

深层-超深层碳酸盐岩储层精细地质建模 技术进展与攻关方向

何治亮¹,赵向原²,张文彪²,吕心瑞²,朱东亚²,赵峦啸³,胡松²,
郑文波²,刘彦锋²,丁茜²,段太忠²,胡向阳²,孙建芳²,耿建华³

(1. 中国石油化工股份有限公司,北京 100728; 2. 中国石化石油勘探开发研究院,北京 102206;

3. 同济大学海洋与地球科学学院,上海 200092)

摘要:深层-超深层碳酸盐岩油气是业界普遍关注的热点和重点领域。如何精准刻画深层-超深层碳酸盐岩储集体空间展布及储集参数分布特征,是高效勘探开发面临的重大技术问题。在对储层地质分析、测井评价、地震预测、地质建模等相关技术发展现状分析的基础上,针对深层-超深层碳酸盐岩储层研究面临资料少、品质差、精度低,加之储层非均质性强等难题,深入开展了深层碳酸盐岩优质储层发育机理与分布规律研究,研发集成了深层碳酸盐岩储层描述与建模的关键技术系列,包括:①多尺度、多属性深层碳酸盐岩储层知识库构建技术;②地质分析新技术——从宏观到微观的储层地质观测分析技术,储层微区原位沉积、成岩环境定性-定量分析技术,储层发育机理与过程实验和数值模拟分析技术;③深层碳酸盐岩储层测井解释新技术——基于全域测井仿真的储层类型识别与参数定量评价技术,基于机器学习的沉积微相识别技术;④深层碳酸盐岩储层地震预测新技术——深层碳酸盐岩地震岩石物理建模技术,岩石物理引导的机器学习储层参数预测与不确定性评价技术;⑤深层碳酸盐岩地质建模新技术——多点地质统计学新算法,地质过程模拟技术,人工智能地质建模技术。分别建立了面控、断控、相控型碳酸盐岩储层地质建模技术流程,并选择塔里木盆地塔河、顺北油气田和四川盆地元坝气田进行了有效应用,为勘探开发部署提供了科学依据。最后,提出了深层-超深层碳酸盐岩储层地质建模未来攻关方向:①升级储层地质知识库,提高对建模的支撑力度;②扩充基于地质过程的建模技术,完善应用研究;③发展基于人工智能的地球物理解释、预测技术,提升复杂储层刻画能力;④研发基于人工智能的建模新方法,不断提高储层表征精度和模型的可靠性;⑤创建深层储层地质模型的快速更新技术,不断提高模型更新效率和精度。

关键词:地质知识库;储层地质分析;储层测井评价;储层地震预测;人工智能建模;精细地质建模;碳酸盐岩储层;深层-超深层

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Progress and direction of geological modeling for deep and ultra-deep carbonate reservoirs

HE Zhiliang¹, ZHAO Xiangyuan², ZHANG Wenbiao², LYU Xinrui², ZHU Dongya², ZHAO Luanxiao³, HU Song²,
ZHENG Wenbo², LIU Yanfeng², DING Qian², DUAN Taizhong², HU Xiangyang², SUN Jianfang², GENG Jianhua³

(1. SINOPEC, Beijing 100728, China; 2. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing, 100083, China;

3. School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Exploration and development of deep and ultra-deep carbonate reservoirs have been a hot and key research topic in the industry. Accurately depicting the spatial distribution and physical property parameters of the reservoirs has been a major challenge for an efficient oil and gas exploration and development. Based on an analysis of current development of reservoir geological analysis, logging evaluation, seismic prediction, geological modeling and other related technologies, this study is focused on figuring out the development mechanisms and distribution patterns of high-quality deep carbonate reservoirs by overcoming the data issues (scarcity, low quality and inaccuracy) and the high heterogeneity nature of the reservoir. A series of key technologies for characterization and modelling of the deep carbonate reservoirs have been developed, including technologies for construction of multi-scale and multi-attribute deep

收稿日期:2022-09-26;修订日期:2022-11-20。

第一作者简介:何治亮(1963—),男,博士、教授级高级工程师,石油地质。E-mail: hezhiliang@sinopec.com。

基金项目:中国科学院A类先导科技专项(XDA14010200);中国石化科技部项目(P21038)。

carbonate reservoir knowledge base; new technologies for geological analysis such as macroscopic to microscopic geological observation, in-situ micro-area qualitative and quantitative analysis for reservoir sedimentation and diagenetic environment, experiment and numerical simulation technologies for mechanism and process of reservoir development; new logging interpretation technologies, such as reservoir type identification and quantitative parameter evaluation based on global logging simulation, and sedimentary microfacies identification based on machine learning; new seismic prediction methods, such as seismic petrophysical modeling, machine learning technologies for rock physics guided reservoir parameter prediction and uncertainty evaluation; new geological modeling technologies such as new algorithm of multipoint geostatistics, geological process simulation, and geological modeling based on artificial intelligence. The technological processes of geological modeling of carbonate reservoirs under the control of karst unconformity, fault and sedimentary facies have been established respectively and applied to oil and gas reservoirs in Tahe, Shunbei and Yuanba blocks in the Tarim Basin and the Sichuan Basin, providing scientific basis for exploration and development deployment. The future research direction of geological modeling for deep and ultra-deep carbonate reservoirs is also predicted: updating geological knowledge base to support geological modeling; expanding the modeling technology based on geological process and improving its application; developing geophysical interpretation and prediction technologies based on artificial intelligence to improve the ability to depict complex reservoirs; developing new modeling methods based on artificial intelligence to continuously improve the accuracy of reservoir characterization and the reliability of models; and establishing rapid updating technology of geological models for deep reservoirs to continuously improve the efficiency and accuracy of model updating.

Key words: geological knowledge base, reservoir geological analysis, reservoir logging evaluation, reservoir seismic prediction, artificial intelligence geological modeling, fine geological modeling, carbonate reservoir, deep and ultra-deep reservoir

引用格式:何治亮,赵向原,张文彪,等. 深层-超深层碳酸盐岩储层精细地质建模技术进展与攻关方向[J]. 石油与天然气地质,2023,44(1):16-33. DOI:10.11743/ogg20230102.

HE Zhiliang, ZHAO Xiangyuan, ZHANG Wenbiao, et al. Progress and direction of geological modeling for deep and ultra-deep carbonate reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(1): 16-33. DOI: 10.11743/ogg20230102.

深层(埋深介于4 500~6 000 m)和超深层(埋深>6 000 m)碳酸盐岩油气是业界普遍关注的热点和重点领域^[1-2]。近年来,随着油气勘探开发理论和技术的不断进步,中国在深层和超深层领域成功发现并规模开发了可观的油气资源,先后在塔里木盆地和四川盆地发现了塔河-轮南、顺北-富满、普光、龙岗、元坝、安岳、川西等多个大型深层-超深层碳酸盐岩油气藏。近5年来,先后实施了一批深度超过8 000 m的钻井,不断突破传统认识,取得了越来越多的油气发现,充分展示了深层-超深层领域巨大的勘探开发潜力^[3-5]。与中-浅层油气藏相比,深层-超深层碳酸盐岩油气藏埋深大、地层温度-压力较高、成藏地质过程复杂、储层非均质性强,各类资料数量较少且品质较差,要实现深层-超深层油气大规模工业化开发存在着诸多挑战。其中,由于时代老、埋藏深,储层形成-保持机理复杂,储层地质模式难以建立。随着埋深增加,地震资料成像质量变差,分辨率明显降低。由于成本过高,深井-超深井难以大量取心,同时,受井型、井径限制,测井系

列往往不全。如何精准刻画深层-超深层油气储集体空间展布及其参数分布特征,实现精细地质建模,支撑高效勘探开发,面临巨大的理论难题和技术挑战。

1 储层地质建模技术现状

地质建模技术是实现三维量化表征油气储集体参数空间分布的重要手段。现代油气藏描述均以建立定量的三维油气藏地质模型为最终表现形式。自加拿大学者Houlding在1993年首次提出“三维地质建模”概念以来^[6],随着油气藏地质理论和计算机技术的不断发展,地质认识与数学方法不断深入结合,地质建模技术不断向精细量化方向发展。

地质建模是以地质理论为指导,通过数据驱动,解决油气藏精细描述的综合方法。即在地质认识的指导下,通过已知控制点资料内插、外推资料点间及以外的油藏特性,以达到三维量化表征油气藏的目的。其模型的可靠性和精细程度除了严重依赖于所采用的

