

文章编号: 1000-7598 (2012) 08-2500-07

工程地质空间多场耦合构模技术研究

朱良峰^{1,2}, 李明江¹, 孙建中¹

(1. 华东师范大学 地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200062; 2. 华东师范大学 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200062)

摘 要: 现有的三维地质模拟技术没有考虑地质空间几何结构场与属性参数场之间的耦合关系, 从而限制了计算机模拟结果的真实性和实用性。工程地质空间多场耦合构模问题已成为制约三维地质模拟技术深入发展应用的瓶颈。在综合国内外研究现状与发展趋势的基础上, 提出了工程地质空间多场耦合构模的总体研究框架和基本工作流程, 给出了研究过程中所遇到的主要科学问题的解决思路或实现方案, 并通过实例说明地质体多场耦合模型在三维地质建模及可视化系统中初步实现后的效果。这些研究成果为建立一套完整的地质体多场耦合构模理论体系和方法体系奠定了基础, 有助于推动工程地质数字化建模分析技术的深入应用。

关 键 词: 三维地质模拟; 工程地质场; 地质结构模型; 地质属性模型; 耦合构模

中图分类号: P 642; TU 17

文献标识码: A

Multifield coupled modeling techniques in engineering geological space

ZHU Liang-feng^{1,2}, LI Ming-jiang¹, SUN Jian-zhong¹

(1. Key Laboratory of GIS of Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

2. Shanghai Key Lab for Urban Ecological Processes and Eco-Restoration, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: The coupling relationship between structure field and property parameters field in geological space is not considered in current technology of 3D geological modeling, and this situation limits the reliability and the practicality of the computer modeling. Multifield coupled modeling in engineering geological space has become a bottleneck that restricts the development and application of 3D geological modeling. Based on the review of the present situation and development trends in 3D geological modeling, the general research framework and the primary working procedure for multifield coupled modeling in engineering geological space are introduced; and solving means of related scientific problems on multifield coupled modeling are given. The visualization effect of the multifield coupled model is realized inside the 3D geological modeling and visualization system; and the practical effect of those methods is shown in a case study. This research lays a foundation to build the theory and method system for multifield coupled modeling of geological bodies; and also is helpful to promote the deepening application of digital modeling and analytic techniques for engineering geology.

Key words: 3D geological modeling; engineering geological field; geological structure model; geological property model; coupled modeling

1 引 言

在大型建设工程项目的勘察、规划、设计、施工阶段, 都需要尽可能多地掌握地下工程地质环境的准确信息, 尽量精确地刻画工程地质体的几何结构特征以及地质体内部属性参数(包括物理、化学、水文地质、工程地质等属性特征)的变化规律^[1-4]。传统地使用二维纸质地图和数字化 CAD 图件来表

达工程地质信息的方式已很难满足实际应用的要求^[5], 需要综合应用 GIS、空间数据库、三维可视化和计算机图形图像等技术进行工程地质体的三维建模及可视化分析, 以直观、形象的三维可视化图形图像形式表达工程地质空间中构造单元的时空展布特征及其内部属性参数的时空分布规律, 实现工程地质信息从二维表达形式向三维甚至四维表达形式的升华, 将以往仅仅蕴涵于地质工作者脑海中的

收稿日期: 2011-03-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 40902093); 国家科技专项(No. SinoProbe-08); 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室开放基金(No. SHUES2011A06)。

第一作者简介: 朱良峰, 男, 1978 年生, 博士, 副教授, 主要从事三维 GIS 与地学空间信息建模方面的研究工作。E-mail: zhuliangfeng@163.com

工程地质体直观形象地展现在地质工作者、规划设计师、岩土工程师乃至非地质专业的管理、决策人员面前。这不仅能使地质工作者在研究过程中非常容易地表达、验证和修改自己建立的地质认识,而且能够在其基础上进行定量的可视化空间分析和专业应用,最大限度地增强地质分析的直观性和准确性,做出符合地质现象分布变化规律的工程设计与施工方案,减少人类对地质问题认识的盲目性以及地下工程设计、施工面临的巨大风险,为制定科学合理的地下空间开发利用方案提供基础地质资料和决策依据。

