

# 地质数据三维可视化的属性、分类和关键技术

吴冲龙<sup>1,2</sup>, 何珍文<sup>1</sup>, 翁正平<sup>1</sup>, 刘军旗<sup>2</sup>

WU Chong-long<sup>1,2</sup>, HE Zhen-wen<sup>1</sup>, WENG Zheng-ping<sup>1</sup>, LIU Jun-qi<sup>2</sup>

1. 中国地质大学(武汉)计算机学院, 湖北 武汉 430074; 2. 教育部三峡地质灾害研究中心, 湖北 武汉 430074

1. *School of Computer, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China;*

2. *Three Gorges Geological Hazard Research Center of Ministry of Education, Wuhan 430074, Hubei, China*

**摘要:**地质数据三维可视化具有显著的空间决策支持属性,其应用分类包括表达可视化、分析可视化、过程可视化、设计可视化和决策可视化。能否实现这两类“五个可视化”,是检验所有地质三维可视化软件的水平 and 质量的试金石。地质数据三维可视化技术在矿产资源勘查、工程地质勘查、矿山设计开发、水利水电工程设计、地质灾害勘查治理和国防工程建设领域,有着广泛的需求和应用前景。其发展趋势是实现地上、地下、地理、地质数据一体化三维可视化采集、存储、管理、处理和集成应用。复杂地质结构的表达和快速动态建模方法和技术,仍将是未来一段时间的研究重点,引进知识驱动和本体论思路、方法,可能是解决这些问题的有效途径。

**关键词:**数据三维可视化;三维地质建模;表达可视化;分析可视化;过程可视化;设计可视化;决策可视化

中图分类号:P628

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2011)05-0642-08

**Wu C L, Hen Z W, Weng Z P, Liu J Q. Property, classification and key technologies of three-dimensional geological data visualization. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(5):642-649**

**Abstract:** Three-dimensional geological data visualization, which application classification includes expression visualization, analysis visualization, procedure visualization, design visualization and decision visualization, has a prominent property of spatial decision support. The problem whether the geological visualization software can implement these five kinds of visualization or not constitutes the touchstone. The technologies for three-dimensional visualization of geological data have wide requirements and application prospects in many fields, such as mineral resources exploration, engineering geological investigation, mine design and development, water conservancy and hydroelectric engineering design, geological hazard survey and prevention and defense engineering construction. Its development tendency is to implement the three-dimensional integrated visualized collection, storage, management, handling and integrated application of geographical data and geological data at surface and in the depth. The expression of the complex geological structure and the rapid dynamic modeling method and technology will be the research focus for some time in the future. The introduction of knowledge driven thinking and ontology may be an effective and adequate solution of these problems.

**Key words:** three-dimensional data visualization; three-dimensional geological modeling; expression visualization; analysis visualization; procedure visualization; design visualization; decision visualization

地质数据三维可视化是地质三维建模的基础,是地质信息科技领域的重要研究方向。近年来随着地质矿产工作信息化的不断推进,地质三维建模技

术和地质数据三维可视化问题受到越来越多的重视。所谓地质三维建模,就是利用地质数据三维可视化技术进行地质体、地质现象和地质过程的三维数

收稿日期:2011-02-28;修订日期:2011-03-23

资助项目:国家“863”计划重点项目《三维空间数据管理与空间分析系统研发》(编号:2008AA121602)、国家“十一五”规划重大科技专项《油气成藏过程动态模拟软件与应用》(编号:2008ZX05051-04)和教育部高校博士点基金项目《地质空间定性推理与动态建模方法研究》(编号:20100145110009)

作者简介:吴冲龙(1945-),男,教授,博士生导师,从事矿产资源勘查和地质信息科技领域的科研与教学工作。E-mail:wucl@cug.edu.cn

字化抽象、重构和再现。实现地质数据的三维可视化的目的,是便于在更加真实、直观和形象的条件下进行现象分析、模型抽象、实体重构、科学计算、过程再现、知识发现、成果表达、评价决策和工程设计,也就是说不仅仅是为了好看,更主要的是为了好用。因此,地质数据的三维可视化具有科学研究、决策支持、辅助设计等多方面的属性。考虑到为空间决策支持服务是地质数据三维可视化的一个重要研究课题,本文拟从这个角度出发来展开讨论。

1 地质数据可视化的概念和属性

目前,人们普遍认可数据可视化的内涵是指“一种计算的方法……,一种将解译图像数据输入计算机并从复杂多维数据集生成图像的工具……”,其目标是“通过可视的方法提供新的洞察力以影响现有的科学方法”<sup>[1]</sup>。换言之,可视化是一个意识处理过程,其目的在于促使生成并获取对问题的观察描述和解决办法。该过程提供了静态图形显示和动画来进行数据的分析和判断<sup>[2]</sup>。由此而论,科学研究应当是数据可视化的第一属性。

