气藏三维地质模型建立技术研究进展与展望——基于中外文献的调研报告

摘要

三维地质模型是气藏开发地质研究成果的最终定量载体，也是储量计算、井位部署与数值模拟的共同数据基础。本报告以中国知网（CNKI）主题检索获得的 634 条题录（去重后 268 篇）为主干，逐篇提取 39 篇核心文献的完整摘要，下载并解析 24 篇论文全文以获取图件，辅以 9 篇经 Crossref 核验的国际期刊论文与 5 部经典专著，系统梳理了气藏三维地质模型建立技术的概念内涵、发展历程、数据基础、工作流程、关键方法与典型实践。研究表明：（1）该技术已经历二维制图、三维确定性建模与地质统计学、相控随机建模与多学科一体化、精细表征与智能建模四个阶段，目前正由“复现井点”走向“预测井间”、由“单一确定性模型”走向“多实现概率模型”；（2）技术体系可归纳为“数据准备—构造格架—相/岩相—储层属性—裂缝与缝洞—粗化与动态验证—不确定性评价”七个环节，其中相建模与裂缝建模是气藏建模的两大难点；（3）针对碳酸盐岩缝洞型、致密砂岩、火山岩、煤岩气与页岩气等不同类型气藏，已分别形成“分级控制+多信息融合”“地质知识库+多点地质统计”“火山机构约束+相控”“井震多级约束”等差异化技术路线，模型与动态资料的吻合率普遍达到 85%～96%；（4）当前的主要矛盾在于井震分辨率不匹配、训练图像与原型模型依赖、裂缝与缝洞的跨尺度表征、不确定性量化不足以及静动态闭环不充分；（5）未来将沿地震多信息驱动、过程模拟与多点统计融合、生成式人工智能、建模—数模一体化与数字孪生五条主线演进。

关键词：气藏；三维地质建模；储层表征；相控建模；多点地质统计学；裂缝建模；不确定性

Abstract

The 3D geological model is the ultimate quantitative carrier of development-geology results for a gas reservoir and the common data basis for reserve estimation, well placement and reservoir simulation. Based on 634 bibliographic records retrieved from CNKI (268 unique), full abstracts of 39 core papers, full texts and figures of 24 downloaded papers, 13 Crossref-verified international papers and 6 classic monographs, this report systematically reviews the concept, history, data basis, workflow, key methods and typical practices of 3D geological modelling for gas reservoirs. Four stages are identified: two-dimensional mapping, 3D deterministic modelling and geostatistics, facies-controlled stochastic modelling with multidisciplinary integration, and fine characterization with intelligent modelling. The technical system is summarized as seven steps: data preparation, structural framework, facies/lithofacies, petrophysical properties, fractures and vugs, upscaling and dynamic validation, and uncertainty assessment. Different technical routes have been established for fractured-vuggy carbonates, tight sandstones, volcanic, coal-bed and shale gas reservoirs, with history-match consistency generally reaching 85%-96%. Key problems include the scale gap between well and seismic data, dependence on training images, cross-scale characterization of fractures and vugs, insufficient uncertainty quantification, and a weak static-dynamic loop. Future directions are seismic-driven modelling, process-based simulation combined with multiple-point statistics, generative artificial intelligence, modelling-simulation integration and digital twins.
Key words: gas reservoir; 3D geological modelling; reservoir characterization; facies-controlled modelling; multiple-point geostatistics; fracture modelling; uncertainty

一、引言

1.1 研究背景与意义

天然气在中国能源结构中的比重持续上升，而气藏地质模型是连接勘探发现与开发生产的枢纽环节。所谓气藏三维地质模型，是指在三维空间内对气藏的构造形态、储层构型、储集物性、裂缝与缝洞系统以及气水分布进行定量表征所形成的数据体，它既是气藏描述成果的最终表达形式，也是储量计算、开发方案编制和数值模拟的共同输入[1-2]。模型精度的高低，直接决定了井位部署的成败、储量评估的可信度和开发指标预测的可靠性。

与油藏相比，气藏三维建模有其特殊性。其一，天然气的可压缩性使气藏的动态响应对压力系统和连通性极其敏感，模型中几米厚的隔夹层或一条未识别的遮挡断层，都可能造成数值模拟结果的量级偏差；其二，气水关系复杂，低渗致密气藏往往没有统一的气水界面，含水饱和度分布受毛细管压力、构造位置与储层非均质性共同控制，饱和度建模的难度明显高于油藏；其三，气藏类型多样，碳酸盐岩缝洞型、致密砂岩、火山岩、煤岩气与页岩气等不同储集空间的建模方法差异显著，很难用一套流程包打天下[3-5]。

近年来，勘探开发对象向深层、超深层与非常规领域延伸，气藏建模面临“储层更薄、非均质性更强、资料更少、精度要求更高”的多重压力。以鄂尔多斯盆地致密气、四川盆地碳酸盐岩气、塔里木盆地超深层气为代表的重点领域，单井控制程度低、地震分辨率有限，传统的“井点插值”式建模已难以满足需求[6-7]。与此同时，多点地质统计学、生成对抗网络、地震多信息驱动建模与建模—数模一体化等新方法不断涌现，正在改变气藏建模的技术路线[2,8-9]。在这一背景下，系统梳理“气藏三维地质模型如何建立、精度如何保证、还存在什么问题”，具有明确的现实意义。

1.2 调研范围、数据来源与文献计量特征

本报告的数据来源分为三部分。第一，中文文献以中国知网总库为检索平台，采用主题检索方式，检索词包括“气藏三维地质建模”“三维地质建模 储层”“相控建模”“多点地质统计学 储层建模”“裂缝 三维地质建模”“储层地质建模方法”“随机建模 储层非均质性”“碳酸盐岩 三维地质建模”“火山岩气藏 地质建模”“致密砂岩气藏 地质建模”“三维地质模型 不确定性”“地震约束 储层建模”“地质建模 数值模拟一体化”“机器学习 储层建模”“构造建模 断层”“储层地质建模流程”等 16 组，每组取前 2 页，共获得原始题录 634 条，按题名去重后得到 268 篇；对其中与建模主题直接相关的 39 篇逐条进入知网节点页面，提取完整中文摘要、关键词与出处信息。第二，为获取图件与更完整的论述，下载并解析了 24 篇代表性论文的 PDF 全文。第三，英文文献通过 OpenAlex、Crossref、Europe PMC 等后台检索并逐条核验 DOI，最终选用 9 篇国际期刊论文与 5 部经典专著，全部条目真实可溯源。

上述 268 条题录的文献类型构成如图 1-1 所示。期刊论文 131 篇，占 48.9%；硕士学位论文 90 篇，占 33.6%；会议论文 33 篇，占 12.3%；博士学位论文 12 篇，

占 4.5%；另有报纸与标准各 1 篇。学位论文占比接近四成，这一构成说明三维地质建模既是学术研究的前沿命题，也是以单区块、单气藏为对象的大量工程性、实践性课题，具有鲜明的“理论—实践”双重属性。

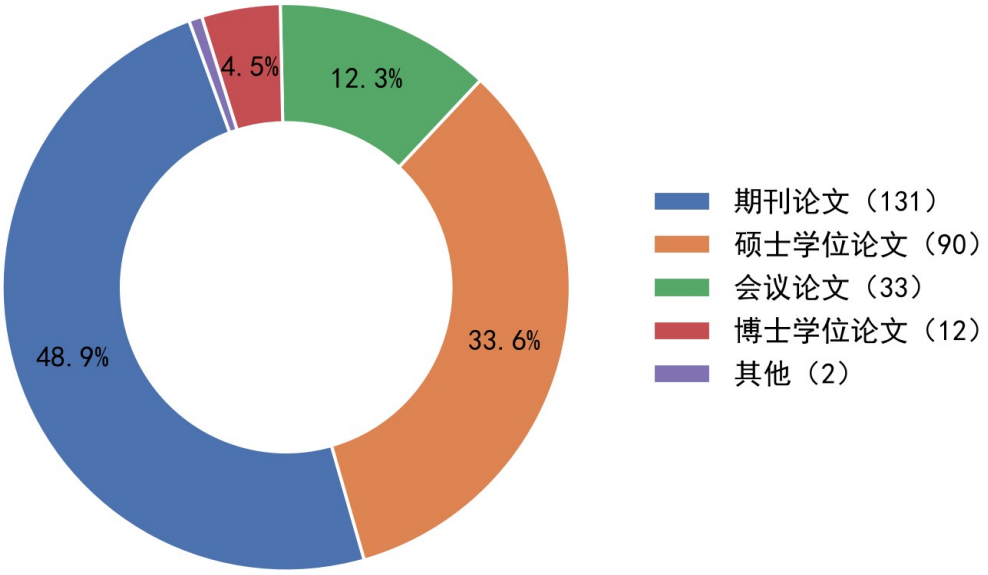


图 1-1 本次检索获得文献的类型构成

按题名关键词将 268 篇文献归入本报告的技术框架后，其主题分布如图 1-2 所示（单篇文献可同时涉及多个主题，故各主题篇数之和大于文献总数）。其中“气藏类型实践”类 89 篇，数量最多，反映建模研究高度依赖具体气藏案例；“建模方法与流程”类 73 篇居次，说明方法学探索仍是主要着力点；“地震约束与反演”34 篇、“智能建模”29 篇、“建模数模一体化”26 篇，构成本领域近五年增长最快的三个方向；而“构造与格架建模”仅 12 篇，表明构造建模方法已相对成熟、趋于标准化，新增研究空间有限。这一分布与下文第 4～6 章的论述重点相互印证。

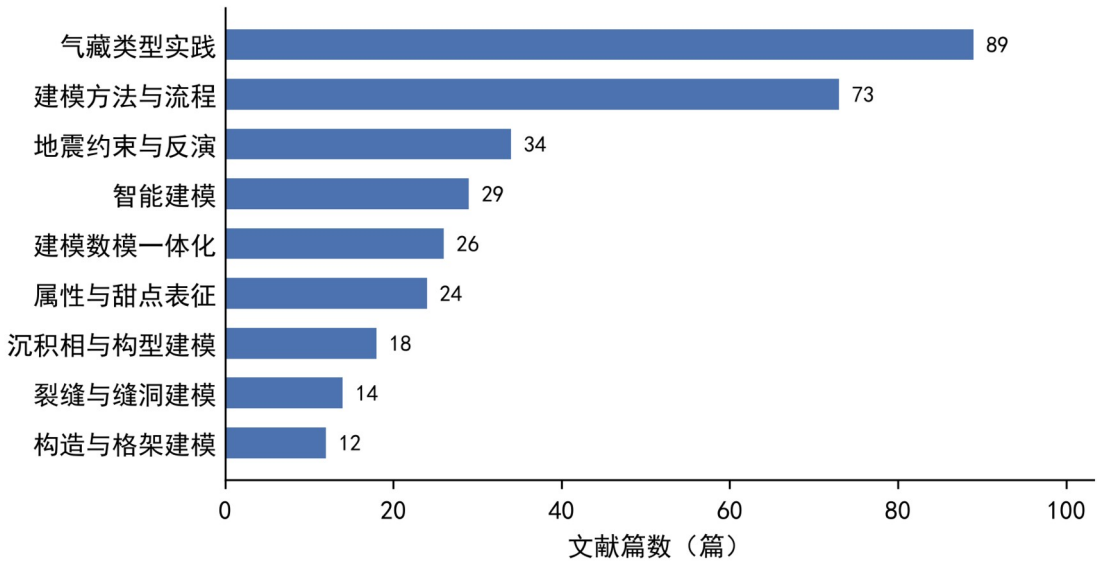


图 1-2 本次检索文献的研究主题分布

从文献来源看（图 1-3），《石油地球物理勘探》5 篇、《石油学报》4 篇，《天然气地球科学》《天然气技术与经济》《岩性油气藏》《地学前缘》《地球科学》《地质科技通报》《天然气工业》《科学技术与工程》《石化技术》《油气藏评价与开发》各 3 篇，构成了主要期刊来源；高校学位论文则集中于中国石油大学（北京）、西安石油大学、东北石油大学、中国地质大学（北京）、西南石油大学与长江大学。文献的年度分布（图 1-4）显示，2024 年以后文献量显著增加，2025 年达 76 篇、2026 年达 63 篇。需要说明的是，知网检索结果按相关度排序，本身带有“近因偏向”，这一分布既反映了检索方式的影响，也客观上说明深层、超深层与非常规气藏建模研究正处于快速升温期。

