

doi:10.3799/dqkx.2014.132

东胜煤田北部地段 3D 煤层模型的 动态构建及不确定性评估

李章林, 吴冲龙, 张夏林, 翁正平, 刘刚, 邵玉祥

中国地质大学计算机学院, 湖北武汉 430074

摘要: 以内蒙古东胜煤田北部艾来五库沟—台吉召地段勘查区为例, 针对三维地质建模方法在多源多类地质数据应用、动态建模及建模结果不确定性评估等方面存在的不足进行研究, 并实现了煤层三维建模。煤层三维建模要领是: 先按照数据的内在逻辑关系和几何结构两个层次进行数据融合处理, 将钻孔、剖面及断层等数据转化为形式简单、结构一致的离散化样品数据; 再以这些数据 and 各类边界线为基础, 通过距离幂次反比(inverse distance weighting, IDW)法插值得到煤层顶底板高程, 并结合这些属性值和 TIN(triangulated irregular network)剖分技术动态生成煤层结构模型; 然后利用一个与煤层顶底板高程估值结果相对应的算子——插值方差, 完成对煤层模型的局部不确定性评估。详细讨论了煤层三维建模的整体流程并基于三维地学信息系统平台 QuanyView 加以实现。实际应用结果表明, 所提方法具有显著的实际应用价值。

关键词: 煤层建模; 东胜煤田; 不确定性分析; 距离幂次反比; 插值方差; 信息处理。

中图分类号: TP391

文章编号: 1000-2383(2014)10-1398-09

收稿日期: 2014-02-09

Dynamic Construction and Uncertainty Assessment for 3D Coal-Seam Models in Northern Dongsheng Coalfield

Li Zhanglin, Wu Chonglong, Zhang Xialin, Weng Zhengping, Liu Gang, Shao Yuxiang

School of Computer Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: This paper explores three issues related with the current coal-seam modeling, namely, integration of multi-source geological data, dynamic modeling and uncertainty assessment for the modeling results by studying 3D coal-seam modeling of five prospect areas from Ailaiwukugou to Taijizhao located in northern Dongsheng coalfield in Inner Mongolia. Firstly, data integration is carried out according to its inherent logic and outer geometrical relationship. The former translates data into sections or profiles, and the latter further converts them into a uniform simple format, which is called uniform discretized samples. Secondly, based on these samples and boundary lines, inverse distance weighting (IDW) method is employed to evaluate the height of both top and base floor of coal layer and then 3D coal models are dynamically built according to these attribute values by triangulated irregular network (TIN). Thirdly, interpolation variance, an alternative uncertainty measurement for IDW estimates, is applied to assess uncertainty of the resulting 3D coal-seam models. Finally, the whole modeling workflow is discussed in detail and implemented based upon a 3D geo-information system named QuanyView. In the application in our study area, the proposed method works well in dynamically modeling the coal layers and their uncertainties in multi-source geological data environment, which shows that it is practical and feasible for 3D modeling in other coalfields.

Key words: coal-seam modeling; Dongsheng coalfield; uncertainty analysis; inverse distance weighting; interpolation variance; information processing.

随着地质信息科学理论和科学体系的形成及实际应用需求的增加, 三维地学建模(three-dimensional geosciences modeling, 3DGM)对于地

质工作的重要性已经得到越来越广泛的支持和认可。研究高效的煤层 3DGM 方法, 在增加煤田地质勘探与开发的安全性、提高研究水平、生产效率和工

作质量等方面都有重要意义。不少学者在这一方面都进行过较深入的研究(吴冲龙,1998;田宜平等,2000;吴立新和史文中,2005;姜在炳,2006;吴冲龙等,2006,2011;何珍文,2008;Zanchi *et al.*,2009;李章林等,2011a)。

在进行内蒙古东胜煤田北部艾来五库沟至台吉召地段勘查区煤层建模工作的研究与实践过程中,笔者发现人们所关注的许多问题,如多种勘查工程数据条件下的三维建模(吴冲龙等,2005a,2005b;Wu *et al.*,2005;张夏林等,2010)、断层构造的影响(姜在炳,2006;李绍虎等,2006;朱良峰等,2008;Zanchi *et al.*,2009)、三维模型的动态构建(姜在炳,2006;何珍文,2008;李章林等,2011a)及建模结果的可信度评估(Bistacchi *et al.*,2008;朱良峰等,2009)等,目前对此还缺乏有较强实用性的解决方案。因此,笔者在该区域煤层建模研究过程中针对这些问题开展了较为系统的研究和总结,所得出的一些方法和认识,对于三维地学建模理论的完善发展及其他区域煤层三维模型的构建,可能具有一定的参考、借鉴意义。

本文以内蒙古东胜煤田北部艾来五库沟至台吉召地段勘查区的煤层三维建模为实例,针对研究过程中遇到的多源地学数据融合、煤层模型的动态构建及不确定性评价等问题进行了研究探讨。在对研究区的地质情况及建模源数据进行说明介绍的基础上展开本文的研究:首先,按照数据的内在逻辑和几何结构两个层次进行数据融合处理,将钻孔、剖面及断层等数据转化为形式简单、结构一致的离散化样品数据;然后,以这些数据和各类边界线为基础,通过 IDW (inverse distance weighting) 法插值得到煤层的顶底板高程,结合这些属性值和 TIN (triangulated irregular network) 剖分技术动态生成煤层结构模型;再次,利用一个与煤层顶底板高程估值结果相对应的不确定性衡量算子——插值方差,完成煤层模型局部不确定性的评估。最后,在对整体建模流程进行详细讨论的基础上对这一方法进行了实现和成功应用。所提方法以较高的效率和质量完成了研究区多源地学数据环境下,煤层模型的动态构建及不确定性评估。