地质数据三维可视化具有科学研究属性的原因还在于,地质现象和地质过程都不同程度地存在着结构信息不完全、关系信息不完全、参数信息不完全和演化信息不完全的情况<sup>[3]</sup>。通常,在地质现象、地质过程分析,地质矿产资源评价和开发利用决策时,对于大量的不确定因素,要依靠技术人员或者领导者本身进行定性理解、定量估算和关系描述,并结合时空数据模型和时空分析模型来进行分析、预测、评估和辅助决策<sup>[4]</sup>。从数学逻辑的角度看,这是一种半结构化或不良结构化甚至非结构化问题。经验表明,数据可视化是描述、表达和理解各种半结构化甚至非结构化问题的关系和模型的最佳方法和手段。这也正是地矿研究与勘查成果总是用图件形式来表达的原因。面对多维的地质时空信息,仅仅有二维图件是不够的,需要实现三维建模与分析。

基于数据可视化的科学研究属性,其概念的外延大致包括科学计算可视化(Visualization in Scientific Computing)、可视化分析(Visual Analysis)、可视化表达(Visual Representation)、可视化显示(Visual Display)等几个组成部分。其中,科学计算可视化是指通过计算机工具、技术和系统,把实验或计算所获得的大量抽象数据转换为人的视觉可以直接感受的图形

图像,以便进行数据探索和分析<sup>[5-9]</sup>。而可视化分析是指以可视化手段为一种直接的方法来帮助提高观察力和进行概念的精练;可视化表达是指对意识印象的图像描述和(或者)以任意可视介质形式存在的数据;可视化显示则是指短暂的和容易修改的可视化表达<sup>[7]</sup>,如在屏幕和显示器上的图形放大、缩小、漫游、闪烁、旋转、拖动等。

可视化思维是个人通过探索数据的内在关系来揭示新问题、形成新观点,进而产生新的综合、找到新的答案并加以确认;而可视化交流是向公众表达已经形成的结论和观点<sup>[8]</sup>。可视化思维和可视化交流代表着信息处理的不同阶段半程(图 1)。虽然这 2 个阶段所面对的群体不同,处理方式不同,处理、输出的对象和内容也不同,但相互间存在着源和流的密切联系。

如前所述,地质数据可视化的第二个属性是空间决策支持。之所以如此,是因为地质调查、工程勘查、矿产资源勘探的数据处理和应用,最终要提交区域地质结构及其演化、工程地质条件和矿产资源可利用性评价成果,为资源的开发利用和重大工程建设提供多方案比较、选优的决策支持,而地质与资源信息普遍具有空间信息特征<sup>[4]</sup>,其决策支持属于空间决策支持范畴。空间决策支持可视化同样涉及可视化计算、可视化分析、可视化表达、可视化显示等几个部分。由于空间决策支持在国土资源、能源勘查、开发、管理,环境保护和地质灾害防治领域具有显著的地位,空间决策支持可视化自然也就成为地质数据三维可视化的第二个重要属性。这就是说,如何更好地为空间决策支持服务,应当是地质数据三维可视化研究必须面对的问题。

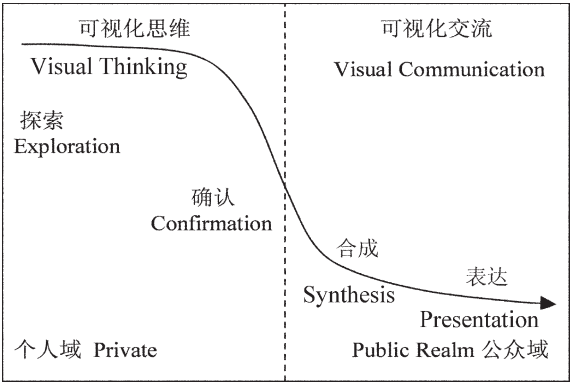


图 1 可视化过程的概念模型<sup>[8]</sup>

Fig. 1 Concept model of visual process

限于篇幅,地质数据可视化的工程设计属性拟另文讨论,不在此赘述。

## 2 空间决策支持的认知过程及其可视化

为了说明这个问题,有必要从 GIS 决策支持可视化研究谈起。李峻<sup>[9]</sup>曾经从空间决策支持认知过程出发,系统地研究了如何在一个完整的空间认知过程中交互、动态地获取并传递知识的问题。一般地说,空间决策支持认知过程可表达为<sup>[10]</sup>:数据(data)→信息(information)→知识(knowledge)→智力(intelligence)。在这个过程中,确定数据(data)的形态、结构、关联和一致性的操作将数据转变为信息(information),对信息的科学归纳和对因果关系的探求将信息转变为知识(knowledge),而当把知识应用于新的思想并对时空关系和未来发展趋势进行有目的的考察时,知识就转变成了智力(intelligence)。这个从知识到智力的认知过程,实际上与可视化工具概念模型中的认知过程是对应一致的,可以用一个基于决策支持的认知过程的可视化工作流程图来表示<sup>[9]</sup>(图 2)。