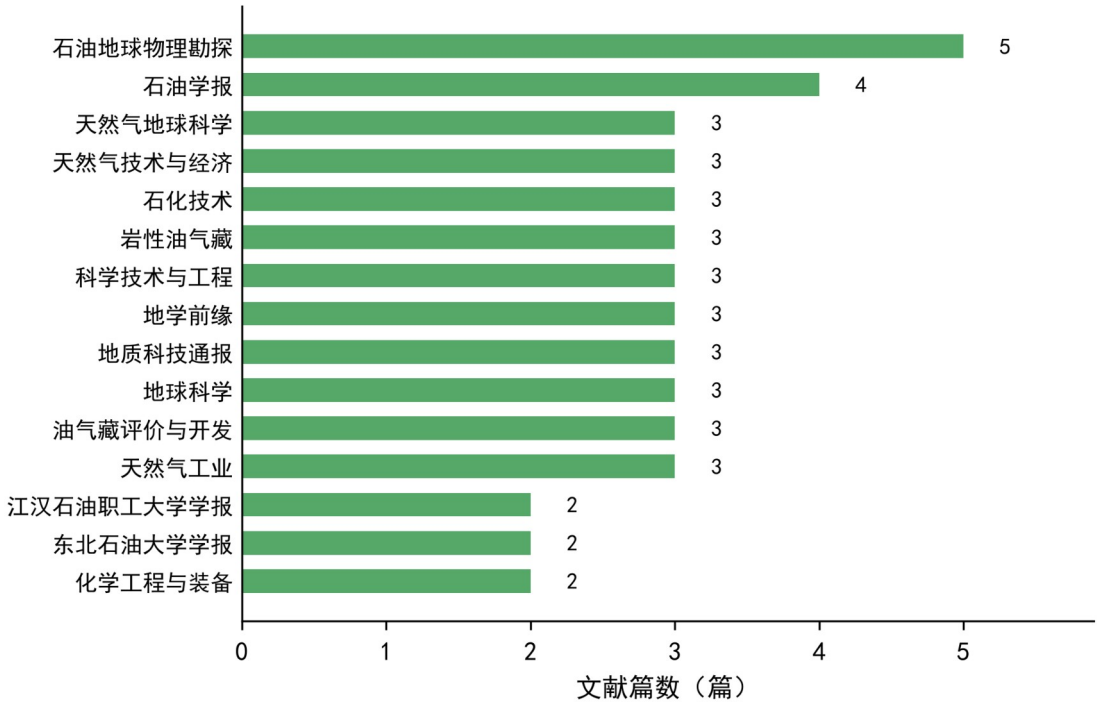


图 1-3 本次检索文献的主要来源分布（前 15 位）

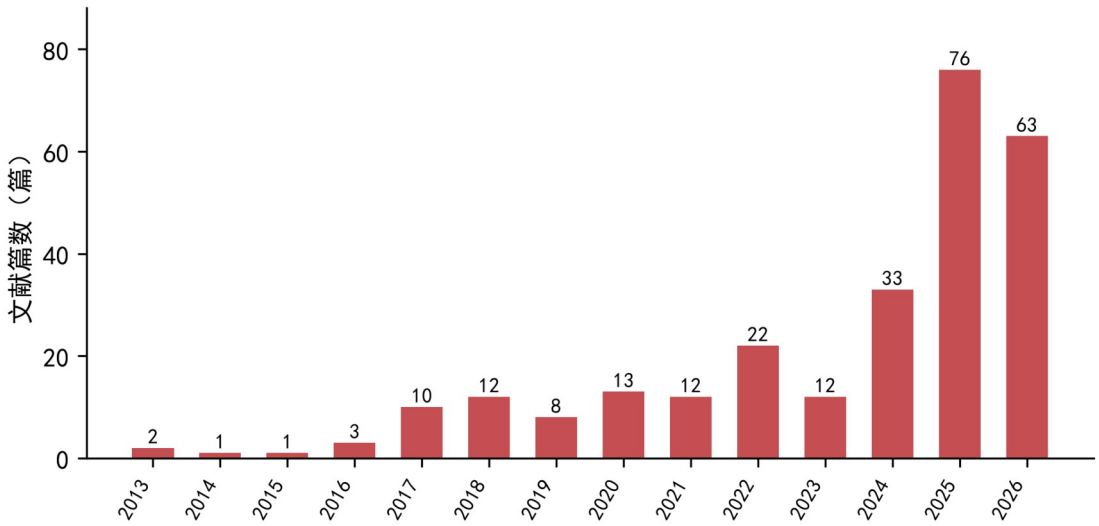


图 1-4 本次检索文献的发表年度分布

1.3 气藏三维地质模型的概念界定与技术定位

从成果形态看，气藏三维地质模型是一个由多类子模型叠合而成的模型体系，通常包括构造模型（断层、层面与地层格架）、沉积相或岩相模型、储层属性模型（孔隙度、渗透率、含气饱和度、泥质含量等）、裂缝与缝洞模型，以及在此基础上的流体分布模型与储量计算模型[10-11]。按建模阶段，可将其分为概念模型、静态模型与预测模型；按数学性质，则可分为确定性模型与随机（概率）模型。确定性模型给出唯一的最可能实现，随机模型则通过多个等概率实现刻画井间的不确定性[12]。

在技术定位上，三维地质建模处于气藏描述与数值模拟的接合部。向上，它承接构造解释、沉积相研究、成岩作用分析与测井解释的成果；向下，它为数值模拟提供网格化、粗化后的属性场，并通过历史拟合接受动态资料的检验与修正[2,13]。因此，模型质量不能仅以“与井点吻合”来衡量，而应以“能否复现气藏动态行为”为最终标准。赵永胜早在 1998 年即指出，储层三维地质模型若不能与数值模拟有效衔接，就难以真正摆脱“静态模型好看、动态预测不准”的困境[1]；这一判断在近三十年后依然是本领域的核心命题，也构成了本报告第 9 章讨论建模—数模一体化的出发点。

需要强调的是，三维地质模型并不能自动消除数值模拟中的不确定性。模型本身隐含的理想化假设（如层内均质、断层封闭性恒定、相序马尔可夫性），以及“描述精度不可能高于地质家的经验认识”这一客观限制，使模型与地下真实之间始终存在方法论缺口[14]。因此，现代建模理念更强调“系统量化并传递不确定性”，而非追求唯一的“正确模型”。这一认识上的转变，是理解近十年技术演进的关键。

二、技术发展历程与阶段特征

气藏三维地质建模并非一成不变的技术流程，而是随资料条件、计算能力与开发需求不断演化的过程。依据建模对象尺度、核心资料与成果形态的变化，可将其大致划分为四个阶段（表 2-1、图 2-1）。

表 2-1 气藏三维地质建模的发展阶段与主要特征

阶段	时间范围	建模对象	核心资料	代表性方法	成果形态
二维制图	1980 年代前	层段、井点	岩心、测井	手工插值、等值线	平面图、剖面图
确定性建模	1980—1990 年代	储层体	三维地震、测井	克里金、确定性插值	构造与属性模型
相控随机建模	1990 年代末—2010 年	相带、构型	井震联合、知识库	序贯指示、目标体、多点统计	多实现相模型
智能精细建模	2010 年至今	单砂体、缝洞	多信息、动态、AI	DFN、过程模拟、GAN	多尺度概率模型

2.1 二维制图阶段

早期气藏描述以井点资料为主，通过岩心观察、测井解释建立单井储层剖面，再以井间对比和平面等值线外推的方式形成气藏整体认识。该阶段的核心工作是储层参数的求取与制图，代表性成果是各类储层等厚图、孔隙度平面图与含气饱和度图。受资料密度限制，描述精度主要取决于井距，井间预测能力薄弱，构造与储层的三维空间关系只能通过多张二维图件在头脑中“叠合”。

2.2 三维确定性建模阶段

三维地震资料的普及与地质统计学方法的引入，使气藏描述从二维制图走向三维定量建模。20 世纪 80 年代末至 90 年代，Houlding 系统提出了三维地质模拟（3D geoscience modeling）的概念框架，将信息管理、地质解释、地质统计预测与三维可视化整合为统一流程[15]；Deutsch 与 Journel 的 GSLIB 软件则把变差函数分析、克里金与序贯高斯模拟等方法工程化、可操作化，为工业界大规模应用奠定了基础[16]。这一阶段的模型以确定性插值为主，强调“对井点数据的最佳估计”，但对储层非均质性的随机性认识不足，模型往往过于平滑，难以再现真实的相变与隔夹层分布。

我国学者在此阶段的贡献集中体现在气藏描述与建模的结合上。王月华等以克拉 2 气田为例，将储层地质建模方法系统应用于气藏描述，形成了“构造—沉积—储层—建模”的完整链条[17]；张春针对川东北沙罐坪—芭蕉场地区石炭系复杂构造带碳酸盐岩气藏，探索了构造复杂条件下的描述与建模方法[18]。这些工作奠定了国内气藏建模“以描述为基础、以模型为出口”的技术传统。

2.3 相控随机建模与多学科一体化阶段

20 世纪 90 年代末以后，随机建模逐步取代确定性插值成为主流。其核心思想是：储层参数的空间分布受沉积相控制，先建立相模型、再在相约束下建立属性模型，即“相控建模”。序贯指示模拟（SIS）因能处理离散相类型而得到广泛应用，目标体建模则擅长刻画河道、点坝等具有特定几何形态的地质体[11]。与此同时，多点地质统计学（MPS）由 Strebelle 提出并实现为 SNESIM 算法，通过训练图像提取多点空间相关性，突破了传统两点统计学无法再现复杂相带形态的局限[19]，被迅速应用于河流相、浊积相与碳酸盐岩储层建模[20]。

这一阶段另一个显著特征是“多学科一体化”。地质、地震、测井、油藏工程人员共同参与建模，地震属性与反演成果开始作为井间约束引入模型，露头与现代沉积知识被系统整理为“地质知识库”，用于约束相带规模与叠置样式。国内在这一时期的代表性成果包括：郭智等针对苏里格致密砂岩气藏提出的辫状河相三维地质建模方法[21]；杨特波等基于地质知识库建立的苏里格苏 X 区块储层模型[22]；阮基富等在磨溪气田嘉二段气藏开展的相控建模实践[23]；宋新民等针对火山岩气藏提出的精细描述与建模技术[4]。

2.4 精细表征与智能建模阶段

2010 年以来，气藏建模的对象由“储层体”细化到“单砂体、裂缝系统与缝洞体”，技术手段则向多信息融合与人工智能方向快速演进[24]。一方面，离散裂缝网络（DFN）建模、多尺度裂缝耦合、断控缝洞体分级建模等方法逐步成熟，使裂缝性、缝洞型气藏的三维表征成为可能[3,25]；另一方面，以生成对抗网络（GAN）为代表的深度生成模型被引入相建模与属性建模，通过学习训练样本的统计特征直接生成三维地质体，并在井点条件化、非平稳性处理等方面取得进展[9,26-27]。

图 2-1 以时间轴的形式概括了这一演进脉络：从 1990 年代的确定性建模与两点地质统计学，到 2000 年后的多点地质统计学，再到 2010 年后的地质过程建模与 2020 年以来的智能建模，方法更替的背后是“资料类型由单一到多元、建模目标由复现到预测、成果形态由确定到概率”的三重转变[2]。

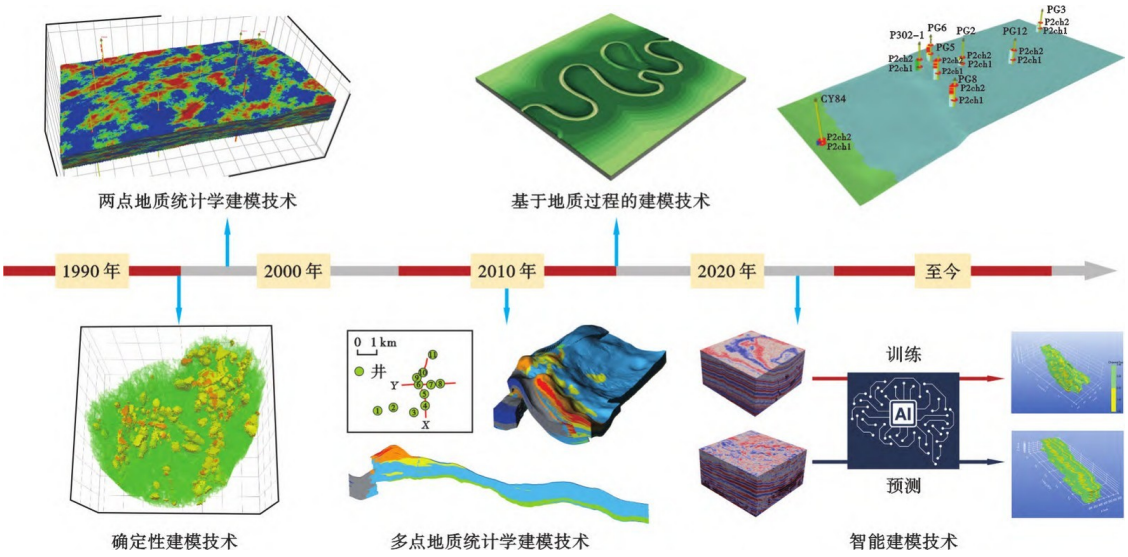


图 2-1 三维地质建模技术的演进脉络（据文献[2]修改）

三、数据基础、工作流程与网格设计

3.1 多源数据体系

气藏三维建模的第一步是建立完整、可信的数据体系。按资料类型与尺度，可将其分为五类（表 3-1）：一是井点资料，包括岩心描述与实验分析、测井曲线与解释成果、试井与产能测试数据，具有纵向分辨率高、横向控制有限的“一维”特征；二是地震资料，包括构造解释成果、地震属性体、叠前/叠后反演数据体与蚂蚁体等裂缝预测体，具有横向覆盖广、纵向分辨率低的“二维/三维”特征；三是动态资料，包括生产历史、压力测试、示踪剂、微地震监测与产气剖面，是检验模型可靠性的最终标尺；四是露头、现代沉积与实验模拟资料，用于建立地质知识库、约束相带规模与构型样式；五是先验地质认识，包括沉积模式、成藏模式与构造演化认识，是“知识驱动”建模的核心输入[8,28]。

