

DOI:10.19948/j.12-1471/P.2023.01.09

# 三维地质模型质量评估方法研究进展综述

王元昊<sup>1</sup>,高振记<sup>2\*</sup>,宋越<sup>2</sup>

(1.中国地质科学院,北京 100037;2.中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心,北京 100055)

**摘要:**三维地质模型在地质找矿和资源评价等应用中具有重要作用,模型质量直接决定模型的应用潜力及应用成效。本文综述了国内外三维地质模型质量评估研究进展,系统阐述了影响三维地质模型质量的因素,包括建模地质对象复杂程度、建模数据源精度与质量、三维地质建模方法、建模人员专家知识等。同时,对当前主要的三维地质模型质量评估方法原理和优缺点进行了分析,认为三维地质模型质量评估已经从定性评估逐步进入定量评估时代。最后,总结了三维地质模型质量评估方法相关研究存在的问题,并且探讨了其未来发展趋势。

**关键词:**三维地质模型;模型不确定性;模型质量;评估方法;影响因素

**中图分类号:** P628

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2097-0188(2023)01-0080-07

20世纪90年代以来,随着计算机技术、GIS技术的发展,数字城市、智慧矿山等概念的提出,以及“数字地球”战略的规划与实施,三维地质建模技术获得了突飞猛进的发展。三维地质建模的概念最早是由加拿大学者 Simon W.Houlding 于 1993 年提出的,即运用计算机技术,在三维环境下将空间信息管理、地质解译、空间分析和预测、地学统计、实体内容分析以及图形可视化等工具结合起来,并用于地质分析的技术<sup>[1]</sup>。在过去数十年的努力下,发达国家积累了一批不同尺度的三维地质框架模型,国土面积小的一些国家建立了全国性的三维地质框架模型,国土面积大的国家建立了省域或州域和区域性的三维地质模型<sup>[2]</sup>。三维地质模型已成功应用于油气勘探、地下水模拟、矿山开采、城市规划<sup>[3]</sup>、固体矿产资源储量评价等众多领域中。总之,伴随着全球信息化的发展,三维地质建模技术将会引领未来地质行业。

随着三维地质建模技术的广泛应用,建模源数据的精度和误差、建模对象地质条件的复杂性、三维地质建模方法多样性等多种因素,导致三维地质模型呈现不同维度不确定性特征。国内外对于三维地质模型的不确定性研究逐渐重视起来,数字矿山、城市地质、煤田地质等领域开展了三维地质模型不确定

性的来源以及传播研究,并且基于误差理论、数理统计理论、统计学分析等方法开展了不确定性评价,定量描述三维地质模型不确定性区域。不确定性评价的结果反映了模型还原真实世界准确程度的评估,主要作用是指出模型各处的不确定性大小及其分布,度量建模时各方面不确定性因素对模型质量的影响,为模型使用者提供质量参考,并为后续模型修正完善提供方向<sup>[4]</sup>。实际上,在三维地质模型的应用中,模型质量的高低最终决定了模型的适用范围和场景,模型质量难以评估,将会严重限制三维地质模型推广与应用。因此,研究三维地质模型的质量评估方法具有现实意义。所谓三维地质模型质量评估,就是运用一定的技术手段或方法,给三维地质模型质量建立一个量度,进而评估三维地质模型的精度、可靠性,为模型使用者选择模型提供有效的参考。

## 1 国内外研究现状

本质上,三维地质模型是一种数学模型,三维地质建模是一个数学模拟的过程,建立精确、可靠的三维地质模型是三维地质模拟的基本目标<sup>[5]</sup>。基于此目标,国内外一些学者已先后开展了三维地质模型不确定性评价及质量评估的相关研究工作。

收稿日期:2022-10-25

资助项目:中国地质调查局项目“地球科学数据集成与服务(DD20221785)”

作者简介:王元昊(1998-),男,在读硕士研究生,就读于中国地质科学院地球探测与信息技术专业,主要从事三维地质建模技术及模型质量评估工作,E-mail:wangyuanhao20@mails.ucas.ac.cn。

\*通讯作者:高振记(1972-),男,博士,研究员,主要从事地质信息化战略规划、地质大数据组织管理分析挖掘、地下空间信息管理理论和应用工作,E-mail:gzhnji@mail.cgs.gov.cn。