在空间决策支持的认知过程中,不仅要求实现空间数据和分析结果的可视化,还要求实现分析规则、分析过程和决策过程的可视化。这种具有认知、分析作用并能完整地面向分析过程和结果的可视化,称为探索可视化(Exploratory Visualization)或分析可视化(Analytical Visualization)。采用可视化的手段来进行数据探索,完成对半结构化或不良结构化问题的关系描述、信息提取、知识合成和智力表达,能够直观而形象地获得针对目标问题的对象认知和解决办法,进而显著地提高空间决策支持的有效性,是空间信息科技的重要发展方向。

随着空间信息技术和空间决策支持的兴起, GIS 研究的重点从空间数据管理逐渐向空间数据分析方向转变,常规的空间量算、信息分类、叠加分析、网络分析、缓冲分析、空间变换和内插、空间统计分析等空间分析方法,已经不能满足决策支持数据的精加工要求,而常规的多维、多源数据及其分析结果显示技术,也不能满足空间决策支持认知过程的可

视化需求。人们已经普遍意识到,对复杂空间决策支持问题的解决不是由单一结构化的空间分析或可视化显示独立完成的,而是由多个可视化显示和空间分析模块相互交融,在思维与分析层次上对空间知识进行挖掘、传输与交流的复合过程来完成的。为此,可视化的研究逐步从主要围绕结果的表达与显示、偏重于技术层次的状况,向思维与分析层次发展,即向多维动态、交互分析、数据挖掘、信息提取、信息传输、知识发现和智力表达的方向发展,并且聚焦于探索可视化分析(Exploratory Visual Analysis)。空间决策支持认知过程可视化技术随之从空间探索、确认、合成、表达这一过程的两端向中间靠拢,力求实现可视化思维和可视化交流的相互交融,形成一个兼有二者特点的工具<sup>[9]</sup>。

GIS 领域的可视化技术研究进展对于地质空间决策支持认知过程可视化而言,有重要的借鉴作用。这种高级可视化将有效地提高对这种不良结构化或半结构化问题的感知力、洞察力、分析力和描述力,地质信息科技正是在借鉴地理信息科技成果的基础上取得进展的<sup>[11-12]</sup>。经过地质信息科技领域广大研究者的共同努力,地质矿产信息系统的可视化技术不仅具备了信息和知识的交流传递作用,还具有很强的动态和交互特性,用户可根据需要自行定制待浏览对象、可视方法和显示形式,并可对整个过程修改编辑,多角度地观察复杂空间对象及其空间关系,直至获得对科学决策的合理支持。简言之,当前空间决策支持认知过程的可视化思维(Visual Thinking)的交互性和可视化交流(Visual Communication)的公众性,已能较好地满足地质矿产勘查开发和工程建设领域空间决策支持的交互、反复和共享的操作要求。

## 3 空间决策支持认知过程可视化的分类

由于地质工作性质的特殊性,地质信息系统可视化的内容更为丰富,而形式也更为复杂。一般地说,在地理科技领域,人们主要关心诸如地形地貌、地物景观等表面现象;而在地质科技领域,人们最关心的是地下地质结构和成分的空间分布。因此,在地

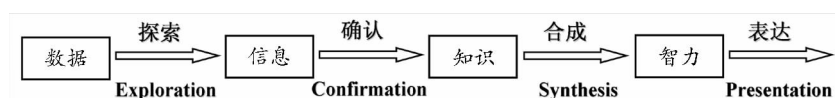


图 2 基于决策支持认知过程的可视化工作流程<sup>[9]</sup>

Fig. 2 Visualization workflow based on the cognitive process of decision support-making



理信息科技领域,人们多关注“面三维”可视化技术的开发和应用;而在地质信息科技领域,人们多关注“体三维”可视化技术的开发和应用。从应用的角度看,地质空间决策支持认知过程可视化可分为表达可视化、分析可视化、过程可视化、设计可视化和决策可视化5类。

表达可视化泛指原始数据和计算成果以图形或图像的形式在屏幕或其它介质上的显示。其内容从图形图像的角度看,大致包括原始数据的符号化显示,一般科学计算结果的饼图、直方图、曲线图、等值线图和曲面图显示、放大、缩小、漫游、闪烁、拖动等,专业分析处理结果的柱状图、剖面图、平面图、三维地形图、三维地质图和表格、文字、数字的显示、放大、缩小、漫游、闪烁、拖动等。从地质科学的角度看,则包括地下复杂结构表达可视化和成分表达可视化2类。表达可视化是空间决策支持认知过程可视化的基础,贯穿于其它各类可视化之中。

分析可视化泛指在可视化环境中进行的各种地质空间决策分析。其内容大致包括各种地质专业的二维或三维空间统计分析、多重分形分析、叠加分析、网络分析、缓冲分析、几何量算、矢量剪切分析等。分析可视化是空间决策支持认知过程可视化的核心,其实现需要通过表达可视化来完成。之所以将其单独分出来,主要是强调地质空间问题分析过程的可视化及其分析过程的沉浸感(Impressive)、动态性(Dynamic)和人机交互(Interactive)特征。

