三维地质建模技术的最新进展和发展趋势

陈麒玉[1a,1b,1c,2*]，荀磊[1a]，崔哲思[1a]，周瑞鸿[1a]，陈大颉[1a]，刘刚[1a,1b,1c]

1. 中国地质大学（武汉）a. 计算机学院；b. 智能地学信息处理湖北省重点实验室；c. 自然资源信息管理与数字孪生工程软件教育部工程研究中心，武汉 430078；
2. 贵州省战略矿产智慧勘查重点实验室，贵阳 550081

* 通信作者，E-mail：qiyu.chen@cug.edu.cn

2024-05-28 收稿；2024-09-10 修回；2024-11-28 接受

基金项目：国家自然科学基金项目(42172333; 42372345)；黑龙江省“揭榜挂帅”科技攻关项目“古龙页岩油大数据分析系统构建技术研究”(2021ZXJ01A12; DQYT-2022-JS-750)；武汉市知识创新专项-曙光计划项目(2022010801020206)

中图分类号：TP31；P628　　文章编号：2096-8523(2025)03-0373-15　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240284

摘　要：三维地质建模是一种综合运用计算机技术、空间信息理论、科学可视化、数理统计等前沿技术方法，对地质现象及过程进行三维数字化描述、表征和重建的技术。其目的是为地球科学家及地质工作者提供一个集科学研究、辅助设计和决策支持为一体的可视化平台，以便更加深入地理解和利用隐藏在地质现象和过程背后的本质涵义和规律。基于野外地质数据构建研究区域的三维地质模型已经成为涉及基础地质调查、自然资源勘查开发、地质灾害预测评价等地质研究及调查工作的必备任务。深入探讨了三维地质建模的研究对象、数据源、空间数据模型，以及 3 个不同视角理解的三维地质建模方法，全面总结了三维地质建模技术的最新进展。提供了三维地质建模技术在矿产预测、地质灾害预警、城市地下空间规划、油气藏储层表征等领域的实践案例。最后结合当前研究现状给出了三维地质建模及相关技术的未来发展趋势。

关键词：三维地质建模；空间数据模型；数据驱动与模型驱动；显式建模与隐式建模；地质统计模拟；智能地质建模

三维地质建模是对研究区域地质对象的拓扑、几何形状和属性的描述以及可视化表达[1]。20 年来，随着应用需求以及计算机软硬件、空间信息理论、三维可视化技术等相关学科发展的大力促进，三维地质建模技术取得了快速发展[2-5]。地质结构和属性信息的三维可视化表征可以提供对地下地质现象及其结构、构造和物质组成更加真实、直观的描述。三维地质模型能够将地下地质结构及物理化学特征复现在三维可视化虚拟环境中。三维地质建模也已成为地质研究、地质调查、工程应用以及地质信息系统开发的基本任务[6]。

三维地质建模技术始于 20 世纪 80 年代[7]，已经形成了相对完整和成熟的理论及方法体系。从广义上讲，三维地质建模是地质数据和地质信息处理的一个综合流程，包括地质数据组织管理、空间信息处理、地质解译、三维可视化、地质空间分析、地质统计分析及预测评价等[8-9]。至今已经发展出了各种各样的三维地质建模方法，从不同视角来看其类别划分也是不同的。建模对象不同、使用的数据源不同、或者模型的用途不同，其选用的空间数据模型和建模方法也会不同。三维地质建模的对象包括所有地下结构和属性信息，例如地质构造、地层、岩石类型、各种物理化学特性等。针对不同的建模对象，提出了多种三维地质建模方法，例如沉积地层框架建模方法[10-11]，顾及断层、褶皱、透镜体等复杂地质结构的三维地质建模方法[12-13]，以及各种物理化学性质的

著录信息：陈麒玉，荀磊，崔哲思，等. 三维地质建模技术的最新进展和发展趋势[J]. 地质科技通报，2025，44(3)：373-387.
CHEN Qiyu, XUN Lei, CUI Zhesi, et al. Recent progress and development trends of three-dimensional geological modeling[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(3): 373-387.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

属性建模方法等[14-17]。

笔者将从三维地质建模的数据源、数据驱动和模型驱动、显式建模与隐式建模、基于地质统计的三维模拟等不同角度总结和概括三维地质建模技术的最新研究进展，并对未来发展趋势给出自己的理解和认识。

1　数据源

三维地质建模的过程就是通过不断对地质观测、调查、勘察、测量和分析数据进行推测和估计，获取能够直观描述地下地质结构的空间点、线、面等几何实体[18]。用于三维地质建模的数据包括整个地质调查和勘探过程中获得的所有直接和间接的多源异构数据[19]。更准确地说，三维地质建模及相关应用使用的数据通常具有以下特点。①不同来源：来自不同部门、不同时期、不同处理软件；②不同维度：一维观测点、二维地质平面图和剖面图、三维数字高程模型（digital elevation model，简称 DEM）及地震数据等；③不同类型：遥感数据、野外观测数据、钻井数据、测井实验数据、人工地震数据、重/磁数据、物理化学属性数据等；④不同的精度和比例尺：例如不同精度的遥感数据，不同比例的地质图等。三维地质建模的目标之一就是在上述数据基础上，不断研究和发展新的技术和方法，实现地下地质结构和属性的三维可视化表征。到目前为止，众多学者已经提出了一系列针对不同数据类型的三维地质建模方法，例如基于钻孔数据的三维地层框架自动构建方法[20]、基于地质平面图的区域地质结构三维重构方法[21]、基于剖面拓扑推理的交互式三维地质建模方法[22]、基于多源数据（如钻探、遥感、地震等数据）融合的三维自动建模方法[23-25]。因此，如何有效地获取和使用上述多源异构数据、构建更可靠的三维地质模型是该领域的最重要挑战之一。

2　三维空间数据模型

三维地质建模技术的发展是伴随着其使用的空间数据模型的发展而发展的[26]。迄今为止已经发展出了 20 余种三维空间数据模型[27-28]（表 1），主要可以分为基于面元的数据模型和基于体元的数据模型。一般地，在对地质结构或者地质实体的空间几何形态进行表征和建模，并且要求在三维模型的基础上开展空间拓扑运算和几何分析时，基于面元的模型将被选择。但在进行地质属性分析时，如地质资源预测、地质动力学模拟或者储量估算等定量评价与分析等，基于网格（体元）的实体模型将更具优势[29]。为了同时实现对地质构造和属性信息的表征，学者们提出了兼具基于面元和体元模型优势的混合模型。但是，为了更好地集成和融合地质结构和各种各样的属性信息，需要进一步研究和开发更加先进高效的三维空间数据模型。

3　三维地质建模的基本理念与方法

三维地质建模是地质数据和地质信息处理的一个综合流程，包括地质数据组织管理、空间信息处理、地质解译、三维可视化、地质空间分析、地质统计分析及预测评价等[30-31]。从不同视角来看，其侧重点不同，所表现出来的思路、特征和具体方法也会不同。笔者将从以下 3 个方面分析和总结三维地质建模的基本理念和方法。

3.1　数据驱动与模型驱动

一般来说，在三维地质建模技术的发展过程中逐渐形成了 2 种观点：模型驱动和数据驱动。这 2 种观点相辅相成、互相促进，发展出了众多具体的三维地质建模方法，逐渐形成了较为完善的三维地质建模理论技术方法体系。图 1 为 2 种观点驱使下从现实地质观测到虚拟近似抽象模型的基本过程[18]。

表 1　三维空间数据模型[27]

Table 1　Data models in 3D geological modeling

基于面元的实体模型（facial model）	基于体元的实体模型（volumetric model）		混合实体模型（mixed model）
	规则体元	不规则体元	
不规则三角网（TIN）	构造实体几何（CSG）	四面体格网（TEN）	TIN-CSG混合
格网（grid）	体素（voxel）	金字塔（pyramid）	TIN-octree混合
边界表示模型（B-Rep）	针体（needle）	三棱柱（TP）	octree-TEN混合
线框模型（wire-frame）	八叉树（octree）	地质细胞	wire-frame-block混合
断面（section）	规则块体（regular block）	不规则块体	B-Rep-voxel混合
断面-三角网		实体（solid）	
多层DEM		广义三棱柱（GTP）	
		角点网格（CPG）	

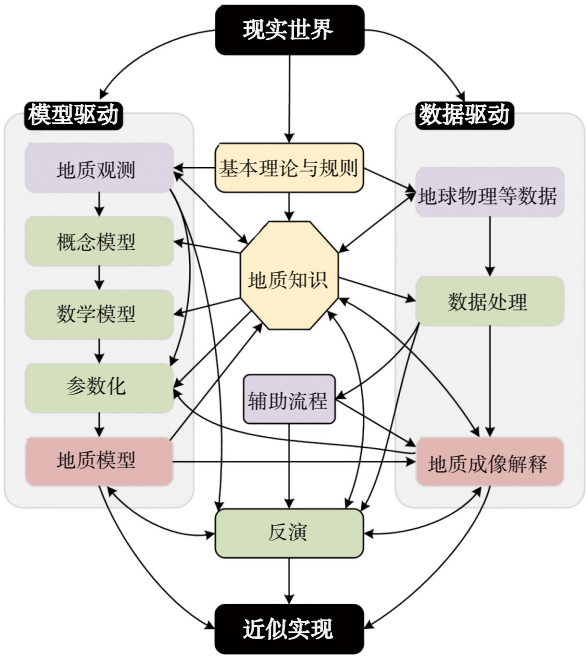


图 1　三维地质建模的 2 种观点：数据驱动与模型驱动[18]