1 地质概况与数据准备

1.1 研究区地质概况

艾来五库沟至台吉召勘查区位于鄂尔多斯台坳与东胜隆起的过渡带上,整体为一向南西向倾斜的单斜构造,局部有宽缓的波状起伏。地层走向大致为

30°N~50°W,倾向 SW,倾角小于 5°。地层层序由老至新依次为:三叠系、侏罗系、白垩系、第三系及第四系。其中,侏罗系延安组为重要的含煤地层,赋存了丰富的煤炭资源(黄晓丽等,2011)。

研究区处于鄂尔多斯盆地东胜煤田北部,包括以下 5 个勘查区:台吉召、柴登、漫赖、艾来五库沟、速贝梁和阿不亥,总覆盖面积达 1 300 km²。区内已查明的断层有 3 条(图 1a),地层由老到新依次为:三叠系上统延长组(T_{3yc})、侏罗系中下统延安组(J_{1-2ya})、侏罗系中统直罗组(J_{2z})、侏罗系中统安定组(J_{2a})、白垩系下统志丹群(K_{1zh})、新近系上新统(N₂)和第四系(Q)。主要含煤地层为侏罗系延安组,岩性为中砂岩、粉砂岩、泥岩及煤层,含 5 个煤组,18 个煤层。可采厚度 2.35~26.90 m,厚煤层由西北到东南呈条带状发育,东北角和西南角相对较薄(黄晓丽等,2011;聂浩刚等,2011;孙希杰,2011)。

1.2 建模源数据准备

本文三维地质建模工作的基本数据源,是内蒙古地质工程公司在中央地质勘查基金资助下,对这 5 个勘查区进行煤炭普查(2007—2008 年度)所获得的各类资料信息,具体包括钻探数据、测井数据及地震剖面数据等。从空间分布上看,各类数据的采集点在东北部较为密集,而西南部较为稀疏,但总体上较为均匀(图 1b),而且与岩相、煤层和构造等地质状况复杂性及其空间分布相对应。

1.3 建模的主要难点问题

本次研究工作中所遇到的难点问题主要有下面

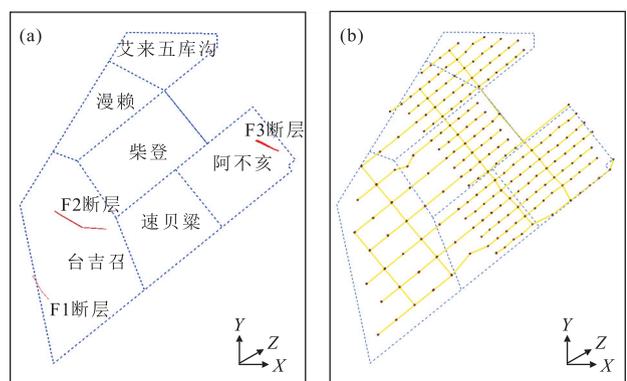


图 1 勘查区各地段边界及区内主要勘探工程和断层的相对位置关系

Fig.1 Borderlines of the exploration areas and its relative position relationship of the exploration engineering and fault structures

a.各勘查区及段层面的空间位置及形态;b.钻孔及剖面数据的空间分布情况

几点:

(1)多源地质数据的融合.所搜集的钻孔数据间距($2\text{ km}\times 2\text{ km}$ 和 $4\text{ km}\times 4\text{ km}$)较大,仅利用这一部分信息无法保证三维模型的精度.建模过程必须考虑使用其他类型的数据,并且同时需要兼顾研究区存在断层的特征.因此,需要将目前各类性质和来源不同的地质数据进行融合处理.

(2)煤层模型的动态构建.研究区内煤层较多,手工交互建模存在较大的工作量,需要提供自动或半自动的建模方式.此外,在目前市场经济的大背景下,也有必要提供能够对煤层最小可采厚度等工业参数进行快速响应的建模方法,即能够随经济参数的变化而动态建模.

(3)煤层模型的不确定性评估.地质体具有典型的灰色信息特征(毛善君,2002),几乎所有的三维地质模型都不可能完全符合实际地质情况,即存在一定的可信度问题.绝大多数基于三维煤层模型的生产 and 研究工作,都只有建立在对这一参数具有充分的理解和认识基础上,才可能获得高可信度的结果.

以上问题也是目前三维建模领域研究人员所共同关注的热点和难点.例如:吴冲龙(1998)、吴立新和史文中(2005)研究提出了地质数据具有“七多”(即多源、多类、多量、多维、多尺度、多时态和多主题)的特征,并针对性地提出了点源数据库的理论与方法.Wu *et al.*(2005)从数据格式转换和三维拓扑结构的角 度,研究了三维地学建模过程中多源地质数据的融合问题.还有学者对存在断层情况下三维模型的动态、高效构建方法进行了研究(Lemon and Jones,2003;姜在炳,2006;李绍虎等,2006;朱良峰等,2008;Zanchi *et al.*,2009).朱良峰等(2009)和 Lindsay *et al.*(2012)较系统地研究了三维模型的不确定性评估问题.以上研究成果虽然并不能直接用于解决上面所列的难点问题,但仍具有重要的参考意义.本文的研究工作,就是以这些研究成果为基础而展开的.