过程可视化是指在体三维环境中开展各种可视化的地质过程动态模拟,例如造山作用动态模拟的可视化、构造变形作用动态模拟的可视化、沉积作用动态模拟的可视化、岩浆(侵入和火山)作用动态模拟的可视化、油气成藏作用动态模拟的可视化、金属矿产形成动态模拟的可视化、各类地质灾害形成作用动态模拟的可视化,以及所有这些地质作用的可视化虚拟仿真(虚拟现实)等。过程可视化同样需要通过表达可视化来实现,单独分为一类是因为计算机动态模拟是研究和认识地质过程的重要途径和方式,同时强调其自然过程的可视化重建和再现。

设计可视化是指在体三维可视化环境中进行各种地质工程设计,主要包括钻孔(井)设计可视化、矿山地下井巷设计可视化、地质灾害治理工程设计可视化、引水工程设计可视化、水电工程设计可视化、铁路公路隧道设计可视化、地下铁路设计可视化、地

下洞室工程设计可视化等。同样,设计可视化也要通过表达可视化这一途径来实现。单独分为一类也是因为地质工程设计本身的重要性,以及地质工程设计工作对可视化的需求最为强烈。地质工程设计历来是采用二维可视化方式进行的(即2D CAD),向三维可视化方式(即3D CAD)发展是必然的趋势。

决策可视化是指在体三维可视化环境中进行矿产资源潜力或工程地质条件评价,进行各类矿产资源开发和地质工程设计的多方案比较择优决策,也包括地质灾害预警、防治、应急预案制定、决策可视化和抗灾救灾的现场应急指挥等。在三维可视化条件下,领导者或决策者可以直观、形象地了解专家的决策认知过程、依据和成果,如同身临其境地考察各个决策方案的合理性,进而做出自己的判断和决策,甚而实施应急指挥。在实现了空间决策认知过程各环节可视化的基础上,有必要进一步实现决策可视化。特别是当地质结构和成分复杂而决策者和指挥者又非专业人员出身时,这种空间决策可视化就显得更为必要。

目前,上述各种面向过程、具有空间认知能力的可视化技术,在国内已经成功地应用于区域地质调查、城市地质调查、工程地质勘查设计、矿产和水文地质勘查、矿山和油田资源开发、矿权管理、储量核算、水利水电工程和地质灾害勘查治理等专业领域的决策支持中<sup>[13-26]</sup>,有力地提高了地矿资源的分析、评价、管理和辅助决策水平。地矿勘查和管理人员可以根据实际需要,利用三维可视化技术对指定范围内的地质体和资源量进行统计分析,可以对地质体进行任意方向的矢量化剪切和截取任意形态的剖面图、切面图、栅状图,并且可以在感兴趣的区域内任意地进行刻槽、挖坑和穿洞分析(图3)。利用三维动态显示技术和虚拟现实(Virtual Reality)技术提供的具有沉浸感(Impressive)、动态(Dynamic)、交互(Interactive)的环境和工具,还可以开展盆地和造山带地质过程分析、工程地质条件和矿产资源可利用性评价,开展盆地构造演化过程、层序地层生成过程、造山带构造演化过程、油气生排运聚过程和地质灾害发生、发展、应急过程的三维动态模拟和仿真,并且从任意角度以不同分辨率来浏览模拟和仿真结果(图3)。