Fig. 1　Two viewpoints of 3D geological modeling: Data-driven and geomodel-driven

从现实地质观测出发，综合运用各类数据及数学模型，最终实现对现实地质结构和现象的数字化、虚拟化近似。

数据驱动的三维地质建模方法完全依赖于所获取的地质数据，而且这些数据是经过专业的预处理加工的。通常可通过以下 2 种途径获得可用数据：①直接解译；②结合其他数学方法反演获得。然后，可将三维地质建模理解成一个三维栅格影像的处理问题，利用图像解译等图像处理技术完成对整个三维影像的重建。近年来，随着机器学习特别是深度学习技术的发展，利用深度人工神经网路对稀疏的地质数据或者传统人工数据处理和建模的过程进行训练[32]，实现了对三维地质模型的智能化自动构建。例如，学者使用生成对抗网络（generative adversarial network，简称 GAN）实现了对地下水相、河道等古地理环境的三维重建[33-35]。基于深度学习方法的三维地质模型自动构建是一个完全数据驱动的过程。完全数据驱动的方法可能导致建模结果与实际地质概念或观测之间的冲突，在实际工作中，基于完全数据驱动的方法建立的三维地质模型难以符合多源实际观测数据。数据驱动的方法虽然已经取得了很大进展，但由于地质沉积演化过程非常复杂，在进行多属性复杂地质结构的建模时，还应该融入地质背景知识和规则的约束。

对于模型驱动的方法，其输入的数据主要是地质观测和勘察数据，如露头、钻井、影像等数据。然后结合地质知识和规则等，形成概念模型[36]。这个概念模型应该充分考虑所有的地质要素、可用信息以及研究区各方面的地质背景知识。概念模型是决定后续选择何种数学模型进行三维空间插值的基础。一旦模型的表征方法和插值方法被定义为一个或一组数学公式，紧接着就要进行这些公式的参数化，并最终获得尽量逼近于现实观测的几何模型。可以看到，模型驱动的三维地质建模方法更加依赖于从真实观测到数学模型的抽象。但由于地质沉积演化规律特别复杂，造成实际地质结构和现象异常复杂，很难用数学模型准确、全面地抽象和描述。具体来讲，模型驱动的方法存在如下几个方面的限制：①引入了难以评价的主观因素，从而导致建模结果带有某些偏见；②包含了无法验证的解译性元素；③某种程度上模型的复杂性无法得到已知数据的支撑。

可以看出，无论是数据驱动还是模型驱动的三维地质建模方法，地质规则和地质知识都起到了至关重要的作用[37]。地质结构的形成和演化过程极其复杂，仅通过有限的数据或者数学模型是很难逼近和表征真实地质现象的。从图 1 中可以看出，地质知识将数据驱动和模型驱动这 2 种途径以不同的方式链接了起来。地质知识几乎被用在了 2 种建模途径的所有步骤，例如数据处理、概念建模、数学模型构建参数化、模型反演等。作为核心步骤，基础的地质规则和知识能够将地质数据资料、概念模型、数学模型等有机地结合起来。因此，融合各种地质数据、模型和地质知识的综合三维地质建模思想将是未来发展的方向。

3.2　显式建模与隐式建模

显式建模是指通过人机交互或者半自动方式来确定不同地质对象之间的接触界面，并最终得到能够表达地质对象空间几何形态的三维体模型的过程[38-39]。用于表达地质对象间界面的网格曲面主要由不规则三角网（triangular irregular network，简称 TIN）[40] 或参数曲面（如 B 样条曲面、NURBS 曲面等）[41] 组成。这些网格曲面由一系列的三维点集构成，因此显式三维地质建模的主要任务就变成了利用从钻孔、露头、剖面等实际地质数据中提取的稀疏点进行空间插值，以获得足够的三维空间点集，并有效地组织和管理这些点集形成空间曲面。为了获得足够的三维点集来表达地质界面，已经研发出了很多种方法及其变体，如样条法、反距离权重法、克里金法、NURBS 曲面等[42]。但是这些方法中点与点

之间都是通过线性连接的，因此所构建的曲面不够光滑。离散平滑插值(discrete smooth interpolation，简称 DSI)方法能够在忠实于实际地质数据的同时获得更加光滑、逼真的曲面表达[43]。显式建模过程易于通过人机交互等方式将专家知识和经验融入三维地质模型，但这也带来了无法评估的不确定性。显式建模通常需要大量的手动编辑，无法支持复杂地质结构及对象的自动构建，其建模效率问题逐渐凸显。此外，当建模数据被修改或者有新数据引入时，就需要重新解释数据并重建整个模型，这给模型的更新带来极大困难。

隐式建模方法为自动构建具有高度复杂性的地质模型开辟了新途径[44]。隐式建模技术将不同地质对象间的界面表示为三维空间标量场 $s(x)$ 的等值面。其核心思想是通过计算三维空间标量场 $s(x)$，然后抽取具有相同标量值的所有三维空间数据点，并可视化表达为一系列的隐式曲面[45]。截止目前，基于稀疏数据点创建隐式曲面的方法主要有 2 种：非网格化方法和网格化方法。非网格化方法一般包括径向基函数插值(radial basis function，简称 RBF)和对偶克里金法(dual Kriging)。非网格化方法方便且易于实现，但它们更趋向于解决大型且密集的线性系统问题。网格化方法也已经被应用于空间标量场计算[46]。在网格化方法中，研究区域的三维空间被划分为能够表达地质不连续性的四面体网格。隐式方法是基于空间体素(网格)进行标量场计算的，因此比基于曲面的显式方法更具健壮性和自动化程度[47]。此外，隐式方法无需专家知识输入和用户交互即可自动获得复杂地质结构的三维模型，且能够同时忠实于多种类型的多元数据。由于隐式建模使用了自动插值方法，其在模型更新方面也显示出了更大优势。图 2 为显式建模与隐式建模的基本过程。

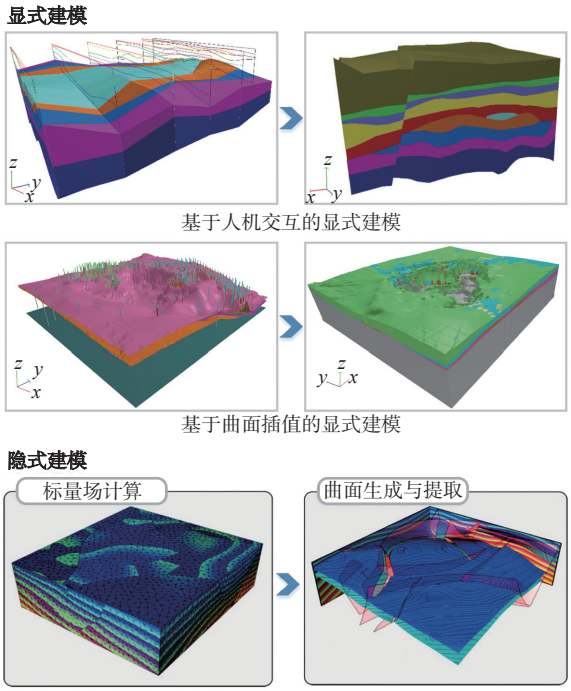


图 2　显式建模与隐式建模过程

Fig. 2　Explicit modeling and implicit modeling processes

3.3　基于地质统计模拟的三维模型自动重建

地质统计学是数学地球科学的重要分支，地质统计模拟可以提供某一地学现象或者事件的多个等概率实现[42]。利用地质统计模拟实现对地质结构及现象的三维表征与建模已成为三维地质建模的重要途径之一。各种不同的能够同时输出多个模拟实现的地质统计模拟方法相继被提出，如序贯高斯模拟(SGSIM)和序贯指示模拟(SISIM)等方法已经在地球科学的不同领域得到广泛应用[48]。基于这些方法输出的多种不同实现，可以进行不确定性分析并提供更准确的定量化评估结果。基于 Kriging 的地质统计模拟方法由于其仅考虑两点间变差，因此难以实现对具有显著各向异性特征的复杂模式及异质结构的表征与模拟。鉴于基于变差函数方法的不足，多点地质统计学(multiple-point geostatistics，简称 MPS)方法应运而生[49]。

在多点地质统计模拟中，地质变量的空间结构性被模式化在训练图像(参考模型)中，高阶(多点)统计特征可以方便从训练图像中捕获[50-52]，从而克服了基于变差函数的地质统计模拟方法难以再现复杂目标几何形态的不足。近年来，多点地质统计模拟在复杂地学现象表征、模拟与建模方面取得了显著进展[53-57]，其三维模拟应用也证实了多点地质统计在复杂地质结构三维表征和建模中的有效性[58]。

基于地质统计学的模拟方法都是基于规则的笛卡尔网格进行的，无法真实地反映地质沉积及结构构造在客观世界中的形态和分布特征。此外，在地质统计模拟过程中应该充分考虑基本地质原理、规则、知识以及研究区域地质背景的约束。图 3 是基于地质统计模拟技术的地下复杂地质结构及属性的三维建模框架与流程。在此框架下，多种不同的模拟实现和属性特征都可以集成在一个统一的不规则网格中，从而实现对多个三维模型进行综合评价与分析[59]。

3.4　智能三维地质表征与建模

人工智能已经成为地学大数据挖掘、建模/模拟、分析与预测的核心和关键技术。随着机器学习和深

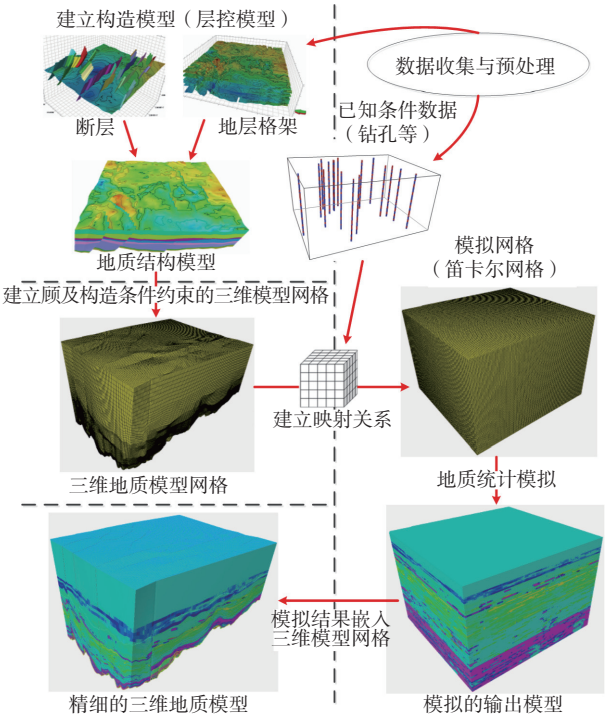


图 3　基于地质统计模拟的三维地质结构–属性一体化建模框架[59]