表 3-1 气藏三维地质建模的主要数据类型与作用

数据类型	典型内容	尺度特征	在建模中的作用
岩心与实验	岩性、物性、孔隙结构、压汞与核磁	厘米级，纵向连续	岩石物理标定、相类型判别、储层下限确定
测井	常规曲线、成像测井、解释成果	分米级，单井	硬数据、相与属性解释、裂缝识别
地震	构造解释、属性体、反演体、蚂蚁体	十米级横向，米级纵向	井间趋势约束、断层与裂缝预测
动态	生产历史、试井、示踪剂、微地震	井—气藏尺度	模型验证、历史拟合、连通性判别
知识与原型	露头、现代沉积、知识库、沉积模式	多尺度	训练图像、相带规模约束、构型样式

3.2 总体工作流程

综合文献中的共性做法，气藏三维地质建模可归纳为“数据准备—构造格架—相/岩相—储层属性—裂缝与缝洞—粗化与动态验证—不确定性评价”七个环节（图 3-1）。各环节之间存在明确的约束关系：构造格架控制相带的垂向分布，相模型控制属性的空间分区，属性模型与裂缝模型共同构成数值模拟的输入，动态验证的结果又反过来修正相、属性与裂缝模型，形成闭环[2,29]。

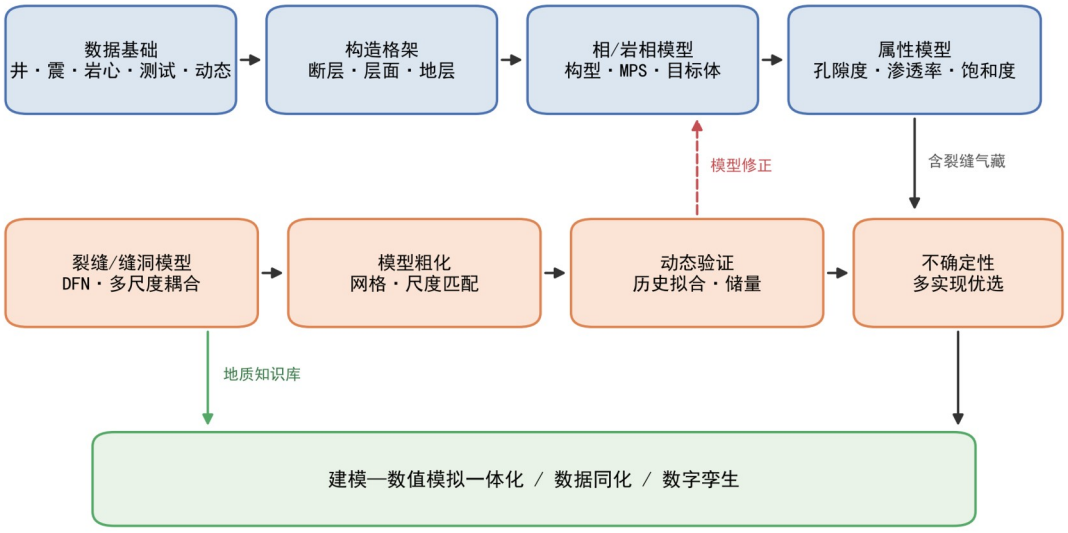


图 3-1 气藏三维地质建模的总体流程

第一环节是数据准备与质控，包括井斜校正、测井归一化、分层对比、地震层位标定与断层组合，其质量直接决定后续建模的上限。第二环节是构造建模，建立断层模型与层面模型，形成三维地层格架。第三环节是相或岩相建模，在格架内表征沉积微相、岩相或储层类型的空间分布。第四环节是属性建模，在相约束下模拟孔隙度、渗透率与含气饱和度。第五环节是裂缝与缝洞建模，针对裂缝性、缝洞型气藏建立离散裂缝网络或缝洞体模型。第六环节是模型粗化与动态验证，通过历史拟合检验模型可靠性。第七环节是不确定性评价，通过多实现模拟与敏感性分析给出模型的不确定性区间[12,14]。

3.3 网格设计与尺度匹配

网格设计是建模中容易被忽视却影响深远的环节。平面网格步长通常取 20～50 m，垂向网格步长 0.5～1.0 m，需兼顾储层厚度、井距与数值模拟的计算能力。网格过粗会漏失薄夹层与侧积层，导致模型“假连通”；网格过细则会使井间外推的不确定性被放大为“精确的假象”。文献中较为一致的做法是“分级网格”：在相建模阶段采用较细网格以保留构型信息，在属性建模与数模阶段按需粗化，并通过粗化前后的储量与连通性对比校验粗化误差[6,30]。

尺度匹配还包括资料尺度的匹配。测井的纵向分辨率可达分米级，地震的纵向分辨率通常为 10～20 m，二者相差 1～2 个数量级。若直接将地震反演体作为硬数据参与建模，会压制测井揭示的薄储层信息；若完全依赖井点插值，又会丢失地震的横向趋势。因此，现代建模普遍采用“分级约束”策略：以井点为硬数据、以地震反演或属性体为软约束（概率体或趋势体），在不同尺度上分别施加控制[29,31-32]。

四、构造建模与格架建立

4.1 断层建模

构造模型是三维地质模型的“骨架”，其核心是断层与层面。断层建模的难点在于断层的空间形态复杂、交切关系多样，尤其是走滑断裂带内部发育多期次、多级次的断裂组合，传统手工解释与建模效率低、一致性差[3,33]。

目前工业界主要采用三类方法。第一类是基于地震解释断面的确定性建模，即将地震解释的断层面三角网格化后直接引入建模软件，再通过断层连接、交切处理与断面平滑形成断层模型。这是最常用的方法，其精度取决于地震解释质量，在断裂密集区往往出现断面交切不合理、断层“穿层”等问题[34]。第二类是基于地震属性的断层自动提取，如相干体、方差体、蚂蚁体与 Fault Likelihood（FL）属性。商晓飞等针对川西新场须二段气藏提出 FL 属性分区标定的思路：按构造单元分区，用钻井揭示的裂缝发育程度标定各区的裂缝响应阈值，再以等比例归一化整合，使 FL 属性与钻井裂缝的吻合率超过 85%[35]。第三类是隐函数（implicit）建模，于海生等将地质概念模型、数学模型与几何拓扑模型结合，基于最小能量泛函融合多种地质信息线性约束构建地层隐式标量场，通过多级网格分裂求解，实现了对数百条复杂交切断层的高效建模与增量更新[33]。隐函数方法的优势在于自动化程度高、拓扑一致性好，代表了构造建模的重要发展方向[10,14]。

4.2 层面与地层格架建模

层面建模的关键是“井震结合、分级控制”。常规做法是以地震解释层位为趋势、以井分层为硬数据，通过协克里金或最小张力法生成层面，再按断层错断关系裁剪，形成断块化的地层格架。对于剥蚀尖灭、地层超覆等复杂接触关系，需引入层序地层学认识建立“地层序列”，由粗到细逐级建模。高恒逸等在四川盆地新场地区雷四段气藏建模中，采用 Structural Framework 建模的 VBM（Volume Based Modeling）算法，以多级层序为约束，由粗到细逐步构建断层与层面模型，有效解决了顶部地层剥蚀尖灭与多级断裂并存的建模难题[36]。

图 4-1 给出了合川区块茅口组气藏储层顶面构造的三维形态，井点、断层与构造等高线的空间关系一目了然，这种“构造面+断层+井点”的三维格架正是后续相建模与属性建模的基础[37]。

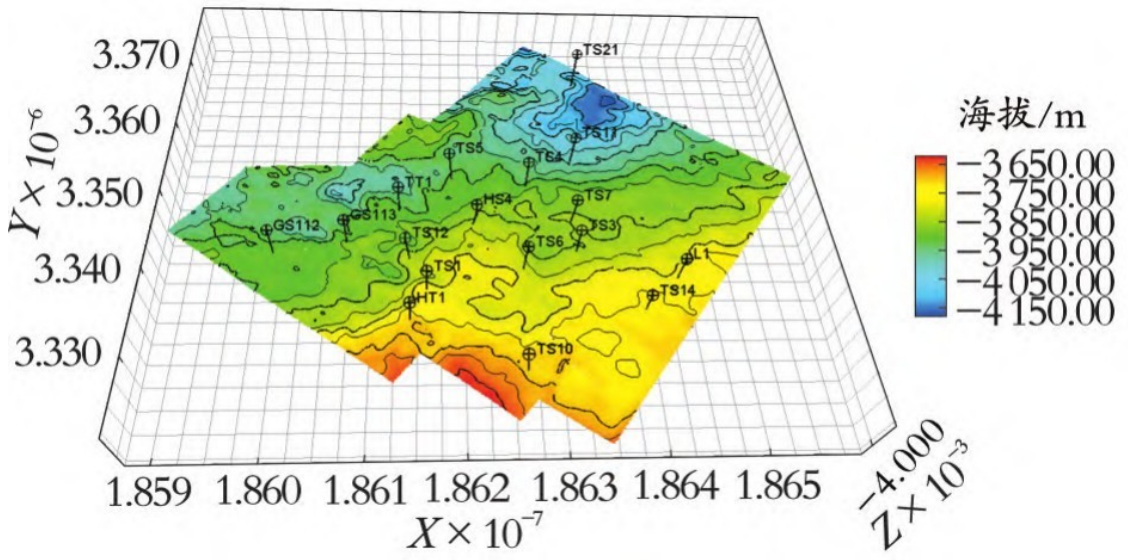


图 4-1 合川区块茅口组气藏储层顶面构造三维模型（据文献[37]）

对于火山岩、煤岩等特殊储层，格架建模还需引入“火山机构”或“煤层分区”的概念。苍正毅在松南气田东岭地区以沉积夹层、风化壳与岩性突变面划分火山喷发期次，将营城组一段划分为 4 个期次，并识别出 4 类火山机构，使火山岩格架建模有了明确的地质约束[38]；刘世隆等在深部煤层建模中通过井震结合相互校正，建立三维高精度构造模型，为煤层、夹矸与顶底板的精细刻画提供格架[32]。

4.3 构造模型的质量控制

构造模型的质量控制主要包括三方面：一是断层与层面的拓扑一致性，即断面不应相互穿透、层面不应跨越断层错断；二是井点吻合度，即模型层面在井轨迹处的深度与实钻分层应控制在允许误差内；三是与动态资料的相容性，即断层封闭性与断块连通性应与试井、生产干扰测试的认识一致。文献中普遍将“井震矛盾”视为构造建模的主要不确定性来源：地震速度场误差可造成 10～30 m 的深度偏差，足以改变气水界面的判断[14]。因此，构造模型不应被视为“一次性成果”，而应在开发过程中随新钻井、新地震与动态资料不断更新。

五、沉积相与岩相建模

5.1 确定性相建模与分级约束

确定性相建模适用于井网较密、相带边界清楚的情形，其做法是以单井相解释为硬数据、以地震属性或反演体为约束，通过插值或概率截断生成相模型。刘江丽等针对四川盆地龙岗气田鲕粒滩型碳酸盐岩储层井网密度小的特点，以单井解释数据为硬数据、地震属性体为约束，建立了碳酸盐岩相控储层模型，将纵向上小尺度精细井资料与地震横向高分辨率的优势结合，提高了井间预测的合理性[39]。高福坤等在安塞油田长 6 特低渗油藏中提出“地震多信息联合分级约束”的思路：以单砂体级沉积微相成果构建确定性相模型，再在相模型与地震岩性概率体的空间分级约束下采用序贯高斯模拟建立高精度岩相模型[29]。

5.2 序贯指示模拟与两点地质统计学

序贯指示模拟（SIS）是相建模的经典随机方法，其通过指示变差函数刻画各相的空间连续性，并按序贯方式逐点抽样。SIS 的优点是能忠实于井点数据、易于条件化，缺点是仅依赖两点统计量，难以再现河道、点坝等具有复杂几何形态的地质体，模拟结果常出现“椒盐状”噪声或相带形态失真[11,20]。在气藏建模实践中，SIS 更多用于相带形态相对简单、井网较密的场景，或作为多点地质统计学方法的对照基准[40]。

5.3 多点地质统计学与训练图像

多点地质统计学通过训练图像（training image）提取多点空间相关性，能够在条件化井点数据的同时再现复杂的相带形态，是近二十年相建模领域最重要的进展[19,41]。其技术核心在于训练图像的建立。王鸣川等系统梳理了六类训练图像建立方法：手工绘制、基于目标模拟、三维地震信息提取或转化、基于原型模型、基于过程模拟以及二维图像方法，并对比了不同方法的数据来源、优势与不足[8]。这一综述揭示了一个基本矛盾：训练图像的质量决定 MPS 建模的精度，而高质量训练图像恰恰难以获得，这构成了 MPS 实用性的主要限制。

针对这一矛盾，国内学者从“知识库”与“过程模拟”两个方向寻求突破。李少华等以鄂尔多斯盆地 D 气田砾质辫状河储层为例，通过现代沉积卫星图片解译测量建立心滩长宽、河道宽度与心滩宽度的经验公式，结合文献调研确定宽厚比，形成地质知识库；在此基础上采用层次化建模策略，先建立五级构型单元模型，再以基于目标方法建立四级构型单元训练图像，用 MPS 建立四级构型模型，并与经典 SIS 方法对比，结果表明知识库约束的层次建模能更好刻画不同级次构型单元的几何形态与叠置样式[40]。图 5-1 即为该研究建立的心滩宽度统计知识库，这类定量统计正是训练图像参数化的基础。