<http://hbdz.org.cn>

国外的一些发达国家对三维地质模型的不确定性研究起步较早,具有典型意义的进展主要包括采用克里金技术、位势场法等方法实现地质体几何模型不确定性的评估。Pomian-Srzednicki<sup>[6]</sup>和Tacher等<sup>[7]</sup>研究了地下三维地质模型的不确定性问题,提出将地质界面处理为高斯随机场,应用克里金技术估计研究区域的局部方差。Yamamoto<sup>[8]</sup>通过实验证明当且仅当普通克里格权值为正或约束为正时,插值方差可以有效替代传统的克里格方差。Aug等<sup>[9]</sup>和Chiles等<sup>[10]</sup>提出通过位势场法创建三维地质模型,将协同克里格标准差与势场估计联系起来,从而对三维地质模型进行不确定性估计。随着近几十年发展起来的新的数学方法,如蒙特卡洛法、信息熵、模糊地质统计、神经网络等方法,同样也适用于处理地质中的不确定性。LI Shuxing等<sup>[11-13]</sup>和Evren等<sup>[14,15]</sup>基于随机模拟(蒙特卡洛法),产生一系列合理的模型,将其分别与待评估模型进行对比,进一步处理生成扰动概率分布模型来表示三维地质建模中的不确定度估计,并针对不同的情况提出改进的蒙特卡洛不确定性估计方法。Wellmann等<sup>[16,17]</sup>和Schweizer等<sup>[18]</sup>应用信息熵的概念实现对整体模型质量的量化,并与模型相异度结合改进对模型质量定量评估的方法。

国内关于三维地质模型质量评估的相关研究起始于21世纪初期,主要应用于城市地质、油气油藏、数字煤矿等领域,为油田开发、矿山建设、深部矿产资源预测评价、城市地下资源的综合利用等方面提供可靠的科学依据。崇仁杰等<sup>[19]</sup>、孙业恒<sup>[20]</sup>、徐传龙<sup>[21]</sup>及张洋洋等<sup>[22]</sup>从构造模型和属性模型两个方面分析三维地质模型的质量控制方法,在油藏储层中得到应用并取得较好效果。李楠等<sup>[23]</sup>、王鹏飞等<sup>[24]</sup>、杨建民等<sup>[25]</sup>、范春玉等<sup>[26]</sup>及李章林等<sup>[27]</sup>基于统计模型、蒙特卡洛模拟等不同方法对三维地质模型进行不确定性评估,实现三维地质模型质量的定量化评价。刘光伟等<sup>[28]</sup>、殷大发<sup>[29]</sup>、谭学群等<sup>[30]</sup>及张庆龙等<sup>[31]</sup>确定具有代表性的多级指标,通过层次分析法、熵权法等方法确定指标权重,构建定量评价体系,客观且全面地评价断块油藏三维模型的质量。

## 2 影响三维地质模型质量的因素分析

主观上,一个完整的三维地质模型主要受建模人员知识储备和对建模对象熟悉程度等影响。但在

客观上,其质量除受限于模型本身的建模对象复杂程度和用途外,还受到建模数据的质量与精度、建模方法等影响。本文在前人研究基础上<sup>[5,6,28,29,32,33]</sup>,将影响三维地质模型质量的因素归纳为建模地质对象复杂程度、建模数据源精度与质量、三维地质建模方法、建模人员专家知识。

### 2.1 建模地质对象复杂程度

地质体是经过多期次、多体制的构造运动形成的,是高度复杂的综合整体<sup>[34]</sup>。根据工程规模大小、地形地质条件等可将建模地质对象分为简单构造区、中等复杂构造区及复杂构造区。对于不同复杂程度的建模对象,对其进行三维地质建模的难度是不一样的,例如仅含有第四系地层的简单构造区,相对于含有断层、褶皱、侵入体等地质构造的变质岩、火山岩复杂构造区,其建模难度是相对较低的,所以在同等建模条件下,简单构造区的模型质量比复杂构造区模型质量要更高。因此,建模地质对象复杂程度会对三维地质模型的质量产生一定的影响。

### 2.2 建模数据源精度与质量

构建三维地质模型的数据源包括钻孔、剖面、路线地质调查、平面地质图、地球物理数据(地震、电法、磁法、重力)、地球化学数据、地形数据、遥感影像、勘探工程数据等<sup>[35]</sup>。建模数据源精度的高低与质量的好坏很大程度上影响到三维地质模型的质量。