Fig. 3　3D geological structure-attribute integrated modeling framework based on geostatistical simulation

度学习等人工智能方法在地球科学领域的广泛应用，以深度生成式神经网络（如自回归模型、变分自编码器、生成对抗网络等）为代表的深度学习地质表征与建模方法取得了快速发展[60-61]，已成功应用于数字岩心重建[62]、多孔介质表征[33]、岩相岩性结构重建[63]和物性参数预测[64]等领域。其中，又以生成对抗网络（GANs）与卷积神经网络（CNN）结合的深度生成网络模型使用最为广泛[65]。图 4 为基于深度学习的地质结构模型重建方法流程，此类方法通过多个卷积神经网络学习地质结构及属性的深层次几何形态和空间分布特征，以及特征融合来实现多源数据的深层次特征融合，利用生成器和判别器的不断对抗训练来生成符合训练样本模式特征的三维地质模型。同时，深度学习方法通过训练拟合一个最佳非线性函数来建立条件数据与目标模型之间的数据通路，当模型训练完成后，在实际重建时通过复用确定的数据通路使得在条件数据约束下能够快速生成目标模型[66]。深度学习方法具有强大的复杂空间模式抽象能力、深层特征提取和生成能力以及映射复用模式，克服了传统地质统计学方法因变异函数或模板结构固定造成的模式多样性和模式尺度生成能力不足的问题，并且相较于传统地质统计学方法具有更高的模型生成效率，能够支持复杂地质结构及属性多细节层次模式的快速生成。

但是，深度神经网络是一个黑盒模型，可能包含数百万个参数和多个隐含层，这种复杂性使得理解每个单元对最终模型生成结果的具体影响变得非常困难。此外，地质演化过程和地质结构–属性的空间分布模式异常复杂，需要充分融合各类型地质勘查数据、多种数学物理模型以及区域构造作用、岩浆作用、沉积作用、变质作用和成矿作用等方面的专家知识，才能较准确地推断和构建出符合客观地质现实的模型。这些都为深度学习方法在三维地质建模领域的深入应用提出了挑战。

4　研究实例

4.1　三维成矿预测

随着矿产资源勘测难度的不断增大以及图像处理、三维可视化等计算机技术的高速发展，信息化手段在定量预测评估矿产资源中变得尤为关键[67]。三维成矿预测作为结合了三维地质建模技术与成矿预测理论体系的新兴学科，其旨在深入研究矿产资源在三维空间中的形成与分布规律，建立直观真实的三维地质模型，揭示矿床的空间分布、形态和属性，为进一步深入开展三维成矿预测和准确评估资源潜

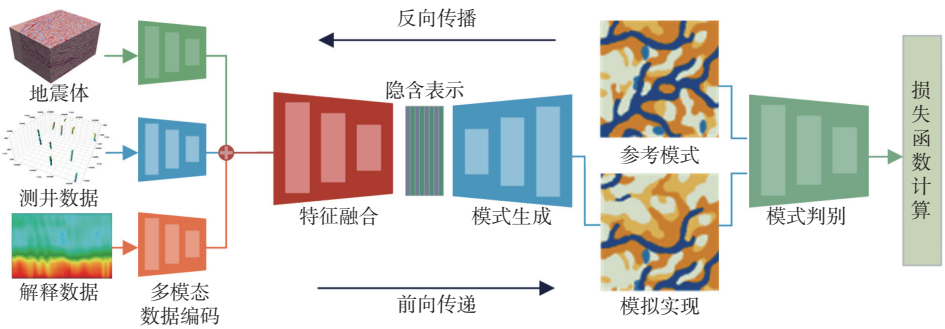


图 4　基于深度学习的三维地质建模框架

Fig. 4　3D geological modeling framework based on deep learning

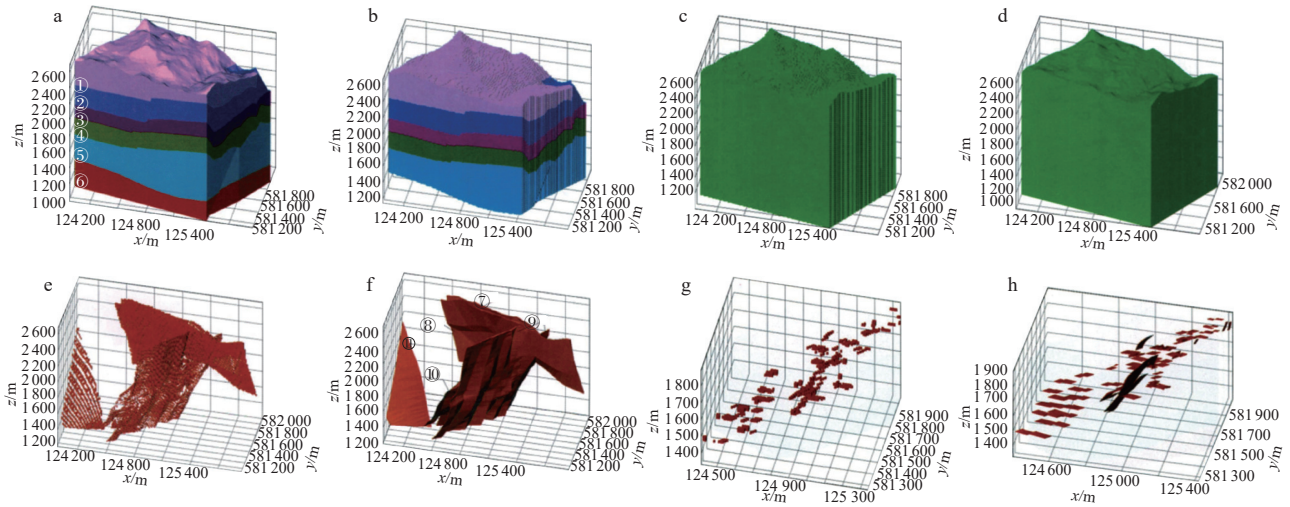
力提供基础[68]。

国内外学者通过成功利用三维可视化技术进行成矿预测，直观呈现矿产资源地下空间的形态和分布特征，有效推动了成矿预测领域的不断发展。例如，陈建平等[69]以个旧锡矿东区中部为研究区域，利用澳大利亚 Micromine 公司的 Kantan3D 软件为建模平台，以钻孔和化验数据为建模资料，建立了地表地面数字模型（digital terrain model，简称 DTM）、地层、构造、已知矿体、钻孔等实体模型和以三维立方体为单元块的定量化预测模型（图 5）。随后，陈建平等[69]利用统计学方法对整个模型进行找矿有利度的计算，从而得出了该研究区尚有较大的找矿潜力的结论。肖克炎等[16]基于三维地质建模技术提出了一种大比例尺三维立体矿产预测方法。NIELSEN 等[70]基于三维地质建模技术和地球物理勘探数据，建立了西澳大利亚洲 Plutonic-Marymia 盆地的区域尺度模型。NIELSEN 等[70]首先建立了一个二维证据权重预测模型，并利用结果将权重应用于三维多类指数叠加模型，发现这种方法建立的三维模型能够有效地支持深部找矿预测并能够对钻探深度进行定位。袁峰等[17]提出了一种以三维地质建模技术为基础的隐伏矿体三维综合信息成矿预测方法，并成功建立了钟姑矿田三维成矿预测模型，有效提升了找矿效率（图 6）。许多实例能够证明成矿预测领域中三维地质建模技术的可行性和广阔前景。整合矿产资源勘查理论体系与三维可视化建模技术，能够为研究者提供强有力的工具以更全面地理解和定量化矿产资源的空间分布与特征。

4.2　地质灾害监测预警

我国幅员辽阔、地质条件复杂，地质灾害点分布广泛，普遍面临地质灾害防治挑战。传统的人工调查和排查手段在面对分布广泛、地形复杂的情况下显得力不从心，存在排查能力有限、无法对复杂地形环境进行精准预测的问题，难以满足全面、精准监测和防范的需求[71]。面对严峻的地质灾害防治形势，需要采用更为先进的信息化手段，结合遥感、地理信息系统（GIS）、三维地质建模等领域的技术，以更有效地进行地质灾害监测预警。

三维地质建模技术与地质灾害监测预警理论相结合，取得了显著的成效，为灾害监测与预警提供了有力支持。王威等[72]以四川省雅安市峡口滑坡为研究对象，根据等高线图、地质信息的剖面图和相关的钻孔信息，建立了三维地表 TIN 模型和三维滑坡体地质模型；然后通过模型和数据对该滑坡进行了综合分析，提供了能够准确反映该滑坡体的滑动趋势和位移的滑坡监测结果，为提高滑坡防灾减灾提供了科学支持。吴冲龙等[73]研制了地质灾害软件 QuantyHazard，实现了对三峡巴东县某地质灾害治理工程中滑坡体的三维可视化建模、分析与预警决策（图 7）。WANG 等[74]建立了三峡库区藕塘滑坡的三维地质模型，分析了多阶段河岸滑坡时空演化规律，为滑坡时空演化和地质灾害防控提供了科学参考（图 8）。KRUIVER 等[75]以荷兰格罗宁省的浅层地下结构为研究区，建立了详细的三维体元模型；