2 建模方法设计

2.1 多源多类地质数据的融合

多源多类地质数据融合主要研究如何对不同来源和类型的数据进行转换与加工,使其得到相互补充和协同利用,从而获得对同一研究对象更客观、本质的理解和认识.本研究的主要目的是获得比利用单一数据源更高质量的建模结果.本次建模过程中

所搜集到的数据类型较丰富,数据规范也较为可靠,为建模过程中进行多源多类地质数据的融合提供了良好的数据基础;另一方面,所搜集到的钻孔数据间距较大且存在分区的差别,简单依靠这些数据难以保证建模结果的精度,需要着力解决其数据融合问题.

本次建模过程中进行地质数据融合的主要难点在于其内在属性的差异和外在表现形式的多样性.例如,从数据的内容上,建模过程中涉及到的数据有地震、测井、钻探数据等类型;从数据的表达形式上,存在点、线、面等特征;从数据的来源上,有实际测量数据和分析推测结果等类型.这就要求研究人员要对这些建模源数据的本质和形式进行区别和针对性分析.

因此,以数据的内在逻辑和外部空间结构两个层次为起点进行分析研究,就有可能将不同来源和类型的地质数据转换成一致或相似的格式,从而使这些数据在建模过程都能直接或间接地得到充分使用,达到从数据源的角度提高建模结果质量的目的.

2.1.1 内在逻辑层次的数据融合 依照数据的内在逻辑,综合利用地质知识进行分析和推理,对多源多类数据进行分析与综合,并以相对统一的格式对结果进行表达.这一过程在本次研究中体现为:以煤田地质与勘探领域的专业知识为背景,对所获取的钻探数据、测井数据及地震剖面等进行煤层对比和综合分析,最后以真实折剖面的形式统一进行表达和展现.

这里真实折剖面指的是勘探剖面上的所有钻孔都具有真实的空间位置和空间形态.与传统将钻孔都投影在一个平面上的勘探剖面相比,其显著的特征是钻孔及其联接而成的剖面形态严格遵循勘探工程在三维空间中的展布形式,故而能够更加真实地反映出地质体在勘探工程位置处的各种特征(屈红刚,2006;李章林等,2011b).图 2 以不同的视角对真实折剖面的基本特征进行了描述,清楚地显示出各钻孔在三维空间中的状态.

2.1.2 外部结构层次的数据融合 真实折剖面所包含的主要信息为:钻孔轨迹线、煤层边界线和断层线信息.为了提高建模过程的自动化程度,需要将所获取的 3 类相应空间数据按其结构特征进一步进行简化处理,并统一转化为简单的线段形式.图 2 中描述了这 3 类数据的处理结果,所采用的方法如下:

(1)钻孔轨迹线数据.按煤层分层属性从钻孔数据中提取当前煤层的钻孔轨迹线数据,这些数据与剖面样品数据结合在一起,可以更充分地表达折剖

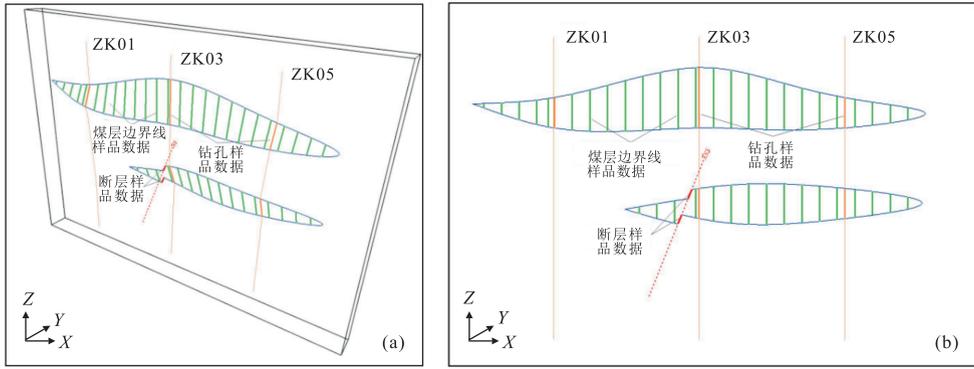


图 2 多源多类地质数据融合过程中真实折剖面的透视图(a)及正视图(b)示意

Fig.2 A typical multi-source and multi-type geological data integration illustrated by a true zigzag section in perspective (a) and front (b) view

面上煤层边界线的形态。

(2)煤层边界线数据.对真实折剖面包含的所有煤层边界线数据,都以一个扫描面为基础,分别沿勘探线方向进行序列化扫描,将其一致离散化为煤层边界线数据。

(3)断层线数据.煤层顶底板面在正断层的影响

下会形成一个以二者交线为边界的空洞,这种特征为本文对断层信息进行规则化处理提供了可能.在折剖面上沿着断层面,生成一条从煤层顶板到底板的线段,即断层线数据.图 3 对断层线数据的生成及其在煤层建模过程中的使用方法作了详细描述.实际建模过程中,这种方法可以处理多个复杂正断层