地质建模方法外,还与地质认识、测井及地震等资料表征储层的准确性和精细程度密切相关。

1.1 地质认识与地质模式建立

地质认识是油气藏地质建模的“灵魂”。在传统的地质建模过程中,需要掌握的地质认识主要包括油气藏地层格架特征(包括断裂、地层结构及其两者的匹配特征)、沉积特征(沉积相、亚相及微相)、储层特征(岩性、储层类型、物性、含油气性、孔渗关系等)、储层发育规律(储层发育的主控因素、成岩作用、储层非均质性特征、储层发育及分布模式等)、储层空间分布特征(储层厚度、储层范围、储层参数三维分布预测等),上述认识作为“先验地质认识”,是开展地质建模的关键依据^[7-9],不但决定了地质建模过程中需采取的策略,同时也影响着测井、地震等地球物理手段对储层参数解释或预测方法的选择,最终决定了地质建模结果的可靠性。在中-浅层油气藏地质研究中,由于各类资料易于获取且精度较高,通过测井、地震等资料开展储层参数计算和空间分布预测,其结果的不确定性相对较低。中-浅层油气藏资料的系统性、完整性,保证了储层地质模型的精度和可靠性。

1.2 测井储层评价技术

测井储层评价主要为地质建模提供储层类型识别和储层参数定量计算等方面资料。作为地质建模的“硬数据”,测井储层评价结果决定了地质建模参数的可靠性。在储层类型识别方面,主要利用岩心资料进行标定,结合电成像测井、试油试采等资料开展储层类型划分^[10],通过总结不同类型储层测井响应特征,利用各类判别分析技术,开展储层类型识别^[11-12]。在储层参数计算方面,考虑到大多数碳酸盐岩储层为多重孔隙介质,一般通过岩心分析拟合的方式来确定基质孔隙度,对于次生孔隙(包括溶蚀孔、洞和裂缝),一般采用中子密度交会的方式得到总孔隙度和基质孔隙度的差值来确定其孔隙度^[13],也有学者通过数值模拟建立双侧向电阻率与裂缝的关系来确定裂缝孔隙度^[14]。随着测井新技术的应用,越来越多的人开始采用成像测井或阵列声波测井开展储层孔隙度和渗透率评价^[15-18],或通过核磁测井开展储层孔隙结构分类^[19],再根据不同储层类型建立孔-渗模型,来提高储层物性参数评价的精度。

1.3 地震储层预测技术

地震储层预测技术目前可以分为基于模型驱动的传统预测方法和基于数据驱动的智能预测方法。在常

规地质建模过程中,地震储层预测结果常被作为井间储层及其参数分布的约束性资料,对模型结果能否客观反映储层空间展布及参数分布起决定性作用。传统的储层预测流程依赖于地震波传播模型和岩石物理模型的构建,利用地震数据反演得到的弹性参数,通过岩石物理关系转换可以得到储层参数。同时,也可以直接对地震记录进行属性提取,实现对储层构造特征、沉积相以及成岩相的刻画。随着油气藏地质特征越来越复杂,传统地震储层预测手段在复杂油气藏评价中面临着越来越多的技术瓶颈。许多学者从正、反演理论模型的建立^[20],地震数据的处理方法^[21-22]以及储层敏感属性的分析^[23]3个方面,进行了大量针对性的研究,并在常规油气藏储层描述中进行了广泛的应用。如Zhao等^[20]利用贝叶斯反演得到纵波速度、横波速度以及密度。由于缺乏大角度的偏移地震道集,密度反演呈现出较高的不确定性,因而利用纵波和横波速度,通过统计岩石物理关系转换获得岩相概率,结果显示含气碳酸盐岩预测结果与测井数据分布一致。徐旺林等^[21]针对鄂尔多斯盆地碳酸盐岩储层非均质性强、地震资料主频低、常规反演分辨率低等特点,提出贝叶斯全频信息同时反演方法,强调利用地震优势频带之外的高频信息,结果表明贝叶斯地震数据全频反演可以更为清楚地反映溶蚀洞穴的位置和横向展布情况。Ghon等^[24]基于高斯混合模型进行贝叶斯反演,利用纵波速度、横波速度以及密度作为模型输入,对部分白云岩化的碳酸盐岩台地进行岩相和孔隙度预测,其结果与地震地层解释较为吻合。

1.4 地质建模技术

20世纪80年代以来,地质建模技术经历了近40年的发展,已经从最初的定性描述不断向量化、精细化方向发展。中国地质建模技术的起步则稍晚,但紧跟国际发展潮流,20世纪80年代后期,中国学者开始引进国外的地质建模技术,并不断应用于油气藏开发实际。20世纪90年代裘怿楠就提出了开发地质的核心任务是油藏描述,油藏描述的最终成果是建立一个三维的、定量的油藏地质模型^[25],可以说进一步确立了地质建模在国内油气藏开发中的重要地位。自此,中国学者不断通过引进吸收国外先进经验,结合国内实际,逐渐积累了丰富的理论认识和技术成果,有效指导了中国的油气田开发实践。按照不同建模技术出现的大致顺序及其在石油工业领域的应用情况,可将地质建模技术分为以下几个方面:①确定性建模技术(1980s—)。这一阶段形成并发展了以确定性建模为

主要思路和方法的建模技术,该方法以沉积学、储层地质学及地震地层学等方法手段获取的确定性地质认识为基础,主要以克里金插值方法实现井间储层参数分布的计算^[26]。由于该方法得到的控制点间的插值结果是唯一确定的,这种确定性的结果与实际储层情况会产生矛盾,因此存在一定的局限性。②两点地质统计学建模技术(1990s初一)。此阶段主要发展了以两点地质统计学方法为基础的随机建模技术,该技术有效克服了确定性建模方法无法表征因储层参数随机性变化而造成的预测结果不确定性方面的不足,能够实现储层建模结果的多解性表达^[27-31]。通过对模型结果的不确定性进行综合分析,最终满足油气勘探开发风险决策的需要。两点地质统计学建模技术虽然具有一定优势,但在精确表征复杂的空间结构及目标体几何形态方面有一定的局限性。③多点地质统计学建模技术(1990s—)。相对于两点统计学方法而言,多点统计学方法能够综合更多的形态学信息,应用多个点来对地质变量的统计特征进行分析,采用“训练图像”代替变差函数来表达地质变量的空间结构属性,能够反映目标体的形态及其空间分布特征,有效弥补了两点统计学建模的不足^[32-36]。目前,基于多点地质统计学方法的随机建模技术已成为建模领域热点。④基于地质过程的数值模拟技术(1990s—)。上述3类建模技术均是数据驱动的建模技术,模型的可靠性严重依赖输入数据的可靠性,无法从本质上表达地质规律。基于地质过程的建模技术以真实的地质作用过程作为控制函数,通过模拟再现地质过程作用下储层参数的空间分布^[37-38]。模拟过程中,通过改变控制参数可以对地质过程的多种情况进行模拟而得到多种结果,最终优选出符合地质实际的方案,其结果更加符合地质规律。该方法经过发展,目前已经开始进入实用阶段。⑤智能化地质建模技术(2010s中后期—)。随着人工智能技术的推广应用,传统行业均进行着深度的数字化转型。在油气藏开发领域,开始尝试将人工智能与地质建模技术进行融合,建立智能化地质建模技术,减少人为主观因素所导致的不确定性,以提高模型精度,实现建模技术的高效化、科学化和智能化^[39-40]。这方面已经开始成为地质建模技术领域的前沿和热点。

2 深层-超深层碳酸盐岩储层建模技术

深层-超深层碳酸盐岩油气领域由于各类资料少、品质差、精度低,加之储层非均质性强,传统的基于数据驱动的地质建模方法存在严重的“水土不服”,亟

需开发出新的地质建模技术,以应对深层储层研究面临的诸多挑战。主要体现在:①对于深层-超深层碳酸盐岩储层发育规律的认识仍需深入,需要建立符合客观实际的储层分类标准及储层成因地质模式,为地质建模提供理论指导。②传统的测井解释模型在识别评价深层-超深层高温高压条件下复杂孔隙介质参数时存在明显的不适应问题,需要建立新的测井参数解释方法,为地质建模提供可靠的“硬数据”。③地震数据在深层-超深层的成像效果较差,信噪比不及中-浅层,无法满足建模精度要求;同时,振幅随偏移距变化的特征不明显,对反演结果以及储层刻画精度都造成明显影响;此外,由于深层-超深层碳酸盐岩储层非均质性很强,其物理响应机理模糊,难以建立起可靠准确的岩石物理模型,无法获取高精度的储层预测结果。④由于资料问题、地质认识问题及地球物理解释局限性等问题,致使深层-超深层地质建模缺少可靠的输入数据,难以建立可靠的训练图像,仅依靠传统的依赖数据驱动的建模技术难以建立可靠的三维地质模型。