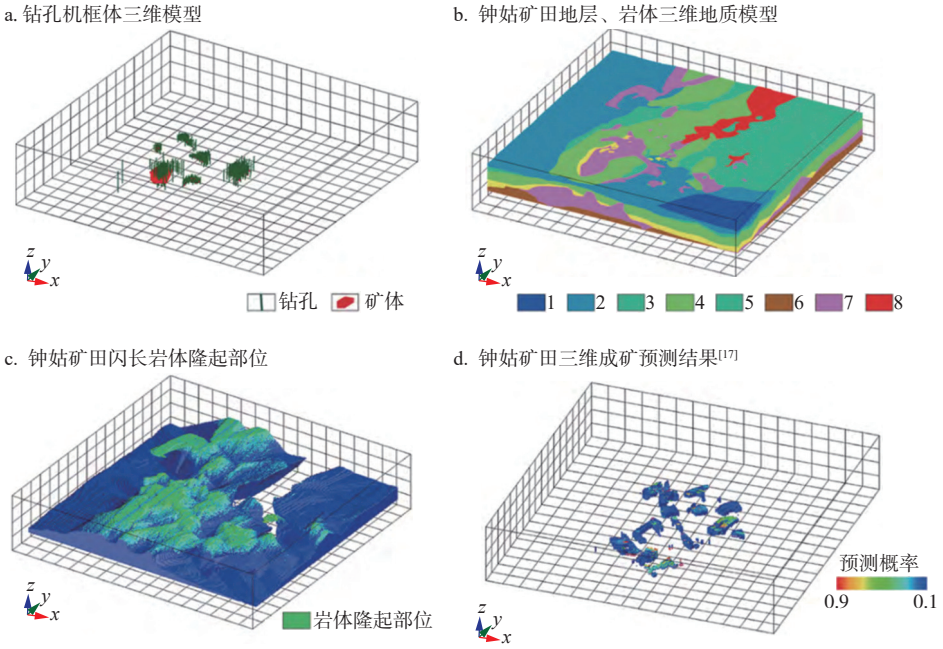


①～⑤. 地层；⑥. 花岗岩；⑦. 大箐东断裂；⑧. 麒麟山断裂；⑨. 芦塘坝断裂；⑩. 1 号断裂；⑪. 大箐南断裂

a, c, e, g. 分别为地层、地表 DTM、构造、已知矿体的实体模型；b, d, f, h. 分别为地层、地表 DTM、构造、已知矿体的三维预测模型

图 5　旧锡矿东区中部地表 DTM、地层、构造、已知矿体等实体模型和三维预测模型[69]

Fig. 5　Surface DTM, stratigraphy, structure, known ore bodies and other solid models and 3D prediction models in the central part of the eastern area of the Gejiu Tin Mine



1-8 分别为白垩系浦口组、白垩系姑山组火山岩、侏罗系象山群、三叠系黄马青组、三叠系周冲村组、二叠系、闪长岩、二长岩

图 6　钟姑矿田三维成矿预测模型

Fig. 6　3D mineralization prediction model of the Zhonggu ore field

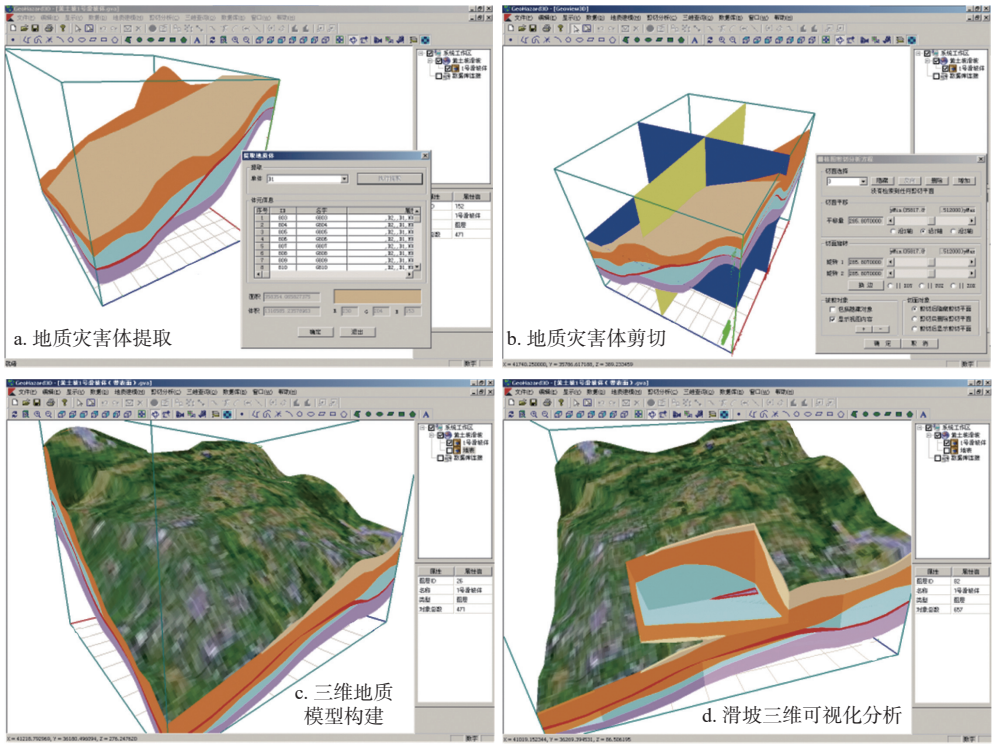


图 7　QuantyHazard 系统用于三峡巴东县某滑坡地质灾害治理工程[73]

Fig. 7　Application of QuantyHazard system in a landslide geohazard control project in Badong County

通过该模型，成功分析了复杂异质结构对地震波传播的综合影响，从而进行了对地震和液化等地质灾害的预测和风险分析。借助三维可视化建模技术，不仅可以全面了解地质灾害的空间分布情况，还能更好地为灾害预警决策过程提供直观、全面的信息，三维地质建模技术已经成为地质灾害防治过程中极其重要的辅助决策工具。

4.3　城市地下空间建模

城市建设加快和人口膨胀导致了各类城市地质问题（例如地面塌陷和沉降、土壤和地下水污染、地

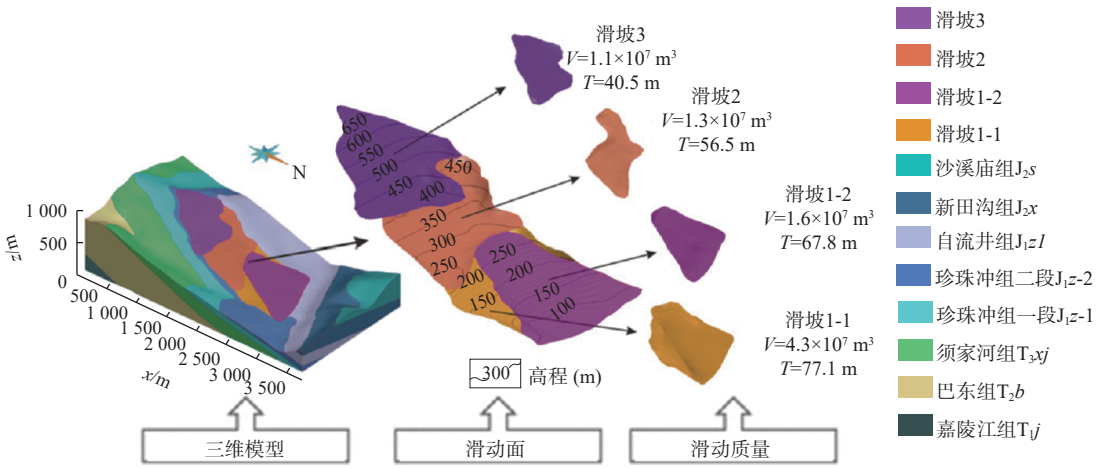


图 8　藕塘滑坡的三维地质模型[74]（*V*. 体积；*T*. 最大厚度）

Fig. 8　3D geological model of the Outang landslide

下水资源紧缺等），严重制约了城市的可持续发展。三维地质建模技术能够为城市地下空间的开发利用提供风险评估和决策支持，可有效帮助各类城市工程项目的实施（如地下交通管网设计、城市用地规划、地下管线铺设等）。屈红刚等[76]建立了北京市三维地质模型并成功服务于城市规划、地铁选线和地热资源开发。CHEN 等[59]利用多点地质统计随机模拟方法基于剖面数据等多源城市地质调查数据，重建了福建省闽江口地区的三维城市地质模型，并基于该模型开展了含水层评估与模型质量评价（图 9）。DOU 等[77]利用三维地质建模技术对浙江省杭州市的钱江新城进行了城市地下空间开发利用的地质适宜性评价，通过多源数据集成的三维隐式建模方法构建了三维城市地质模型，并根据城市地质调查数据建立了地质适宜性相关的评价体系。FRICK 等[78]利用隐式地质建模技术重建了德国柏林的城市地质模型，以三维城市地质模型为基础分析了德国首都柏林市中心下方地下水安全的影响（图 10）。GUO 等[79]结合了机器学习和径向基函数的优势，利用隐式建模方法实现了辽宁省沈阳市区域三维城市地质模型的自动构建。