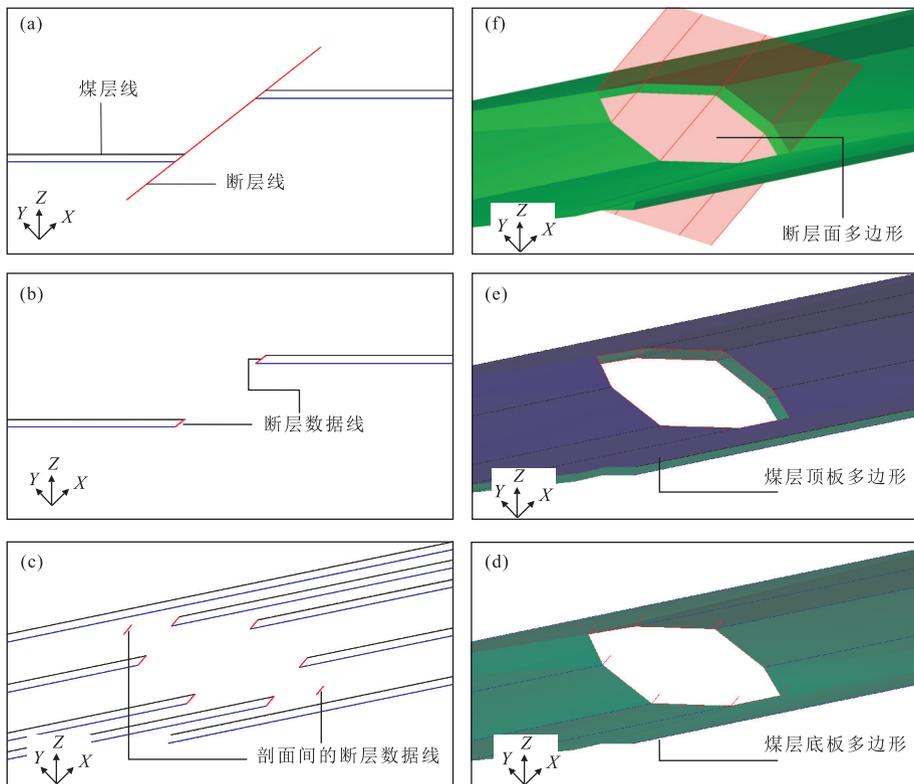


图 3 断层线数据的提取及在建模过程中的应用说明

Fig.3 Illustrations on generation of fault sample data and its application on coal-seam modeling

a.典型的正断层及其上下盘煤层;b.剖面上一个煤层的断层线数据提取结果;c.空间上多个煤层的断层线数据提取结果;d.断层影响下的煤层底板多边形构建结果;e.断层影响下的煤层顶底面模型构建结果;f.断层影响下的煤层体模型构建结果

相切割的情况.其中,图 3d 中的煤层底板多边形中的空洞为煤层受到断层作用的结果.

2.2 模型的动态构建与更新

三维地质模型的动态构建与更新一直是 3DGM 领域的难点和关键(吴冲龙等,2011),其在本次煤层建模过程中的难点主要体现在:(1)单个的煤层模型通常较薄,需要保证每个煤层模型内部、顶底板之间不存在相交和穿透;(2)在高程方向上煤层分层较多.因此,同时也需要保证不同煤层模型之间不存在相互交叉和穿透;(3)区内某些煤层受断层影响,其本身的特征及对相关煤层模型的影响情况需要在建模结果中得到准确体现.因此,虽然基于序列剖面拓扑推理和地质空间定性推理的三维地质体动态重构方法(何珍文,2008)和以地层模型为基础的动态建模技术在不少方面已取得了不错的效果,但与解决本次建模过程中的要求还存在一定的差距.

由于厚度和底板高程是影响煤层模型空间形态的两个重要参数,本文以此为主要研究点和突破口进行煤层动态建模方法的设计.采用先构建煤层框架模型,再构建其结构模型的基本思路,完成研究区内煤层模型的动态构建.主要实现过程如下.

2.2.1 煤层框架模型的构建 (1)生成参考基面.以数据融合过程中抽取的钻孔数据和各类研究区的边界范围为数据源,构建一个参考基面或模板(Lemon and Jones,2003),用于记录煤层顶、底板高程估计值;(2)估计煤层顶、底板高程.利用距离幂次反比(IDW)或克立格等其他空间插值方法,以规则化处理好的煤层相关数据为基础,对参考基面上未知点的煤层顶、底板高程进行估值;(3)生成虚拟框架模型数据.以参考基面上同一待估位置处的煤层顶、底板高程估计值为起始点,生成虚拟框架模型,作为构

建煤层结构模型的直接源数据.

上面步骤(1)中参考基面的生成过程,可以使用 TIN 或 TIN 与 GRID 混合的数据结构,保证勘探工程的见煤点位置和三维建模结果的一致性.另外,对于步骤(2)中煤层顶、底板高程的插值,需要将当前煤层的钻孔轨迹线数据和断层线数据区分开,以保证断层两侧煤层空间形态的合理性.

2.2.2 煤层结构模型的构建 (1)生成煤层边界线.根据最小可采厚度等工业指标和勘查区边界等约束条件,构建煤层的边界线;(2)生成煤层底板多边形.提取每个煤层在其边界线内的虚拟样品,利用带约束条件的 TIN 剖分技术生成当前煤层的底板多边形(图 3d);(3)生成煤层顶板多边形.拷贝每个底板多边形的拓扑信息,结合其每个结点上对应的顶板高程值信息,生成相应的煤层顶板多边形(图 3e);(4)生成煤层结构模型.利用煤层顶、底板多边形生成其侧面进而生成完整的煤层结构模型(图 3f).

综上所述,煤层三维建模流程的基本思路为:以煤层顶、底板厚度估值结果为基础动态生成其顶底板多边形,并进一步自动生成煤层模型.图 4 对其过程和效果进行了简单描述.实践证明,这种方法可以快速动态构建出同一约束条件(如最低可采厚度等工业指标)下多层形态复杂的煤层模型;也可以针对同一煤层根据不同的约束条件快速构建其不同形态的三维模型.