近年来,为了实现深层碳酸盐岩储层精细地质建模,支撑高效勘探开发,笔者针对四川、塔里木等盆地深层-超深层油气藏开展了大量的理论探索和技术攻关,在深层-超深层碳酸盐岩储层地质建模技术方面取得了一系列进展,大幅度提高了深层-超深层油气藏表征的精度,有效指导了勘探开发实践。笔者提出了针对性的技术路线,即在充分收集整理经典的碳酸盐岩储层地质理论和各类储层成因地质模式,以及传统的碳酸盐岩储层地质、地球物理描述与地质建模技术的基础上,深入开展深层碳酸盐岩优质储层发育机理与分布规律研究,研发针对深层不同类型碳酸盐岩储层描述与建模的关键技术,开发多尺度、多属性深层碳酸盐岩储层知识库,结合具体地区各类资料的应用,开展具体对象的油气藏精细描述与建模,为勘探开发部署提供科学依据(图1)。

2.1 碳酸盐岩储层知识库构建

碳酸盐岩储层知识库构建以服务于高质量的储层分析、评价、描述及地质建模为目标,能够实现储层相关知识的管理与储层研究的有效融合,是提升碳酸盐岩储层研究效率和精度的有效途径^[41]。

2.1.1 知识分类框架体系及其要素构成

考虑碳酸盐岩储层知识库建设目标、技术方法、知识内容及应用需求,笔者将知识框架划分为三大

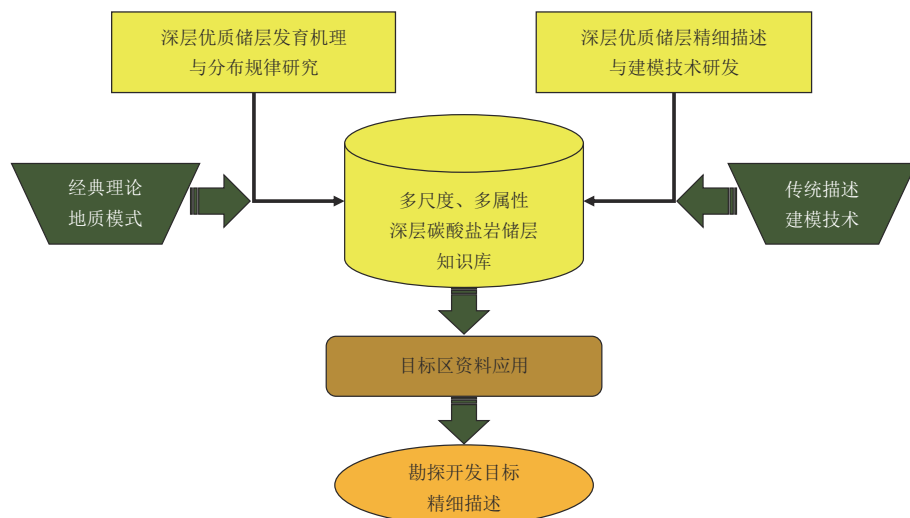


图1 深层碳酸盐岩储层精细建模技术路线

Fig. 1 Technical route for fine modeling of deep carbonate reservoirs

类:技术服务标准类、技术研究方法及与地质对象有关的专业知识和案例。根据储层类型和研究技术领域将其进一步细分为亚类,每个亚类分别建立知识体系,亚类继续细分为子类,以此类推,由大到小、由粗到细,形成完整的碳酸盐岩储层知识分类体系及要素构成。

2.1.2 储层知识库构建方法

储层知识库的构建主要包括标准规范确定、知识采集入库及管理软件编制。标准规范的建立主要针对地质对象案例类知识体系,对露头及油藏的研究数据按照标准进行高效的采集和规范、有效的管理,以便能够获得预期的统计规律,为储层研究所借鉴。知识采集入库目的是开展储层知识库内容建设,通过系统地进行数据采集、抽提、整理及入库,能够不断完善知识库的内容,其内容的系统性、先进性、新颖性是判断知识库建设好坏的关键指标。知识管理软件平台开发是知识库建设的重要内容,笔者采用分层的松散耦合体系设计完成了碳酸盐岩储层知识库平台软件架构,由1个门户和3个既可以关联集成又可以独立运行的子系统组成,每个子系统独立运行的同时又与其他系统有深度的交互式数据集成,有力支撑了储层知识库的构建及应用。

2.1.3 基于知识库的类比分析

建设知识库的主要目标功能是根据知识库相关信息开展类比分析,获取统计规律。通过从知识库中6个不同类型数字露头、13个密井网解剖区块、10 000

余张野外照片、30 000余条专业词条、100余万条裂缝信息等数据中,挖掘目标区的特征参数数据,展开详细的统计和对比分析,获得基于实体模型或成熟区块的统计规律和储层地质模式,为储层研究提供科学依据。如针对断控型储层,基于知识库中案例的统计分析,可以获得断裂控制裂缝、溶洞发育展布的规律认识:断层规模越大,断层断距越大,周围裂缝发育概率越高,裂缝带越宽;距断层越近,相关的裂缝和溶洞越发育;断层核附近裂缝发育程度最高。基于统计分析,可以获得断距与裂缝、溶洞发育频率的相应关系,将相关数据转化为储集体发育的条件概率体,就能够为断控溶洞、裂缝的精细建模提供支撑。

2.2 深层碳酸盐岩储层地质分析新技术

沉积相、断裂、不整合面及相关流体活动是影响深层-超深层碳酸盐岩优质规模储层发育的关键地质因素,由此可把碳酸盐岩储层分为相控、断控和面控型及复合类型的储集体^[42]。近年来,随着一些新的地质分析技术逐步发展成熟,在沉积、成岩环境定时、定量分析方面得到了广泛应用,为从宏观到微观全面系统刻画碳酸盐岩储集体提供了必备手段,使得不同类型储集体的成因机理分析和地质模式的构建更加准确可靠。

2.2.1 从宏观到微观的储层地质观测分析技术

在碳酸盐岩储层观测表征方面,逐步发展完善与系统应用的技术包括:野外露头无人机观测、激光点云扫描、薄片数字化自动化分析、场发射扫描电镜、CT孔

隙结构分析等技术。针对相控、断控、面控等碳酸盐岩储集体,通过一系列技术的合理应用,实现了从宏观形态与展布、规模与尺度大小、岩石和矿物组成、孔隙结构与非均质性等方面从宏观至微观多尺度的刻画与表征。

通过无人机机载 LIDAR (light detection and ranging) 设备,对典型野外露头的地形地貌进行三维扫描和点云数据获取,是开展野外地质研究的重要方法^[43]。数据处理之后,可以对不同地质体展布特征和形态在千米至米级尺度上,进行刻画表征。与无人机相比,激光点云扫描采用地面固定基站的方式,能从更精细的米级至厘米尺度上进行扫描刻画,可以精细表征礁滩体、断裂-裂缝、溶洞的发育与形态特征。

薄片数字化自动化分析是借助光学显微镜对薄片不同点位光性特征进行逐一扫描检测,或者通过电子探针针对薄片不同点位的元素组成进行逐一扫描检测,在此基础上确定毫米-微米尺度上矿物组成和结构特征。场发射扫描电镜能在毫米-微米尺度上刻画储集体岩石、矿物、孔隙的形态和结构。通过对厘米尺度的储集体柱塞样品开展微米-纳米CT成像,能更为精细地在微米-纳米尺度上分析储集体内部的孔隙类型、形态、大小与联通性等属性特征^[44]。笔者应用CT分析技术对塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组凝块岩、泡沫棉、叠层石等类型的微生物岩孔隙结构进行了定量测试,其中叠层石中见有丰富的顺层分布的格架孔隙,凝块岩中可见受岩溶改造的大小不等的溶蚀孔洞,孔隙度高达17.8%。

2.2.2 储层微区原位沉积、成岩环境定性-定量分析技术

不同类型的碳酸盐岩储层在沉积过程中分别受到了各种水体物理化学条件的影响,在沉积之后的成岩演化过程中又受到了不同类型成岩流体的改造。识别、示踪和恢复沉积、成岩环境及过程,对开展优质储层发育机理研究,建立地质模式,有着重要的意义。近年来发展起来的沉积、成岩环境定性、定量分析技术主要包括:原位微区元素、原位微区C、O和Sr同位素、Mg同位素、团簇同位素、U-Pb同位素测年等技术。

碳酸盐岩中的Ca、Mg、Fe和Mn等常量元素、稀土等微量元素以及C、O和Sr同位素组成和变化特征是开展碳酸盐岩沉积和成岩环境示踪的重要手段。传统的溶样分析方法需要挑选方解石、白云石单矿物或选

择单一组构的碳酸盐岩,不但需要的量较多,而且不能对毫米-微米级的成岩矿物进行精细分析。近年来,激光剥蚀与高精度质谱仪的联合应用逐步实现了元素(特别是稀土元素)及C、O和Sr同位素的微区原位分析,使得沉积、成岩环境识别分析更加精细准确。笔者应用这些技术识别出四川盆地震旦系灯影组二段的葡萄状白云石是形成于白云石海环境中的原生白云石^[45],分别建立了深层碳酸盐岩储层所经历的大气降水岩溶、热液流体溶蚀和白云岩化、TSR(硫酸盐热化学还原反应)相关流体改造的地质-地球化学判识指标体系^[46]。