总之,可视化已经成为目前地质现象和地质过程时空分析、地质矿产资源评价与空间决策支持所

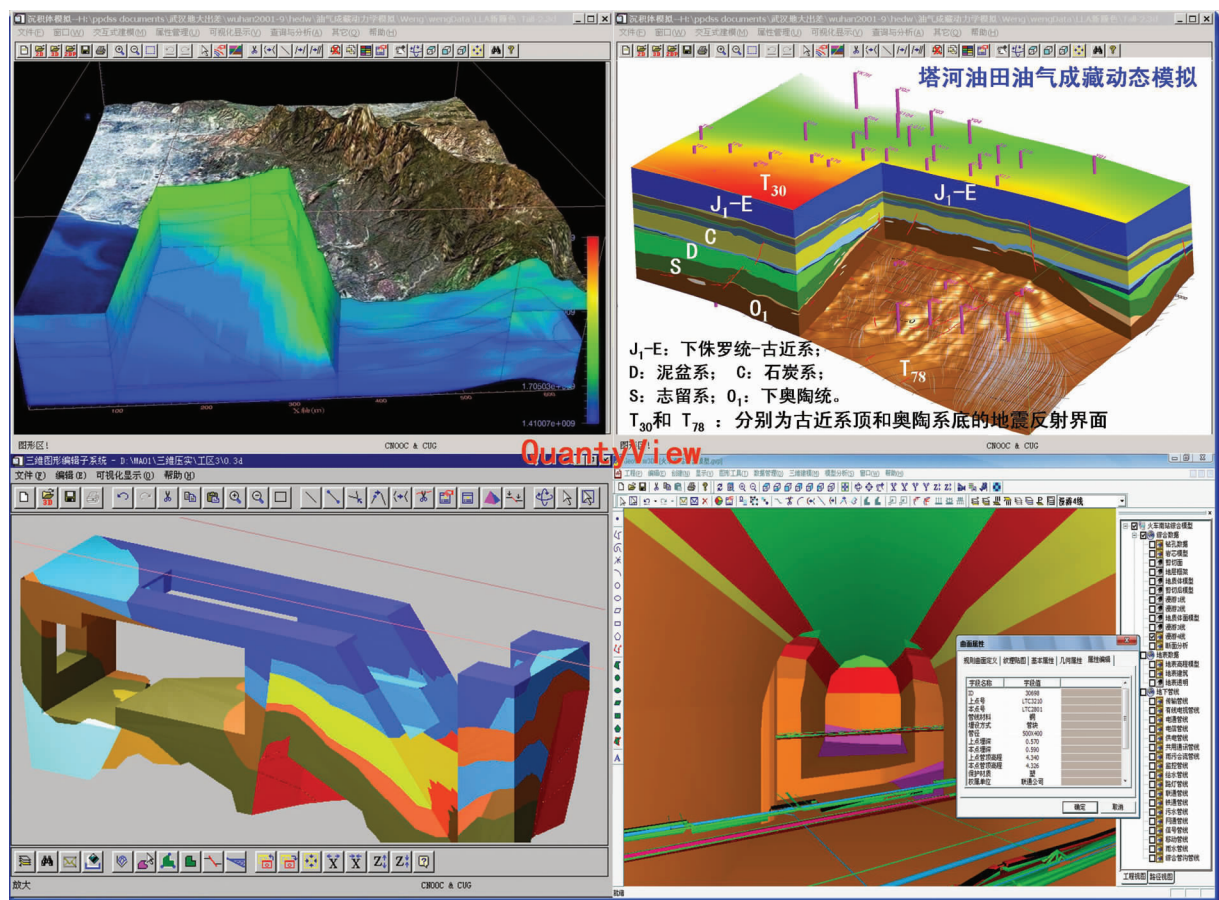


图 3 地质三维可视化建模与切割分析实例

Fig. 3 Cases of three-dimensional visualization and cutting analysis of the geological body

不可或缺的技术和手段。鉴于上述“5 个可视化”在地质空间决策支持认知过程方面具有重要意义,以及其实现具有较高的技术难度,能否真实而又完全地实现“5 个可视化”,已经成为检验所有三维可视化地矿信息系统软件的水平和质量试金石。

4 地质数据可视化的关键技术

三维地质建模与分析技术是实现地质数据可视化的基础,其中包括合理的基础三维数据结构、海量三维数据体的存储和快速调度、三维地质体的数字化的快速建模技术、三维数字地质体的局部快速动态更新技术、三维数字地质体的快速自由矢量剪切技术、三维数字地质体的多样化空间分析技术和三维数字地质体的快速动态建模技术。三维地质建模与分析技术是实现上述“5 个可视化”的基本保证,也是目前地质数据可视化领域的关键技术和研究热

点之所在。

4.1 合理的基础三维数据结构

合理而有效的基础三维数据结构是实现地质体、地质现象和地质过程的“5 个可视化”的核心问题<sup>[12]</sup>。目前在地质空间采用的三维数据结构模型一般分为几何对象模型、属性对象模型和拓扑关系模型<sup>[27]</sup>。这 3 个模型分属 3 个不同的层次和方面:几何模型用于描述地质体的形态和空间展布;属性模型用于存储管理地质实体的定性或定量的描述信息;拓扑关系模型则主要用于描述 2 个和 2 个以上地质实体之间的相互拓扑关系,以及单个复杂地质实体内部的各个子实体之间的拓扑关系。属性模型和几何模型之间是可以相互转换的。当对属性模型进行可视化时,其实质就是属性模型向几何模型的转换;当对几何模型进行查询统计时,其实质就是几何模型向属性模型的转换。地质体本身是一个整体,其描



述模型的划分只是人为的结果,这种划分在很大程度上限制了三维地质体模型的动态重构与局部快速更新。能否用一个统一的数据结构模型来表达和管理真实的三维地质体数据,是需要进一步解决的重大关键技术问题之一。近年来,国内许多研究者<sup>[18,27-37]</sup>都曾经对地质体的三维数据结构模型做过一些深入的探讨。

#### 4.2 海量三维数据体的存储和快速调度

海量三维地质体数据的存储和快速调度是实现地质体、地质现象和地质过程的“5 个可视化”的基础。为了实现分析、设计和决策可视化,地质信息系统必须能展现和管理非均质和非参数化的实体,单个地质体的几何数据量往往是地表普通建筑物的几何数据量的几十倍乃至几十万倍;外加上相关的属性数据和拓扑关系数据,对于大范围的海量三维地质体数据,其数据量已远远超出现有常规 GIS 的三维空间数据管理和处理能力。多线程动态调度方法、自适应的三维空间数据多级缓存方法、基于可视化计算与调度任务关联信息的预调度机制,以及多级三维空间索引技术的提出<sup>[38]</sup>,可能能够推进海量三维地质体数据有效存储和管理问题的解决。