2.3 模型的不确定性评估

通过上面建模方法和过程的论述,所得到的煤层模型空间形态几乎完全由其顶底板高程值决定.因此,本次研究过程中影响建模结果可信度的一个重要方面在于:未采样点煤层顶底板高程值的估值过程.故估值结果的不确定性可以作为评价煤层模

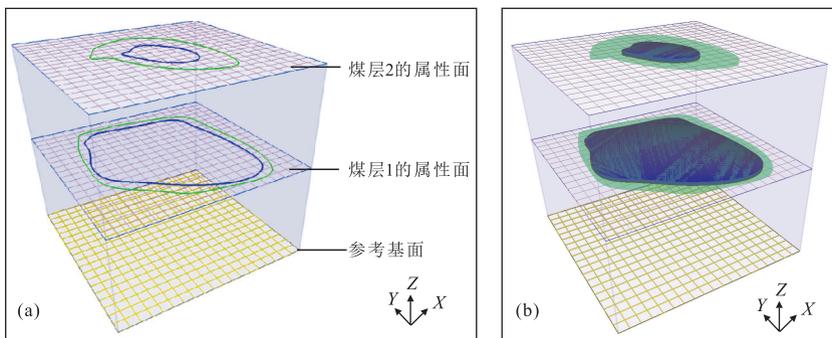


图 4 基于顶、底板高程估值结果的煤层边界线动态生成(a)及煤层结构模型动态构建(b)过程示意

Fig.4 Illustrations on dynamically constructing coal-seam borderline and the respective structure models based on elevation estimates of coal seam roof and floor

型可信度的重要依据。

传统的克里格方差没有考虑参估样点属性值的局部变化特征,并不能够较好地衡量估值结果的不确定性(Pierre,1997)。本文则引入插值方差来进行煤层模型的不确定性评估(Yamamoto,2000)。假设当前待估点的普通克里格(OK)或IDW估计值为 $Z^*(x_0)$,参估样品分配到的权值为 λ_i ,则与这一待估点对应的插值方差 s_0^2 可由下式计算得到:

$$s_0^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot [Z(x_i) - Z^*(x_0)]^2, \text{其中} \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1.$$

显然,插值方差的大小与参与计算的样品值有关,因此其具备衡量估计值局部可靠性的基本条件。通常,插值方差值高的地方,估值结果的不确定性就大;反之,估计值的不确定性就小。

在对煤层顶、底板高程进行估值的过程中,笔者将通过分别计算并记录估值结果的插值方差或插值标准差,完成煤层建模结果的局部可信度评估。实际操作时,首先需要对当前不确定性评价方法的有效性进行验证,然后才能对建模结果的不确定性进行评估。

针对插值方差不确定性评价结果的有效性验证,Yamamoto(2000)所提供的基本方法为,研究插值方差与估值结果之间的相关性或插值方差与真实估值误差之间的相关性。当相关性较强时,说明当前插值方差对不确定性表达得比较准确,反之,则说明当前插值方差计算结果不具备刻画其不确定性的能力。后一种情况产生的原因可能是多方面的,插值参数的设置、插值方法的选择甚至是所使用的插值方差这一指标本身,都可能使得可信度评估结果不满足要求。在这种情况下为了追求更优的不确定性评价结果,可以尝试重新设置插值参数或选择其他的参数,直到试验了所有可操作的参数,或认为目前的相关性已经可以接受为止。对于IDW法而言,可以修改的参数包括参估样品的个数、幂指数等。对于OK法,除了同样可以改变与IDW类似的参数外,还可以使用更加适合的空间变异性模型。对于本文的煤层建模结果,也可以使用地质统计学本身非常丰富的不确定性建模方法。

对于建模结果不确定性大小的详细评估,可以寻找一个特定的指标作为参考,当插值方差大于这个指标时,就可以判定不确定性较大;反之,不确定性则较小。由于插值方差的大小依赖于当前插值对象,故很难找出这样一个特定的指标。由插值方差得出的不确定性评价结果,在明确重点研究区域或地

段后,可以通过计算这一范围内插值方差的均值、方差、变异系数、峰度或绘制直方图等方式确定其统计特征,也可以通过计算这一区域内插值方差的变差函数确定其空间变异性结构,最后结合研究对象本身的特点对建模结果的不确定性的进行综合分析和判断。

3 实现及应用

图5描述的是包含了上述多源多类地质数据融合、模型动态构建与更新和不确定性评估3个方面建模方法整体实现的流程,主要包含数据处理、煤层框架模型的构建、煤层结构模型的构建、煤层模型的

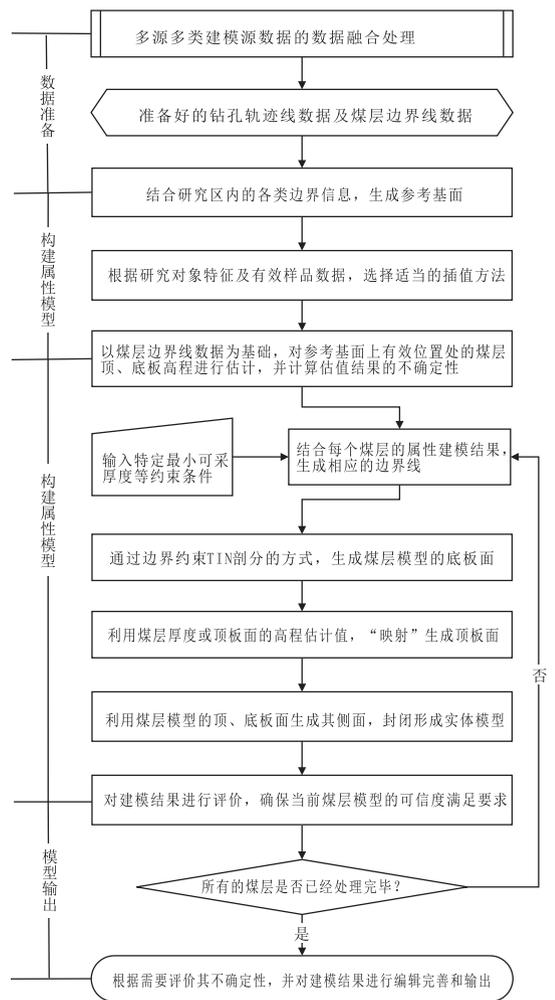


图5 多源地质数据环境下煤层动态建模及其不确定性评估方法的整体实现流程

Fig.5 The workflow of the proposed method for dynamic modeling coal seams and evaluating the uncertainty under multi-source geological data condition

