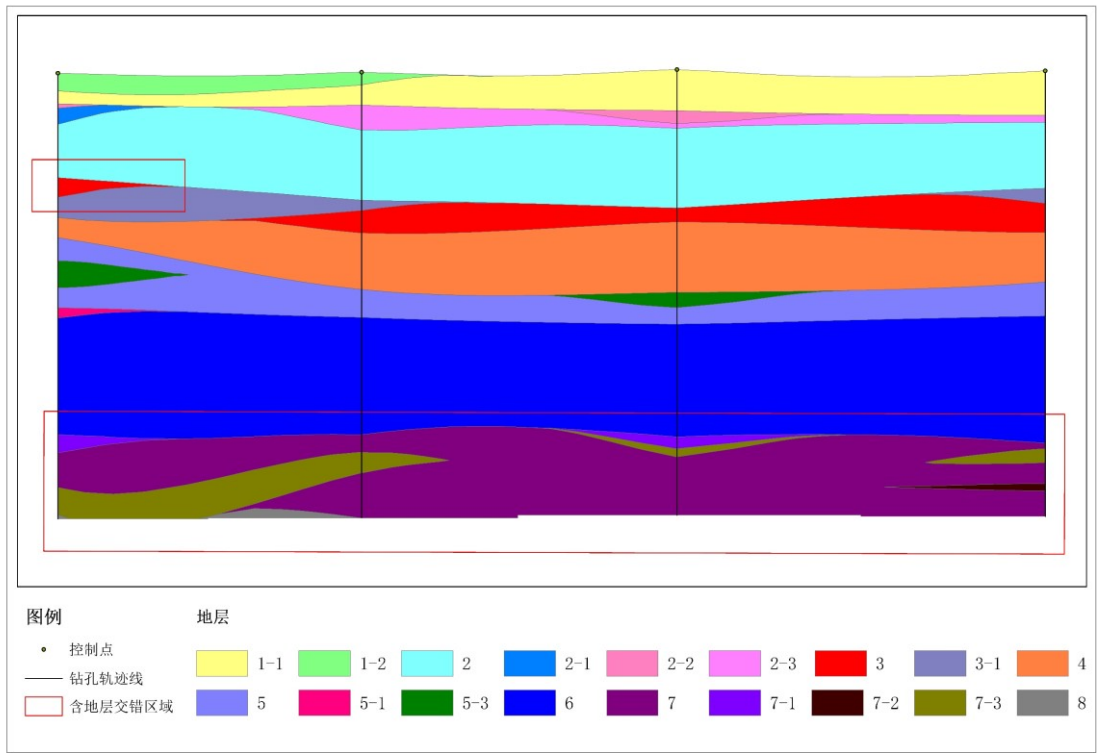


图 11 含地层交错的剖面图生成

Fig 11 Profile Generation with Stratigraphic Inversion

6 结论

本文开发了一种基于贯通地层思想的地层层序统一与自动剖面绘制算法，显著提升了地质模型的准确性和一致性。通过对透镜体的精确识别与分类，能够有效分类和聚合不同类型的透镜体，减少了透镜体对地层层序统一和连接的干扰，提升了整体地层层序统一的效果。同时，引入贯通地层，通过识别和统一编码贯通地层，实现了不同钻孔间公共地层的准确标记和连接，有效简化了复杂地层体系中的层序结构。此外，针对地层尖灭问题，解决方法考虑了地层厚度，使得地层连接更加流畅，符合自然地质规律。实验结果验证了算法在自动绘制剖面图方面的高鲁棒性和准确率，生成的剖面图线条光滑，处理特殊地层情况效果接近人工绘制，

显著降低了人工和时间成本，提升了工作效率，为工程地质勘察和地质建模提供了有效的技术支持。然而，该方法仍存在一些不足之处：

（1）本研究的剖面连层方法主要针对第四纪覆盖区进行了验证，对于第四纪下的基岩区域，地层特征更加复杂，算法的适用性和准确性尚需进一步验证和优化。

（2）本研究中涉及的钻孔数量较少，随着钻孔数据量的增加，现有算法在计算效率和大数据处理能力方面可能面临挑战。因此，未来需要进一步优化算法，以提升其在大规模钻孔数据下的处理效率和性能。