在构建三维地质模型之前,需要针对建模区域开展地质调查工作,收集建模区域内相关的地质图、钻孔、数字高程模型等等一系列建模数据,其调查工作程度,即建模数据源的精度,是决定模型质量的一个重要因素。不同的调查精度直接决定了建模的模型精度和模型可靠性,如利用1/50万调查精度的数据构建出等同于1/5万精度的三维地质模型,其质量就会大打折扣。另外,在野外采集数据过程中,由于测量工具自身存在的误差和人为操作不当等因素,造成采集到的原始数据与实际真值存在一定的差异,使得建模数据具有很大的不确定性和模糊性,最终也会影响到三维地质模型的质量。

### 2.3 三维地质建模方法

目前,三维地质建模方法基于建模数据源可分为基于钻孔、基于剖面、基于地球物理数据、基于多源数据融合等几类。基于建模内容分为结构建模和属性建模,综合应用地表地质、钻探、地球物理、地球化学等资料,将地表、浅层与深层各方面的地质构造

结合起来,进行地质实体的几何形态建模为结构建模;通过建模区域内电阻率、温度、地应力等属性数据进行地质实体内部属性参数(如孔隙度、渗透率、含油饱和度等)的建模为属性建模<sup>[36-38]</sup>。基于建模过程和模型的数学特征可以分为显式建模和隐式建模,所谓显式建模,即在三维可视化环境下,通过人工交互进行线框连接,所见即所得地建立三维地质模型;隐式建模是指基于空间采样数据,通过空间插值构建三维实体表面的隐式函数表达<sup>[39]</sup>。各种建模方法及其影响因素见表1。

在三维地质界面拟合过程中,往往也会需要插值方法对地层表面的曲面形态进行模拟,对于较复杂的地质实体,采用常规的插值方法可能无法构建出精确的三维模型,还需要用到高阶插值方法。常用的插值方法有:克里金插值法(Kriging)、样条函数法(Spline)、反距离加权插值法(IDW)、离散光滑插值法(DSI)等。这些方法都是通过已知离散点的数据来推算未知区域,进而转换为连续的数据曲面,会引起一定的误差,无法保证模型结果的质量。

#### 2.4 建模人员专家知识

三维地质建模本质上是地质学家采用计算机对自己认知地质体的直观表达的过程,建模人员对于建模对象的熟悉程度和自己的专业水平,对建设的模型质量具有直接的影响。对于断层、褶皱、侵入体、尖灭等特殊地质构造,由于其形态毫无章法,且可以获得的约束数据较少,在建模过程中,需要建模人员结合专业的地质知识来进行推导。另外,建模人员在推测的过程中,也会凭借个人的经验对地层进行一些必要的简化,导致反映的地质构造会与实际地质实体有偏差。

### 3 主要三维地质模型质量评估方法

三维地质模型是对地质实体的一种近似描述,

在不确定性因素的作用下,模型的质量势必会受到影响。下面总结几类常见的评估方法,包括统计模拟、信息熵法和多指标综合评估法。

#### 3.1 统计模拟

目前,三维地质建模技术的数据源类型种类繁多,其中钻孔数据是构建三维地质模型的主要数据。因此,通过从钻孔数据中预留一部分数据用于验证模型,将其与同一地理位置处的模拟钻孔(模型孔)结果进行对比,计算模型孔与验证孔的分层厚度误差、地层埋深误差,并对分层厚度误差结果和地层埋深误差结果绘制统计曲线图,且进行极小值、极大值、均值、中位值、标准差、方差、5%截尾均值、10%截尾均值等指数的统计,以实现三维地质模型质量的定量评估。Lark等<sup>[40,41]</sup>通过设计实验并保留验证钻孔,将得到的模型与验证钻孔的观测结果进行比较,使用解释误差的统计模型(均值、方差等)量化三维地质模型的不确定性,评估模型的可信度。范春玉等<sup>[26]</sup>为解决城市三维地质模型精度无法定量评估的难题,提出采用未参与建模的钻孔数据对模型进行分层厚度、地层埋深误差计算的方法,实现城市三维地质模型精度的定量评价,为三维地质模型的应用提供科学依据。李章林等<sup>[27]</sup>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,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可靠性评估。统计模拟流程图如图1所示。

该方法计算简单、高效,可快速实现三维地质模型的质量评估,但是其仅适用于钻孔数据较多且分布均匀的建模区域,在面对具有复杂地质构造(断层、褶皱等构造)的建模区域时,其评估效果会受到较大影响,在实际应用中具有一定的局限性。