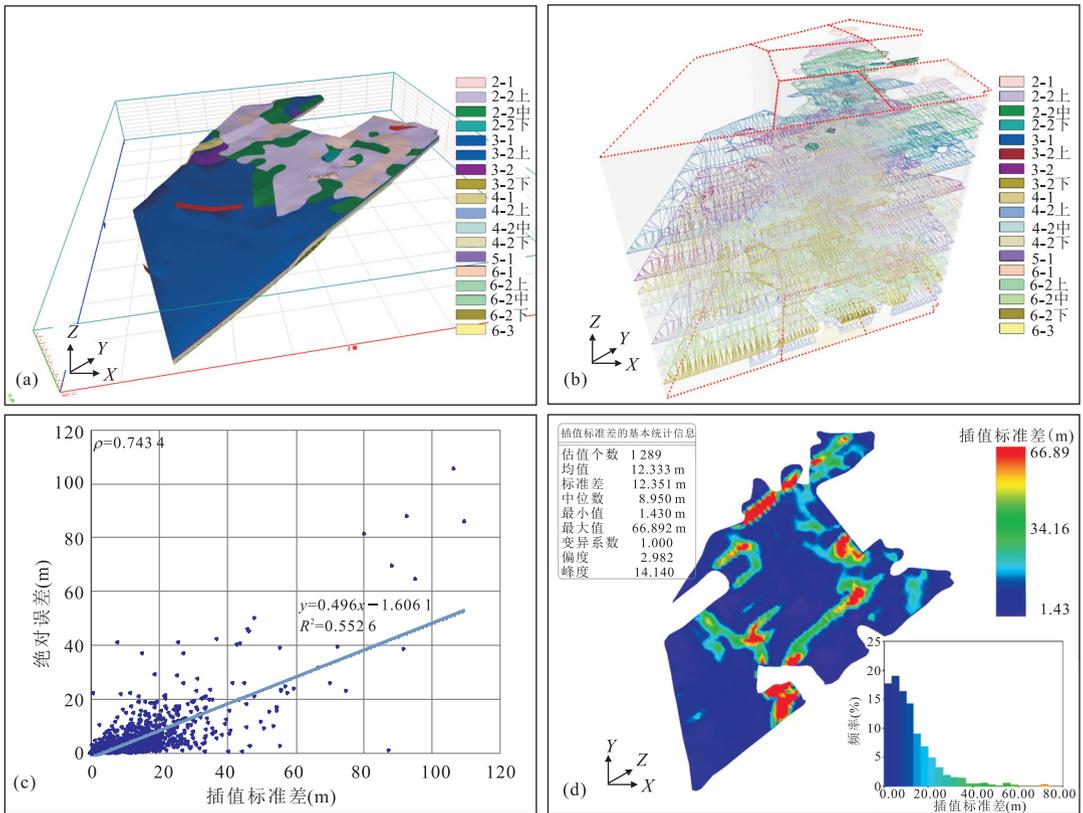


图 6 系列典型的建模成果

Fig.6 A series of typical modeling results

a.为研究区内断层影响下 18 个煤层的三维模型;b.为其在 Z 方向上分离后的空间形态;c.为以某一煤层样品数据为基础进行交叉验证的过程中,插值标准差与绝对误差之间的关系;d.为这一煤层的底板面不确定性评价结果

不确定性评估和模型输出等步骤。

这一方法已通过基于三维地学信息系统平台 QuantyView(原名 GeoView)(Wu *et al.*, 2005)得到了实现,在本研究区范围内的煤层三维建模过程中的应用效果良好.图 6 显示了较典型的建模成果.其中,图 6a 和 6b 描述的是研究区内 5 组共 18 个煤层的三维模型.可以看到,虽然区内煤层整体上呈层状分布,但分层数较多、层与层之间形态各异、同一层内部也可能存在多个矿体并且受到断层的影响,这些因素的存在反映了良好的实际建模质量和效果,在很大程度上验证了本方法的稳健性。

在不确定性建模和评价的过程中,笔者对 IDW 估值结果(取与待估点最近的 6 个煤层边界线数据作为样品进行估值)的插值标准差与真实估值误差之间的相关性进行了统计,研究区所有 18 个煤层的总体相关系数为 0.72.对单个煤层而言,其标准差与真实估值误差的相关系数值在 0.63~0.81 之间,平均值为 0.73.图 6c 描述的是其中一个典型煤层的不确定性有效性验证结果.结果表明,研究区内煤层模