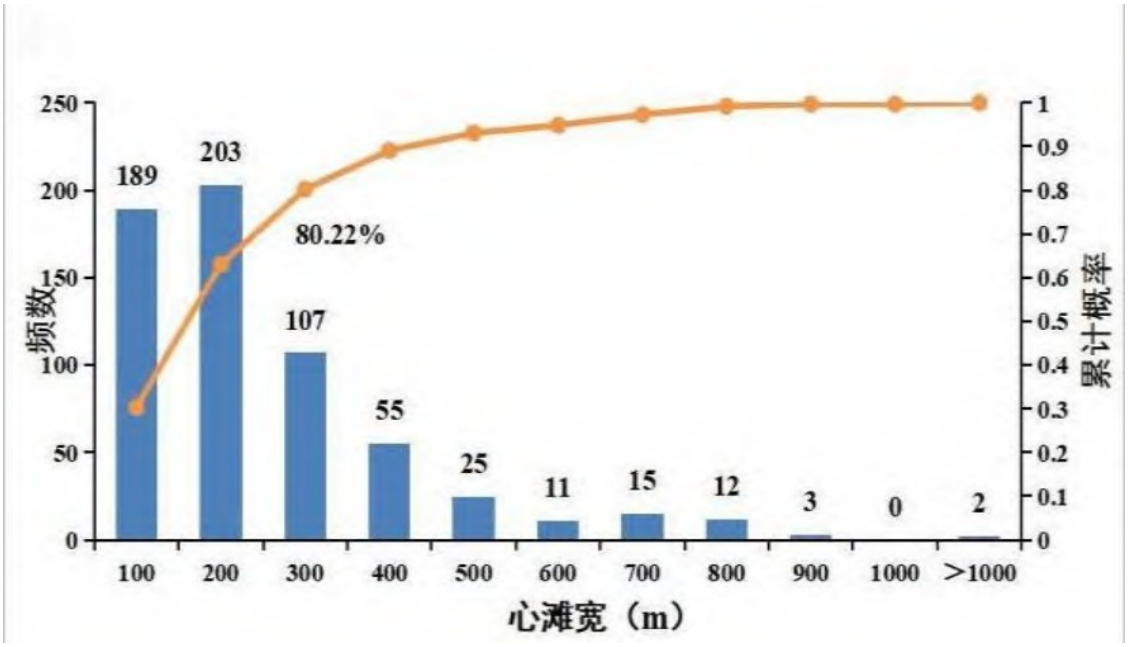


图 5-1 砾质辫状河心滩宽度统计与累计概率曲线（据文献[40]）

唐佳凡等则从沉积动力学角度切入：以南美 Oriente 盆地 J 油田 M1 层潮控河口湾储层为对象，设定地形坡折高度、潮汐幅度、河口流速与沉积物粒径等参数，通过沉积动力学模拟建立三维沉积模型，再将其转换为三维训练模板，联合井上测井数据用 MPS 构建储层模型；验证井与测井数据的相对误差为 7.6%，精度高于序贯高斯模拟[42]。这一“过程模拟生成训练图像”的思路，使训练图像从“主观绘制”走向“机理约束”，是 MPS 发展的重要方向。

当训练图像质量较好时，MPS 的效果显著优于两点统计学。哈什米等对伊朗西南部一条状碳酸盐岩储层的对比研究表明，MPS 能够更好地再现河口坝与相带组合的几何形态，而两点统计学方法则倾向于产生过于连续的相带[20]。黄文松等则把地震信息引入 MPS：先通过波阻抗的相标定建立“砂体概率生成曲线”，将波阻抗数据转化为地震相的空间概率分布，再以井震结合的方式开展辫状河储层多点统计建模，结果表明该方法能较好降低稀井网地区建模结果的不确定性，河道与心滩的连续性也得到更好体现[43]。图 5-2 为鄂尔多斯盆地 D 气田基于 MPS 建立的辫状河相模型，心滩、辫状河道与泛滥平原的空间配置关系清晰，体现了 MPS 对相带形态的再现能力。

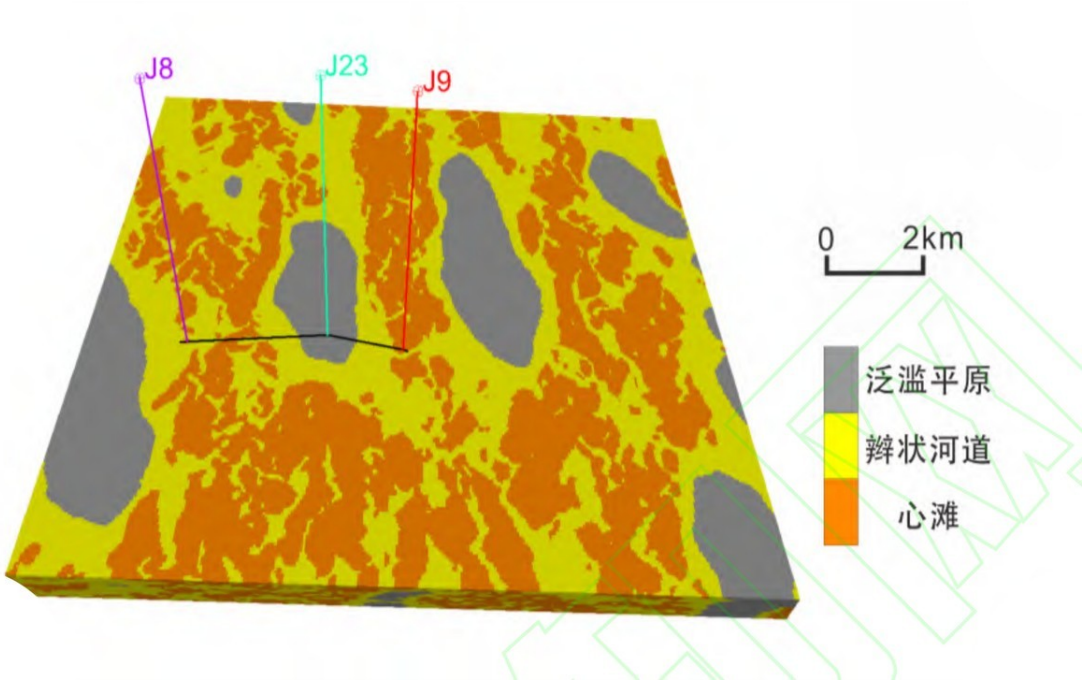


图 5-2 基于多点地质统计学的辫状河相模型（据文献[40]）

5.4 构型建模与地质知识库

对于河流相、辫状河三角洲等构型复杂的储层，“层次化构型建模”已成为主流。其基本思路是按构型级次逐级建模：先建立复合砂体或构型单元级次的模型，再在其内部建立单砂体、侧积层或夹层模型。陈仕臻等以胜利油田史南区块曲流河储层为例，提出构型模式控制下的多尺度建模方法：针对点坝砂体级次，利用基于过程的非条件模拟获取并筛选与储层认识相匹配的训练图像，建立全区模型；针对点坝内部级次，选取密井网井区，用不同位置的旋转方位角约束侧积层发育程度，建立局部模型；最终模型与井点及生产动态的吻合度提高至 92.7%[30]。陈仕臻等进一步将地震沉积学提取的成因与演化信息（地层切片揭示的成因单元演化过程）转化为概率体，作为约束条件建立辫状河储层模型，用于开发井设计后使水平井油层钻遇率提高到 95% 以上[44]。

地质知识库是构型建模的“参数仓库”。杨特波等以苏里格气田苏 X 区块为例，建立了基于地质知识库的致密砂岩气藏储层建模流程，将露头、现代沉积与密井网解剖得到的定量参数（砂体宽厚比、河道宽深比、夹层频率等）转化为建模约束条件，显著降低了井间预测的不确定性[22]。李少华等的工作则进一步说明，知识库不仅可以约束相带规模，还可以直接用于训练图像的构建[40]。

5.5 深度生成模型与智能相建模

近年来，以生成对抗网络为代表的深度生成模型被引入相建模。其基本思想是让生成器学习训练图像的分布，判别器判断生成样本的真伪，二者对抗训练后，生成器可产生与训练样本统计特征高度相似的三维地质体。李少华等将基于单一图像的生成

对抗网络（SinGAN）应用于 N 气田两个小层的沉积微相建模，仅需一张图像即可训练，生成的相模型与训练图像刻画的微相空间结构比经典 Simpat 方法更为相似[26]。

针对三维建模中训练样本稀缺、结构一致性不足的问题，翁正平等提出多判别器注意力生成对抗网络（MDAGAN）：引入 X、Y、Z 三个方向的判别器联合约束，增强三维空间的方向一致性与整体结构协调性；在判别器中引入混合中值空间—通道注意力模块，提高对多尺度结构特征的表达能力；以变差函数与方向连通性函数定量评价，生成的三维地质体在宏观结构形态、空间相关性与连通拓扑特征上均与参考地质体保持一致[9]。宋随宏等则将 GANSim 框架扩展为“增强型 GANSim”，用于多模式、非平稳浊积扇储层建模，通过地质模式证伪与局部判别器设计解决井周相带断连问题，并指出 GANSim 训练完成后建模速度约为 SNESIM 的 1000 倍[27]。

国际上的相关研究同样活跃。Bai 与 Tahmasebi 提出将机器学习与多点地质统计学结合的混合建模框架，用机器学习方法学习训练图像的高层特征以提升 MPS 的再现能力[45]；Lee 等将潜扩散模型用于条件化储层相生成，通过学习数据分布实现井点条件下的多样本生成[46]。这些工作表明，深度生成模型正在从“替代 MPS”走向“与 MPS、过程模拟融合”，其价值不仅在于生成速度，更在于能够以概率方式表达相带分布的不确定性。

图 5-3 为四川盆地新场地区雷四段潮坪相碳酸盐岩气藏的岩相模型，微—粉晶白云岩、藻粘结白云岩与含灰云岩等有利岩相的三维分布清晰可辨，体现了“成因+多属性约束”相建模在碳酸盐岩气藏中的应用效果[36]。

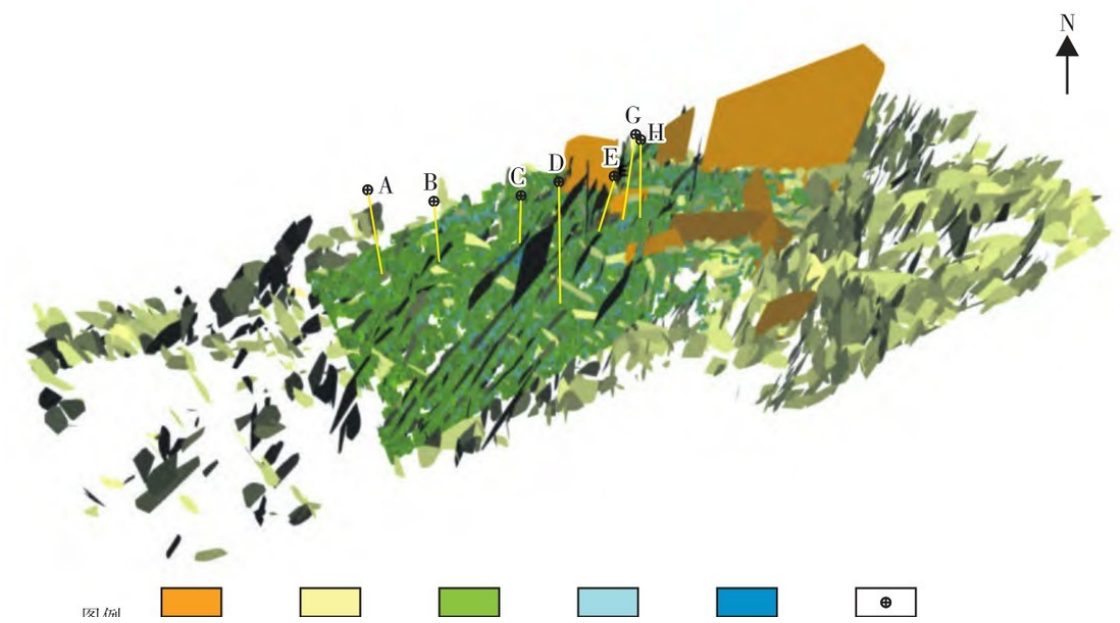


图 5-3 潮坪相碳酸盐岩气藏岩相模型（据文献[36]）

六、储层属性建模与不确定性分析

6.1 井震协同的分级约束

属性建模是在相模型约束下，对孔隙度、渗透率、含气饱和度等连续变量进行空间模拟。由于井点数据稀疏、地震数据纵向分辨率低，单一数据源难以满足精度要求，因此“井震协同、分级约束”成为主流策略。贾霆以新疆 HC 油田为例，通过叠前高分辨率地质统计学反演获得砂岩概率体，将其作为三维软约束体参与岩相与孔隙度建模，在井控程度低的条件下有效提高了储层展布预测的精度[31]。张海峰等提出基于导航金字塔的强地震约束建模方法：先利用导航金字塔技术对地震数据进行分解与重构，凸显地质规律，再采用贝叶斯—序贯高斯方法建立测井数据与地震属性的约束关系，使砂体预测厚度与实际厚度的吻合率达到 86%[47]。

6.2 孔隙度建模

孔隙度建模通常采用序贯高斯模拟（SGS），并以相模型分区、以地震反演体或概率体作为趋势约束。高恒逸等在新场雷四段气藏中优选岩相、储层相及储层孔隙度反演数据体开展分级约束，采用序贯高斯随机模拟建立基质储层孔隙度模型，该方法能有效刻画薄储层与夹层的属性变化[36]。对于致密砂岩气藏，孔隙度与岩相、泥质含量的关系更为密切，建模时需先通过测井解释与岩石物理建模确定岩性边界，再在岩相约束下模拟孔隙度[6,31]。在超深层缝洞型储层中，Deng 等将深度学习用于顺北油田的孔隙度预测，利用井震数据训练网络以克服地震信号弱、非均质性强的困难，为井点稀疏条件下的属性建模提供了数据驱动方案[48]。