由此可以看出，三维地质建模技术通过集成、整合、分析大量城市地质调查数据，不仅能够帮助人们更好地理解城市地下空间地质环境，而且能够帮助

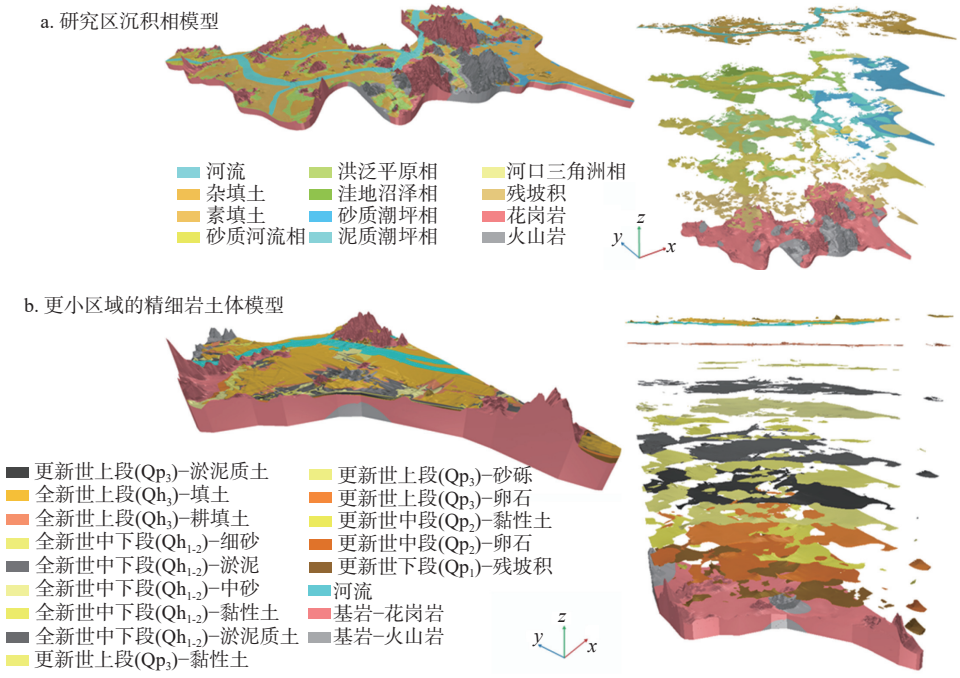
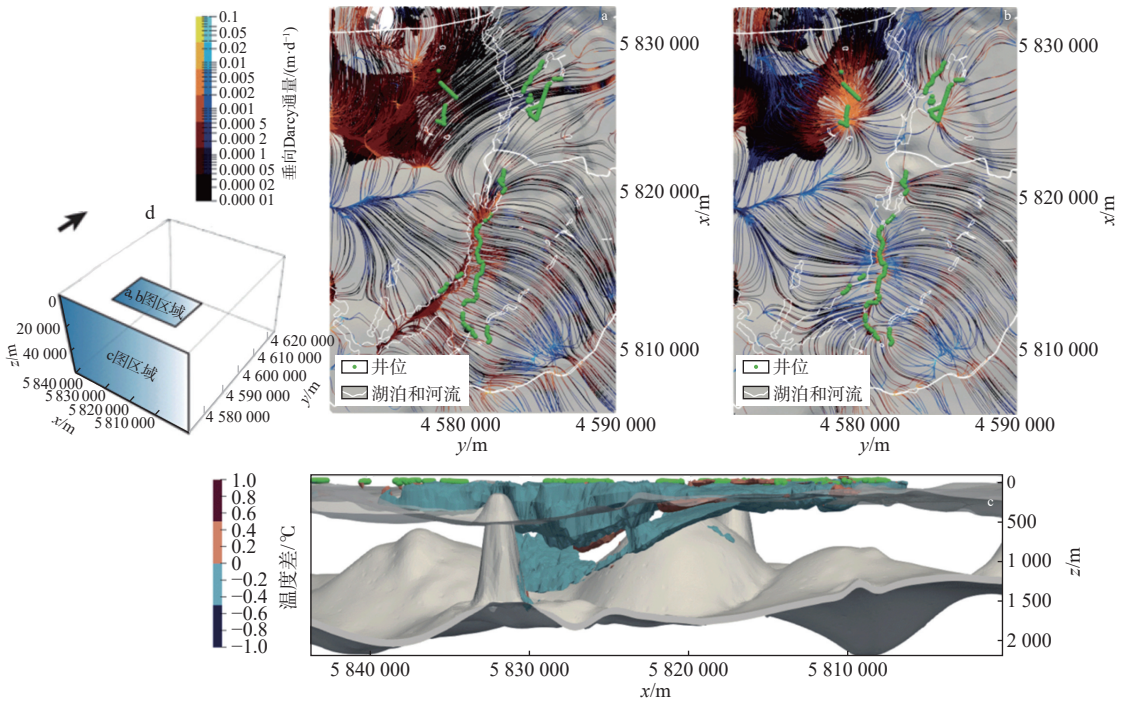


图 9　三维地质建模技术在城市地质调查中的应用[59]

Fig. 9　Application of 3D geological modeling technology in the urban geological survey



a. 抽水前的流场; b. 抽水后的流场; c. 模型剖面展示; d. a ~ c 图的观测位置

图 10　三维地质建模技术在城市地下水安全评估领域的应用[78]

Fig. 10　Application of 3D geological modeling technology in the urban groundwater safety assessment

城市地下空间规划和设计优化，预测城市地下空间内可能存在的地质灾害和地下资源。此外，三维地质建模技术能够服务于城市地下空间基础设施的建设和维护，通过集成传感网数据帮助有关部门实时监测地下环境变化，提前处理潜在的城市地质灾害。

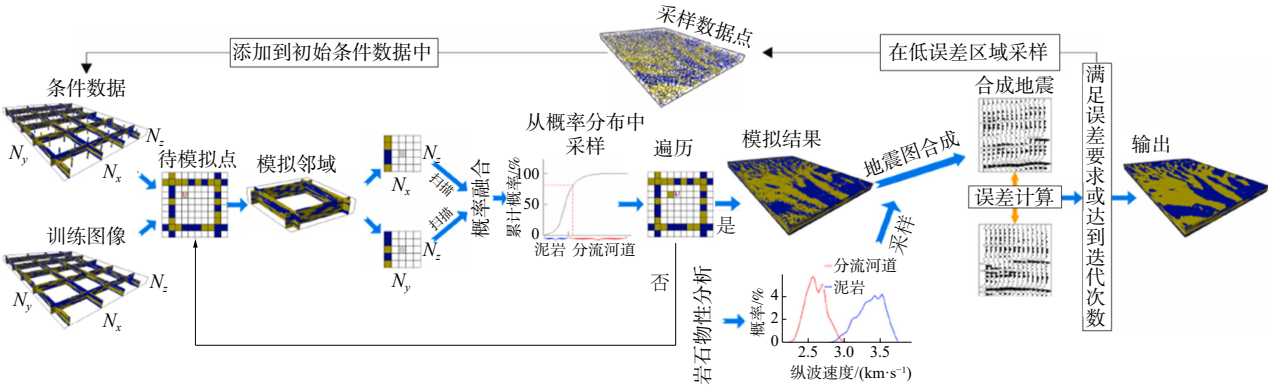
4.4　油气藏储层表征模拟

三维地质建模对于科学的油藏评价、油藏开发管理以及三维油藏数值模拟具有重要的支撑意义[80-81]。针对不同可开发阶段和不同地质条件的油气田，三维地质建模技术能够起到不同的作用：在油气藏储层开发评价阶段，三维地质建模技术主要应用于储层格架建立；而在储层开发初期通常需要进行精细地层对比和油气水地下空间分布建模；在储层开发后期，三维地质建模技术能够为井间参数预测提供基础并构建储层预测模型。于兴河等[82]利用井震结合的相控随机模拟方法成功重建了鄂尔多斯大牛地二叠纪河流相油气储层模型，所构建的储层模型对地质勘探实践起到了指导作用。刘振峰[83]利用三维地质建模技术针对鄂南某致密砂岩油田构建了系列储层参数模型，并及时应用到了油气藏储层计算、有利区优选，钻井轨迹调整等工作环节中。WANG 等[84]利用水平井数据构建了四川盆地涪陵页岩气田龙马溪组–五峰组三维页岩气储层模型。RADWAN 等[85]以 Aghar 油田 Bahariya 组中的河口复合体为例，通过地震、测井、岩心、扫描电镜图等多种数据，利用三维地质建模技术揭示了 Aghar 油田的储层储集特征。WANG 等[86]提出了一种改进的 3DRCS 方法的储层结构重建方法，可以利用二维储层剖面重建三维储层结构的非平稳空间模式（图 11）。SONG 等[87]提出了一种基于生成对抗网络的三维储层模拟框架（GANSim-3D），能够通过渐进训练去捕获地质模式以及输入的井点数据、沉积相概率分布图等多种条件数据与地质模型之间的关系，并以塔河油田为例，利用三维井数据以及从地球物理解释中获取的溶洞三维概率图作为条件数据，对区域内的溶洞型储层进行了描述（图 12）。

通过上述油气藏储层表征模拟应用可知，三维地质建模技术能够在三维空间中量化、展示各类储层参数，同时集成各类地球物理数据（地震、重力、电磁等），最终整合这些数据进行储层的精细表征与模拟[88-90]。这不仅能够提高对各类油气储层的认识，还为储层勘探开发全流程中的科学决策提供更加全面的地质信息，为提高勘探开发生产效率、优化储层资源的开发和管理提供了重要的技术支撑和保障。

5　结论与展望

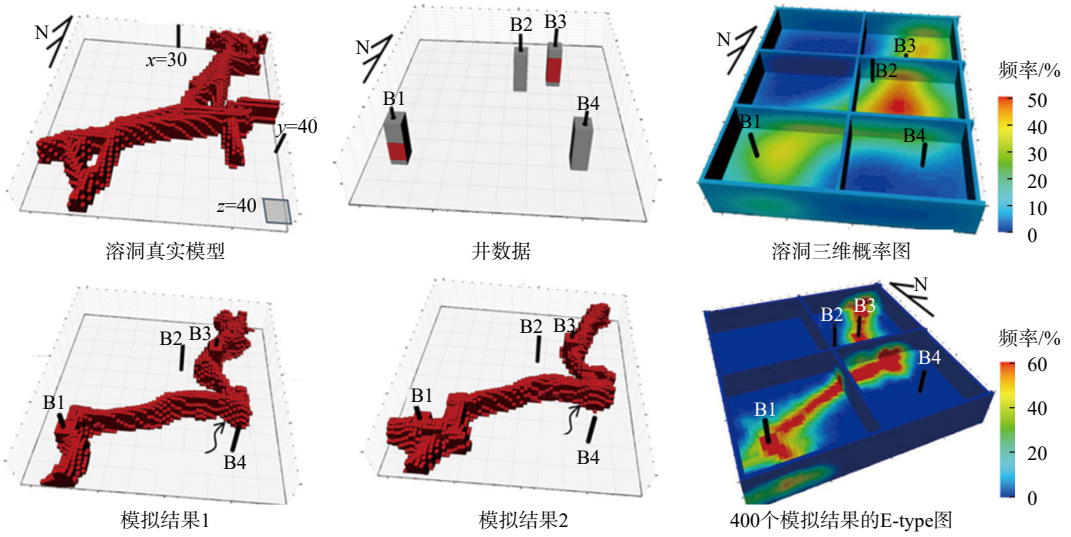
笔者全面深入地对三维地质建模技术的最新进



N_x, N_y 和 N_z 分别代表 x, y, z 方向上的尺寸

图 11　基于多点地质统计学的三角洲油藏沉积结构模型构建流程[86]