References

Caumon, G., Collon-Drouaillet, P., Le Carlier de-Veslud, C., et al., 2009. Surface-based 3D m-

- odeling of geological structures. *Math Geosci*, 41(8): 927-945
- Chen, J. H., Zhou, Z. D., Chen, G., et al., 2005. Automatic formation method of prospecting line profile map based on drill hole database. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, (3): 486-490
- Chen, X. F., Ma, G. X., Wang, M., et al., 2023. Construction of a 3D geological model based on the accurate division of stratigraphic boundaries. *China Earthquake Engineering Journal*, 45(4): 946-953
- Chen, Y. Y., Li, W. B., Wu, Q., et al., 2010. Automatic generation of complicated fault in geological section. *Coal Geology & Exploration*, 38(5): 7-12
- Chu, D., Fu, J., Wan, B., et al., 2024. A multi-view ensemble machine learning approach for 3D modeling using geological and geophysical data. *International Journal of Geographical Information Science*, 38, 2599-2626.
- Feng, B., Chen, M. T., Yue, D. D., et al., 2019. Comparison of 3D Geological Modeling Based on Two Different Interpolation Methods. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 49(4): 1200-1208
- Fu, J. M., Hu, M. S., Fang, F., et al., 2024. Complex Orebody 3D Modeling Using Radial Basis Function Surface Incorporating Stacking Integration Strategy. *Earth Science*, 49(3): 1165-1176
- Groshong, R., 2006. 3-D Structural Geology. Berlin, Heidelberg: *Springer Berlin Heidelberg*
- Hassanzadeh, A., Vázquez-Suñé, E., Corbella, M., et al., 2022. An automatic geological 3D cross-section generator: Geopropy, an open source library. *Environmental Modelling & Software*, 149: 105309
- Hua, W. H., Guo, D. Y., Liu, X. G., et al., 2023. Unified Correction and Connection Method of Stratigraphic Sequence with Complex Inversion. *Earth Science*, 48(4): 1532-1542
- Hua, W. H., Xiao, Y. N., Wang, Z. J., et al., 2022. Real-Time Generation Technology of Vector Geological Profile Based on 3D Geological Model. *Earth Science*, 47(11): 4256-4266
- Ichoku, C., Chorowicz, J., Parrot, J., 1994. Computerized construction of geological cross sections from digital maps. *Computers & Geosciences*, 20(9): 1321-1327
- Koltermann, C. E., Gorelick, S. M., 1996. Heterogeneity in sedimentary deposits: A review of structure - imitating, process - imitating, and descriptive approaches. *Water Resources Research*, 32(9): 2617-2658
- Li, X. J., He, Y. F., Wang, G. C., et al., 2017. Drill section algorithm based on auto-matching of stratigraphic distribution pattern. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 41(5): 939-945
- Li, Y. G., Qu, G. S., Chen, J. Q., 2005 Realization of a 3D subsurface geological modeling software in urban areas based on borehole data. *Geological Bulletin of China* (5): 470-475
- Wei, X., Yin, Z., Bonner, W., Caers, J. 2024. Knowledge-driven stochastic modeling of geological geometry features conditioned on drillholes and outcrop contacts. *Computers & Geosciences*, 105779.
- Wang, G. G., Yao, J., Wu, Y., et al., 2024. Characteristics and genesis of uranium mineralized lenses and its implications for deep-source uranium metallogenesis in Datian area of Panzhihua, Sichuan Province. *Geology in China*, 51(3): 912-931
- Wang, J. W., Guo, J. T., Zhang, R. B., 2012. An Automatic Generation and 2D/3D Visualization for Geological Sections with Strata Pinch - Out. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 28(3): 405-410
- Wang, L. F., Liu, X. L., Du, L. Z., 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
- Wu, X., Liu, G., Fan, W., et al., 2024. Cross-sections compilation-adjustment method based on 2D-3D linkage in regional three dimensional