6.3 渗透率建模

渗透率是属性建模中最难准确表征的参数，其非均质性强、与孔隙度的相关性弱、受裂缝与微裂缝影响显著。工程实践中常用三种方法：一是基于孔渗回归的经验公式，简单但精度有限；二是相控序贯高斯/序贯指示模拟，能够体现不同相的渗透率差异；三是引入裂缝信息建立等效渗透率场。高福坤等在安塞长 6 油藏中应用孔渗关系经验公式计算渗透率模型，并以克里金插值建立含油饱和度模型[29]。对于致密砂岩与火山岩气藏，渗透率还受应力敏感性与微裂缝控制，仅靠孔渗关系难以刻画，需要结合岩心覆压实验与裂缝密度模型进行校正[38,49]。

6.4 含气饱和度与气水关系建模

含气饱和度建模是气藏区别于油藏的关键环节。由于天然气的可压缩性与气水界面识别的困难，饱和度模型往往需要综合测井解释、毛细管压力曲线、构造位置与气水界面认识。丁雅洁等在准噶尔盆地莫北凸起三工河组凝析气藏建模中，将砂体展布与孔渗参数协同约束，结合凝析气井流物组分反演与井底压力耦合，建立“地质—相态—井筒”一体化模型，建模物性与实测值相关系数均大于 0.99，产量拟合精度大于

96%[50]。图 6-1 为该模型的含气饱和度分布，可见含气饱和度在高部位富集、向低部位逐渐降低，与构造—气水关系认识一致。

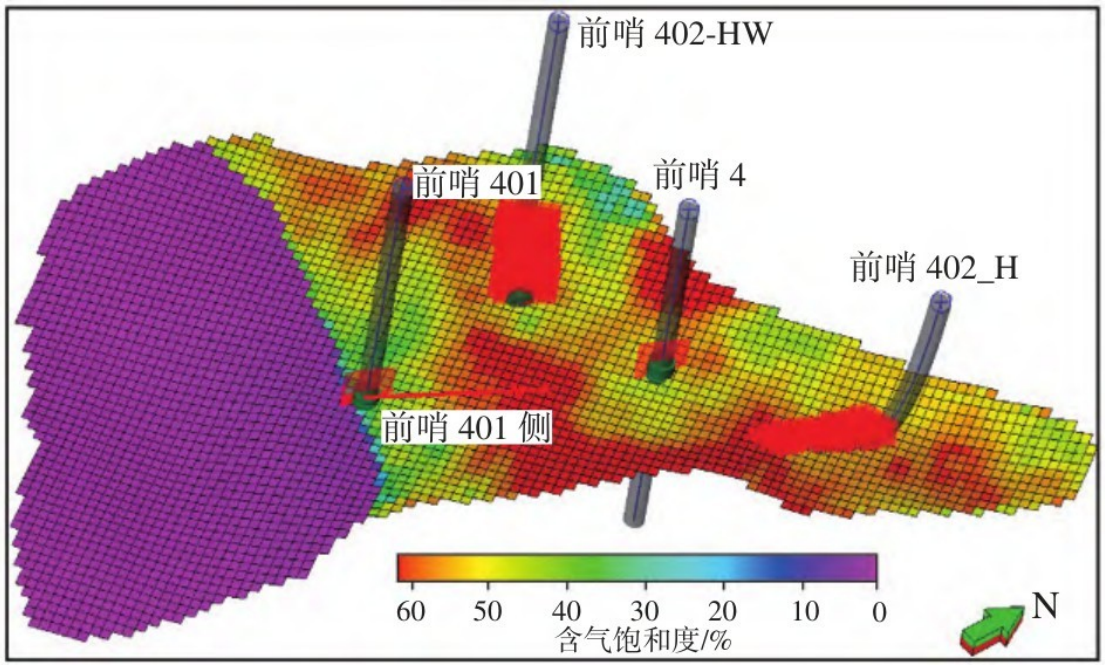


图 6-1 莫北凸起三工河组凝析气藏含气饱和度模型（据文献[50]）

对于膏盐层控气的气藏，饱和度建模还需考虑膏盐层对气水分布的控制。彭先等在四川盆地铁山坡飞仙关组建立了膏盐层与气水层井震结合相控三维模型，识别出封盖控气、降储控气与使气藏复杂化三类控气模式，实现了膏盐层控气非均质性的三维定量表征[51]。

6.5 不确定性分析与多实现优选

随机建模的价值不仅在于给出一个模型，更在于给出模型的不确定性区间。标准做法是生成多个等概率实现（通常 50～200 个），统计各网格节点属性值的分布，据此评价储量与连通性的不确定性，其概率论基础与实现策略可参见经典教材[11,52]。Kamali 等在伊朗西南部碳酸盐岩储层的研究中，通过序贯高斯模拟生成多个等概率模型，并对孔隙度、渗透率与储量的不确定性进行了系统分析，指出“单一确定性模型无法表达储层非均质性带来的风险”[12]。

不确定性分析的另一条路径是“敏感性分析+分级评价”：识别对储量与产能影响最大的参数（如气水界面、有效厚度下限、裂缝密度），通过蒙特卡洛抽样或实验设计量化其影响，进而指导资料补取与开发决策。Wellmann 与 Caumon 在三维构造模型不确定性的综述中强调，构造不确定性往往被低估，而它恰恰是储量不确定性的主要来源之一[14]。近年来，随着建模—数模一体化的发展，基于集合的数据同化方法（如 ES-MDA）开始用于同步更新建模参数与属性参数，使不确定性分析从“静态统计”走向“动态约束”[13]。

图 6-2 为合川区块茅口组缝洞型碳酸盐岩气藏的孔隙度与渗透率模型，二者在三维空间上的非均质性显著，孔洞发育带与裂缝带的叠合关系清晰，反映了“沉积相—储层类型分级控制+多尺度信息融合”建模思路的效果[37]。

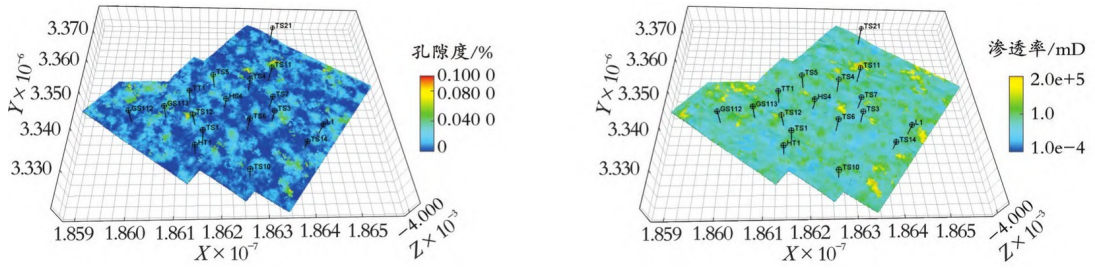


图 6-2 缝洞型碳酸盐岩气藏孔隙度与渗透率模型（据文献[37]）

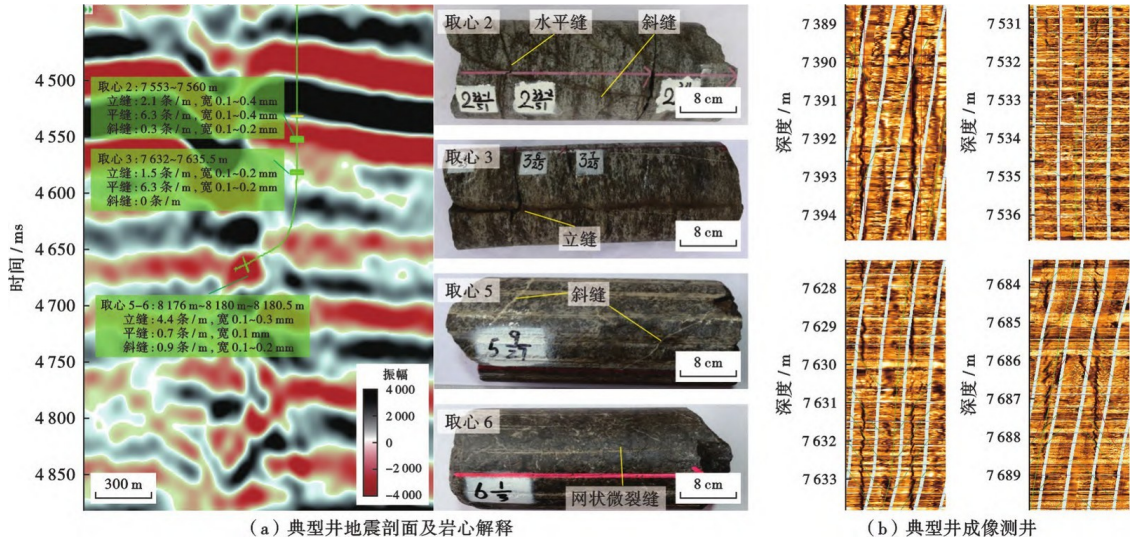
七、裂缝与缝洞型储层的三维建模

7.1 裂缝表征与建模方法体系

裂缝性气藏的建模难度远高于常规孔隙型气藏，原因在于裂缝的规模跨度极大（从微米级微裂缝到数百米的一级断裂）、分布受构造应力与岩性共同控制、且地震响应弱、井点钻遇率低。因此，裂缝建模形成了“地质表征—地震预测—随机模拟—动态验证”的专门技术链[49,53]。

裂缝表征的基础是岩心、薄片与成像测井（FMI）。图 7-1 展示了顺北地区典型井的岩心裂缝与成像测井响应：岩心上可识别立缝、平缝、斜缝与网状微裂缝，成像测井则给出裂缝的产状、密度与开度，二者结合可建立单井裂缝发育强度曲线[3]。在井间，裂缝预测主要依赖地震属性，常用属性包括相干、方差、曲率、蚂蚁体与 Fault Likelihood。李重逢等以珠江口盆地 X 工区为例，提取方差、蚂蚁体、混沌、曲率与断层距离五类属性，采用偏最小二乘回归（PLSR）建立地震属性与 FMI 裂缝密度的统计映射，并依据变量投影重要性指标确定属性权重（曲率 0.263、蚂蚁体 0.215、方差 0.190、混沌 0.189、断层距离 0.142），拟合决定系数达 0.925；随后以井点 FMI 裂缝密度为硬数据、多属性融合体为井间趋势约束，通过序贯高斯模拟建立三维裂缝密度模型，并用未参与建模的 A1 井三个井段独立验证，预测均值 0.55、0.66、1.39 m^{-1} 与实测 0.62、0.73、1.43 m^{-1} 接近[54]。

在建模方法上，裂缝模型通常按尺度分别处理：大尺度裂缝（断层级）采用确定性建模，从中提取断裂片；中、小尺度裂缝采用随机建模或离散裂缝网络（DFN）建模；微裂缝则以等效属性的方式融入基质。王珂等以大北 12 气藏为例，分别采用随机与确定性方法建立小尺度与大尺度裂缝模型，二者叠加得到总裂缝模型，并指出背斜核部裂缝密度低但张开度、渗透率高，翼部密度高但张开度低，这一“密度—开度”的非同步关系对产能预测至关重要[49]。



（a）典型井地震剖面及岩心解释　　（b）典型井成像测井

图 7-1 顺北地区典型井岩心裂缝与成像测井响应（据文献[3]）

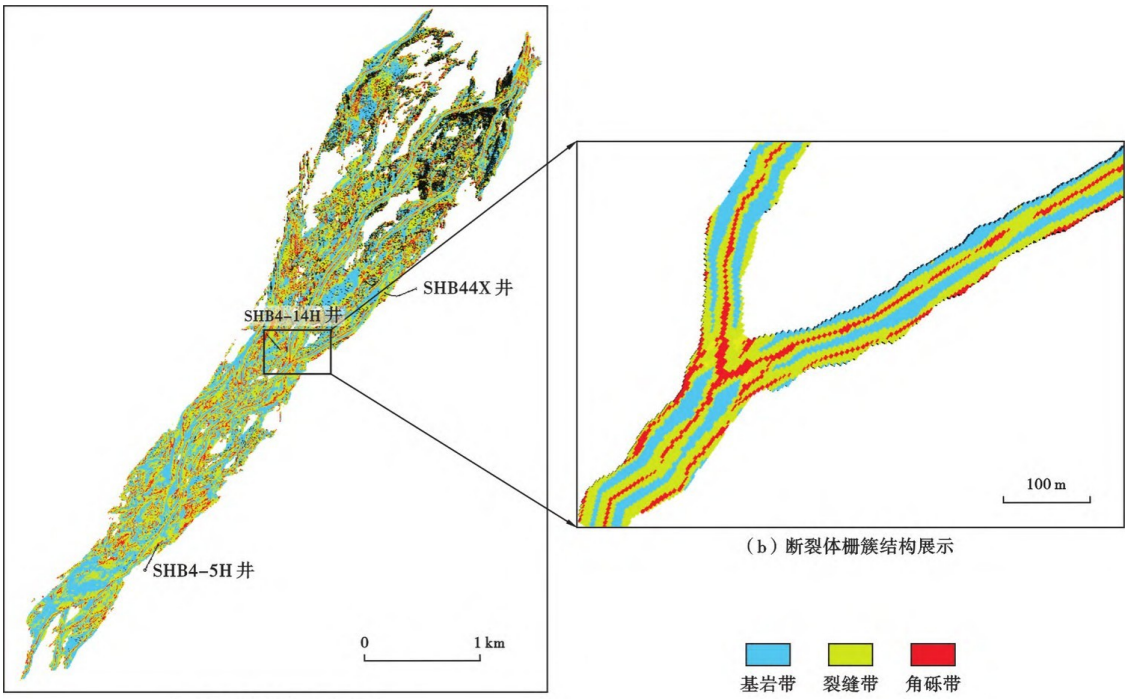
7.2 多尺度裂缝耦合与“动态缝网”