近20年来,工程地质三维模拟技术已引起地球科学界和实际工程界的广泛关注,并成为具有国际前沿性质的研究热点^[1-2]。在地质工作者、计算机专家和GIS研究人员的共同努力下,一系列用于精确刻画地下工程地质体结构特征的三维地质建模及可视化分析技术相继开发出来并在实际工程中得到应用^[1],初步显示了三维地质模拟在工程地质空间重构、分析与表示、过程模拟等方面具有巨大的潜力和价值。然而,随着地下空间勘探开发的不断深入,对工程地质体的建模分析工作提出了更高的要求,早期的只建立简单的几何结构构造模型的三维地质模拟技术,已无法满足实际综合地质研究工作的需要^[4-5]。实际工作中不仅需要准确地描述工程地质体的几何形态,更需要准确地描述地质体内部非均质分布的物理、化学、水文、工程等属性特征,甚至需要将两者耦合起来进行各种定量的空间分析和专业应用。地下空间勘探开发的实际应用需求推动了三维地质建模及可视化分析技术的发展,使得建立实用、可靠的地质体几何结构构造和属性参数特征耦合模型成为三维地质模拟技术必然的发展方向。

2 国内外研究现状与发展趋势

工程地质三维模拟研究是一个集合了基础地质学、工程地质学、岩土工程学、地球空间信息科学和计算机科学等多学科的交叉领域。近20年来,国内外在工程地质三维模拟方面的研究主要集中在三维地质模拟的理论基础、实现技术、实际工程应用等3个方面。

(1) 在工程地质三维模拟的理论基础方面,主要是基于工程地质空间认知、划分、映射、表达的要求,研究适合于三维地质模拟的空间数据模型及其数据结构。

(2) 在工程地质三维模拟的实现技术方面,主

要研究三维地质模拟的体系结构和三维地质模型重构的具体方法。一般将三维地质模拟划分为地质数据处理、地质实体建模、模型分析与应用(包括属性建模、空间分析、其他应用等)3个阶段^[6]。现有的三维地质建模方法可分为2类:一类是用于重构地质体空间几何形态的地质结构建模方法^[7-10];另一类是用于地质体内部属性参数特征三维重构的地质属性建模方法,如:以空间插值为基础的确定性属性建模方法;以随机模拟为基础的不确定性属性建模方法^[4]。

(3) 从实际应用上来看,地质体三维建模与可视化分析是工程界长期的需求。基于地质概念的工程地质三维实体模型能够定量地分析地质单元结构形态及其属性特征,为深入认识工程地质现象和地质过程提供新的手段和视野。在20世纪90年代中期,很多地质专家和工程人员就认同了三维地质模拟的概念和作用,并开展了一系列探索性的应用研究工作。但现有的三维地质模拟技术多是对地质体几何结构构造的直观描述和空间展示为主,主要应用于地下地质体的几何表示、地质属性参数空间不均一性的可视化显示、数值模拟模型的前处理和后处理等有限的几个领域^[3],更深层次的定量分析应用则很少,工程地质三维模拟的潜力远未挖掘出来。

从总体上来看,工程地质三维模拟的理论、方法和技术目前尚处于研究和应用的初级阶段,还有许多问题有待于解决。按照现在的理论和技术水平,真正实现完全意义上的三维地质模拟至少需要10~20a的时间。当前亟需开展研究的重要工作包括:研究并设计、实现面向地质实体、胜任复杂环境下地质模拟、具有真三维拓扑结构的数据模型及数据结构;研究三维地质结构模型/属性模型的统一构模与融合分析技术;研发成熟的3D/4D可视化定量空间分析工具;研究地质数据和地质模型不确定性的表示、地质模型准确性的检验等。

3 多场耦合构模的基本概念

用地质场的观点^[11-13]来分析,工程地质三维模拟是对工程地质场中的物质、信息、特征进行三维重构、再现、分析的过程。工程地质场由2类相互关联的场组成:一类是地质属性参数场,它是地质体、不同地质体的界面或地质体组合的物理、化学、水文、工程等方面的特性在空间上的反映,它连续地分布在三维地质空间中,没有明确的边界形态;另一类是地质几何结构场,它是地质体、不同地质