- geological modeling. *Earth Science Informatics*, 17(2), 1067-1092.
- Wang, Y. M., Zhou, C. J., Yang, B., et al., 2022. Research on 3D Geological Structure Modeling of Quaternary Coverage Area in Northern Anhui. *South China Geology*, 38(2): 321-329
- Wellmann, J. F., Horowitz, F. G., Schill, E., et al., 2010. Towards incorporating uncertainty of structural data in 3D geological inversion. *Tectonophysics*, 490(3-4): 141-151
- You, J. J., Min, H. K., Wang, F. F., et al., 2024. Geological Modeling Interpolation Algorithm Considering Spatial Anisotropy of Strata. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 45(6): 107-113
- Zhao, L. D., Guo, R. T., 2011. Two Kinds of Sequence Hierarchy Classification Systems: A difficult Problem with Scientific Significance. *Northwestern Geology*, 44(2): 8-14
- Zhu, L. F., Pan, X., Wu, X. C., et al., 2008. Construction Method and Actualizing Techniques of 3D Visual Model for Geological Faults. *Journal of Software* (8): 2004-2017
- Zhu, Y., Liu, X. J., Chen, S. Z., 2008. Design and Implementation of an Automatic Geological Section Drawing System. *Yangtze River* (8): 72-74
- 中文参考文献**
- 陈建宏, 周智勇, 陈纲, 等, 2005. 基于钻孔数据的勘探线剖面图自动生成方法. 中南大学学报 (自然科学版) (3): 486-490
- 陈小芳, 马国玺, 王敏, 等, 2023. 基于精确划分地层边界的三维地质体模型构建. 地震工程学报, 45(4): 946-953
- 陈巍瑛, 李文斌, 武强, 等, 2010. 地质剖面图中复杂断层的自动生成方法. 煤田地质与勘探, 38(5): 7-12
- 冯波, 陈明涛, 岳冬冬, 等, 2019. 基于两种插值算法的三维地质建模对比. 吉林大学学报 (地球科学版), 49(4): 1200-1208
- 扶金铭, 胡茂胜, 方芳, 等, 2024. Stacking集成策略下的径向基函数曲面复杂矿体三维建模方法. 地球科学, 49(3): 1165-1176.
- 花卫华, 郭丹阳, 刘修国, 等, 2023. 含复杂倒转的地层层序统一修正与连接方法. 地球科学, 48(4): 1532-1542
- 花卫华, 肖旖旎, 王振娟, 等, 2022. 基于三维地质模型的矢量地质剖面图实时生成技术. 地球科学, 47(11): 4256-4266
- 李晓娟, 何育枫, 王桂春, 等, 2017. 地层分布模型自匹配的剖面图动态生成算法. 物探与化探, 41(5): 939-945
- 李亦纲, 曲国胜, 陈建强. 2005. 城市钻孔数据地下三维地质建模软件的实现. 地质通报(5): 470-475
- 王凤岗, 姚建, 吴玉, 等, 2024. 四川攀枝花大田地区铀矿化透镜地质体特征、成因及其对深源铀成矿的启示. 中国地质, 51(3): 912-931
- 王家伟, 郭甲腾, 张荣兵. 2012. 含尖灭地层的地质剖面图自动生成与 2D/3D绘制. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 28(3): 405-410
- 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
- 王义梅, 周春静, 杨波, 等, 2022. 皖北第四纪覆盖区三维地质结构建模研究. 华南地质, 38(2): 321-329
- 郁军建, 闵浩坤, 王斐斐, 等, 2024. 考虑地层空间各向异性的地质建模插值算法. 郑州大学学报 (工学版), 45(6): 107-113
- 赵亮东, 郭荣涛. 2011. 层序级别划分的两种途径: 具有重要科学意义的难题. 西北地质, 44(2): 8-14
- 朱良峰, 潘信, 吴信才, 等, 2008. 地质断层三维可视化模型的构建方法与实现技术. 软件学报 (8): 2004-2017
- 朱莹, 刘学军, 陈锁忠. 2008. 地质剖面自动绘制系统设计与实现. 人民长江(8): 72-74