传统裂缝建模只考虑天然裂缝，而致密砂岩与页岩在开发过程中还会产生水力压裂缝与注水诱导裂缝，三者耦合形成的“复杂缝网系统”才是控制渗流的实际介质。吕文雅等以姬塬油田 L 井区长 8 段致密砂岩储层为例，基于岩心、薄片、测井、微地震监测与生产动态资料，分别表征天然裂缝、水力压裂缝与注水诱导裂缝：天然裂缝以 NEE—SWW 向和近 EW 向高角度缝为主；水力压裂缝走向 48°～71°，平均缝长 204.5 m、缝宽 38.5 m、缝高 14.7 m；注水诱导裂缝以近 NE—SW 向和 NW—SE 向为主。在此基础上按成因与形成时间将三类裂缝耦合，建立了动态的复杂缝网系统三维模型，并经数值模拟验证了可靠性[25]。

刘艳祥等在庆城油田长 7 页岩油储层中提出“多尺度裂缝分级建模”流程：用蚂蚁体等叠后地震属性识别大尺度裂缝，以确定性方法建模；结合储层地质力学方法与常规测井裂缝解释建立中、小尺度裂缝发育强度约束体，以该约束体协同裂缝参数采用随机建模方法分别建立中、小尺度裂缝模型；最后将三个尺度的裂缝网络融合，并建立裂缝等效属性模型。模型与单井裂缝发育规律及生产动态吻合[53]。马玉林等则以露头统计约束断缝体轮廓：断缝体宽度一般 80～160 m，内部划分破碎带（5～20 m）、裂缝带（15～50 m）与基质带，用裂缝密度波动递减函数刻画内部结构带，再以离散裂缝网络方法建立内部裂缝模型，为少井、地震分辨率不足条件下的断缝体建模提供了新思路[55]。这一“大尺度确定性+小尺度随机”的分级策略，已成为裂缝建模的通用范式。

7.3 断控缝洞体的分级建模

塔里木盆地顺北地区的断控缝洞型储集体是近年气藏建模领域最具代表性的难题。尚浩杰等以顺北 4 号断裂带为例，提出按构造级次划分储层级次、逐级建模再融合的思路：将储集体划分为走滑断裂带、断控体、断裂体—类洞穴—杂乱体、断裂体—类洞穴内部充填以及微裂缝共 5 个层级，高层级约束低层级。对断裂体、类洞穴与杂乱体，分别采用结构张量、相干能量梯度与方差地震属性体表征，以井震结合确定阈值并用确定性建模截断，建立轮廓模型；针对内部栅簇发育模式，以轮廓模型为约束，采用改进的基于目标的方法逐层建立内部栅簇结构三维模型；对微裂缝则采用改进的离散裂缝网络模拟，建立包含共轭裂缝、弯曲裂缝的微裂缝网络。最终按优先级融合各层级模型，预测储量与动态分析储量的误差为 6.54%，数值模拟累积产油量与压力拟合误差在 10% 以内[3]。图 7-2 即为该断控体内部充填与栅簇结构模型，可见基岩带、裂缝带与角砾带在断面附近的规律性配置。



（a）断裂体内部充填模型
（b）断裂体栅簇结构展示

图 7-2 顺北 4 号断裂带断控体内部充填与栅簇结构模型（据文献[3]）

吴云龙则从“分级控制+多信息融合”的角度，以合川区块茅口组缝洞型碳酸盐岩储层为对象，采用随机建模与确定性建模相结合的方式，逐步构建构造框架、沉积相分布、储层分类及孔隙度、渗透率、含气饱和度模型，并采用地质统计学与多属性协同模拟技术建立多尺度融合的缝洞体模型，形成了一套可操作的精细储层建模方法[37]。陈叔阳等在顺北 1 号断裂带的工作进一步验证了该方法体系在不同断裂带之间的可移植性[56]。

7.4 双重介质与裂缝—孔洞融合

裂缝性碳酸盐岩气藏通常为“裂缝—孔隙”双重介质，模型中需同时表达基质与裂缝两套系统。李辉等以普光气田飞仙关组—长兴组储层为例，将建模对象划分为基质与裂缝两大介质：基质模型基于单井解释数据与地震阻抗数据体，通过井震结合、逐级相控、多趋势融合概率体约束建立；裂缝模型按分尺度、分期次思路，融合成因、地质与地震信息，综合构造应力场、距断层远近与裂缝地震敏感属性，采用熵权法结合专家经验构建多元融合裂缝空间展布约束体，再以 DFN 方法建立裂缝模型。对所建双重介质模型开展数值模拟，各井历史拟合效果均在 80% 以上[57]。

高恒逸等在新场雷四段气藏中采用分尺度 DFN 模型，优选模拟算法分别构建大、中、小尺度裂缝片模型，利用同位条件赋值算法融合各尺度裂缝模型，建立完整的三维裂缝网格模型，形成了“多级层序+VBM 算法控制格架、成因+多属性约束控制属性模型、分尺度 DFN 模型融合控制裂缝模型”的建模思路[36]。彭家俊针对库车坳陷超深层凝析气藏，将微裂缝与基质组合、中小尺度裂缝采用连续裂缝介质模型（DPM）、内部断层与断裂系统采用离散裂缝模型（DFN），建立了孔—缝—断三类介质地质模型，成功复现了边水沿大裂缝快速窜进的现象[7]。

八、典型气藏建模实践与对比

不同类型气藏的储集空间、非均质性与资料条件差异显著，其建模技术路线也各有侧重。表 8-1 汇总了本报告调研的主要气藏建模实践。

表 8-1 典型气藏三维地质建模实践对比

气藏类型	典型实例	核心难点	关键技术	效果
缝洞型碳酸盐岩	顺北 4 号、合川	断控体结构复杂	分级建模+属性截断+DFN	储量误差 6.54%
礁滩/潮坪相碳酸盐岩	普光、高磨、新场	强非均质、双重介质	VBM 格架+分级相控+DFN	历史拟合 >80%
致密砂岩	苏里格、大北 12	砂体薄、井距大	知识库相控+反演约束	储量分类、缝网拟合
火山岩	徐深、松南东岭	岩性岩相变化快	火山机构+期次约束	储量复算、水平井设计
煤岩气	米脂北 8# 煤	含气量非均质	井震多级约束	符合率 90.76%
凝析气	莫北三工河组	低渗、连通性差	地质—相态—井筒一体化	物性相关 >0.99，拟合 >96%
超深层/深水	库车 TB、东非 M	井少、地震精度低	孔缝断三类介质、多源共控	水侵复现、盲井检验

8.1 碳酸盐岩气藏

碳酸盐岩气藏是我国天然气增储上产的主体，也是建模技术最集中的领域。四川盆地高石梯—磨溪灯四气藏、普光气田、新场雷四段气藏、龙岗鲕粒滩气藏与塔里木盆地顺北断控缝洞气藏，几乎涵盖了碳酸盐岩储层的全部类型。这些气藏的共同特点是储集空间多样（孔、洞、缝共存）、非均质性极强、地震响应复杂，因而建模普遍采用“分级控制”策略：先按构造级次或储层类型分级，再逐级建模并融合[3,36-37]。

潘恒等针对川中高磨地区灯四气藏储集空间复杂、储层品质与发育位置差异大的特点，优化了构造建模、属性建模与天然裂缝建模方法，建立了完整的三维地质模型，模型对井间储层预测具有较高可信度[58]。刘江丽等在龙岗气田以单井解释为硬数据、地震属性体为约束，建立了鲕粒滩相控储层模型[39]。这些实践表明，碳酸盐岩气藏建模的关键不在于算法的新颖，而在于“地质认识—地震响应—井点标定”三者的闭环。

8.2 致密砂岩气藏

致密砂岩气藏以苏里格气田为典型代表，其砂体多期叠置、横向变化快、储层致密、非均质性强。郭智等针对苏里格辫状河相致密砂岩气藏，建立了以构型分级、相控约束为核心的建模方法，强调砂体叠置样式对连通性的控制[21]。郝璐璐等以苏里格中部 X 区为例，引入“确定+随机”建模思想，采用河流相储层建模技术计算地质储量 $1285.22\times10^{8}\ m^{3}$，并结合生产数据建立“甜点”评价标准，将储量分为四类，其中Ⅰ+Ⅱ类呈大面积连片分布[59]。杨特波等则通过地质知识库约束，提高了苏 X 区块井间砂体预测的合理性[22]。

大北 12 气藏代表了另一类致密砂岩气藏——构造裂缝发育的背斜型气藏。王珂等的研究表明，构造裂缝密度随单层厚度增大而减小、与距断层距离呈负相关，背斜核部与翼部的“密度—开度”关系相反，这一认识直接影响了裂缝属性等效模型的建立与开发对策的制定[49]。

8.3 火山岩气藏

火山岩气藏储集空间以原生气孔、杏仁体内孔、构造缝与溶蚀孔为主，岩性岩相变化快，是建模难度最大的气藏类型之一。宋新民等较早系统提出了火山岩气藏精细描述与地质建模的技术框架[4]。钟琳在徐深气田以单井数据、区域地质与地震资料为基础，建立了速度模型、构造模型、储层密度模型与概率模型，用于预测储层分布、靶点深度与气水界面位置，并成功应用于水平井设计，提高了储层钻遇率[60]。

苍正毅在松南气田东岭地区开展了更为系统的研究：以沉积夹层、风化壳与岩性突变面划分 4 个喷发期次，识别出 3 相 6 亚相与 4 类火山机构，将储集空间划分为 14 种类型；通过高压压汞与氮气吸附实验确定有效孔径下限 12 nm、有效孔隙度下限 3.82%；最终依托 Petrel 软件建立断层、层面、岩相与属性模型，明确了“靠近火山岩顶部或地层界面孔隙度高、渗透率高值沿深大断裂分布”的规律，并完成储量复算[38]。图 8-1 展示了徐深气田徐深 A 区块的断层、层位、密度与储层概率模型，直观反映了火山岩气藏“构造格架+属性体”的建模思路。

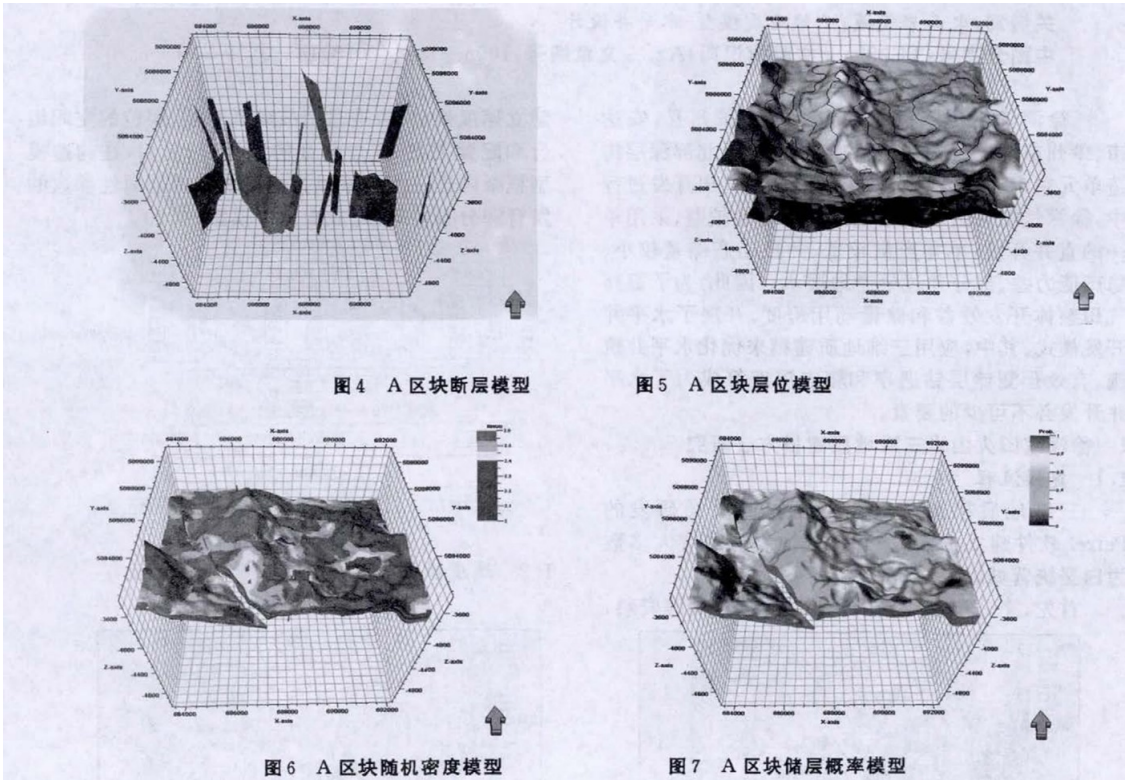


图 8-1 徐深气田 A 区块断层、层位、密度与储层概率模型（据文献[60]）

8.4 页岩气与煤岩气

页岩气与煤岩气属于非常规天然气，其建模重点由“储层物性”转向“含气性”“可压性”与“甜点”分布。页岩气建模通常以构造—岩相—属性的通用框架为基础，通过地震多属性融合与工程参数耦合刻画“甜点”区的空间分布[6,28]。