Fig. 11　Workflow of delta reservoir sedimentary structures based on multiple-point geostatistics



B1 ~ B4. 笛卡尔网格坐标系下的示例井位

图 12　利用 GANSim-3D 的三维储层模拟实例[87]

Fig. 12　An example of 3D reservoir simulation via GANSim-3D

展进行了综述和概括，对三维地质建模的研究对象、数据源以及不同维度的建模理念和方法进行了深入剖析，并提供了其在矿产预测、地质灾害预警、城市地下空间建模、油气藏储层表征等领域的实践案例。

三维地质建模相关理论最基本的目标是研发能够在三维空间中合理、准确描述和表达地质对象几何特征及物理化学特性的先进技术和方法。近年来三维地质建模技术取得了迅猛发展，已经提出了针对各种类型的异构数据或者融合多元异构数据的三维建模方法。数据驱动和模型驱动 2 种不同的建模观点互为补充，共同促进着三维地质建模理论和技术方法的发展。此外，地质规则及专家知识也起到了非常重要的作用，并作用于基于 2 种不同观点的三维地质建模过程的各个步骤。显式建模和隐式建模各具特征，但相较于显式建模，隐式建模是近年来发展起来的、能够实现复杂地质结构模型自动构建的新技术。地质统计模拟能够自动输出模拟对象的多种不同实现，其在三维地质结构表征与建模方面的有效性和能力也已被证实。地球科学多领域的三维地质建模应用实践表明，三维地质建模技术正朝着多源数据融合、领域知识驱动、高精度多尺度、高效动态以及智能化的方向发展。

依据以上分析与结论，笔者从 4 个方面总结了三维地质建模技术的发展方向及建议，具体包括如下几个方面。

(1)集成建模　除了要求基于多源异构数据、地质先验知识以及数学模型进行三维地质模型的集成建模外，地质结构和各类属性信息的三维可视化集成表征仍然是一个挑战，各类建模手段和方法应用场景、建模方式、使用的数据均存在较大差异，难以

在统一框架下对比不同类型建模方法之间的性能差异，因此需要发展新的统一三维空间数据模型和集成建模方法。此外，多尺度三维地质模型的集成表达、调度和管理也是一个难题。大数据时代的三维地质模型应该被赋予更多的功能与能力，三维地质模型不仅仅只是模型本身所包含的信息的呈现，它应该成为地质大数据集成、管理、挖掘、分析、可视化表达及共享的操作平台与门户。

（2）高精度与高效率　复杂地质结构及地质沉积演化过程的三维可视化建模与模拟是典型的计算密集型任务，并且随着研究和实践的不断深入，对模型规模和模型精度的要求都在不断提升，大规模高精度三维地质模型的高效构建已经成为领域的研究热点和瓶颈技术。借助大型计算机集群或者超级计算机的丰富计算资源对三维地质建模及模拟过程进行并行加速，大大提升其模拟计算效率，将是实现大规模高精度三维地质模型高效构建的有效途径。

（3）可视化与 XR　为了进一步增强三维地质模型的视觉效果和真实性，应该使用如虚拟现实（VR）、增强现实（AR）、混合现实（MR）、数字孪生（DT）等先进的可视化技术进行三维地质模型的呈现，进一步增强可视化的表达和呈现效果，为用户提供更加高效便捷的交互方式，打造地下空间全信息数字孪生系统。此外，先进的科学可视化和可视分析技术可以促进基于三维地质模型的数据挖掘和知识发现。

（4）智能化　人工智能技术为三维地质建模和地质过程模拟开辟了新的途径，许多有效的方法已经被用于三维地质模型的自动化和智能化构建。机器学习及深度学习技术在自动化、智能化三维地质建模方面显示出了巨大的潜力，但是也存在诸如训练样本少、参数优化难、多源数据与地质知识融合难、生成模型的可解释性差等挑战，智能化三维地质建模技术方法的研究是该领域的前沿和热点，专门针对地下空间表征、建模和模拟的 AI 大模型是未来发展的重要方向之一。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1] MALLET J L. Geomodeling[M]. New York: Oxford University Press, 2002.

[2] JESSELL M, AILLÈRES L, DE KEMP E, et al. Next generation three-dimensional geologic modeling and inversion[M]. Denver, USA: Society of Economic Geologists, 2014.

[3] 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 H J, BAI S W, ZHAO X H, et al. Discussion on strata partition in three dimension strata model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(5): 637-639. (in Chinese with English abstract)

[4] 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.
PAN M, FANG Y, QU H G. Discussion on several foundational issues in three-dimensional geological modeling[J]. Geography and Geo-Information Science, 2007, 23(3): 1-5. (in Chinese with English abstract)

[5] 武强，徐华. 三维地质建模与可视化方法研究 [J]. 中国科学(地球科学), 2004, 34(1): 54-60.
WU Q, XU H. Research on three-dimensional geological modeling and visualization methods[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2004, 34(1): 54-60. (in Chinese with English abstract)

[6] 李青元，张洛宜，曹代勇，等. 三维地质建模的用途、现状、问题、趋势与建议 [J]. 地质与勘探, 2016, 52(4): 759-767.
LI Q Y, ZHANG L Y, CAO D Y, et al. Usage, status, problems, trends and suggestions of 3D geological modeling[J]. Geology and Exploration, 2016, 52(4): 759-767. (in Chinese with English abstract)

[7] CHRISTIAN J T. 3D geoscience modeling: Computer techniques for geological characterization[J]. Earth-Science Reviews, 1996, 40(3/4): 299-301.

[8] 陈麒玉，刘刚，何珍文，等. 面向地质大数据的结构−属性一体化三维地质建模技术现状与展望 [J]. 地质科技通报, 2020, 39(4): 51-58.
CHEN Q Y, LIU G, HE Z W, et al. Current situation and prospect of structure-attribute integrated 3D geological modeling technology for geological big data[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(4): 51-58. (in Chinese with English abstract)

[9] 吴冲龙，刘刚. “玻璃地球”建设的现状、问题、趋势与对策 [J]. 地质通报, 2015, 34(7): 1280-1287.
WU C L, LIU G. Current situation, existent problems, trend and strategy of the construction of "Glass Earth"[J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(7): 1280-1287. (in Chinese with English abstract)

[10] 陈麒玉，刘刚，吴冲龙，等. 城市地质调查中知识驱动的多尺度三维地质体模型构建方法 [J]. 地理与地理信息科学, 2016, 32(4): 11-16.
CHEN Q Y, LIU G, WU C L, et al. Knowledge-driven multiple scale 3D geological modeling method in urban geological survey[J]. Geography and Geo-Information Science, 2016, 32(4): 11-16. (in Chinese with English abstract)

[11] 吴冲龙，毛小平，田宜平，等. 三维数字盆地构造−地层格架模拟技术 [J]. 地质科技情报, 2006, 25(4): 1-8.
WU C L, MAO X P, TIAN Y P, et al. Digital basins and their 3D visualization modeling[J]. Geological Science and Technology Information, 2006, 25(4): 1-8. (in Chinese with English abstract)

[12] JACKSON M D D, PERCIVAL J R R, MOSTAGHIMI P, et al. Reservoir modeling for flow simulation by use of surfaces, adaptive unstructured meshes, and an overlapping-control-volume finite-element method[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2015, 18(2): 115-132.

[13] 张夏林, 吴冲龙, 周琦, 等. 贵州超大型锰矿集区的多尺度三维地质建模 [J]. 地球科学, 2020, 45(2): 634-644.
ZHANG X L, WU C L, ZHOU Q, et al. Multi-scale 3D modeling and visualization of super large manganese ore gathering area in Guizhou China[J]. Earth Science, 2020, 45(2): 634-644. (in Chinese with English abstract)

[14] GUETING N, CAERS J, COMUNIAN A, et al. Reconstruction of three-dimensional aquifer heterogeneity from two-dimensional geophysical data[J]. Mathematical Geosciences, 2018, 50(1): 53-75.

[15] 陈少强, 李琦, 苗前军, 等. 矢量与栅格结合的三维地质模型编辑方法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(7): 1544-1548.
CHEN S Q, LI Q, MIAO Q J, et al. An editing method of 3D geological model with the union of vector and grid[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2005, 17(7): 1544-1548. (in Chinese with English abstract)

[16] 肖克炎, 李楠, 孙莉, 等. 基于三维信息技术大比例尺三维立体矿产预测方法及途径 [J]. 地质学刊, 2012, 36(3): 229-236.
XIAO K Y, LI N, SUN L, et al. Large scale 3D mineral prediction methods and channels based on 3D information technology[J]. Journal of Geology, 2012, 36(3): 229-236. (in Chinese with English abstract)

[17] 袁峰, 李晓晖, 张明明, 等. 隐伏矿体三维综合信息成矿预测方法 [J]. 地质学报, 2014, 88(4): 630-643.
YUAN F, LI X H, ZHANG M M, et al. Three dimension prospectivity modelling based on integrated geoinformation for prediction of buried orebodies[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(4): 630-643. (in Chinese with English abstract)

[18] WELLMANN F, CAUMON G. 3-D structural geological models: Concepts, methods, and uncertainties[J]. Advances in Geophysics, 2018, 59: 1-121.