体的界面或地质体组合的几何结构形态特征在空间上的反映,它具有相对明晰的边界,控制数据呈离散状分布。

在工程地质空间,地质几何结构场和地质属性参数场不仅在空间位置上重合(具有套合关系),而且在成因及特性上相互关联(具有耦合关系)。工程实践中通常是根据地属性参数特征来划分地质几何结构场的控制界面(如地层之间的分界面)。但从另一角度来看,地质属性参数场的分布特征往往与地质体的几何形态、埋藏深度以及与其周围地质体的相对差异有关^[13],地质几何结构场不仅展现了地质体的空间几何分布特征,还控制了地质体内部属性参数的空间分布变化。因此,亦可在地质几何结构场的基础上推断、预测地质属性参数特征,实际工作中也常有这方面的应用需求。厘清工程地质空间几何结构场与属性参数场的耦合关系,不仅具有理论意义,更重要地是在三维地质模拟时具有实际的指导意义。

在三维空间中,对地质几何结构场进行模拟重构生成三维地质结构模型,对地质属性参数场进行模拟重构生成三维地质属性模型。三维地质结构模型侧重于反映地质体的空间位置、几何形态和拓扑关系,但难以表达地质体内部的属性参数特征变化情况,一般是将同一地质单元内部的属性参数特征假定为均一不变的。三维地质属性模型可以方便地表达地质体内部属性参数特征的非均一性,并易于进行统计计算和综合分析,但不含地质体几何形态和拓扑关系方面的信息。

鉴于地质空间中几何结构场与属性参数场的耦合关系,工程地质体三维模拟的流程应能准确地反映“根据采样的地质属性参数信息→界定地质空间几何结构特征→预测地质属性参数空间展布规律→实际验证与应用”这一实际工作过程,但现有的三维地质建模流程和技术方法在实现这一目标时却存在很大的不足,主要问题涉及4个方面:

(1) 在三维空间数据模型方面缺乏实用高效、矢栅一体的混合数据模型。现有的空间数据模型在对工程地质空间划分、表达及分析时存在着或多或少的缺陷,难以完整、统一地描述地质体的几何结构特征及其内部属性参数信息。

(2) 在三维地质模拟的过程中,目前一般采用“独立构模”或“顺序构模”的方法来重构地质空间几何结构场和属性参数场。“独立构模”是指完全不考虑地质空间几何结构场和属性参数场的相互关系,将其作为2个独立的数据场,分别单独的构建地质

结构模型和地质属性模型。“顺序构模”则考虑到地质几何结构场和属性参数场在空间位置上的重合关系,先构建地质空间几何结构场模型,然后在此基础上体素化,生成属性参数场模型,并建立属性数据与地质体几何结构数据的对应关系。“独立构模”或“顺序构模”的思路都没有考虑地质结构和属性参数在空间和成因上的耦合关系,在理论上具有很大的局限性,计算机模拟的结果也与真实的地质情况差别较大。

(3) 从三维地质模拟的具体实现技术上来看,现有的技术侧重于重构地质体的空间几何形态,并形成了不少实用高效的三维地质结构建模方法,而对地质属性参数重构技术研究较少,属性建模大多采用自动插值方法或基于地质统计学的 Kriging 方法,这些属性建模方法复杂繁琐,且未能充分有效地考虑属性参数场与地质体的结构特征、地质约束作用及地质学原理的耦合关系。

(4) 现有的可视化分析技术缺乏统一、完备的三维空间分析理论指导,很难实现对既包含地质体几何形态、又包含地质体内部属性参数特征的地质实体模型进行真正自由、灵活的定量三维空间分析。

一个真正的三维地质实体模型应该能够完整、统一地描述地质对象的空间位置、几何形态、拓扑关系和内部属性信息,具有真三维表达能力、真三维空间分析能力且支持三维空间预测,而不是在地质空间中将几何结构场和属性参数场割裂开来,分别进行重构、描述和分析。理想的三维地质实体模型重构流程应该将地质数据处理、地质体几何结构框架生成、地质属性参数场重构、三维可视化空间分析作为一个统一的整体过程加以研究,充分考虑地质属性参数场对地质几何结构框架的指示意义、地质几何结构框架对地质属性参数场的约束作用,实现真正意义上的地质空间多场(即几何结构场与多种属性参数场)耦合构模,从而生成带属性参数的三维地质多场耦合模型。