碳酸盐岩团簇同位素(Δ_{47})是一种有效的地质温度计,基本不会受到成岩过程中成岩流体碳、氧同位素分馏交换的影响^[47]。因此,通过 Δ_{47} - T 的相关函数关系计算成岩温度,结合碳酸盐岩稳定氧同位素($\delta^{18}\text{O}_{\text{碳酸盐岩}}$),可以直接恢复成岩流体的性质($\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$)。此外,钙($\delta^{44}\text{Ca}$)、镁同位素($\delta^{26}\text{Mg}$)、卤族元素(Cl, Br, I)等测试方法和技术逐步兴起,在碳酸盐岩成岩流体来源判别方面得到越来越多的应用^[48]。近几年,针对碳酸盐矿物的测年技术取得了长足进展,通过激光剥蚀加高分辨率多接收质谱仪(LA-ICP-MS)开展高精度U-Pb测年,能较好地实现微米尺度下的碳酸盐岩成岩年代分析。近期对生物介壳、孔隙充填物、裂缝方解石脉等不同位置和类型的碳酸盐矿物开展定年分析,分别取得了较为可信的年代数据^[49]。与阴极发光和原位微区微量元素和同位素分析相结合,能更准确地对成岩流体的来源性质和时代,开展定性和定时研究^[50-51]。

2.2.3 储层发育机理与过程的实验和数值模拟分析技术

开展流体-岩石实验和数值模拟是探索碳酸盐岩储层成因机制的重要手段。根据研究对象所处的地质环境,提取流体-岩石体系的关键反应参数如温度、压力、流体、岩石组分、流体/岩石比、孔隙几何形状等,在此基础上开展物理模拟实验以及数值模拟计算,可以厘清不同地质与成岩流体环境下碳酸盐岩储集空间形成的控制因素,阐明优质规模储集体的成因机制。

模拟实验主要借助高温高压反应釜、混合流反应器、旋转盘反应装置、金刚石压腔反应釜、毛细硅管反应装置等设备,查明矿物溶解-沉淀过程中的反应速率常数、反应速率等;同时结合微观观测手段如扫描电

子显微镜、原位拉曼光谱、垂直干涉扫描仪、微米-纳米CT等,研究矿物溶蚀-沉淀界面形貌的变化、孔隙几何形态的变化等等^[52-57]。针对有机质生烃过程中所形成的有机酸等是否对碳酸盐岩具有溶蚀作用的问题,笔者通过高温高压反应釜开展了生烃伴生酸性流体的溶蚀实验,发现随油气运移的酸性流体能沿着断裂、缝合线对碳酸盐岩产生溶蚀作用,证实了中成岩期生烃期流体溶蚀作用的存在^[58]。

数值模拟是计算和预测流动和反应进程、溶质输运、矿物分布、孔隙分布的有力工具。数值模拟能够与物理模拟实验相结合,校验和预测物理实验的结果。同时,数值模拟还具有不可替代的优点,比如考察参数全面,可计算范围广,便于考察无法实时或者直接观测的实验过程,在更微小的空间尺度(比如矿物的溶解-沉淀界面的变化、孔隙尺度的流动过程等)或更广阔的空间尺度(油气藏尺度、盆地尺度),更漫长的时间尺度(数百年甚至数万年等)考察储层成岩过程中的流体流动、热、多组分溶质运移过程等。常用的数值模拟工具包括 ToughReact、格子波尔兹曼方法、Crunch 等^[59-62],以上方法能从不同尺度计算流动、传输和反应过程中的矿物饱和度、溶质成分、矿物反应速率、孔隙度、渗透率变化等等,进而明确优势储集空间的形成条件、预测储集空间的分布。

2.3 深层碳酸盐岩储层测井解释新技术

岩石物理属性的测井响应规律是储层类型识别和储层参数评价的基础。由于深层-超深层很难获取足够的碳酸盐岩储层岩心样品,特别是包含裂缝和洞穴的岩心,测井响应规律不清楚,严重制约了碳酸盐岩沉积相判别、储层类型测井识别和参数计算的精度。

2.3.1 基于全域测井仿真的储层类型识别与参数定量评价技术

针对缝洞型储层,考虑到不同缝洞体的组合和尺度的差异,以不同测井方法原理为基础,笔者建立了全域数值模拟技术,开展了不同孔、洞、缝及其不同组合方式下的测井岩石物理属性(岩电响应、核磁特性、弹性性质等)的响应规律模拟,结合野外露头,成像测井等,系统总结了不同储集空间类型的测井响应规律,形成了样本参数库。在此基础上,针对岩溶储层,建立了基于决策树分类的储层类型识别方法,在塔河主体区,识别符合率达到89.5%。

针对礁滩相储层,笔者通过改进K值聚类分析(KNN),建立了礁滩相储层分类识别技术,在元坝识别

符合率达到90.3%。对于储层参数的计算,由于不同曲线反应的岩石物理信息不同,考虑到电阻率曲线自相关性和孔隙度曲线形态变化,利用R/S分形法^[63]计算电阻率分形维数,利用盒维数法^[64]计算孔隙度曲线(声波时差、中子孔隙度、密度)分形维数,然后根据二者交会图确定不同孔隙结构分类标准,进一步进行全井段孔隙结构识别;在考虑储层分类的基础上,分类型建立了基于地质约束的最优化孔隙度和渗透率模型。

针对裂缝型储层,笔者通过数值模拟,细化了裂缝角度变化时裂缝孔隙度与双侧向测井响应模型,建立了无需事先判断裂缝角度的裂缝孔隙度自适应模型。新模型与电成像计算的裂缝孔隙度相关性达到89%。依据欧姆定律微分形式,推导了基于双侧向电阻率定量计算裂缝开度的评价模型。

2.3.2 基于机器学习的沉积微相识别技术

根据沉积旋回特征,笔者提出了刻画测井曲线形态参数的方法,通过岩心资料、成像测井和常规测井的不同曲线形态参数(曲线的幅度比、方差等),建立了不同沉积微相的特征图库,明确了不同沉积微相的测井响应特征,建立样本库。利用决策树C4.5算法开展沉积微相识别时发现,训练样本属性缺失率较高时,算法构建的决策树模型结点数会增多,树模型复杂(图2a),导致分类准确率下降;此外该算法在计算时会对数据集反复调用对数,增加了计算的时间。针对上述问题,笔者利用朴素贝叶斯定理^[65]方法,处理训练集空缺属性,修改算法对函数的调用顺序,优化C4.5算法,使得构建的树模型简单(图2b),不仅提高了分类准确性,而且进一步提升了运算效率。此外,针对样本不均衡容易过拟合,分类类别较多时错误率高,以及特征关联性较强时精度差的问题,通过数据均衡化处理,采用集成学习思想,建立了基于决策树的分类识别模型。通过元坝7口井119个样本点验证,正确识别117个,与原算法相比,符合率从82.0%提高到98.3%,为地质建模提供了较精确的硬数据。

2.4 深层碳酸盐岩储层地震预测新技术

2.4.1 深层碳酸盐岩地震岩石物理建模技术

深层-超深层碳酸盐岩储层的地震岩石物理模型是利用地震数据刻画储层岩性、孔隙度、裂缝密度、油气饱和度的物理基础。根据实验数据揭示的深层碳酸盐岩储层地震岩石物理响应机理,笔者建立了深层碳酸盐岩储层的地震岩石物理模型,有效表征了裂隙的