型的不确定性评价结果,无论是对于整体还是对单个煤层模型,插值标准差都能够较好地描述估值结果的可靠性.在确定插值方差可以有效评价建模结果不确定性的基础上,可以利用前面介绍的方法,对重点地段和典型勘查区的不确定性进行分析和评估.图 6d 是利用插值标准差表达的一个典型煤层的顶板不确定性评价结果.从中可以看出,总体上,煤层模型底部大部分位置都具有相对较高的可信度,以台吉召勘查区最为显著,仅在少部分区域存在较大的不确定性.这一结果,可以为研究区今后进一步地质工作的计划和实施提供参考。

4 结果和结论

三维地质模型不仅可以清晰反映地质体的空间展布形态,有助于地质人员达成统一认识,而且还能够用于进行各种空间分析,如储量计算、开采设计等工作.目前它正受到越来越多的专家学者甚至是一线生产、工作人员的重视.因此,对三维模型的动态

构建方法和建模结果质量评估进行研究具有一定的理论和实际意义。

本文所选研究区——内蒙古东胜煤田北部艾来五库沟—台吉召地段勘查区,具有典型煤炭三维地质建模的基本特点和需求,如存在多源多类的建模源数据,需要进行动态建模和不确定性评价等。以此为实例,研究了基于数据的内在逻辑关系和几何结构层次的数据融合、TIN 剖分技术和顶底板高程估值的动态建模、插值方差的煤层模型的局部不确定性评估等方法,并利用三维地学信息系统平台 QuantityView 进行了实现。在本研究区的建模过程中,该方法能够以较高的质量和效率完成研究区内多源多类地质数据情况下煤层模型的动态构建,并能对建模结果的可信度进行评估。这表明,所提方法具有一定的理论意义和可实践性。实际建模过程中,对研究区本身的地质特征及其建模源数据的分析和理解、空间插值方法类型的选择及其计算参数的设置,是影响本方法建模结果质量的关键。

复杂断层情况下的煤层动态建模,以及综合考虑建模源数据和建模过程的建模结果不确定性评估方法等,是值得进一步研究和讨论的,拟另文加以阐述。

References

- Bistacchi, A., Massironi, M., Dal Piaz, G. V., et al., 2008. 3D Fold and Fault Reconstruction with an Uncertainty Model: An Example from an Alpine Tunnel Case Study. *Computers & Geosciences*, 34 (4): 351—372. doi: 10.1016/j.cageo.2007.04.002
- He, Z. W., 2008. Key Techniques of Three-Dimensional Dynamic Modeling in Geological Space (Dissertation). Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 173 (in Chinese with English abstract).
- Huang, X. L., Liang, G. K., Ma, F. Z., et al., 2011. Sedimentary System and Coal Accumulation Characteristics in Northern Dongsheng Coalfield. *Coal Geology of China*, 23(7): 1—6 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Z. B., 2006. Dynamic Modelling Technology of Coal Seam and Its Application. *Journal of China Coal Society*, 31(1): 40—44 (in Chinese with English abstract).
- Lemon, A. M., Jones, N. L., 2003. Building Solid Models from Boreholes and User-Defined Cross-Sections. *Computers & Geosciences*, 29(5): 547—555. doi: 10.1016/S0098—3004(03)00051—7
- Li, S. H., Wu, C. L., Tian, Y. P., et al., 2006. 3D Visual Modeling of Listric Faults and Vector Cut. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 25(Suppl.2): 3841—3846 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. L., Wu, C. L., Zhang, X. L., et al., 2011a. Dynamical Constructing the Solid Model for an Ore-Body with Refined Attributes. *Journal of China University of Mining & Technology*, 40(6): 990—994 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. L., Wu, C. L., Zhang, X. L., et al., 2011b. Key Technologies and Development of a 3D Coal Geological Modeling Information System. *Journal of China Coal Society*, 36(7): 1117—1123 (in Chinese with English abstract).
- Lindsay, M. D., Aillères, L., Jessell, M. W., et al., 2012. Locating and Quantifying Geological Uncertainty in Three-Dimensional Models: Analysis of the Gippsland Basin, Southeastern Australia. *Tectonophysics*, 546—547: 10—27. doi: 10.1016/j.tecto.2012.04.007
- Mao, S. J., 2002. Gray Geographical Information System—The Theory and Technology of Correct Geological Spatial Data Dynamically. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 38(4): 556—562 (in Chinese with English abstract).
- Nie, H. G., Dong, F. C., Zhao, W. K., et al., 2011. Coal-Bearing Strata Sequence Stratigraphic Features and Coal Accumulation Pattern Analysis in Dongsheng Coalfield—A Case Study of Abuhai Exploration Area in Dongsheng Coalfield. *Coal Geology of China*, 23(2): 10—16 (in Chinese with English abstract).
- Pierre, G., 1997. Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Oxford University Press, New York, 483.
- Qu, H. G., 2006. Three-Dimensional Geological Surface Modeling from Intersected Folded Cross-Sections. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 35(4): 411 (in Chinese).
- Sun, X. J., 2011. Division and Correlation of Jurassic Yan'an Formation in Dongsheng Coalfield, Chaideng Prospecting Region (Dissertation). Shandong University of Science and Technology, Qingdao, 55 (in Chinese with English abstract).
- Tian, Y. P., Liu, H. B., Liu, G., et al., 2000. Vector Cut Principle and Method for 3-D Tectonic-Stratigraphic Basin Framework. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 25(3): 306—310 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C. L., 1998. Development and Applications of Geological and Mineral Resources Point-Source Information System (GMPIS). *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 23(2): 193—198 (in Chinese with English abstract).

Wu, C. L., He, Z. W., Weng, Z. P., et al., 2011. Property, Classification and Key Technologies of Three-Dimensional Geological Data Visualization. *Geological Bulletin of China*, 30(5): 642–649 (in Chinese with English abstract).