近年来,国内外开展了三维地质模拟与数值模拟耦合方面的研究,这主要是为了解决岩土工程数值模拟前处理中存在的三维地质模型建立困难、空间单元划分复杂繁琐的难题,利用三维地质建模技术建立表征地质体几何结构形态的工程地质三维实体模型,自动生成精细合理的三维剖分网格,并输入数值模拟软件^[14-15]。而在工程地质空间几何结构场与地质属性参数场耦合方面的研究,则还处于尝试阶段。一些初步的研究和应用表明:工程地质空间多场耦合模型在科学研究和实际工程中具有很大

的优势,但现有的研究工作缺乏系统的理论指导,没有形成标准的多场耦合构模技术流程,存在着操作复杂、难以实用化的缺陷。从目前掌握的文献资料来看,国内外在工程地质空间多场耦合构模方面的研究尚处于初级阶段,开展相关领域的深度理论分析和系统实证研究是一项极为迫切的任务。

4 总体研究框架

4.1 研究流程

综合现有的三维地质结构建模、属性建模基础理论和实际应用情况,本文提出工程地质空间多场耦合构模研究的总体框架,基本的研究流程如图 1 所示。

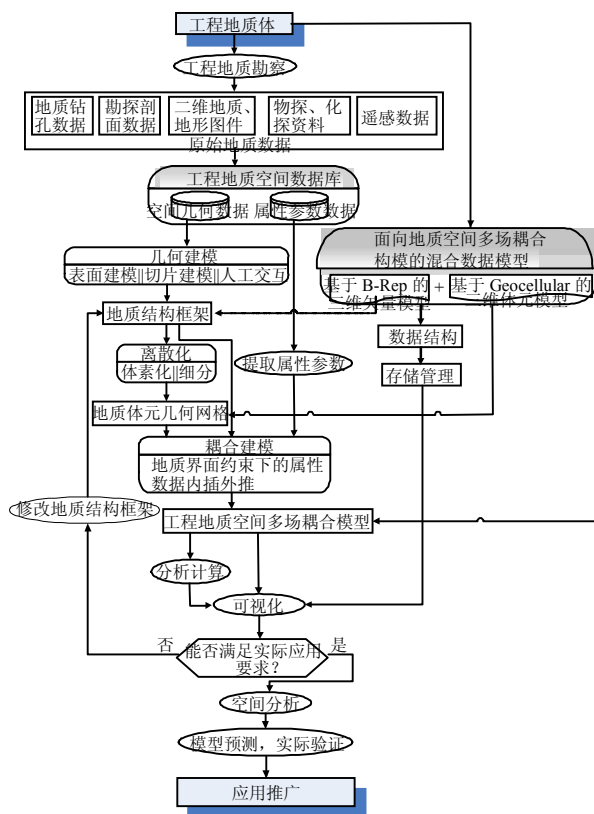


图 1 工程地质空间多场耦合构模的总体框架
Fig.1 Research framework for multifield coupled modeling in engineering geological space

4.2 主要改进

4.2.1 三维空间数据模型

由于工程地质空间多场耦合模型需要对工程地质体的几何形态、拓扑关系和内部属性信息进行完整、统一地描述和分析,因此,需要使用矢量模型和体元模型相结合的三维混合数据模型来对地质空间进行映射、表达。在具体实现时,本文设计了一种基于边界表示(B-Rep)和地质晶胞(Geocellular)