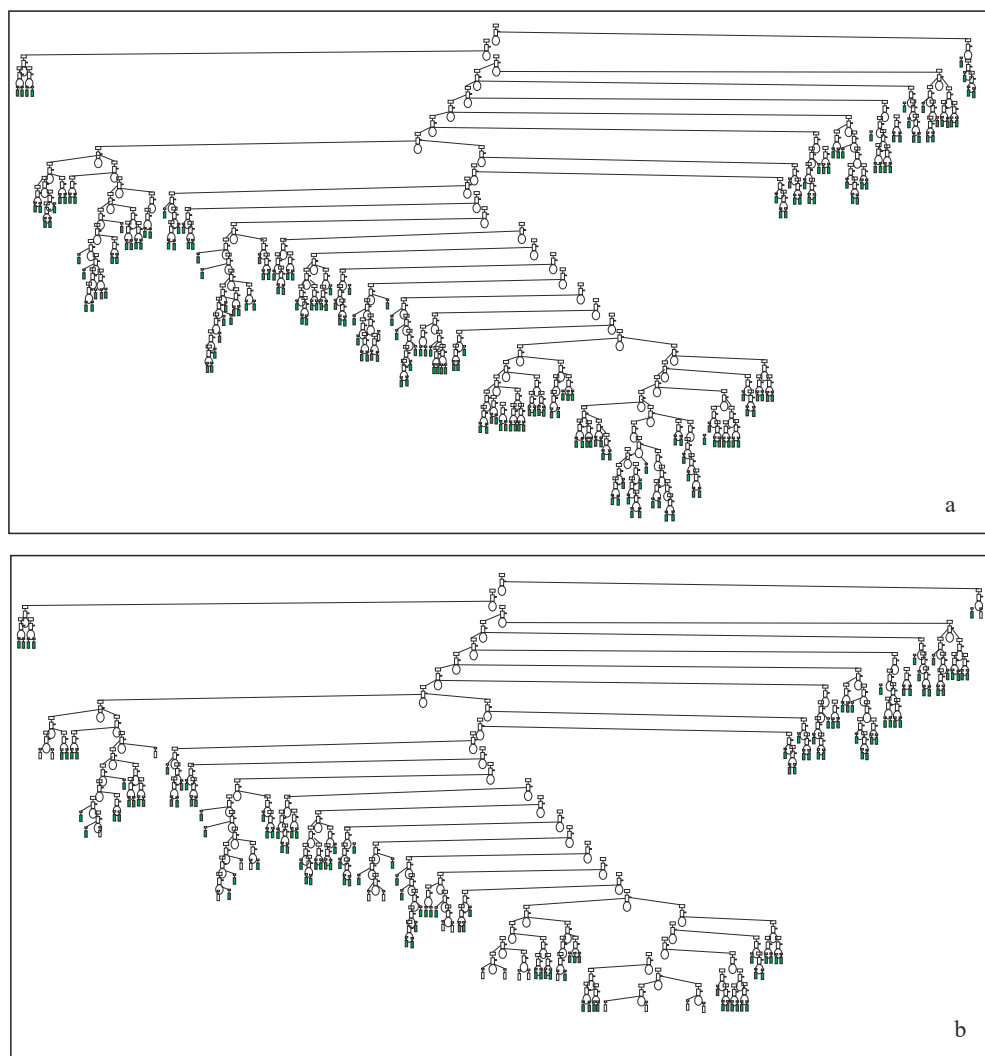


图2 决策树分类图谱

Fig. 2 Classification map of decision tree

a. C4.5决策树模型;b. 笔者改进的C4.5决策树模型

发育程度和流体类型对弹性特征的影响,较好地解释了深层-超深层碳酸盐岩储层的实验和测井数据特征。此外,深层高温高压岩石物理实验揭示,温度可以对弹性波的纵横波速度有明显影响,因此,建立了考虑温度影响的深层碳酸盐岩地震岩石物理模型,为利用地震弹性参数更加准确地刻画深层-超深层裂缝分布和识别流体,提供了关键参数。

2.4.2 岩石物理引导的机器学习储层参数预测与不确定性评价技术

总孔隙度(传统意义上的孔隙+裂缝)是深层-超深层碳酸盐岩储层评价的重要指标。深层-超深层碳酸盐岩储层孔隙类型多样,非均质性极强。一方面,尽管深层-超深层碳酸盐岩储层总孔隙度较低,但裂缝孔隙度却控制着深层-超深层碳酸盐岩储层的品质。

传统意义上的孔隙与裂缝在总孔隙谱上呈现不同的概率分布;另一方面,由于储层极强的非均质性,地震弹性参数与总孔隙度之间呈现明显的非线性关系,由地震弹性参数来估计总孔隙度存在很大的不确定性。近年来发展起来的机器学习技术为深层-超深层复杂碳酸盐岩储层孔隙度预测提供了新途径^[66-68]。由于深度学习网络具有高度非线性映射能力,非常适合建立从复杂碳酸盐岩储层地震弹性参数到总孔隙度之间的非线性映射关系,同时,在概率理论的框架下建立混合概率密度输出,不仅可以合理刻画总孔隙度中传统孔隙与裂缝的分布,还可以对总孔隙度预测结果进行不确定性评价,从而为井位部署决策提供依据。因此,笔者提出了一种基于高斯混合概率密度深度神经网络的深层-超深层复杂碳酸盐岩储层总孔隙度反演方法^[69]。由于机器学习需要大量的标签数据用于网络训练,而

深层-超深层油气钻井岩心又很少,为弥补标签数据的不足,通过碳酸盐岩地震岩石物理模型可生成一定数量的模拟数据,结合测井数据可共同构成网络训练数据,提高网络的泛化能力。笔者提出的高斯混合概率密度深度神经网络总孔隙度反演方法,已在塔里木跃进工区超深层复杂碳酸盐岩储层总孔隙度预测中进行试验应用,取得了良好的预测效果。

2.5 深层碳酸盐岩地质建模新技术

针对深层-超深层碳酸盐岩储层地质建模技术现状与面临的挑战,笔者分别从多点地质统计学建模方法、地质过程建模方法、人工智能地质建模方法等方面进行了研究,初步研发了针对性的算法并形成了软件模块,在不同地区取得了较好的应用效果。

2.5.1 多点地质统计学新算法

多点地质统计学应用的关键是训练图像的获取及模拟算法的改进。笔者研发的深层碳酸盐岩储层知识库为训练图像的获取提供了便利。训练图像的建立方式从传统的手工绘制、二维图像分析发展成为无人机露头扫描分析、三维沉积过程模拟等更为先进的技术。训练图像的信息更加完善,数量也更加丰富。无人机倾斜摄影技术可以从更广阔的视域捕捉大型野外露头的地质特征,通过高分辨率图像信息采集,对不同的岩性进行标定和分类,从而建立了具有更多信息的露头数字化模型,提供了更加准确的训练图像,对于描述大型溶洞、暗河的内部结构,以及大型礁滩储层的沉积构型,具有明显的优势。

多点地质统计学新算法的发展主要从提升模拟速度以及模拟目标的连续性两个方面进行,为进一步提升模拟目标的效果,需要从传统的基于概率的方法向基于模式的方法逐步改进,算法的运算效率需要达到工业化应用的水平。沉积地质体具有一定的矢量性特征,沉积体的方向、叠置关系、演化序列等均受一定的规则限制,研发出更符合地质规则的算法是提升建模效果的关键^[70-71]。笔者研发的基于沉积序列的多点统计新算法,在训练图像模式匹配过程中采用沉积序列和动态规划的方法,比传统的采用欧式距离进行模式比较的方法更加科学,得到的模拟结果更符合沉积学规律。在深层礁滩储层结构的模拟中,基于沉积序列的多点统计新算法取得较好的应用效果,可以把礁体内部的礁基、礁核、礁盖纵向结构表征得更加清晰和可靠。

2.5.2 地质过程数值模拟技术

从数据驱动向过程驱动是地质建模技术发展的重要阶段,尤其针对深层储层数据稀少、资料品质差等难题,以地质统计学为代表的建模技术面临着重要挑战。地质过程模拟技术更强调从正演的角度再现储层的形成过程,融入了沉积学机理以及专家经验。在数据匮乏的条件下,充分挖掘先验地质认识,同时考虑一定的不确定性,从更客观的角度建立和评价深层储层模型。针对深层碳酸盐岩地层分布特点,笔者根据多场耦合原理,创建了集沉积物生产模型、能量分布模型及碳酸盐搬运模型于一体的沉积正演模拟新算法^[71-73]。相比于目前已有的其他沉积模拟技术,新方法既考虑了动能和势能的变化,又加入了地形特征的因素,可以满足不同古地形特点的台地分布模拟,且运算速度快,适合于快速分析地层分布规律。此外,为解决沉积过程模拟参数调整耗时、寻优困难等问题,笔者还提出了基于智能优化算法的沉积过程反演技术,通过模拟退火、遗传演化等优化算法对沉积模拟的输入参数进行快速优化,实现与条件数据的逐步吻合,获取了最符合地质实际的沉积模型,尤其是还将气象学领域的复型洗牌优化算法(SCE-UA)引入到了沉积学领域,可同时满足16个地质参数的联合反演,大幅度提高了地质过程模拟的效率和质量。碳酸盐岩地质过程模拟新方法已研发形成软件系统 CarbSIMS,从理论模型测试到巴哈马现代沉积模拟研究,以及针对四川普光、元坝、巴西盐下 Jupiter 等深层油气藏所开展的应用^[74],均取得了较好的模拟效果。

2.5.3 人工智能地质建模技术

人工智能技术在测井资料解释、地震储层预测、产能预测方面均取得了较大的进展。地质建模技术具有多学科集成的特点,技术的综合性强,对人工智能算法的要求更高,既要包容多领域的知识,还要对跨尺度数据进行有效融合。储层地质知识库的建立为人工智能的应用提供了便利,其提供的大数据样本是地质建模应用的重要基础。面对不同类型的深层储层,适用的人工智能建模方法也应有所区别。如深层断控型储层建模更多依赖于三维地震资料,可标定的井数据极少。笔者通过地震多参数分析及雕刻技术,产生了足量的训练样本,优选条件化生成对抗网络(CGAN)进行训练,将训练好的网络迁移应用到其他区块,在顺北5号带南段的测试中取得了较好的效果^[75]。深层礁滩型储层主要受沉积作用控制,笔者通过所研发的沉积过