[19] 吴冲龙, 翁正平, 刘刚, 等. 论中国“玻璃国土”建设 [J]. 地质科技情报, 2012, 31(6): 1-8.
WU C L, WENG Z P, LIU G, et al. Discussion on "Glass Land" of China[J]. Geological Science and Technology Information, 2012, 31(6): 1-8. (in Chinese with English abstract)

[20] 唐丙寅, 吴冲龙, 李新川, 等. 一种基于钻孔地质数据的快速递进三维地质建模方法 [J]. 岩土力学, 2015, 36(12): 3633-3638.
TANG B Y, WU C L, LI X C, et al. A fast progressive 3D geological modeling method based on borehole data[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(12): 3633-3638. (in Chinese with English abstract)

[21] 周良辰, 林冰仙, 王丹, 等. 平面地质图的三维地质体建模方法研究 [J]. 地球信息科学学报, 2013, 15(1): 46-54.
ZHOU L C, LIN B X, WANG D, et al. 3D geological modeling method based on planar geological map[J]. Journal of Geo-Information Science, 2013, 15(1): 46-54. (in Chinese with English abstract)

[22] 何珍文. 地质空间三维动态建模关键技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
HE Z W. Key techniques of three-dimensional dynamic modeling in geological space[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008. (in Chinese with English abstract)

[23] 陈国良, 刘修国, 盛谦, 等. 一种基于交叉剖面的地质模型构建方法 [J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2409-2415.
CHEN G L, LIU X G, SHENG Q, et al. A modeling method based on intersected geological sections[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(8): 2409-2415. (in Chinese with English abstract)

[24] 王占刚, 潘懋, 王斌. 三维多元地学数据一体化显示框架设计 [J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(19): 72-75.
WANG Z G, PAN M, WANG B. Flexible framework for multi-geoobjects integrated visualization[J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(19): 72-75. (in Chinese with English abstract)

[25] 朱良峰, 李明江, 孙建中. 工程地质空间多场耦合构模技术研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2500-2506.
ZHU L F, LI M J, SUN J Z. Multifield coupled modeling techniques in engineering geological space[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2500-2506. (in Chinese with English abstract)

[26] 吴立新, 陈学习, 车德福, 等. 一种基于 GTP 的地下真 3D 集成表达的实体模型 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 32(4): 331-335.
WU L X, CHEN X X, CHE D F, et al. A GTP-based entity model for underground real 3D integral representation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(4): 331-335. (in Chinese with English abstract)

[27] WU L X. Topological relations embodied in a generalized tri-prism (GTP) model for a 3D geoscience modeling system[J]. Computers & Geosciences, 2004, 30(4): 405-418.

[28] 程朋根, 龚健雅, 史文中, 等. 基于似三棱柱体的地质体三维建模与应用研究 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2004, 29(7): 602-607.
CHENG P G, GONG J Y, SHI W Z, et al. Geological object modeling based on quasi tri-prism volume and its application[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004, 29(7): 602-607. (in Chinese with English abstract)

[29] CHEN Q Y, LIU G, LI X C, et al. A corner-point-grid-based voxelization method for the complex geological structure model with folds[J]. Journal of Visualization, 2017, 20(4): 875-888.

[30] LI X H, YUAN F, ZHANG M M, et al. Three-dimensional mineral prospectivity modeling for targeting of concealed mineralization within the Zhonggu iron orefield, Ningwu Basin, China[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 71: 633-654.

[31] 陈麒玉, 刘刚, 李新川, 等. 基于实时矢量剪切的三维地质体模型序贯剖面可视分析方法 [J]. 岩土力学, 2017, 38(5): 1365-1372.
CHEN Q Y, LIU G, LI X C, et al. A visual analysis method of 3D geological models by sequential sections based on real-time vector shear[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(5): 1365-1372. (in Chinese with English abstract)

[32] GUO J T, WU L X, ZHOU W H, et al. Section-constrained local geological interface dynamic updating method based on the HRBF surface[J]. Journal of Structural Geology, 2018, 107: 64-72.

[33] FENG J X, HE X H, TENG Q Z, et al. Reconstruction of porous media from extremely limited information using conditional generative adversarial networks[J]. Physical Review E, 2019, 100: 033308.

[34] WANG Y Z, ARNS C H, RAHMAN S S, et al. Porous structure reconstruction using convolutional neural networks[J]. Mathematical Geosciences, 2018, 50(7): 781-799.

[35] ZHU L C, ZHANG T F. Generating geological facies models

with fidelity to diversity and statistics of training images using improved generative adversarial networks[J]. Arxiv, 2019: 1909.10652.

[36] LI N, XIAO K Y, ZHANG T, et al. A GIS-based tool for the China national mineral resource assessment initiative: A case study of gold deposits in the Bayan Obo Group, Inner Mongolia, China[J]. Ore Geology Reviews, 2020, 120: 102523.

[37] PERRIN M, ZHU B T, RAINAUD J F, et al. Knowledge-driven applications for geological modeling[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2005, 47(1/2): 89-104.

[38] GUO J T, WANG X L, WANG J M, et al. Three-dimensional geological modeling and spatial analysis from geotechnical borehole data using an implicit surface and marching tetrahedra algorithm[J]. Engineering Geology, 2021, 284: 106047.

[39] WANG G W, LI R X, CARRANZA E J M, et al. 3D geological modeling for prediction of subsurface Mo targets in the Luanchuan District, China[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 71: 592-610.

[40] 毛先成, 赵莹, 唐艳华, 等. 基于 TIN 的地质界面三维形态分析方法与应用 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(4): 1493-1499.
MAO X C, ZHAO Y, TANG Y H, et al. Three-dimensional morphological analysis method for geological interfaces based on TIN and its application[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(4): 1493-1499. (in Chinese with English abstract)

[41] 花卫华, 宿紫莹, 朱玉华, 等. 大范围地质体分块建模方法 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(6): 257-265.
HUA W H, SU Z Y, ZHU Y H, et al. Large-range geological block modeling method[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(6): 257-265. (in Chinese with English abstract)

[42] JOURNEL A G, HUIJBREGTS C J. Mining geostatistics[M]. London: Academic Press, 1978.

[43] MALLET J L. Discrete smooth interpolation[J]. ACM Transactions on Graphics, 1989, 8(2): 121-144.

[44] CAUMON G, GRAY G, ANTOINE C, et al. Three-dimensional implicit stratigraphic model building from remote sensing data on tetrahedral meshes: Theory and application to a regional model of La Popa Basin, NE Mexico[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(3): 1613-1621.

[45] 邓浩. 面向隐伏矿体预测的三维地质建模与空间分析若干技术研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2008.
DENG H. Study on 3D geological modeling and spatial analysis for prediction of buried ore bodies[D]. Changsha: Central South University, 2008. (in Chinese with English abstract)

[46] CAUMON G, COLLON-DROUAILLET P, LE CARLIER DE VESLUD C, et al. Surface-based 3D modeling of geological structures[J]. Mathematical Geosciences, 2009, 41(8): 927-945.

[47] 王权, 邹艳红. 基于轮廓线层间形态插值的三维地质隐式曲面重构 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(5): 293-300.
WANG Q, ZOU Y H. Three-dimensional geological implicit surface reconstruction based on intermediate contour morphological interpolation[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(5): 293-300. (in Chinese with English abstract)

[48] YARUS J M, CHAMBERS R L. Stochastic modeling and geostatistics: Principles, methods, and case studies[M]. Tulsa, Okla: American Association of Petroleum Geologists, 1994.

[49] GUARDIANO F B, SRIVASTAVA R M. Multivariate geostatistics: Beyond bivariate moments[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1993: 133-144.

[50] CHEN Q Y, LIU G, MA X G, et al. Conditional multiple-point geostatistical simulation for unevenly distributed sample data[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2019, 33(4): 973-987.

[51] STREBELLE S. Conditional simulation of complex geological structures using multiple-point statistics[J]. Mathematical Geology, 2002, 34(1): 1-21.

[52] YANG L, HOU W S, CUI C J, et al. GOSIM: A multi-scale iterative multiple-point statistics algorithm with global optimization[J]. Computers & Geosciences, 2016, 89: 57-70.

[53] CHEN Q Y, MARIETHOZ G, LIU G, et al. Locality-based 3-D multiple-point statistics reconstruction using 2-D geological cross sections[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018, 22(12): 6547-6566.

[54] COMUNIAN A, RENARD P, STRAUBHAAR J. 3D multiple-point statistics simulation using 2D training images[J]. Computers & Geosciences, 2012, 40: 49-65.

[55] 薛佩佩, 文章, 梁杏. 地质统计学在含水层参数空间变异研究中的应用进展与发展趋势 [J]. 地质科技通报, 2022, 41(1): 209-222.
XUE P P, WEN Z, LIANG X. Application and development trend of geostatistics in the research of spatial variation of aquifer parameters[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(1): 209-222. (in Chinese with English abstract)

[56] ZHANG T, DU Y, HUANG T, et al. Reconstruction of spatial data using isometric mapping and multiple-point statistics[J]. Computational Geosciences, 2015, 19(5): 1047-1062.

[57] 尹艳树, 吴胜和, 张昌民, 等. 基于储层骨架的多点地质统计学方法 [J]. 中国科学(地球科学), 2008, 38(增刊 2): 157-164.
YIN Y S, WU S H, ZHANG C M, et al. Multi-point geostatistics method based on reservoir skeleton[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2008, 38(S2): 157-164. (in Chinese with English abstract)

[58] Mariethoz G, Caers J. Multiple-point geostatistics: Stochastic modeling with training images[M]. Manhattan, USA: John Wiley & Sons, 2014.

[59] CHEN Q Y, LIU G, MA X G, et al. 3D stochastic modeling framework for Quaternary sediments using multiple-point statistics: A case study in Minjiang Estuary area, Southeast China[J]. Computers & Geosciences, 2020, 136: 104404.

[60] CHEN Q Y, CUI Z S, LIU G, et al. Deep convolutional generative adversarial networks for modeling complex hydrological structures in Monte-Carlo simulation[J]. Journal of Hydrology, 2022, 610: 127970.