的混合数据模型,并构建相应的空间数据结构,解决了工程地质体几何形态、拓扑关系和内部属性参数信息的统一描述问题(见图 1)。边界表示模型是最成熟、无二义的三维矢量实体表示法,具有算法简单、速度快的优点,不足之处在于其数据结构复杂,维护拓扑关系比较繁琐。地质晶胞模型实质是三维栅格结构的变种,它在 XY 平面上是标准的 Grid 剖分,而在纵向(Z 方向)则依据数据场类型或地层界面变化进行实际划分,从而形成逼近实际界面的三维体元空间剖分。本文设计的基于边界表示和地质晶胞的混合数据模型,首先使用基于边界表示、面向地质实体并兼顾拓扑关系的三维矢量数据模型来组织表征地质体的三维几何结构框架;然后对地质空间进行离散化剖分,用地质晶胞结构来组织表征地质体内部的属性参数数据;在保障几何无缝、拓扑一致的前提下,使用一种合适的纽带(如三角网 TIN 或共面的四边形)来记录并连接地质结构框架和地质体元网格之间的公共界面。这从概念上对工程地质对象的几何形态、拓扑关系和内部属性信息进行完整、统一地描述和分析。这种混合数据模型既保持矢量结构简洁、精确的优点,又具备体元模型简单、通用的长处,具有真三维表达能力、真三维空间分析能力,且支持三维空间预测,是一种支持工程地质空间多场耦合模型集成显示分析的实用新型的三维空间数据模型。图 2 是使用这种混合数据模型来表达地质体几何结构特征和内部属性参数信息的一个实例。

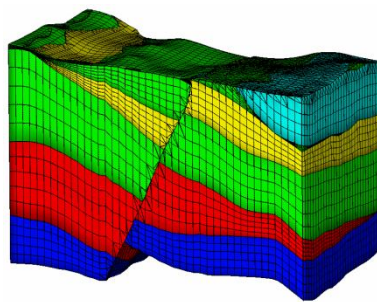


图 2 使用混合数据模型表达的三维地质实体模型
Fig.2 Solid model of geological objects in 3D expressed by a hybrid data model based on B-Rep and Geocellular

4.2.2 地质属性参数场三维重构方法

在地质属性参数场三维重构时,为了真实地反映地质属性特征在三维空间中分布的非均质性以及地质结构、构造对地质属性参数场的控制、约束作用,引入“地质条件约束下的属性参数插值”技术。在具体实现时,需要解决 2 个问题:

(1) 定性的地质约束条件的量化表达问题。地质约束条件既包括可以用准确的数字表达的定量的地质约束(如:简单地层层面和断层、褶皱、透镜体、侵入体等特殊地质体控制界面的空间分布特征),也包括定性的地质约束(如:对研究场区内沉积环境、沉积相空间展布规律的认识以及地质人员的解释、推断)。定量的地质约束条件可以很方便地参与地质属性建模,而定性的地质条件则很难直接对地质属性三维建模起到约束作用。在现有的技术条件下要实现定性的地质约束条件的量化表达,可通过2种方法:一是在工程地质数据处理阶段就先进行沉积环境、沉积相等定性的地质约束条件的解释、推断工作,将定性的地质约束转换为用数字表达的、定量的控制参数(表现为组成地质体几何结构框架的地质界面),然后在地质界面的约束下对地质体元网格内的地质属性参数进行内插外推。这是最现实也是最容易实现的办法。二是改进建模方法及实现算法,通过程序设计,在构模过程中自动进行复杂地质界面的交切处理、高程调整与一致性处理,将控制地质界面空间几何形态的地质约束条件转化为计算机能够识别、编程的构模规则。这种方法需要结合各种复杂的地质背景条件,对现有的建模方法进行优化、改进,实现起来难度较大。

(2) 同一地层单元内部属性参数的插值问题。沉积岩、岩浆岩、变质岩这3类岩体在产出形态上差异较大,地质体内部属性参数插值需采用不同的方法。对于沉积岩,同一地质年代的沉积结果(地层)一般具有相同的地质属性。为解决同一地层单元内部属性参数的插值问题,引入“等时地层”^[2]的概念,假定同一地层内部的各个部分是对比的。“等时地层”可以看作是一个次一级的地层层段,其划分依据是地层在垂向上的展布特征和地层关系(如地层整合、超覆、剥蚀等),它将相邻的钻孔的地质体属性数据关联起来并与所模拟的地层层段相一致。等时地层面可以看作是某一地层层体内的细小地层层面,它是沉积过程中由于外界环境的累积变化而逐步形成的。在工程地质空间属性参数建模的过程中,可将层状地质体细分为一系列的等时地层,并据此将地质体几何结构框架离散化为地质晶胞体元数据(如图2所示)。同一等时地层内的地质属性参数具有高度的相关性,可根据同一地层内均匀沉积的假设,采用线性插值方法或距离反比加权法进行估值。在地质属性参数场重构时,可根据