#### 4.3 三维地质体的数字化的快速建模技术

三维地质体的数字化的快速建模技术是三维地质信息系统大规模推广使用的前提条件。三维地质体的建模速度决定了三维地质信息系统的实用性能。最理想的情况是软件系统能够实现足够复杂地质体和地质过程的全自动建模,但迄今为止并未完全实现。为了提高三维地质信息系统的实用性,必须对三维地质体的快速建模方法进行研究,主要包括研究如何提供方便快捷的交互建模工具、研究限定条件下三维地质体模型的自动或半自动建模问题等关键技术问题。

#### 4.4 三维数字地质体的局部快速动态更新技术

三维数字地质体的局部快速动态更新技术,是目前地质空间建模研究热点与难点问题之一。地质空间建模按照技术层次分为 5 个阶段,即模型可视化阶段、模型度量阶段、模型分析阶段、模型更新阶段和时态建模阶段。前 3 个阶段属于静态建模,后 2 个阶段属于动态建模阶段。三维静态建模方法与动态建模方法的本质区别在于建立的三维地质模型是否可以进行模型的快速更新与重构,地质体、地质现象和地质过程的勘探研究都是一个渐进的过程,这

就要求三维地质体模型的建模也是一个增量建模的完善过程,能实现三维地质模型的局部快速动态更新。基于钻孔的连续地层序列匹配、基于非共面剖面拓扑推理和基于凸包剪切、限定散点集剖分的动态重构算法<sup>[39]</sup>是该领域近期的新研究成果。该方法对于研究区域地质背景有假定前提,还不能适应任意复杂的地质环境。显然,要妥善地解决这个问题,还需要进一步加强对三维数据结构及其相关三维实体重构方法等关键技术的研究和开发。

#### 4.5 三维数字地质体的快速矢量剪切技术

在建立了三维数字地质体模型的基础上,可进行各种挖刻和剪切分析,进而可统计开挖量或分析地质结构,为地质条件研究、地下工程建设、采矿生产安排提供分析、设计工具。根据所采用的空间数据模型,矢量剪切分析有体剪切技术、空间分区二叉树技术、面剪切技术等<sup>[40-41]</sup>。它包括规则的空间线、面、体等之间的矢量剪切,也包括不规则的空间线、面、体等之间的矢量剪切。例如,复杂的地表面与工程实体之间的矢量剪切分析复杂的地质体与工程实体之间的矢量剪切分析。对于具有三维复杂结构的大规模数字地质体矢量剪切分析,可采用三维空间索引、多级缓存技术和基于 BSP 的快速面片裁剪算法,对三维索引边界进行并行快速布尔运算判定,再通过后台裁剪运算快速重构裁剪后的三维空间实体关系,并提高其准确性、可靠性和效率。

#### 4.6 三维数字地质体的多样化空间分析技术

基于三维数字地质体的真三维空间分析功能,既是地质数据三维可视化软件区别于二维软件和计算机图形学的主要特征之一,也是评价一个三维地质矿产信息系统功能的主要指标之一。三维空间分析涉及到大量空间数据的运算和复杂空间关系的判断,如何保证针对异构的三维数字地质体空间分析的准确性、效率和可靠性,适应地矿勘查工作的多主题要求,是地质信息技术的共性难点问题。目前,建立有效的、多样的空间分析方法模型,为地质矿产信息系统提供更多更强大的功能,已成为当前地质信息科学领域研究和应用中十分重要的任务。三维数字地质体的空间分析技术通过分析三维地质矿产信息系统空间分析的基本内容,抽象出三维空间分析的原型分析算法,如三维相交检测、布尔运算、点集区域查询等,具有普适性、多样化特征。它既包括通用的三维空间分析技术,如叠置分析、缓冲区分析、

三维网络分析、三维查询与度量分析、三维表面分析、三维几何分析、统计分析等;在此基础上,又针对地质矿产信息工作典型的领域应用,开展诸如地质体剖面分析、刻槽挖洞分析、栅栏图分析、管线分析、流域分析、水淹分析、地下工程模拟开挖分析、矿产储量分析、构造体平衡分析、地层沉降正反演分析等。利用面向地质矿产信息的多样化的三维数字地质体空间分析功能,可以分析地质体内部的特征和属性,为了解和掌握地质体的组成、结构、稳定性、活动规律和运动机制提供途径。

#### 4.7 三维数字地质体的快速动态建模技术

基于剖面资料建立的三维数字地质体模型不能动态重建的问题,长期以来一直困扰着该领域的专家学者。从 20 世纪 90 年代末期开始,人们已经能够通过单纯的剖分算法来实现简单空间实体或者规则空间实体模型的动态构模,但复杂地质体模型是通过大量的人工交互作业建立的,其中包含过多地质知识和人工智能推理过程,单纯的剖分算法难以实现其动态重建。