煤岩气是近年新兴的勘探领域。贺煜斐等以鄂尔多斯盆地米脂北 8# 煤为例，基于三维地震、测井与煤岩取心测试资料建立煤岩储层参数与含气量模型，经抽稀井检验，模型预测与钻井结果的符合率达 90.76%；通过模型解剖明确了“低灰分、高孔隙区是总含气量富集带，断裂带附近与褶皱转折端是游离气甜点区，低幅度背斜高部位是游离气富集带”的规律[5]。刘世隆等则提出井震结合多级约束的深部煤层三维建模方法，通过多级迭代约束刻画煤层、夹矸与顶底板的岩相与物性特征[32]。

8.5 深层、超深层与深水气藏

深层、超深层与深水气藏的共同特征是“埋深大、井少、井距大、地震精度低”，建模的核心矛盾是资料不足与精度要求高之间的冲突。彭家俊针对库车坳陷埋深超过 6000 m、储量近 $300\times10^{8}\ m^{3}$ 的 TB 凝析气藏，综合构造、地震、岩心与测井资料，采用构造框架建模、序贯指示相建模、相控属性建模与多尺度裂缝建模，完成 321 条断裂组合，建立了孔—缝—断三类介质模型，并据此明确了边水沿大裂缝快速窜进的规律与注气开发对策[7]。

李伟强等以东非深水海域 M 气藏为例，针对重力流与底流交互作用形成的海底扇水道储层，提出“EOD 模型+不同岩相发育概率+地震反演体+方位角趋势体”共控的

建模策略，采用层次相控建模与序贯指示模拟构建岩相模型，盲井检验表明模型与地质认识符合程度较高，在一定程度上降低了少井条件下深水储层建模的不确定性[61]。

8.6 实践对比与启示

综合上述实践，可以归纳出四点共性认识。第一，“分级”是应对非均质性的通用策略——无论是顺北的五级储层、新场的多级层序，还是姬塬的多尺度裂缝，其本质都是把复杂对象分解为可表征的级次，再逐级约束、逐级融合。第二，“多信息融合”是弥补资料不足的主要途径——井、震、岩心、动态与知识库的融合方式，决定了模型的上限。第三，“动态验证”是模型可靠性的最终判据——从顺北的储量误差6.54%、普光的拟合率 80%，到莫北的产量拟合 96%，凡是经过动态检验的模型，其可信度明显高于仅做井点吻合检验的模型。第四，“类型适配”是方法选择的基本原则——碳酸盐岩重在缝洞结构，致密砂岩重在构型与裂缝，火山岩重在机构与期次，煤岩气重在含气量，不存在普适的最优方法[6,28]。

九、模型粗化、动态验证与建模—数模一体化

9.1 模型粗化

地质模型网格通常达数百万至数千万个，而数值模拟所能承受的网格数往往只有十万至百万级，因此需要进行粗化。粗化的基本原则是“保通道、保储量、保连通”：对河道、裂缝带等高渗通道采用局部加密或渗透率张量粗化，对均质泥岩段采用算术平均或几何平均，并对比粗化前后的储量、井间连通性与压力传播特征。文献中较为一致的做法是“分级粗化+误差校验”，即粗化后必须重新进行储量计算与历史拟合，若误差超过阈值则调整粗化方案[2,6]。

9.2 动态验证与历史拟合

历史拟合是检验地质模型可靠性的核心手段。图 9-1 为顺北 4 号断裂带典型井的产油量与井底压力拟合曲线，模型对产量递减趋势与压力下降过程的再现程度较高，累积产油量与压力拟合误差均在 10% 以内[3]。类似地，普光气田双重介质模型的各井拟合率在 80% 以上[57]，莫北凝析气藏模型的产量拟合精度大于 96%[50]，庆城长 7 多尺度裂缝模型与生产动态数据吻合[53]。这些案例说明，“静态模型+动态拟合”的闭环已经成为气藏建模的标准配置。李勇等将地质建模与数值模拟用于煤层气微幅构造控藏控产分析，进一步说明建模—数模一体化在非常规气藏中的实用价值[62]。

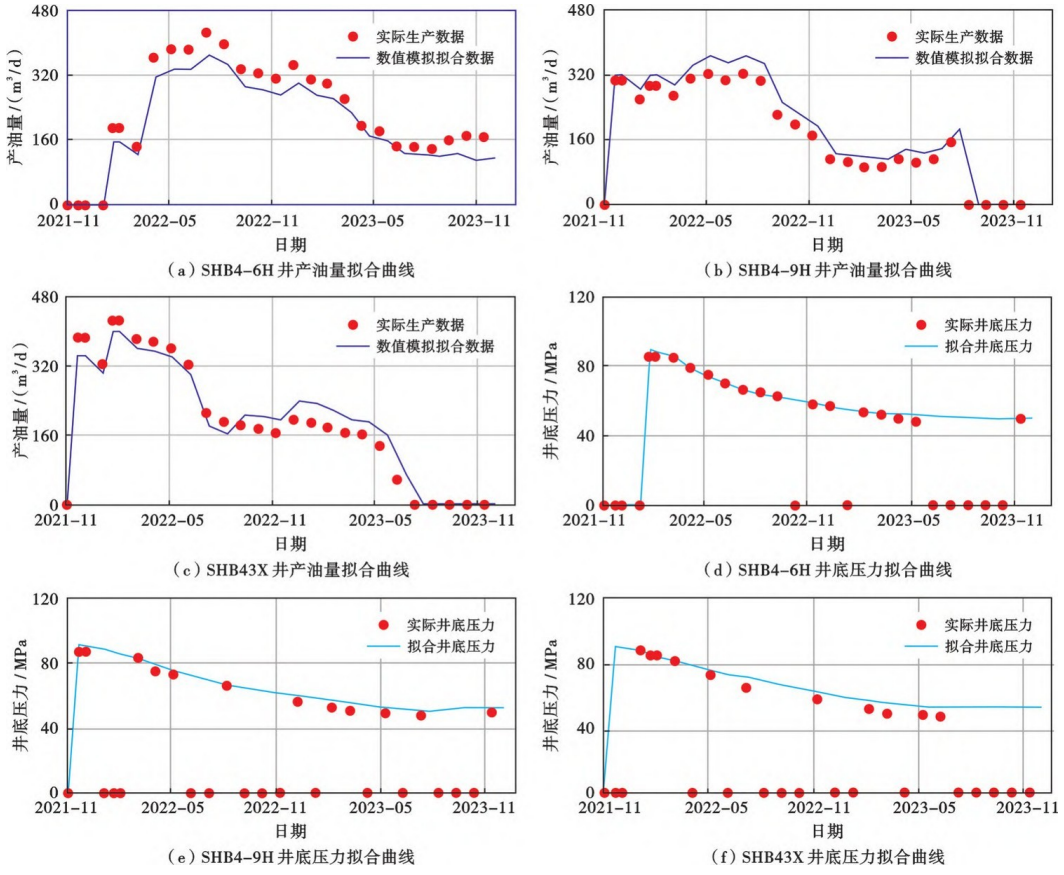


图 9-1 顺北 4 号断裂带典型井产量与井底压力拟合曲线（据文献[3]）

9.3 建模—数模一体化与数字孪生

建模与数模长期存在“两张皮”的问题：地质模型追求精细刻画，数值模拟追求计算效率，二者的网格、尺度与参数体系不一致，导致模型在传递过程中失真。计秉玉等系统阐述了建模—数值模拟一体化的内涵，认为一体化应包括理念、流程、算法与应用四个层面，并指出地质建模技术将向地震多信息驱动、多点统计学新算法、地质过程模拟与人工智能方向发展，数值模拟则向多相多组分多场耦合、全气藏一体化模拟与人工智能自动历史拟合方向发展，最终走向多维多尺度数据同化、油气藏开发大模型与数字孪生[2]。

在方法层面，嵇韦靖提出建模数模一体化的自动历史拟合框架：以高斯场建模参数与河流相建模参数构造不同全局特征的地质模型数据集，开发全局特征指导的、基于自注意力与 Wasserstein 距离的条件生成式地质建模模型，再基于 ES-MDA 算法同步更新高斯噪声、建模参数与属性参数；在二维与三维测试案例中，该方法相较基于无条件生成式建模的框架，拟合效果分别提高 7.7%、36.6% 与 27.3%[13]。这一思路的价值在于：把“建模参数”而非“网格属性”作为反演变量，从根本上避免了降维带来的非线性信息损失。

数字孪生是建模—数模一体化的更高形态。刘文岭等提出“数字孪生油气藏”的概念，强调构建油气藏的数字化孪生体，最大限度逼近真实油气藏，并及时准确表征其全生命周期动态变化[63]。对气藏而言，数字孪生意味着模型不再是“一次性静态成果”，而是随生产数据实时更新的动态体，这对建模的自动化、实时化与不确定性量化提出了更高要求。

十、存在问题与发展趋势

10.1 主要问题

第一，井震分辨率不匹配与资料不足的矛盾突出。测井的纵向分辨率可达分米级，地震的纵向分辨率通常为 10～20 m，二者相差 1～2 个数量级；深层、超深层与深水气藏井数少、井距大，井间预测主要依赖地震，而地震的横向分辨率又受限于采集与处理条件[31,61]。如何在资料不足的条件下建立“既忠于井点又能合理外推”的模型，仍是核心难题。

第二，训练图像与原型模型的依赖限制了多点地质统计学的推广。MPS 的精度取决于训练图像的质量，而高质量训练图像难以获得；手工绘制主观性强，基于目标模拟难以再现复杂叠置关系，基于过程模拟计算量大、参数标定困难[8,40]。如何实现训练图像的“定量化、自动化、地质化”，是 MPS 走向实用的关键。

第三，裂缝与缝洞的跨尺度表征仍不成熟。裂缝的规模跨度达 6～7 个数量级，地震只能识别大尺度裂缝，井点只能钻遇少量裂缝，微裂缝则完全依赖岩心与薄片；缝洞型储层的洞穴、裂缝与溶蚀孔洞的空间配置关系复杂，现有 DFN 与等效介质方法难以同时满足精度与效率要求[3,25]。

第四，不确定性量化不足。多数建模实践仍以“给出一个最可能模型”为目标，多实现模拟与敏感性分析流于形式；构造不确定性、相带边界不确定性与参数不确定性未能在模型中系统传递，导致储量与开发指标的风险评估缺乏依据[12,14]。

第五，静态模型与动态响应的闭环不充分。建模与数模的网格、尺度与参数体系不一致，历史拟合往往通过调整局部属性“凑”出拟合结果，而非修正地质认识；自动历史拟合方法虽已出现，但计算成本高、适用性有限[2,13]。

第六，智能建模的地质可解释性与泛化能力不足。深度生成模型能够生成“看起来很像”的三维地质体，但其是否遵循地质规律、能否外推到新区新层系，仍缺乏系统检验；高质量样本不足、模型泛化能力差、知识与数据融合程度低，是当前智能表征与建模面临的三大难题[9,28]。

10.2 发展趋势

趋势一：地震多信息驱动建模。随着叠前反演、地震属性融合与深度学习地震解释的发展，地震信息将从“趋势约束”升级为“建模主控”，形成“地震定格架、地震定相带、地震定属性”的技术路线[6,29,47]。

趋势二：过程模拟与多点统计融合。以沉积动力学模拟、地质过程模拟生成训练图像或训练模板，再与 MPS、GAN 结合，使模型从“统计相似”走向“成因合理”[42,45]。

趋势三：生成式人工智能。扩散模型、GAN 与 Transformer 等生成模型将在相建模、属性建模与裂缝建模中发挥更大作用，其优势在于多样本生成、条件化灵活与计算效率高；未来的关键是建立“地质知识约束+数据驱动”的混合框架，提升模型的地质可解释性[9,27,46]。

趋势四：建模—数模一体化与数据同化。以集合数据同化、自动历史拟合与代理模型为核心，实现建模参数与动态资料的同步更新，使模型从“静态成果”变为“动态预测工具”[2,13]。

趋势五：数字孪生与实时更新。依托物联网、高性能计算与人工智能，构建气藏的数字孪生体，实现模型随生产数据实时更新、随开发方案动态优化[63]。

此外，多尺度多物理场耦合（纳米孔喉—厘米岩心—米级测井—千米地震）、地质—工程一体化（建模与压裂、井网、井轨迹协同优化）以及建模流程的标准化与开放数据共享，也将是未来的重要方向[6,28]。

十一、结论

本报告基于 268 篇中文文献（其中 39 篇提取了完整摘要、24 篇下载了全文）、9 篇国际期刊论文与 5 部经典专著，对气藏三维地质模型建立技术进行了系统调研，主要结论如下。

（1）气藏三维地质建模已形成“数据准备—构造格架—相/岩相—储层属性—裂缝与缝洞—粗化与动态验证—不确定性评价”的七环节技术体系。构造格架控制相带分布，相模型控制属性分区，属性与裂缝模型共同构成数值模拟输入，动态验证结果反向修正模型，形成闭环。