#### 3.2 信息熵法

信息熵是在20世纪50年代引入的,其基本概念

表1 不同建模方法的精度影响因素

Table 1 Factors affecting the accuracy of different modeling methods

分类依据	建模方法	影响因素
基于建模数据源	基于钻孔	由于钻孔数据的分布不均一性会导致钻孔间的地质信息出现缺失的情况。难以反映精度较高的地质信息,会丢失一些细节之处。
	基于剖面	所采样有关深度的地质信息反映地下情况有限,且其结果解释不统一,会导致模型出现多解性。
	基于地球物理数据	不同来源的数据具有不同的数据精度,融合各种类型的数据会造成地质界面与真实情况存在差异。
基于建模内容	基于多源数据融合	
	结构建模	控制点处难以保证地层界面的准确性以及点间未知区域的精度。
基于建模过程和模型的数学特征	属性建模	网格化过程中网格剖分方法、网格大小、网格定向、网格形状等因素影响属性模型的精度。
	显式建模	对于无钻孔采样的区域,模型空间比较粗放、生硬,模型表面较为粗糙、棱角尖利。
	隐式建模	对于褶皱、断层、尖灭、透镜体、丘状构造等复杂地质构造表达能力较弱。

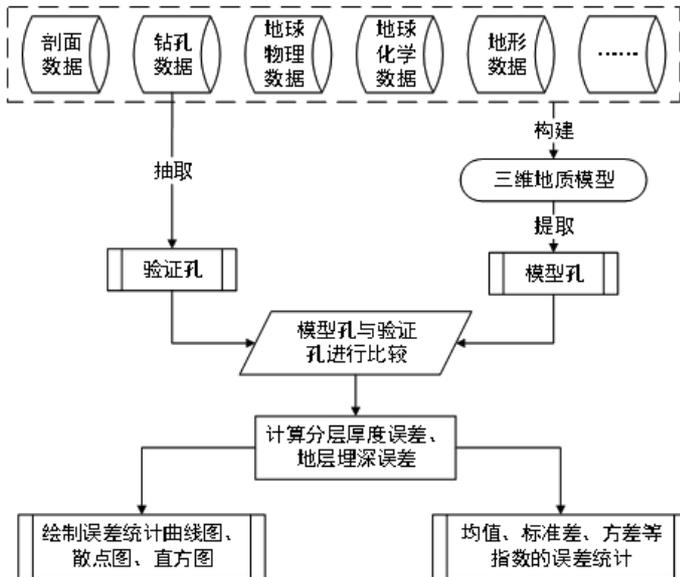


图1 统计模拟流程图

Fig.1 Flow chart of statistical simulation

是描述事件发生的不确定性,是可视化和分析复杂三维地质模型不确定性的一种强有力的方法。若将可能发生的结果当作三维地质模型中的地质单元,则可将信息熵应用到地质模型中。将三维模型细分为一系列大小相等的离散单元,应用信息熵的概念,计算单元熵可视化各位置处的不确定性,模糊性的熵作为地质单元的不确定性评估,最终基于上述两个熵的概念扩展出平均熵实现对整体模型质量的度量。Wellmann等<sup>[16,17]</sup>应用信息熵的概念可视化地质模型中的不确定性,可以识别模型内的不确定性区域、评估地质单元的不确定性以及对整体模型质量的量化。Schweizer等<sup>[18]</sup>提出了一种利用信息熵和模型相异度对连续模型的不确定性进行定量评估的方法,信息熵和模型相异度概念的结合改进了三维地质建模中的不确定性评估。

基于信息熵进行不确定性分析的优势在于,对于模型的每个子区域,它将多个结果的概率合并为一个有意义的测量值,并且基于合理的理论考虑度量的性质,即当不存在不确定性时熵值为0,不确定性最高时熵值为最大,适合表示三维地质模型的质量。但该方法的一些限制也是需要注意的,在研究模型方位不确定性时只能通过代替表面解释的扰动进行分析,这会导致对不确定性的分析产生系统性低估。信息熵法流程图如图2所示。