[61] 宋随宏, 史燕青, 侯加根. 基于生成对抗网络的储层地质建模方法研究进展 [J]. 石油科学通报, 2022, 7(1): 34-49.
SONG S H, SHI Y Q, HOU J G. Review of a generative adversarial networks(GANs)-based geomodelling method[J]. Petroleum Science Bulletin, 2022, 7(1): 34-49. (in Chinese with English abstract)

[62] CAO D P, HOU Z Y, LIU Q, et al. Reconstruction of three-dimension digital rock guided by prior information with a combination of

InfoGAN and style-based GAN[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 208: 109590.

[63] FENG R H, GRANA D, MUKERJI T, et al. Application of Bayesian generative adversarial networks to geological facies modeling[J]. Mathematical Geosciences, 2022, 54(5): 831-855.

[64] MATSUOKA D, WATANABE S, SATO K, et al. Application of deep learning to estimate atmospheric gravity wave parameters in reanalysis data sets[J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(19): e2020GL089436.

[65] GOODFELLOW I, POUGET-ABADIE J, MIRZA M, et al. Generative adversarial networks[J]. Communications of the ACM, 2020, 63(11): 139-144.

[66] LECUN Y, BENGIO Y, HINTON G. Deep learning[J]. Nature, 2015, 521: 436-444.

[67] 刘静, 陈建平. 我国三维成矿预测的研究现状及发展趋势 [J]. 地质学刊, 2017, 41(3): 441-447.
LIU J, CHEN J P. Research status and development trend of 3D metallogenic prediction in China[J]. Journal of Geology, 2017, 41(3): 441-447. (in Chinese with English abstract)

[68] 成秋明. 应用复杂性-非线性理论开展成矿预测: 奇异性理论-广义自相似性-分形谱系多重分形理论与应用 [J]. 矿床地质, 2006, 25(增刊 1): 463-466.
CHENG Q M. The application of complexity-nonlinear theory to ore prognosis: The singularity theory-generalized self-similarity-fractal lineage multiple fractal theory and its application[J]. Mineral Deposits, 2006, 25(S1): 463-466. (in Chinese with English abstract)

[69] 陈建平, 吕鹏, 吴文, 等. 基于三维可视化技术的隐伏矿体预测 [J]. 地学前缘, 2007, 14(5): 54-62.
CHEN J P, LÜ P, WU W, et al. A 3D method for predicting blind orebodies, based on a 3D visualization model and its application[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(5): 54-62. (in Chinese with English abstract)

[70] NIELSEN S H H, CUNNINGHAM F, HAY R, et al. 3D prospectivity modelling of orogenic gold in the Marymia Inlier, western Australia[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 71: 578-591.

[71] 许强, 董秀军, 李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 957-966.
XU Q, DONG X J, LI W L. Integrated space-air-ground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 957-966. (in Chinese with English abstract)

[72] 王威, 王水林, 汤华, 等. 基于三维 GIS 的滑坡灾害监测预警系统及应用 [J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3379-3385.
WANG W, WANG S L, TANG H, et al. Application of 3-D GIS to monitoring and forecast system of landslide hazard[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3379-3385. (in Chinese with English abstract)

[73] 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, 33(2): 123-128.
WU C L, TAN Z H, LI W Z, et al. Research and development of GeoHazard: A geological hazard exploration information system of the Three Gorges Reservoir area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, 33(2): 123-128. (in Chinese with English abstract)

[74] WANG J G, SCHWEIZER D, LIU Q B, et al. Three-dimensional landslide evolution model at the Yangtze River[J]. Engineering Geology, 2021, 292: 106275.

[75] KRUIVER P P, WIERSMA A, KLOOSTERMAN F H, et al. Characterisation of the Groningen subsurface for seismic hazard and risk modelling[J]. Netherlands Journal of Geosciences, 2017, 96(5): s215-s233.

[76] 屈红刚, 潘懋, 刘学清, 等. 城市三维地质建模及其在城镇化建设中的应用 [J]. 地质通报, 2015, 34(7): 1350-1358.
QU H G, PAN M, LIU X Q, et al. Urban 3-D geological modeling and its application to urbanization[J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(7): 1350-1358. (in Chinese with English abstract)

[77] DOU F F, LI X H, XING H X, et al. 3D geological suitability evaluation for urban underground space development: A case study of Qianjiang Newtown in Hangzhou, eastern China[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 115: 104052.

[78] FRICK M, SCHECK-WENDEROTH M, CACACE M, et al. Boundary condition control on inter-aquifer flow in the subsurface of Berlin (Germany): New insights from 3-D numerical modelling[J]. Advances in Geosciences, 2019, 49: 9-18.

[79] GUO J T, XU X C, WANG L Y, et al. GeoPDNN 1.0: A semi-supervised deep learning neural network using pseudo-labels for three-dimensional shallow strata modelling and uncertainty analysis in urban areas from borehole data[J]. Geoscientific Model Development, 2024, 17(3): 957-973.

[80] 吴胜和, 李宇鹏. 储层地质建模的现状与展望 [J]. 海相油气地质, 2007, 12(3): 53-60.
WU S H, LI Y P. Reservoir modeling: Current situation and development prospect[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2007, 12(3): 53-60. (in Chinese with English abstract)

[81] 吴胜和, 岳大力, 刘建民, 等. 地下古河道储层构型的层次建模研究 [J]. 中国科学(地球科学), 2008, 38(增刊 1): 111-121.
WU S H, YUE D L, LIU J M, et al. Hierarchical modeling of underground paleochannel reservoir architecture[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2008, 38(S1): 111-121. (in Chinese with English abstract)

[82] 于兴河, 李胜利, 赵舒, 等. 河流相油气储层的井震结合相控随机建模约束方法 [J]. 地学前缘, 2008, 15(4): 33-41.
YU X H, LI S L, ZHAO S, et al. The constraining method on stochastic modeling for fluvial petroleum reservoir controlled by depositional facies integrating wells with seismic data[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(4): 33-41. (in Chinese with English abstract)

[83] 刘振峰. 致密砂岩油气藏储层建模技术方案及其应用 [J]. 地球物理学进展, 2014, 29(2): 815-823.
LIU Z F. Reservoir modeling program for tight oil & gas sands and its applications[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(2): 815-823. (in Chinese with English abstract)

[84] WANG G C, LONG S X, JU Y W, et al. Application of horizontal wells in three-dimensional shale reservoir modeling: A case study of Longmaxi-Wufeng shale in Fuling gas field, Sichuan Basin[J]. AAPG Bulletin, 2018, 102(11): 2333-2354.

[85] RADWAN A A, ABDELWAHHAB M A, NABAWY B S, et al. Facies analysis-constrained geophysical 3D-static reservoir modeling of Cenomanian units in the Aghar Oilfield (Western Desert,

Egypt): Insights into paleoenvironment and petroleum geology of fluviomarine systems[J]. Marine and Petroleum Geology, 2022, 136: 105436.

[86] WANG L X, YIN Y S, ZHANG C M, et al. A MPS-based novel method of reconstructing 3D reservoir models from 2D images using seismic constraints[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 209: 109974.

[87] SONG S H, MUKERJI T, HOU J G, et al. GANSim-3D for conditional geomodeling: Theory and field application[J]. Water Resources Research, 2022, 58(7): e2021WR031865.

[88] CUI Z S, CHEN Q Y, LUO J, et al. Characterizing subsurface structures from hard and soft data with multiple-condition fusion neural network[J]. Water Resources Research, 2024, 60(11): e2024WR038170.

[89] EIGBE P A, AJAYI O O, OLAKOYEJO O T, et al. A general review of CO_2 sequestration in underground geological formations and assessment of depleted hydrocarbon reservoirs in the Niger Delta[J]. Applied Energy, 2023, 350: 121723.

[90] FAN W Y, LIU G, CHEN Q Y, et al. Automatic reconstruction of geological reservoir models based on conditioning data constraints and BicycleGAN[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2024, 234: 212690.

Summary for “三维地质建模技术的最新进展和发展趋势”

Recent progress and development trends of three-dimensional geological modeling

CHEN Qiyu[1a, 1b, 1c, 2*], XUN Lei[1a], CUI Zhesi[1a], ZHOU Ruihong[1a], CHEN Dajie[1a], LIU Gang[1a, 1b, 1c]

1a. School of Computer Science; 1b. Hubei Key Laboratory of Intelligent Geo-Information Processing; 1c. Engineering Research Center of Natural Resource Information Management and Digital Twin Engineering Software, Ministry of Education, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430078, China;

2. Guizhou Key Laboratory for Strategic Mineral Intelligent Exploration, Guiyang 550081, China

* Corresponding author, E-mail: qiyu.chen@cug.edu.cn

Abstract: [**Objective**] Three-dimensional (3D) geological modeling is a technology that comprehensively utilizes computer technology, spatial information, scientific visualization, mathematical statistics, and other cutting-edge technologies and methods to conduct 3D digital representation, characterization, and reconstruction of geological phenomena and processes. Its purpose is to provide a visualization platform that integrates scientific research, auxiliary design and decision support for geoscientists and geological workers to understand and utilize the essential meanings and laws hidden behind geological phenomena and processes more deeply. [**Progress**] Building 3D geological models of research areas based on field geological data has become a necessary task for geological research and surveys involving basic geological surveys, natural resource exploration and development, geological disaster prediction and evaluation, etc. This paper deeply discusses the research objects, data sources, spatial data models of 3D geological modeling, as well as three different perspectives for understanding 3D geological modeling methods, and comprehensively summarizes the latest progress of 3D geological modeling technology. It also provides practical cases of 3D geological modeling technology in the fields of mineral exploration, geological disaster warning, urban underground space planning, and oil and gas reservoir characterization. [**Prospect**] Finally, based on the current research status, the future development trends of 3D geological modeling and related technologies are presented.

Key words: 3D geological modeling; spatial data model; data-driven and model-driven; explicit modeling and implicit modeling; geostatistical simulation; intelligent geological modeling

Received: 2024-05-28; Revised: 2024-09-10; Accepted: 2024-11-28

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240284