人们对三维地质体动态建模方法的研究,经历了从纯粹的空间构模数据结构与算法研究转变为建模过程中的地质知识表达、推理与应用研究的过程。人们先后提出了基于表面模型(subsurface model)的时空约束规则及其诊断问题,探讨了空间与时态推理在地质建模中的应用可能<sup>[42]</sup>;基于地质语法(geological syntax)的概念,对地质一致性(geological consistency)问题进行了探讨<sup>[43]</sup>;讨论了地质解释过程中的人工智能推理算法<sup>[44]</sup>;提出了不确定性下的地质推理分析,并将其应用于地下水体重构研究<sup>[45]</sup>;研究了基于用例推理的地质构造建模方法<sup>[46]</sup>和基于 SEM(Shared Earth Model)<sup>[47]</sup>、面模型的油气盆地模型知识驱动重建方法<sup>[48]</sup>。

显然,这些研究成果为基于剖面的地质体动态建模的实现提供了新的思路和途径,在一定程度上推进了空间推理在地质体动态建模中的应用研究。

目前,在三维地质建模方面已经出现了一些比较完善的三维地质建模软件,国外的如 GOCAD、MVS、MicroStation、Surpac 等,国内的如 QuantityView(原名 GeoView)、GeoMo 3D、Titan 3DM 等。这些软件都提供了通过钻孔(井)、剖面、平面资料进行三维地质建模和分析的工具。这些软件实现了多种数据三维综合建模、显示和分析,但目前的建模方

式仍然是静态交互的。

## 5 结论与展望

地质空间决策是各级政府和勘探、矿业、油气田等管理机构领导的重要工作内容,为决策提供技术支持是地质数据三维可视化的重要服务领域。

实现地质数据三维可视化,不是为了好看而是为了好用。一个优秀的地质数据三维可视化软件,应当能够实现“表达可视化、分析可视化、过程可视化、设计可视化和决策可视化”5 个方面的功能。此外,还需要具备真三维图形数据和属性数据一体化管理和编辑功能,所生成的三维数字地质结构和数字地质体可以支持空间数据和属性数据的双重可视化查询;要支持采用钻孔、平硐、槽探、竖井、勘探剖面图、构造平面图等进行三维地质结构和地质体混合建模,还要提供各种专业化工具,支持 DLL 库、控件、组件等多种二次开发方式。地质数据三维可视化技术的发展十分迅速,其未来趋势是实现地上、地下、地理、地质数据一体化三维可视化采集、存储、管理、处理和集成应用,以及地质建模和数据更新的快速化、高效化、动态化。复杂地质结构的表达和快速动态建模方法和技术,仍将是未来一段时间的研究重点,知识驱动、数据挖掘、本体论思路、方法的引进和应用,可能是解决这些问题的有效途径。

## 参考文献

- [1]McCormick B H. Visualization in Scientific Computing[R]. National Science Foundation (NSF) Workshop Report, 1987.
- [2]Wood M, Brodli K. Visc and GIS: Some fundamental considerations [C]//John Wiley and Sons. Visualization in Geographical Information Systems. 1994: 3.
- [3]吴冲龙,张洪年,周江羽.盆地模拟的系统观与方法论[J].地球科学——中国地质大学学报, 1993, 18(6): 741-7473.
- [4]李裕伟. 空间信息技术的发展及其在地球科学中的应用[J]. 地学前缘, 1998, 5(1/2): 335-341.
- [5]McCormick B H, Defanti M D, Brown M D. Visualization in scientific computing[J]. Computer Graphics, 1987, 21(6): 103-111.
- [6]唐卫清,李慎权,余盛明,等. 科学计算可视化[J]. 软件世界, 1995, (5): 74-77.
- [7]Visvalingam M. Visualization, in GIS, Cartography, and VISC [C]//John Wiley and Sons. Visualization in Geographical Information Systems. 1994: 18-25.
- [8]Dibiase D, MacEachren A M, Krygier J B, et al. Animation and the role of map design in scientific visualization[J]. Geography and Geographic Information System, 1990, 19(4): 201-214.