### 3.3 多指标综合评估法

地质体本身复杂,且高精度三维空间数据获取

难度大、成本高,三维地质建模流程各个环节都隐藏着不确定性问题<sup>[32]</sup>。首先,针对建模对象的地质特点,分析三维地质建模流程中影响模型质量的因素,构建质量评估因素集;在质量评估因素集的基础上,推导出描述三维地质模型质量不确定性的误差指标,这些指标可用于定量描述出三维地质模型质量不确定性的量值大小,并且在几何及物理意义上是明确和易于理解的。经验丰富的地质专家对各指标进行评价,建立评价准则,并对评价准则量化;在各指标评价准则量化确定之后,还要清楚各指标在总体评估中的作用大小,可以通过层次分析-熵值定权法<sup>[42]</sup>等方法确定其在总体中的权重;利用实际生成的模型与评价准则进行对比,得到各指标的赋值,对于可量化的指标概念采用统计法即可得到指标的赋值,对于不可量化的模糊概念指标,其赋值可以通过专家打分法进行模糊评价;最后,结合各指标赋值结果与相对应的权重,对三维地质模型质量进行一个全方位的综合评估。多指标综合评估法流程图如图3所示。

武强等<sup>[43]</sup>通过分析三维地质建模各个环节中影响空间数据质量的因素,建立了空间信息质量检测模型。刘光伟等<sup>[28]</sup>提出采用C-F方法(可信度方法)对三维地质建模各阶段不确定性进行统一度量,以层次分析法(AHP)确定了各证据权重,并且以扎哈淖尔露天矿为工程实例,构建了扎哈淖尔露天矿三维地质模型精度评价体系,有效地实现三维地质模型精度定量化评价,最后利用实际采动量核算的方法,验证该方法是可行的。殷大发<sup>[29]</sup>基于熵权法的概

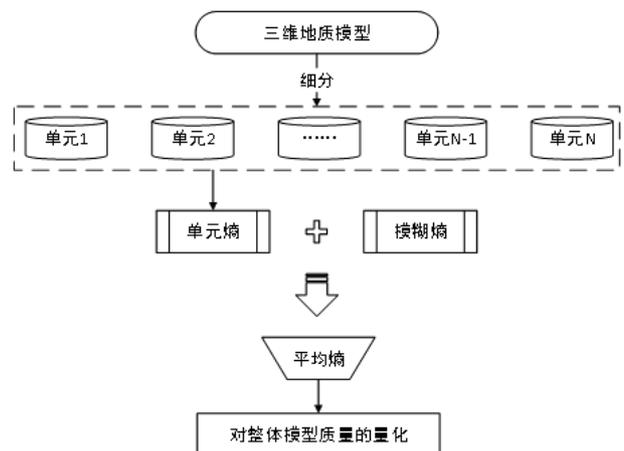


图2 信息熵法流程图

Fig.2 Flow chart of information entropy method

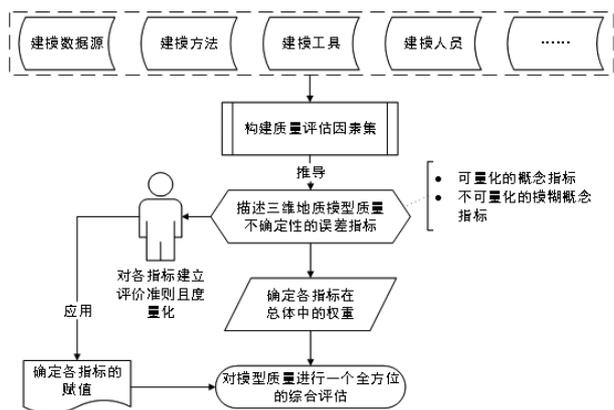


图3 多指标综合评估法流程图

Fig.3 Flow chart of multi-indicator comprehensive evaluation method

念对三维地质模型进行模糊综合评价。谭学群等<sup>[30]</sup>和张庆龙等<sup>[31]</sup>以复杂断块油藏为例,选取多个关键指标,利用层次分析法设置权重,根据累计得分得出模型质量的评估结果。

该方法可以对三维地质建模各阶段不确定性进行统一度量,客观地评估整个三维地质建模过程,不仅能够实现对三维地质模型质量的定量化评估,而且还可以指出模型有待改进和提升的方面。然而它也有一定的不足,针对不同类型的地质模型,关键指标的选取将会决定模型质量的评估效果。

## 4 存在问题

纵观前人研究成果,可以发现三维地质模型质量评估已经从定性评估逐步进入定量评估时代。当前,三维地质模型质量评估方法相关研究主要存在以下几方面问题:

(1) 国内外学者主要集中于三维地质模型不确定性评估方法的研究,对模型质量评价研究相对较少。常采取位势场法、随机模拟、信息熵等数学方法对模型不确定性进行评估及量化,侧重于对模型局部进行评价,或针对三维地质建模中某一具体不确定性问题研究较为深入。

(2) 尽管有少数学者对模型质量的定量评估进行尝试<sup>[28-31]</sup>,但是它们仅适用于某些特定的研究区或者一些特定类型的三维地质模型,普适性相对较弱。

(3) 缺乏用于指导模型使用者确定模型的精度、可靠性及适用场景的度量指标。

总而言之,针对一个给定的三维地质模型如何科学、准确地判定其精度、可靠性、适用范围和场景,

仍是三维地质模型应用面临的一个重要难题。

## 5 结论

三维地质模型有着广阔的应用前景,其质量优劣直接制约着三维地质模型的应用效果,三维地质模型质量评估方法研究是当前三维地质模型应用推广中一项重要任务。

本文总结了前人在三维地质模型不确定性评估等方面的一些研究进展,并结合文献资料和三维地质模型实际情况,总结了影响三维地质模型质量的四大类因素,以期三维地质模型质量定量化评估以及相关领域的学者提供参考和借鉴。分析了当前主要的三维地质模型质量评估方法原理和优缺点,便于建模人员对其构建的模型进行相关的质量检验。由于三维地质建模技术已经覆盖了工程地质、水文地质、环境地质、灾害地质、生态地质等众多领域,在不同领域中,应用的三维模型尺度也有所不同。因此,今后三维地质模型质量评估的重点研究方向是针对不同应用领域、不同尺度的三维地质模型,研究相对应的评估方法,进一步提升模型质量评估可靠性,为三维地质模型应用推广提供重要技术支撑。

### 参考文献:

- [1] S. HOULDING. 3D Geoscience Modeling: Computer Techniques for Geological Characterization[M]. Springer-Verlag, 1994.
- [2] 姜作勤. 发达国家三维地质建模的现状与发展趋势[J]. 地质调查动态, 2016(17).
- [3] 马震, 黄庆彬, 林良俊, 等. 雄安新区多要素城市地质调查实践与应用[J]. 华北地质, 2022, 45(01): 58-68.
- [4] 梁栋. 三维地质模型不确定性分析方法研究[D]. 中国地质大学, 2021.
- [5] 朱良峰, 吴信才, 潘信. 三维地质结构模型精度评估理论与误差修正方法研究[J]. 地学前缘, 2009, 16(04): 363-371.
- [6] POMIAN-SRZEDNICKI I. Calculation of geological uncertainties associated with 3-D geological models[J]. EPFL, 2001.
- [7] TACHER L, POMIAN-SRZEDNICKI I, PARRIAUX A. Geological uncertainties associated with 3-D subsurface models[J]. Computers & Geosciences, 2006, 32(2): 212-221.
- [8] YAMAMOTO J. An Alternative Measure of the Reliability of Ordinary Kriging Estimates[J]. Mathematical Geology, 2000, 32: 489-509.
- [9] AUG C, CHILÈS J P, COURRIOUX G, et al. 3D Geological