等时地层内的样本点数据内插求得同一等时地层内待插点的属性值。这种方法概念明晰,实现起来简单直观,也适用于一些具有比较明显的方向性的变质岩和岩浆岩。对于无法分层、不具明显方向性的变质岩和岩浆岩,使用克里金方法进行内部属性插值。通过设计不同的变差函数,克里金方法很容易实现属性估值,并能克服一般距离加权插值方法插值结果的不稳定性。

4.2.3 多场耦合模型生成机制

三维地质模型是由复杂多变的地质数据和模糊抽象的建模规则共同作用的结果,地质模型的重构过程就是一个通过不断的迭代和修正操作来逐步求精的过程。要建立准确实用、可交互、可修正、可评估的工程地质空间多场耦合模型,需要在建模流程中引入迭代构模技术,同时建立相应的信息反馈机制,从而循序渐进地逼近工程地质体的实际情况。这包括以下2个层面的涵义:

(1) 引入几何结构场与属性参数场的迭代构模技术,用贯穿于三维地学模拟整个生命周期的“迭代构模”思想来取代传统上将地质建模划分为几何结构建模和属性参数建模这2个相对独立的阶段的做法。具体实现时,先应用三维几何建模技术建立一个以主要地质界面为主的地质结构框架模型,然后将工程地质空间离散化为体元网格,在地质结构框架的约束下对地质属性参数场进行内插外推,生成一个初始的耦合模型(几何结构框架模型+属性参数模型);在初始耦合模型的基础上,结合地质专家的知识、经验以及各种定性、定量的地质数据,选用合适的构模方法及控制参数,对地质结构框架模型进行局部地细化和调整,通过不断的迭代和修正操作来逐步求精,从而得到较为真实可信的三维地质实体模型。

(2) 建立工程地质空间耦合构模分析过程中的信息反馈机制,将工程地质数据处理、几何结构框架生成、属性参数场模拟流程与多场耦合建模分析规则一体化,自动地或交互式的半自动地实时检测地质体几何结构框架、地质体元几何网格以及两者耦合起来的动态可视化显示效果,反馈模型构建过程中的各种观测误差、计算误差、解释误差和视觉误差,并及时提供改正数据、修正模型、调整相关参数的途径^[6],以获取真实合理的多场耦合模型。误差是指计算机模型与地质体实际空间展布的偏离程度,它是三维地质模型的固有属性。三维地质模

型的精度反映了误差的离散程度。在真三维场景下可使用多种质量检测方法对多场耦合模型进行误差检测和信息反馈,如:基于多源信息的对比检查方法、基于三维拓扑约束关系的自动质量检查方法、基于属性数据查询的逻辑检查方法、基于三维可视化的人工检查方法、基于三维空间量算的人工检查方法等。进行误差修正时,可使用以下3类方法:一是优选建模方法,如采用高次插值方法、应用特定的地质原理及约束条件;二是补充修正初始建模数据,如增加虚拟钻孔或地质剖面;三是直接修正建模中间结果,如使用基于三角网(TIN)的模型修正技术。具体实现时,先根据计算机图形所展示的地质结构、构造及属性参数在三维空间内的展布情况,评判模型精度能否满足特定的要求;快速定位、重点核查三维地质模型中精度较差的部位;分析三维地质模型中精度较差部位产生的原因,以分别采取有针对性的误差修正方法和技术来修正模型;对修正后的模型重新进行精度评估,直至其精度满足工程技术要求。

5 多场耦合构模实例与效果

研究区范围为 $500\text{ m} \times 400\text{ m}$, 区内有 24 个代表性钻孔, 揭露了 5 个地层单元; 在这些钻孔内还采集到 99 个土样, 测定了其中四氯乙烯的含量。首先根据钻孔分层资料, 使用地层层位法^[8]生成反映地质结构变化特征的三维地层模型(见图 3); 然后, 根据四氯乙烯浓度采样数据, 在整个三维空间中直接使用距离反比加权法插值生成四氯乙烯浓度分布模型(见图 4); 接着, 耦合三维地层模型中的控制界面信息, 在地层层面的约束下分别以各个地层内的四氯乙烯浓度采样数据为插值样本点, 使用距离反比加权法插值生成各个地层单元内部四氯乙烯浓度分布模型(见图 5); 最后, 进行比较与检验。