- [9]李峻. GIS决策支持可视化的研究[D]. 武汉大学博士学位论文, 2001.
- [10]Britton H, Batty M. Locational models, geographic information and planning support system[J]. Journal of Planning Education and Research, 1993, 12(3):184-198.
- [11]吴冲龙. 计算机技术与地矿工作信息化[J]. 地学前缘, 1998, 5(2): 343-355.
- [12]吴冲龙, 刘刚, 田宜平, 等. 论地质信息科学[J]. 地质科技情报, 2005, 24(3): 1-8.
- [13]吴冲龙, 毛小平, 王燮培, 等. 三维油气成藏动力学建模与软件开发[J]. 石油实验地质, 2001, 23(1): 301-311.
- [14]吴冲龙, 牛瑞卿, 刘刚, 等. 城市地质信息系统建设的目标与解决方案[J]. 地质科技情报, 2003, 22(3): 67-72.
- [15]吴冲龙, 毛小平, 田宜平, 等. 盆地三维数字构造-地层格架模拟技术[J]. 地质科技情报, 2006, 25(4): 1-8.
- [16]吴冲龙, 谭照华, 李伟忠, 等. 三峡库区地质灾害勘察点源信息系统的研发[J]. 水文地质工程地质, 2006, (2): 123-128.
- [17]毛小平. 盆地构造三维动态演化模拟系统研制[D]. 中国地质大学博士学位论文, 2000.
- [18]田宜平. 盆地三维数字地层格架的建立与研究[D]. 中国地质大学博士学位论文, 2001.
- [19]吴立新, 殷作如, 钟亚平. 再论数字矿山: 特征、框架与关键技术[J]. 煤炭学报, 2003, 28(1): 1-7.
- [20]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), 2004, 34(1): 54-60.
- [21]李绍虎. 临清坳陷东部油气成藏动力学模拟——三维地质建模研究与应用 [D]. 中国地质大学博士学位论文, 2006.
- [22]刘志锋, 吴冲龙, 张志庭, 等. 三维地质体建模技术在紫金山金矿的应用[J]. 采矿技术, 2007, 7(2): 53-54.
- [23]刘军旗. 水利水电工程地质三维信息系统研究与应用 [D]. 中国地质大学博士学位论文, 2007.
- [24]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.
- [25]Gang Liu, Chonglong Wu, Yiping Tian, et al. Design and Integrated Application of Geological Hazard Information 3D Visualization and Analysis System in Three Gorges Reservoir Area[C]//Proceedings of 2nd Conference on Environmental Science and Information Application Technology. 2010, 1: 391-395.
- [26]张夏林, 吴冲龙, 翁正平, 等. 数字矿山软件(QuantyMine)若干关键技术的研发和应用[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2010, 35(2): 303-310.
- [27]张志庭. 盆地断块构造三维建模与过程可视化技术研究[D]. 中国地质大学博士学位论文, 2010.
- [28]何珍文. 地质空间三维动态建模关键技术研究[D]. 华中科技大学博士学位论文, 2008.
- [29]毛小平, 黄延祐, 吴冲龙. 体元结构模型在三维地震模型正演模拟研究中的应用[J]. 地球物理学报, 1998, 41(6): 833-840.
- [30]王笑海. 基于三维拓扑网格结构的 GIS 地层模型研究[D]. 中国科学院武汉岩土力学研究所博士学位论文, 1999.
- [31]齐安文, 吴立新, 李冰, 等. 一种新的三维地学空间构模方法——类三棱柱法[J]. 煤炭学报, 2002, 27(2): 158-163.
- [32]侯恩科, 吴立新. 面向地质建模的三维拓扑数据模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2002, 27(5): 467-472.
- [33]李建华, 边馥苓. 工程地质三维空间建模技术及其应用研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2003, 28(1): 25-30.
- [34]吴立新, 史文中, Christopher G M. 3D GIS 与 3D GMS 中的空间构模技术[J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(1): 5-11.
- [35]吴立新, 史文中. 论三维地学空间构模[J]. 地理与地理信息科学, 2005, (1): 1-4.
- [36]程军林. 地质三维数据结构的数学模型及其算法研究[D]. 中国地质大学博士学位论文, 2006.
- [37]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.
- [38]屈红刚, 潘懋, 王勇, 等. 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), 2006, 42(6): 717-723.
- [39]孙卡. 海量地质空间数据的动态调度技术研究[D]. 中国地质大学博士学位论文, 2010.
- [40]Zhenwen He, Wu Chonglong, Gang Liu. Three-dimensional Reconstruction of Geological Solid Based on Topology Reasoning[J]. Geo-Spatial Information Science, 2008, 11(3): 201-208.
- [41]田宜平, 刘海滨, 刘刚, 等. 盆地三维构造——地层格架的矢量剪切原理及方法[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2000, 25(3): 306-309.
- [42]杨成杰, 吴冲龙, 翁正平, 等. 矢量剪切技术在地质三维建模中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35(4): 419-422.
- [43]Chiaruttini C, Roberto V, Buso M. Spatial and temporal reasoning techniques in geological modeling[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 1998, 23(3): 261-266.
- [44]Perrin M. Geological consistency: an opportunity for safe surface assembly and quick model exploration[J]. 3D Modeling of Natural Objects, A Challenge for the 2000's, 1998, 3(6): 4-5.
- [45]Roberto V, Chiaruttini C. Modeling and reasoning techniques in geologic interpretation [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans. 1999, 29(5): 460-473.
- [46]Schoniger M, Dietrich J, Hattermann F. Geological reconstruction using conditional stochastic simulation for uncertainty analyses of water resources management[J]. IAHS-AISH Publication, 2002, 273: 163-168.
- [47]Minor M, Koppen S. Design of geologic structure models with case based reasoning[J]. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 2005, 3698(9): 79-91.
- [48]Perrin M, Beiting Z, Rainaud J, et al. Knowledge-driven applications for geological modeling[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2005, 47(1/2): 89-104.