- Modelling and Uncertainty: The Potential-field Method[M]. *Quant. Geol. Geostatistics*, 2005, 14: 145-154.
- [10] AUG C. Modelling the Geometry of Geological Units and its Uncertainty in 3D From Structural Data: The Potential-Field Method[J]. R. Dimitrakopoulos S. Ramazan (eds.), *Proc. of International Symposium on Orebody modelling and strategic mine planning*, Perth, 2004.
- [11] LI S, ROUSSOS D. Quantification and assessment of fault uncertainty and risk using stochastic conditional simulations [J]. *Journal of Coal Science and Engineering*, 2002, 8.
- [12] LI S, SCOTT J, DUNN D. Quantification of geological uncertainty and risk using stochastic simulation and applications in the coal mining industry[J]. *Australasian Institute of Mining and metallurgy Spectrum Series*, 2007.
- [13] LI S XING, KNIGHTS P, DUNN D. Geological uncertainty and risk: implications for the viability of mining projects[J]. *Journal of Coal Science and Engineering (China)*, 2008, 14 (2): 176.
- [14] PAKYUZ-CHARRIER E J, LINDSAY M D, OGARKO V, et al. Monte Carlo Simulations for Uncertainty Estimation in 3D Geological Modeling, A Guide for Disturbance Distribution Selection and Parameterization[J]. *Solid Earth*, 2018, 9: 385-402.
- [15] PAKYUZ-CHARRIER E, GIRAUD J, OGARKO V, et al. Drillhole uncertainty propagation for three-dimensional geological modeling using Monte Carlo[J]. *Tectonophysics*, 2018, 747-748: 16-39.
- [16] WELLMANN J F, REGENAUER-LIEB K. Uncertainties have a meaning: Information entropy as a quality measure for 3-D geological models[J]. *Tectonophysics*, 2012, 526-529: 207-216.
- [17] WELLMANN J F. Information Theory for Correlation Analysis and Estimation of Uncertainty Reduction in Maps and Models[J]. *Entropy*, 2013, 15(4): 1464-1485.
- [18] SCHWEIZER D, BLUM P, BUTSCHER C. Uncertainty assessment in 3-D geological models of increasing complexity [J]. *Solid Earth*, 2017, 8(2): 515-530.
- [19] 崇仁杰, 于兴河. 储层三维地质建模质量控制的关键点 [J]. *海洋地质前沿*, 2011, 27(07): 64-69.
- [20] 孙业恒. 油藏地质模型质量控制与验证方法[J]. *断块油气田*, 2011, 18(01):43-46.
- [21] 徐传龙. 三维地质建模质量控制方法及应用[J]. *辽宁化工*, 2014, 43(08):1082-1085.
- [22] 张洋洋, 郭敏, 刘志慧, 等. 油藏三维地质模型质量控制研究——以D油田E块为例[J]. *天然气与石油*, 2020, 38 (01): 65-71.
- [23] 李楠, 李苍柏, 宋相龙, 等. 一种三维地质几何模型不确定性评价方法[J]. 2018年中国地球科学联合学术年会论文集(四十三)——专题93:超深层(油气)重磁地震勘探技术、专题94:深部预测方法, 2018: 91-93.
- [24] 王鹏飞, 高振南, 李俊飞, 等. 基于数理统计方法的地质模型不确定性评价[J]. *地质科技情报*, 2019, 38(02): 291-296.
- [25] 杨建民, 权勃, 张文童, 等. 基于蒙特卡洛模拟的三维地质模型不确定性分析[J]. *断块油气田*, 2020, 27(03): 309-312.
- [26] 范春玉, 曾玉清, 毛寅, 等. 丘陵地区复杂三维城市地质模型精度评价研究——以长株潭城市群核心区为例[J]. *中国金属通报*, 2020, (02): 84-85+87.
- [27] 李章林, 吴冲龙, 张夏林, 等. 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[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2014, 39(10):1498-1506.
- [28] 刘光伟, 宋佳琛, 白润才, 等. 基于C-F方法三维地质模型精度评价研究[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(11):192-198.
- [29] 殷大发. 煤矿三维地质模型精度评价及动态更新技术探讨[J]. *煤矿开采*, 2018, 23(04): 20-24.
- [30] 谭学群, 刘云燕, 周晓舟, 等. 复杂断块油藏三维地质模型多参数定量评价[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(01): 185-194.
- [31] 张庆龙, 刘磊, 贾志伟, 等. 复杂断块油藏三维地质模型的多级定量评价[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2021, 43(03): 61-70.
- [32] 武强, 徐华. 数字矿山中三维地质建模方法与应用[J]. *中国科学:地球科学*, 2013, 43(12):1996-2006.
- [33] 姬广军, 张永波, 朱吉祥, 等. 三维地质建模精度影响因素及质量控制[J]. *桂林理工大学学报*, 2020, 40(01): 85-94.
- [34] 陈昌彦, 张李节, 王思敬, 等. 断裂构造研究进展对工程地质学的启示[J]. *地质论评*, 2002(05): 487-494.
- [35] 自然资源部中国地质调查局. 三维地质模型元数据[R]. 2019.
- [36] 刘少华, 肖克炎, 王新海. 地质三维属性建模及其可视化 [J]. *地质通报*, 2010, 29(10):1554-1557.
- [37] 陈兵, 朱泳标, 张燕. 基于EVS的三维地质建模研究[J]. *高速铁路技术*, 2020, 11(06): 6-10+18.
- [38] 何登发, 杨庚, 管树巍, 等. 前陆盆地构造建模的原理与基本方法[J]. *石油勘探与开发*, 2005, (03): 7-14.
- [39] 郭甲腾, 吴立新, 周文辉. 基于径向基函数曲面的矿体隐式自动三维建模方法[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(08): 2130-2135.
- [40] LARK R M, MATHERS S J, THORPE S, et al. A statistical assessment of the uncertainty in a 3-D geological framework model[J]. *Proceedings of the Geologists' Association*, 2013, 124(6): 946-958.
- [41] LARK R M, THORPE S, KESSLER H, et al. Interpretative modelling of a geological cross section from boreholes: sources of uncertainty and their quantification[J]. *Solid Earth*, 2014, 5(2): 1189-1203.
- [42] 王兰化, 张莺. 层次分析-熵值定权法在城市建设用地适宜性评价中的应用[J]. *地质调查与研究*, 2011, 34(04): 305-312.
- [43] 武强, 徐华. 虚拟地质建模与可视化[M]. 科学出版社, 2011.