（2）技术演进呈现清晰的阶段性：20 世纪 80 年代以前以二维制图为主；80—90 年代进入三维确定性建模与地质统计学阶段；90 年代末至 2010 年以相控随机建模与多学科一体化为特征；2010 年以来进入精细表征与智能建模阶段，建模目标由“复现井点”转向“预测井间”，成果形态由“单一确定性模型”转向“多实现概率模型”。

（3）相建模与裂缝建模是气藏建模的两大难点。相建模的核心是训练图像与地质知识库，多点地质统计学、基于目标的构型建模与生成对抗网络构成了三条主要技术路线；裂缝建模的核心是跨尺度表征，形成了“大尺度确定性+小尺度随机+微裂缝等效”的分级策略，并正在向“天然裂缝—水力压裂缝—注水诱导裂缝”耦合的动态缝网系统发展。

（4）不同类型气藏已形成差异化的技术路线：缝洞型碳酸盐岩采用“分级控制+多信息融合”；礁滩与潮坪相碳酸盐岩采用“VBM 格架+分级相控+分尺度 DFN 融合”；致密砂岩采用“地质知识库+相控+地震反演约束”；火山岩采用“火山机构约束+期次划分+相控属性”；煤岩气采用“井震多级约束+含气量建模”；深层、超深层与深水气藏则强调“少井条件下的多信息共控”。经动态验证的模型，其储量误差多在 7% 以内、历史拟合率多在 80%～96%。

（5）当前的主要问题集中在井震分辨率不匹配、训练图像依赖、裂缝与缝洞跨尺度表征、不确定性量化不足、静动态闭环不充分以及智能模型的地质可解释性不足六个方面。

（6）未来将沿地震多信息驱动、过程模拟与多点统计融合、生成式人工智能、建模—数模一体化与数字孪生五条主线演进。对气藏建模工作者而言，关键不在于追逐单一新算法，而在于建立“地质认识—多源数据—模型算法—动态验证”的闭环思维，针对具体气藏类型选择适配的技术组合，并系统量化模型的不确定性。

参考文献

[1] 赵永胜. 储层三维地质模型难使数值模拟摆脱困境[J]. 石油学报, 1998, 19(3): 135-137.

[2] 计秉玉, 张文彪, 何应付, 等. 油藏地质建模与数值模拟一体化内涵及发展趋势[J]. 石油学报, 2024, 45(07): 1152-1162.

[3] 尚浩杰, 陈叔阳, 何云峰, 等. 断控缝洞型碳酸盐岩储层结构表征与三维地质建模——以顺北 4 号断裂带为例[J]. 石油学报, 2024, 45(11): 1662-1679.

[4] 宋新民, 冉启全, 孙圆辉, 等. 火山岩气藏精细描述及地质建模[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(4).

[5] 贺煜斐, 黄道军, 黄雷, 等. 煤岩气藏三维地质建模及气藏富集规律——以鄂尔多斯盆地米脂北 8#煤为例[J]. 天然气地球科学, 2026, 37(07): 1445-1462.

[6] 李进步, 王继平, 李浮萍, 等. 致密砂岩气藏定量表征技术新进展[J]. 天然气工业, 2026, 46(08): 75-86.

[7] 彭家俊. 超深层孔-缝-断三类介质凝析气藏建模数模一体化研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2024.

[8] 王鸣川, 商晓飞, 段太忠. 多点地质统计学建模中训练图像建立方法综述[J]. 高校地质学报, 2022, 28(01): 96-103.

[9] 翁正平, 毛新源, 陈麒玉, 等. 基于多判别器注意力生成对抗网络的三维地质建模方法[J]. 地学前缘, 2026, 33(04): 84-94.

[10] 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.

[11] PYRCZ M J, DEUTSCH C V. Geostatistical reservoir modeling[M]. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2014.

[12] KAMALI M R, OMIDVAR A, KAZEMZADEH E. 3D geostatistical modeling and uncertainty analysis in a carbonate reservoir, SW Iran[J]. Journal of Geological Research, 2013, 2013: 687947.

[13] 嵇韦靖. 建模数模一体化的油藏自动历史拟合方法研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2025.

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

[15] HOULDING S W. 3D geoscience modeling: computer techniques for geological characterization[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1994.

[16] DEUTSCH C V, JOURNEL A G. GSLIB: geostatistical software library and user's guide[M]. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 1998.

[17] 王月华, 皮学军, 张柏桥. 储层地质建模方法在克拉 2 气田气藏描述中的应用[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(1): 65-68.

[18] 张春. 复杂构造带碳酸盐岩气藏描述及地质建模研究——以川东北沙罐坪-芭蕉场地区石炭系气藏为例[D]. 成都: 西南石油大学, 2013.

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

[20] HASHEMI S, JAVAHERIAN A, ATAEE-POUR M, et al. Two-point versus multiple-point geostatistics: the ability of geostatistical methods to capture complex geobodies and

their facies associations—an application to a channelized carbonate reservoir, southwest Iran[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2014, 11(6): 065002.
[21] 郭智, 孙龙德, 贾爱林, 等. 辫状河相致密砂岩气藏三维地质建模[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(1): 76-83.
[22] 杨特波, 王继平, 王一, 等. 基于地质知识库的致密砂岩气藏储层建模: 以苏里格气田苏 X 区块为例[J]. 岩性油气藏, 2017, 29(4): 138-145.
[23] 阮基富, 李新玲, 唐青松. 相控建模技术在磨溪气田嘉二段气藏中的应用[J]. 岩性油气藏, 2013, 25(4): 83-88.
[24] 苏旭. 储层三维地质建模发展现状[J]. 化学工程与装备, 2023, (10): 180-181.
[25] 吕文雅, 刘艳祥, 曾联波, 等. 致密砂岩储层复杂缝网系统三维地质建模方法——以姬塬油田 L 井区三叠系延长组 8 段 1 亚段为例[J]. 石油学报, 2025, 46(11): 2115-2127.
[26] 李少华, 史敬华, 于金彪, 等. 基于单一图像生成对抗神经网络方法在沉积相建模中的应用[J]. 油气地质与采收率, 2022, 29(01): 37-45.
[27] 宋随宏, FENG Man. 基于增强型生成对抗网络地质建模框架的多模式非平稳储层随机模拟[J]. 石油勘探与开发, 2026, 53(01): 177-189.
[28] 岳大力, 李伟, 王武荣, 等. 碎屑岩储层智能表征与建模方法研究现状及展望[C]//第十八届全国古地理学及沉积学学术会议摘要集. 2025.
[29] 高福坤, 周丽萍, 李东阳, 等. 地震多信息联合分级约束油藏建模技术在特低渗油藏开发中的应用[J]. 地球物理学进展, 2025, 40(01): 121-130.
[30] 陈仕臻, 林承焰, 任丽华. 构型模式控制下的曲流河多尺度地质建模研究——以胜利油田史南区块为例[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(03): 552-562.
[31] 贾霆. 地震反演三维约束下的储层建模技术在新疆 HC 油田的应用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
[32] 刘世隆, 李震, 陈明鑫, 等. 基于井震结合的多级约束深部煤层三维地质建模[J]. 天然气地球科学, 2026, 37(07): 1378-1389.
[33] 于海生, 曹宏, 崔京彬, 等. 基于隐函数的三维复杂构造建模[J]. 石油地球物理勘探, 2025, 60(06): 1504-1512.
[34] KHATTAB M A, RADWAN A E, EL-ANBAAWY M I, et al. Integrating 3D structural modelling and seismic interpretation to optimize hydrocarbon development in the Early Miocene Nukhul Formation, October Oil Field, Gulf of Suez, Egypt[J]. Scientific Reports, 2026, 16. DOI: 10.1038/s41598-025-29859-6.
[35] 商晓飞, 王鸣川, 李蒙. 基于 Fault Likelihood 属性分区标定的裂缝预测与三维地质建模——以川西坳陷新场气田须二段气藏为例[J]. 东北石油大学学报, 2022, 46(04): 62-76.
[36] 高恒逸, 邓美洲, 刘露, 等. 复杂潮坪相碳酸盐岩气藏三维地质建模研究——以四川盆地新场地区雷四段气藏为例[J]. 天然气技术与经济, 2025, 19(05): 1-8.
[37] 吴云龙. 基于分级控制和多信息融合的缝洞型碳酸盐岩气藏三维地质建模方法[J]. 石油化工高等学校学报, 2025, 38(05): 61-68.
[38] 苍正毅. 中基性火山岩储层精细描述与地质建模 ——以松辽盆地长岭断陷松南气田东岭地区为例[D]. 长春: 吉林大学, 2022.

[39] 刘江丽, 徐美茹, 吕学菊, 等. 地震约束鲕粒滩型碳酸盐岩储层三维地质建模[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(03): 63-70.
[40] 李少华, 王欢, 窦梦皎, 等. 基于砾质辫状河地质知识库的多点地质统计学建模——以鄂尔多斯盆地 D 气田为例[J/OL]. 长江大学学报(自然科学版), 2025.
[41] MARIETHOZ G, CAERS J. Multiple-point geostatistics: stochastic modeling with training images[M]. Chichester: Wiley, 2014.
[42] 唐佳凡, 唐明明, 卢双舫, 等. 基于耦合沉积动力学模拟与多点地质统计学方法的河口湾储层三维建模[J]. 地球科学, 2024, 49(01): 174-188.
[43] 黄文松. 三维地震约束辫状河储层的多点统计建模研究：以委内瑞拉 M 区块为例[J]. 地球科学, 2022, 47(11): 4033-4045.
[44] 陈仕臻, 林承焰, 任丽华, 等. 成因与演化信息约束的辫状河储层地质建模——以委内瑞拉奥里诺科重油带 M 区块为例[J]. 石油地球物理勘探, 2020, 55(05): 1092-1101.
[45] BAI T, TAHMASEBI P. Hybrid geological modeling: combining machine learning and multiple-point statistics[J]. Computers & Geosciences, 2020, 142: 104519.
[46] LEE D, OVANGER O, EIDSVIK J, et al. Latent diffusion model for conditional reservoir facies generation[J]. Computers & Geosciences, 2025, 194: 105750.
[47] 张海峰, 黄旭日, 张俊, 等. 基于导航金字塔的强地震约束建模方法——以胜利油田沙二段河流相为例[J]. 石油地球物理勘探, 2024, 59(06): 1197-1205.
[48] DENG Z, ZHOU D, DONG H, et al. Deep learning for predicting porosity in ultra-deep fractured vuggy reservoirs from the Shunbei oilfield in Tarim Basin, China[J]. Scientific Reports, 2024, 14. DOI: 10.1038/s41598-024-81051-4.
[49] 王珂, 张荣虎, 李宝刚, 等. 致密砂岩储层构造裂缝特征及地质建模——以塔里木盆地库车坳陷大北 12 气藏为例[J]. 海相油气地质, 2023, 28(01): 72-82.
[50] 丁雅洁, 李想, 韩子建, 等. 准噶尔盆地莫北凸起侏罗系三工河组凝析气藏精细地质建模方法[J]. 岩性油气藏, 2026, 38(04): 191-200.
[51] 彭先, 欧成华, 肖富润, 等. 四川盆地铁山坡飞仙关组膏盐层控气非均质性三维表征[J]. 地质科技通报, 2025, 44(02): 193-203.
[52] CAERS J. Petroleum geostatistics[M]. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2005.
[53] 刘艳祥, 吕文雅, 曾联波, 等. 鄂尔多斯盆地庆城油田长 7 页岩油储层多尺度裂缝三维地质建模[J]. 地学前缘, 2024, 31(05): 103-116.
[54] 李重逢, 朱国净, 刘永华, 等. 基于测井约束与地震多属性融合的裂缝密度三维建模方法[J/OL]. 地质科技通报, 2026.
[55] 马玉林, 何维领, 秦学杰, 等. 露头地质认识约束下的砂岩断缝体储层地质建模:以鄂尔多斯盆地泾河油田延长组油层为例[J/OL]. 地质科技通报, 2026.
[56] 陈叔阳, 何云峰, 王立鑫, 等. 塔里木盆地顺北 1 号断裂带奥陶系碳酸盐岩储层结构表征及三维地质建模[J]. 岩性油气藏, 2024, 36(2): 124-135.
[57] 李辉, 游瑜春, 曾大乾, 等. 深层碳酸盐岩强非均质储层双重介质三维地质建模——以普光气田飞仙关组—长兴组储层为例[C]//2024 油气田勘探与开发国际会议论文集Ⅰ. 2024.
[58] 潘恒, 廖明光, 王家辉, 等. 川中高磨地区灯四气藏储层三维地质建模[J]. 石化技术, 2024, 31(02): 175-177.

[59] 郝璐璐, 郑森, 丁千, 等. 苏里格气田中部 X 区地质模型构建及储层“甜点”优选[J]. 石油化工应用, 2025, 44(03): 83-87.
[60] 钟琳. 徐深气田火山岩气藏三维地质建模方法及在水平井设计中的应用[J]. 内蒙古石油化工, 2013, 39(14): 139-141.
[61] 李伟强, 邵大力, 王红平, 等. 稀井区深水重力流砂岩气藏地质建模方法研究[C]//第十八届全国古地理学及沉积学学术会议摘要集. 2025.
[62] 李勇, 李军辉, 李永臣, 等. 地质建模和数值模拟在煤层气微幅构造控藏控产中的实践[J]. 天然气工业, 2025, 45(03): 54-67.
[63] 刘文岭, 韩大匡. 数字孪生油气藏: 智慧油气田建设的新方向[J]. 石油学报, 2022, 43(10): 1450-1461.