程模拟软件,生成了大量的符合地质规律的三维地层模型作为训练样本,进一步优选适用的深度学习网络进行训练和迁移应用,在四川盆地普光气田主体区的储层建模中取得了一定效果。

3 不同类型深层碳酸盐岩储层地质建模流程与应用

不同盆地、不同层系深层碳酸盐岩储层发育的主控因素差异很大,导致了碳酸盐岩储集体的多样性。按照深层碳酸盐岩储层形成的主控因素不同,可将其划分为相控、面控、断控3种端元类型和相-面、相-断、断-面、相-断-面等4种复合类型。

针对不同类型深层碳酸盐岩储层开展精细建模,首先需要开展系统的地质分析,建立符合客观实际的地质模式;其次,需要选择针对性的关键技术,充分挖掘有限的各种资料与信息(图3)。笔者研发的储层地质知识库系统集成了储层发育展布的规律认识、技术方法、规范流程以及典型案例等多尺度、多属性的地质知识。针对不同类型储层的地质分析技术、智能测井评价技术、储层地震反演技术、储层形成地质过程的模拟技术、多点地质统计学建模技术、基于深度学习的建模技术等,为深层复杂储层评价以及三维精细地质模型的建立提供了技术支撑。

下面选择具有代表性的3类储层(相控-礁滩型、断控-断溶型、面控-暗河型)分别简述精细建模的技术流程与应用效果。

3.1 面控-暗河型储层

与不整合面有关的碳酸盐岩古岩溶储层占有重要地位,由于具有复杂缝洞体系的岩溶储层非均质性极强,其地质建模是目前研究的热点,也是本团队近期关注的重点之一^[76-78]。长期构造抬升剥蚀所导致的表生岩溶作用控制了与不整合面有关的缝洞储层的发育,当岩溶流体流动时间较长时,位于潜流带的部分裂缝扩容形成暗河管道,能否准确地刻画暗河及其相关储集空间的大小、分布与结构,是主要的技术难点。

古暗河系统建模需要综合储层多学科数据,结合知识库中大量的地质信息构建训练图像,再采取前述的多点地质统计学建模方法,表征暗河系统的形态及结构特征。其中,基于知识库来制作训练图像是核心内容。笔者以塔里木盆地塔河油田主体区为例,开展了典型暗河系统的精细建模工作^[41]。首先,要从知识库中优选与研究区相似的古岩溶及现代岩溶露头,统计暗河形态、结构,测量特征参数,绘制相应河道展布及结构平面图;其次,通过比较现代地下河宽度及其概率分布与塔河相邻露头古暗河、溶洞宽度,采用累计概率曲线方法,建立校正前、后古暗河与现代暗河对应宽

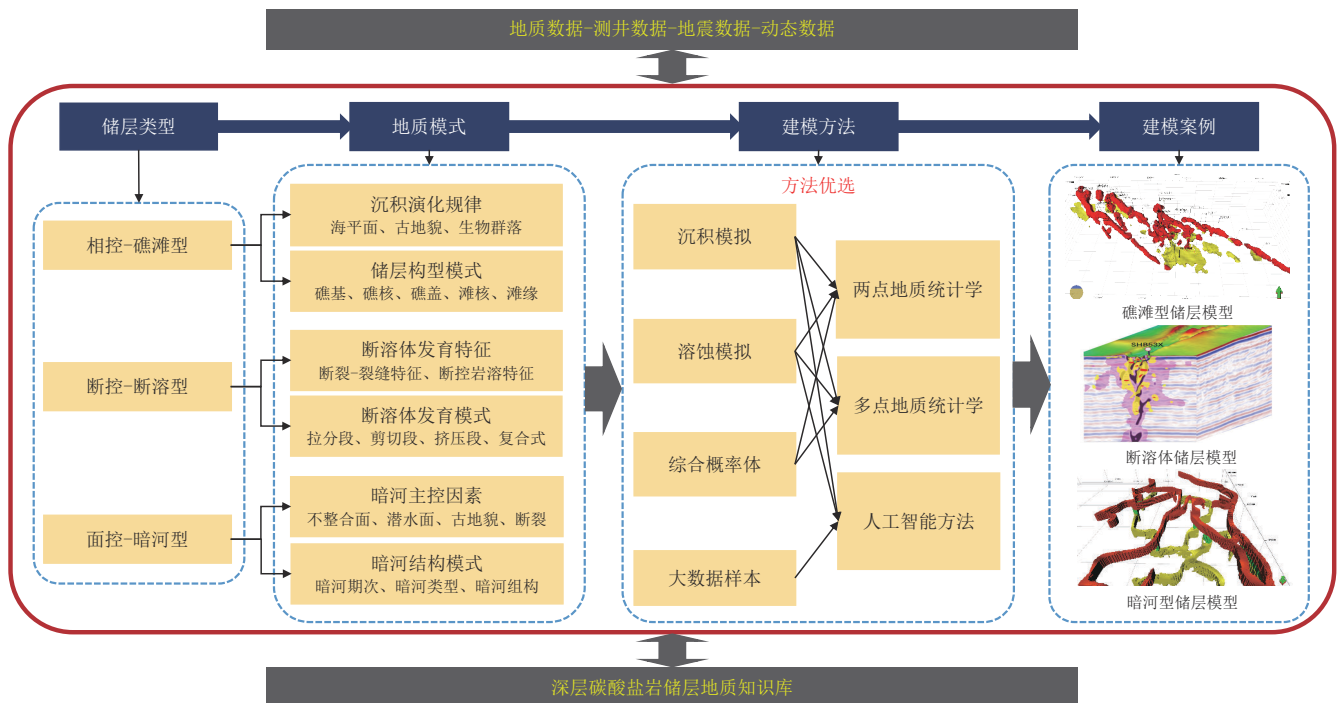


图3 深层碳酸盐岩储层精细地质建模技术流程

Fig. 3 Technical process of fine geological modeling for deep carbonate reservoirs

度列表;最后,根据校正后的现代暗河、溶洞形态,制作三维训练图像,图像既模拟了典型现代暗河形态和结构等要素,又反映了研究区古暗河、溶洞几何参数特征,能够较好地用于古暗河系统建模。

图4为塔河油田主体区典型暗河系统建模结果。基于知识库的建模方法与以地震体积雕刻为主的建模方法相比,模型结果精度进一步得到提升。通过验证井对比,实钻井钻遇符合率由67.0%提高到81.8%;原模型刻画了河道的轮廓,主要为河道异常体。新模型包含2层主河道,6条分支河道,5个溶蚀带和落水洞。结果表明,基于储层知识库并结合多点地质统计学建模方法的应用,更有效地表征了暗河系统的复杂结构,提高了模型精度和建模效率。

3.2 相控-礁滩型储层

以往针对礁滩型储层的建模方法和技术因为缺乏储集体构型分析和展布规律的约束,难以实现对礁滩相储集体内部结构和边界的精细刻画,建模结果与地质实际存在较大差异,甚至不符合地质规律。由于没能准确表征礁滩体内部储层非均质性特征,因而不能满足礁滩型碳酸盐岩气藏三维地质建模的精度需求^[9]。

笔者形成了深层礁滩型储层的精细建模方法与流程:以储层地质知识库中现代沉积及露头资料所解释的储层构型特征为指导,将目标区基于地质过程模拟技术获得的礁滩体沉积模拟结果通过赋值转换为符合礁滩体储层构型及展布特征的地质概率体;以礁滩相储层地球物理预测数据体为依据,采用截断值赋值方法建立储层发育地震概率体;充分结合地质模式和地

震预测成果,将地质概率体和地震概率体进行融合,作为井间约束,采用分级相控+序贯指示方法建立礁滩相储层三维沉积相及微相模型。将测井解释物性数据作为硬数据,在礁滩相储层三维沉积微相模型的控制下,以地震反演数据、物性统计分析成果数据为约束,采用相控随机建模的方法建立三维孔-渗-饱模型;再利用多种资料,动静结合,建立气藏的气水分布模型。

该方法和流程在元坝礁滩相气藏精细建模过程中得到有效应用。以双重概率体为约束,结合储集体构型分析,采用分级相控建模方法,能够模拟礁滩相储层各相带的空间分布,详细表征礁滩体的垂向相序和平面相域接触关系以及储层内部结构与非均质性特征,更符合真实的地质背景和礁滩相储层沉积模式。