比较图 4、5, 发现 2 个模型中的化学属性参数分布情况存在着比较大的差异。为了定量评估这 2 个模型的精度, 新增了一个 1 个钻孔, 采集到 8 个土样数据, 并使用这些新增数据进行模型检验工作。结果发现, 考虑地层约束生成的地质属性参数模型(见图 5)更能准确地反映研究区四氯乙烯的实际分布情况。图 3、5 中的三维模型可直接应用于工程实际, 为该场区地质构造和物化属性参数分布的定量评估提供深层次的支持。这个实例也说明了引入多场耦合的思想方法来构建三维地质实体模型具有很强的直观性、实用性和可操作性。

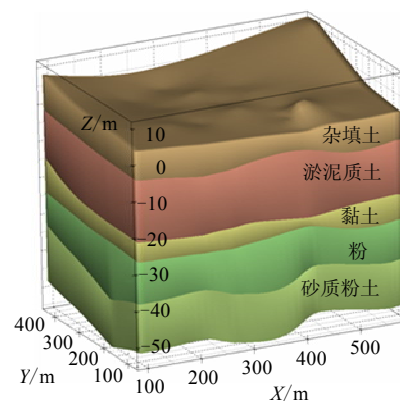


图 3 研究区三维地层模型

Fig.3 3D stratigraphic model of the study area

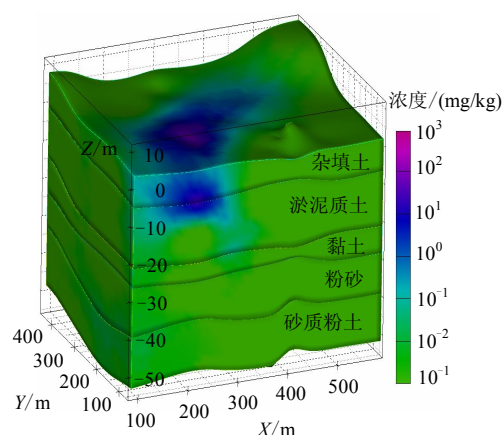


图 4 不考虑地层界面约束时的化学属性参数场模型

Fig.4 3D model of chemical property parameters field created without control strata

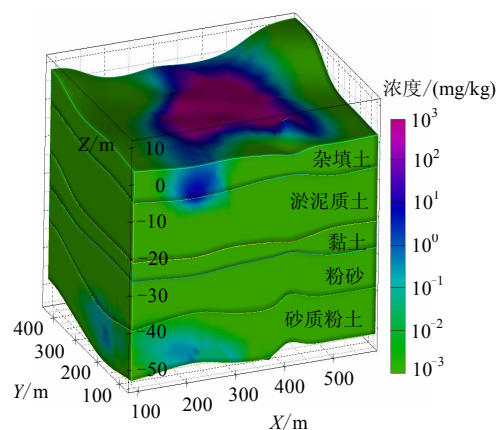


图 5 耦合地层控制界面后的化学属性参数场模型

Fig.5 3D model of chemical property parameters field created coupled with control strata

6 结论与展望

(1) 工程地质空间三维几何结构场/属性参数场耦合构模是实现工程地质数字化应用突破的关键。多场耦合构模的过程是一个信息逐步提取与集成的过程, 亦是一个“工程地质体→地质空间数据→地质

空间信息→知识决策”的过程。

(2) 本文提出了工程地质空间多场耦合构模的标准流程框架, 并通过一个实例说明地质体多场耦合模型在三维地质建模及可视化系统中初步实现后的效果。这为建立一套完整的地质体多场耦合构模的理论体系和方法体系奠定了基础, 有助于完善复杂地质条件下三维地质模拟的方法与技术。