Wu, C. L., Liu, G., Tian, Y. P., et al., 2005. Geoview: A Computer-Aided System for Informatization of Geological and Mineral Resources Survey and Exploration Works. Proceedings of IAMG'05: GIS and Spatial Analysis, Toronto, 2: 958–963.

Wu, C. L., Liu, G., Tian, Y. P., et al., 2005a. Discussion on Geological Information Science. *Geological Science and Technology Information*, 24(3): 1–8 (in Chinese with English abstract).

Wu, C. L., Liu, G., Tian, Y. P., et al., 2005b. Theory and Method Problems of Informatization of Geological Surveying and Mineral Resource Exploration. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(3): 359–365 (in Chinese with English abstract).

Wu, C. L., Mao, X. P., Tian, Y. P., et al., 2006. Digital Basins and Their 3-D Visualization Modeling. *Geological Science and Technology Information*, 25(4): 1–8 (in Chinese with English abstract).

Wu, L. X., Shi, W. Z., 2005. On Three Dimensional Geosciences Spatial Modeling. *Geography and Geo-Information Science*, 21(1): 1–4 (in Chinese with English abstract).

Wu, Q., Xu, H., Zou, X. K., 2005. An Effective Method for 3D Geological Modeling with Multi-Source Data Integration. *Computers & Geosciences*, 31(1): 35–43. doi: 10.1016/j.cageo.2004.09.005

Yamamoto, J. K., 2000. An Alternative Measure of the Reliability of Ordinary Kriging Estimates. *Mathematical Geology*, 32(4): 489–509. doi: 10.1023/A:1007577916868

Zanchi, A., Francesca, S., Stefano, Z., et al., 2009. 3D Reconstruction of Complex Geological Bodies: Examples from the Alps. *Computers & Geosciences*, 35(1): 49–69. doi: 10.1016/j.cageo.2007.09.003

Zhang, X. L., Wu, C. L., Weng, Z. P., et al., 2010. Research and Application of the Digital Mine Software QuanyMine. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(2): 302–310 (in Chinese with English abstract).

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*, 19(8): 2004–2017 (in Chinese with English abstract).

Zhu, L. F., Wu, X. C., Pan, X., 2009. Theory of Accuracy Assessment and Methods for Error Correction in 3D Geological Structure Models. *Earth Science Frontiers*, 16(4): 363–371 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

何珍文, 2008. 地质空间三维动态建模关键技术研究(博士学位论文). 武汉: 华中科技大学, 173.

黄晓丽, 梁官考, 马飞宙, 等, 2011. 东胜煤田北部延安组沉积体系及聚煤特征. *中国煤炭地质*, 23(7): 1–6.

姜在炳, 2006. 煤层动态建模技术及应用. *煤炭学报*, 31(1): 40–44.

李绍虎, 吴冲龙, 田宜平, 等, 2006. 铲状断层三维可视化建模及矢量剪切. *岩石力学与工程学报*, 25(增刊 2): 3841–3846.

李章林, 吴冲龙, 张夏林, 等, 2011a. 带精细属性特征的矿体实体模型动态构建方法. *中国矿业大学学报*, 40(6): 990–994.

李章林, 吴冲龙, 张夏林, 等, 2011b. 煤炭三维地质建模信息系统的研制及关键技术. *煤炭学报*, 36(7): 1117–1123.

毛善君, 2002. 灰色地理信息系统——动态修正地质空间数据的理论和技术. *北京大学学报(自然科学版)*, 38(4): 556–562.

聂浩刚, 董福辰, 赵维宽, 等, 2011. 东胜煤田含煤岩系层序地层特征与聚煤规律分析——以东胜煤田阿不亥煤炭勘查区为例. *中国煤炭地质*, 23(2): 10–16.

屈红刚, 2006. 基于交叉折剖面的 3 维地质表面建模方法研究. *测绘学报*, 35(4): 411.

孙希杰, 2011. 东胜煤田柴登勘查区侏罗系延安组地层划分与对比研究(硕士论文). 青岛: 山东科技大学, 55.

田宜平, 刘海滨, 刘刚, 等, 2000. 盆地三维构造—地层格架的矢量剪切原理及方法. *地球科学——中国地质大学学报*, 25(3): 306–310.

吴冲龙, 1998. 地质矿产点源信息系统的开发与应用. *地球科学——中国地质大学学报*, 23(2): 193–198.

吴冲龙, 何珍文, 翁正平, 等, 2011. 地质数据三维可视化的属性、分类和关键技术. *地质通报*, 30(5): 642–649.

吴冲龙, 刘刚, 田宜平, 等, 2005a. 论地质信息科学. *地质科技情报*, 24(3): 1–8.

吴冲龙, 刘刚, 田宜平, 等, 2005b. 地矿勘查工作信息化的理论与方法问题. *地球科学——中国地质大学学报*, 30(3): 359–365.

吴冲龙, 毛小平, 田宜平, 等, 2006. 三维数字盆地构造——地层格架模拟技术. *地质科技情报*, 25(4): 1–8.

吴立新, 史文中, 2005. 论三维地学空间构模. *地理与地理信息科学*, 21(1): 1–4.

张夏林, 吴冲龙, 翁正平, 等, 2010. 数字矿山软件(QuanyMine)若干关键技术的研发和应用. *地球科学——中国地质大学学报*, 35(2): 302–310.

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*, 19(8): 2004–2017.

朱良峰, 吴信才, 潘信, 2009. 三维地质结构模型精度评估理论与误差修正方法研究. *地学前缘*, 16(4): 363–371.