早期认为礁滩体横向大面积发育,内部呈薄层均一状分布特征;新地质认识认为礁滩体横向呈孤立椭圆形或条带状分布,内部微相发育呈特殊序列及强非均质性特征。相较于前期以地震资料为单一的约束条件建立的旧模型,随着礁滩体储层构型地质认识的深入,新增以构型模式为指导并结合通过礁滩体沉积模拟结果得到的地质概率体作为约束条件,新模型能够精细表征礁滩体内部礁基-礁核-礁盖及滩核-滩缘的物性变化及非均质性特征,能够刻画礁滩相气藏内一礁或一滩独立成藏的特殊流体空间分布特征(图5)。

3.3 断控型储层

断控型碳酸盐岩储层是指碳酸盐岩地层中以大型走滑断裂或次级断裂为主控因素,叠加不同程度的地表大气淡水或深部热液溶蚀作用,形成的沿断裂分布的储集体。根据溶蚀程度的强弱,断控型储层又进一

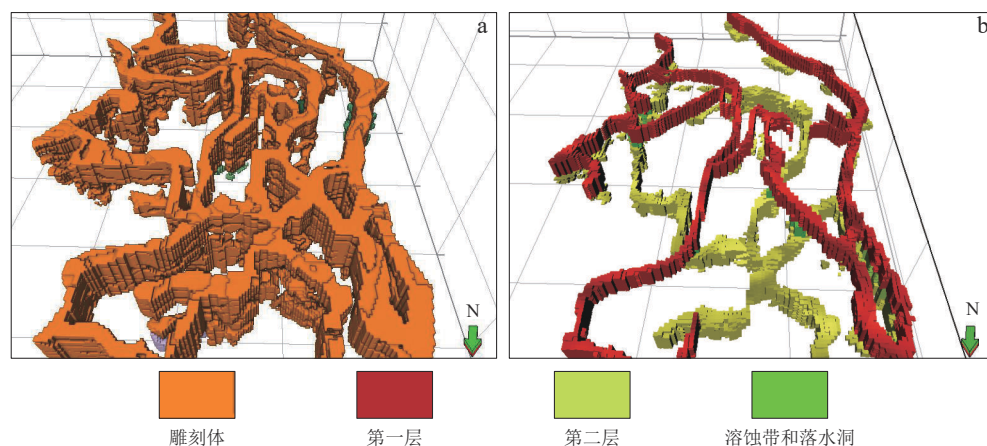


图4 塔里木盆地塔河油田典型区块暗河系统建模结果(局部)示意图

Fig. 4 Comparison of modeling results of underground river system in a typical area, Tahe oilfield

a. 模型以地震体积雕刻为主;b. 新模型基于知识库

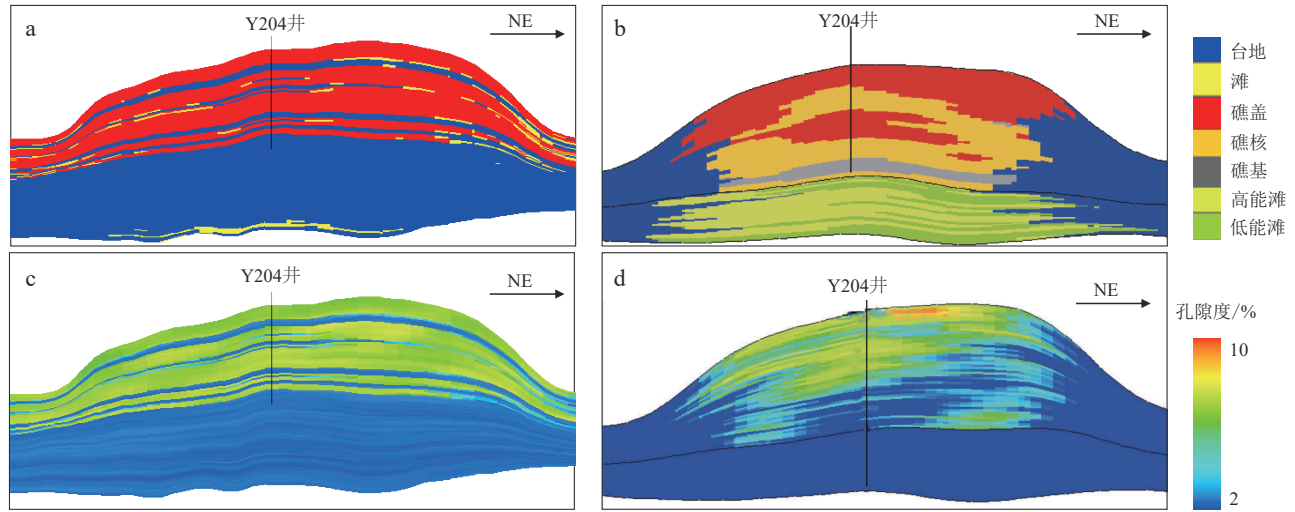


图 5 元坝气田长兴组 Y204 井礁滩型储层沉积微相和孔隙度新、旧模型对比

Fig. 5 Comparison between old and new well Y204-tied microfacies and porosity models of reef beach type reservoirs, Changxing Formation, Yuanba gas field

a. 旧沉积微相模型; b. 新沉积微相模型; c. 旧孔隙度模型; d. 新孔隙度模型

步划分为断缝储集体和断溶体。断缝体储集空间以裂缝间隙或破碎角砾间隙为主,少有溶蚀或未有溶蚀发生,建模的关键在于多尺度裂缝的精细刻画;断溶体的储集空间以溶蚀孔-洞、溶蚀缝为主,建模的关键在于多尺度孔-洞的刻画^[79-80]。断控型储层具有“平面窄条带、纵向延伸长”的特点,由于钻遇井及获取的信息极少,需要充分挖掘多元数据信息,尤其借助储层地质知识库中相关领域的信息,创建出更加高效、更加准确的

断控储集体地质建模新技术。笔者通过露头、测井、地震等多元信息的综合,在断控储集体地质模式指导下,初步建立了以地震刻画为主的断控三维地质模型,将该初始模型与井资料进行标定和修正^[81-82],并与三维地震资料进行一一对应,提取大量模型剖面与地震剖面构建出大数据训练样本对,通过深度学习算法实现断控储层预测网络的搭建,并迁移应用到其他研究区块(图6)。

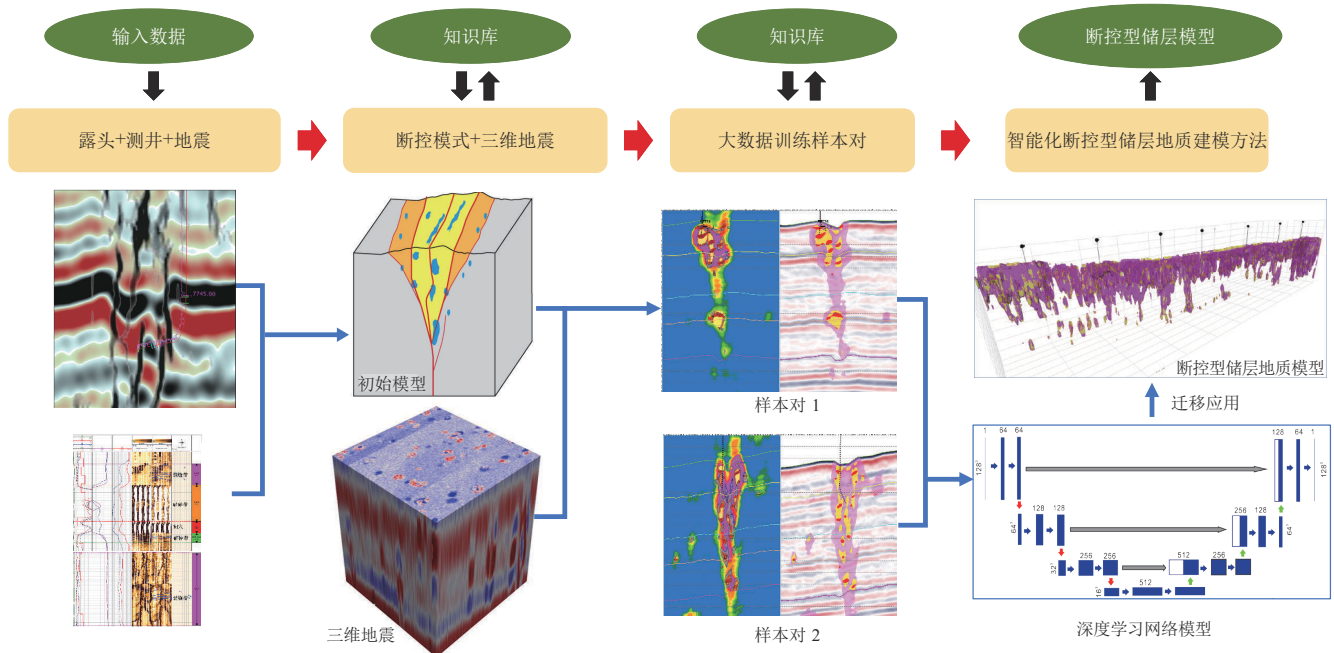


图 6 深层断控型储层地质建模技术流程

Fig. 6 Technical process of geological modeling for deep fault-controlled reservoirs