(3) 本文提出的研究方案和解决思路, 仅仅奠定了该项研究的粗略框架, 还有许多问题需要进行进一步的研究与探索。今后的重点研究方向包括: 地质空间多场耦合模型的三维可视化分析技术; 地质空间耦合场的定量三维空间分析技术; 地质空间多场耦合建模分析软件系统的设计与开发; 地质空间多场耦合构模与空间分析实证研究等。

参考文献

- [1] TURNER A K. Challenges and trends for geological modelling and visualization[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2006, 65(2): 109—127.
- [2] THOMAS A J. Modeling geology in three dimensions[J]. **Geobyte**, 1988, 3(1): 14—20.
- [3] 郑贵洲, 申永利. 地质特征三维分析及三维地质模拟研究现状[J]. **地球科学进展**, 2004, 19(2): 218—223.
ZHENG Gui-zhou, SHEN Yong-li. 3D analysis of geological characteristics and status research of 3D geology modelling[J]. **Advance in Earth Sciences**, 2009, 19(2): 218—223.
- [4] 魏嘉. 地质建模技术[J]. **勘探地球物理进展**, 2007, 30(1): 1—6.
WEI Jia. Review of geologic model building techniques[J]. **Progress in Exploration Geophysics**, 2007, 30(1): 1—6.
- [5] ROYSE K R, RUTTER H K, ENTWISLE D C. Property attribution of 3D geological models in the Thames Gateway, London: new ways of visualising geoscientific information[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2009, 68(1): 1—16.
- [6] WU Q, XU H. On three-dimensional geological modeling and visualization[J]. **Science in China Series D: Earth Sciences**, 2004, 47(8): 739—748.
- [7] 贺怀建, 白世伟, 赵新华, 等. 三维地层模型中地层划分的探讨[J]. **岩土力学**, 2002, 23(5): 637—639.
HE Huai-jian, BAI Shi-wei, ZHAO Xin-hua, et al. Discussion on strata partition in three dimension strata model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(5): 637—639.
- [8] LEMON A M, JONES N L. Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections[J]. **Computers & Geosciences**, 2003, 29(5): 547—555.
- [9] KAUFMANN O, MARTIN T. 3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines[J]. **Computers & Geosciences**, 2008, 34(3): 278—290.
- [10] MOORE R R, SCOTT E J. Three-dimensional reconstruction and modeling of complexly folded surfaces using mathematics[J]. **Computers & Geosciences**, 2001, 27(4): 401—418.
- [11] 赵鹏大, 池顺都. 初论地质异常[J]. **地球科学—中国地质大学学报**, 1991, 16(3): 241—248.
ZHAO Peng-da, CHI Shun-du. A preliminary view on geological anomaly[J]. **Earth Science—Journal of China University of Geosciences**, 1991, 16(3): 241—248.
- [12] 陈永清, 赵鹏大. 综合致矿地质异常信息提取与集成[J]. **地球科学—中国地质大学学报**, 2009, 34(2): 325—335.
CHEN Yong-qing, ZHAO Peng-da. Extraction and integration of geoanomalies associated with mineralization[J]. **Earth Science—Journal of China University of Geosciences**, 2009, 34(2): 325—335.
- [13] 成秋明. 空间自相似性与地球物理和地球化学场的分解方法[J]. **地球物理学进展**, 2001, 16(2): 8—17.
CHENG Qiu-ming. Spatial self-similarity and geophysical and geochemical anomaly decomposition[J]. **Progress in Geophysics**, 2001, 16(2): 8—17.
- [14] 李明超, 钟登华, 秦朝霞, 等. 基于三维地质模型的工程岩体结构精细数值建模[J]. **岩石力学与工程学报**, 2007, 26(9): 1893—1898.
LI Ming-chao, ZHONG Deng-hua, QIN Zhao-xia, et al. Refined modeling for numerical simulation of engineering rock mass structures based on 3D geological model[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(9): 1893—1898.
- [15] 刘晓明, 罗周全, 杨彪, 等. 复杂矿区三维地质可视化及数值模型构建[J]. **岩土力学**, 2010, 31(12): 4006—4010.
LIU Xiao-ming, LUO Zhou-quan, YANG Biao, et al. Numerical modeling and geological body visualization for complex mine[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(12): 4006—4010.