## Review of research progress on quality assessment methods of 3D geological models

WANG Yuan-hao<sup>1</sup>, GAO Zhen-ji<sup>2\*</sup>, SONG Yue<sup>2</sup>

(1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Command Center of Natural Resources Comprehensive Survey, China Geological Survey, Beijing 100055, China)

**Abstract:** Three-dimensional geological model plays an important role in geological prospecting and resource evaluation, and its quality determines the application potential and effect of the model. This paper reviews the research progress of 3D geological model quality evaluation at home and abroad, and systematically expounds the factors that affect the quality of 3D geological model, including the complexity of modeling geological objects, the accuracy and quality of modeling data sources, the methods of 3D geological modeling, and the expert knowledge of modeling personnel. At the same time, the paper analyzes the principle, advantages and disadvantages of the main methods of quality evaluation of 3D geological models, and holds that the quality evaluation of 3D geological models has gradually entered the era of quantitative evaluation from qualitative evaluation. Finally, this paper summarizes the problems existing in the research of 3D geological model quality assessment methods, and discusses its future development trend.

**Key words:** 3D geological model; model uncertainty; model quality; evaluation methods; influencing factors

## Geochemical characteristics and tectonic implications of the Neoproterozoic A-type granites in Red Sea State, Sudan

ZHOU Zuo-min<sup>1,2</sup>, LI Yong<sup>3</sup>, LIU Xiao-yang<sup>1,2</sup>, WU Xing-yuan<sup>1,2</sup>

(1. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 2. Mining institute of Southern Africa, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 3. Wuhan Center, China Geological Survey, Wuhan 430205, China)

**Abstract:** The Red Sea State of Sudan is located in the Nubian shield. A series of Neoproterozoic granites are identified in the Red Sea State, which consist of medium-coarse- and medium-fine-grained syenogranites and middle-fine-grained alkali feldspar granites. Zircon U-Pb dating implies the granites are intruded in  $713 \pm 4$  Ma, which are formed in Pan-African orogenic event. They show high  $\text{SiO}_2$  contents (70.80% ~ 77.83%). They are metaluminous or weak peraluminous with A/CNK ratios of 0.94 ~ 1.08 and A/NK ratios of 1.12 ~ 1.44. They show the similar Chondrite-normalized REE and multi-trace elements patterns. The REE patterns are right-inclined with REE medium differentiations of LREE/HREE ratios of 2.46 ~ 7.13 and display "V" shaped curve and medium to strong Eu anomaly with  $\delta\text{Eu}$  values of 0.30 ~ 0.57. The granites are characterized by the enrichment of large ion lithophile elements (LILEs) such as Th, U, K and high field-strength elements (HFSEs) such as Zr, Hf and by the depleted Nb, Ta, Sr, P and Ti contents. They show low  $I_{\text{Sr}}$  ratios, depleted  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ ,  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  values and the similar  $T_{\text{DM1}}$  and  $T_{\text{DM2}}$  values. The granites chemically show  $A_2$ -type affinity. We propose that the 713 Ma A-type magmatism might be driven by upwelling of asthenosphere and subsequent partial melts of juvenile crust of Nubian shield on conditions of obvious Heating and decompression in a back-arc extensional setting.

**Key words:** Red Sea State in Sudan; Nubian shield; Neoproterozoic; A-type granite; juvenile crust; back-arc extensional setting