上述技术方法和流程在塔里木盆地顺北油田1号、5号断裂带得到了应用^[83],均取得了较好效果。其中顺北1号带以溶蚀洞、溶蚀孔为主要储集空间,体现了强溶蚀的断溶体特点;顺北5号带南段以溶孔和裂缝带破碎间隙为主,体现了弱溶蚀的断缝体特点。两个应用实例均是在各自断裂带上取部分数据作为训练样本,分别建立了适用于断溶体和断缝体的深度学习网络模型,将该网络模型应用到预测区域,可在数小时内完成各类储集体精细地质模型的建立,比传统的用地震雕刻进行确定性建模的效率明显提高;且由于深度学习网络在训练过程中加入了更多的井震匹配关系,因此在储层预测准确度上也得到有效提高。通过测试工区的盲井检验,储层预测符合率从89%提高到91%。

4 深层-超深层碳酸盐岩储层建模技术未来攻关方向

深层-超深层碳酸盐岩油气领域由于各类资料少、品质差、精度低,储层非均质性强,为了实现深层碳酸盐岩储层精细地质建模,需要在传承经典的碳酸盐岩储层地质理论及已有的碳酸盐岩储层地质、地球物理与地质建模技术的基础上,持续开展深层碳酸盐岩优质储层发育机理与分布规律研究,不断加大深层-超深层碳酸盐岩储层知识库构建技术、储层智能测井评价技术、储层地震反演技术、储层形成地质过程模拟技术、多点地质统计学建模技术、基于深度学习的智能建模技术等关键技术的攻关力度,更广泛地开展典型地区的油气藏精细描述与建模工作,在应用中发现问题的,不断迭代升级,为高效勘探开发部署提供科学依据。

本项目针对深层-超深层碳酸盐岩储层所形成的建模技术思路、方法与工作流程在塔里木盆地、四川盆地深层-超深层油气藏勘探开发实践中,初步进行了应用,取得了良好的应用效果。未来尚需在以下几个方面持续开展攻关。

4.1 储层地质知识库升级

随着储层研究精细化程度的提高,面对繁杂的知识和成果数据,需要进一步对现有知识体系进行完善,细化已有知识图谱,规范知识库内容,构建碳酸盐岩储层微知识体系网。知识库内容的建设是长期过程,需要持续采集、整合和完善不同类型、不同尺度的露头、油藏及文献资料数据,扩充储层地质知识库内容。基于知识库中海量数据挖掘出有用的地质知识是知识库建设的重要环节。一方面要从文献、标准包等资料中,通过

信息检索技术获取相关经验和认识,另一方面要结合大数据及人工智能等深度学习方法,从野外露头上提取相关储层特征及规律。构建信息技术与储层研究相融合的新工作思路和流程,基于知识库获取地质模式及统计规律,制作各类储层建模所需的训练图像,大幅提高储层的研究效率和精度,有效降低碳酸盐岩储层地质模型的不确定性,是未来知识库应用的重要方向。

4.2 基于地质过程建模技术的扩充

碳酸盐岩储层形成的地质过程既包括沉积过程又包括成岩改造过程,这两者共同控制了储层的质量及分布。前期对碳酸盐岩地层沉积过程的模拟研究取得了较为显著的效果,推动了定量沉积学的快速发展。在沉积过程模拟基础上,进一步探索后期的成岩过程模拟技术,是地质过程模拟研究领域的重要方向。成岩改造模拟技术需要针对不同的控制因素设计相应的新算法,才会使得模拟过程更符合实际。如果是多种因素联合控制,则会进一步增加算法设计的难度。因此,地质过程模拟要与储层地质研究密切结合,在未来的攻关过程中相互促进。

4.3 发展基于人工智能的地球物理解释、预测技术

机器学习方法应用于储层预测,特别是碳酸盐岩储层刻画,与机器学习应用在其他领域的情况相比,技术的发展和运用存在一定的滞后性。研究并筛选出适合于碳酸盐岩储层刻画的人工智能方法非常重要。未来在人工智能的框架下,厘清不同的地震信息对储层目标的响应情况,有效地综合多地震信息,将能够实现碳酸盐岩储层的高精度和高分辨率预测。基于监督式数据驱动的储层刻画往往依赖于稀疏的钻井、测井数据,无法有效利用丰富的三维地震信息。所以需要进一步发展基于无监督学习、半监督学习以及迁移学习的储层刻画技术,避免稀疏标签数据可能带来的过拟合问题,提高机器学习模型的泛化能力。考虑地质约束、空间约束、物理约束、数据特征约束的机器学习模型,能够获得与地质专家的认识相吻合、与物理规律相一致的储层预测结果。

4.4 研发基于人工智能的建模新方法

虽然基于条件化生成对抗的地质建模方法取得了一些进展,但目前的深度学习地质建模方法仍处于探索阶段,尚难以开展工业化应用,缺少样本是面临的主要问题之一。有别于测井和地震数据的深度学习应用场景,油气藏地质建模的应用场景是地下的三维地质

体,目前已有技术还无法直接获取实际样本,需要把地质知识量化,以多种形式参与深度学习,实现数据和知识混合驱动智能地质建模。另外,借鉴人类学习的基本模式,通过文本数据和图像数据的混合学习,将强化学习、符号学习与样本学习更深入结合,开发出具有持续学习能力的地质建模机器,是未来重要的发展方向。

4.5 创建深层储层地质模型的快速更新技术

储层地质模型快速更新是指导钻井精准钻达目标靶点的关键技术。采用钻前多种数据综合分析所建立的初始地质模型,受地震速度难以准确确定等因素制约,随着地层埋深的增加,地震成像的准确性和储层预测的精度都会降低,地质模型也必然存在较大的不确定性。钻井过程中的随钻信息为地质模型的快速更新提供了宝贵资料,目前地球物理方面已实现了随钻速度模型的实时更新以及地震成像的实时更新。如何利用实时更新的地震成像数据对相应区域的地质模型进行快速更新,需要研发效率更高、整合信息能力更强的地质建模新技术。借助于深层网络的信息融合能力,充分挖掘地球物理信息与地质模型信息之间的逻辑关系,让机器学习更加智能化,是实现钻探目标模型快速更新的一个重要攻关方向。

致谢:本文得到了中国科学院A类战略性先导科技专项“智能导钻技术装备体系与相关理论研究”项目1“深层油气形成与分布预测”02课题“深层油气优质储层发育与分布”(编号:XDA14010200)与中国石化科技部项目“油气藏地质建模关键技术及软件平台研发”(编号:P21038)联合资助,项目组成员分别参与了相关研究工作并作出了实质性的贡献。研究过程中,朱日祥院士、金之钧院士、底青云院士和项目咨询、跟踪专家组给予了悉心指导和帮助,中国石化西北油气分公司、西南油气分公司、勘探分公司等单位提供了宝贵资料,在此一并表示诚挚的谢意!

参 考 文 献

- [1] 马永生,黎茂稳,蔡勋育,等. 中国海相深层油气富集机理与勘探开发:研究现状、关键技术瓶颈与基础科学问题[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(4): 655-672, 683.
MA Yongsheng, LI Maowen, CAI Xunyu, et al. Mechanisms and exploitation of deep marine petroleum accumulations in China: Advances, technological bottlenecks and basic scientific problems [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4): 655-672, 683.
- [2] 何治亮,马永生,朱东亚,等. 深层-超深层碳酸盐岩储层理论技术进展与攻关方向[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(3): 533-546.
HE Zhiliang, MA Yongsheng, Zhu Dongya, et al. Theoretical and technological progress and research direction of deep and ultra-deep carbonate reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(3): 533-546.
- [3] 赵文智,汪泽成,姜华,等. 从古老碳酸盐岩大油气田形成条件看四川盆地深层震旦系的勘探地位[J]. 天然气工业, 2020, 40(2): 1-10.
ZHAO Wenzhi, WANG Zecheng, JIANG Hua, et al. Exploration status of the deep Sinian strata in the Sichuan Basin: Formation conditions of old giant carbonate oil/gas fields [J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(2): 1-10.
- [4] 马永生,何治亮,赵培荣,等. 深层-超深层碳酸盐岩储层形成机理新进展[J]. 石油学报, 2019, 40(12): 1415-1425.
MA Yongsheng, HE Zhiliang, ZHAO Peirong, et al. A new progress in formation mechanism of deep and ultra-deep carbonate reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(12): 1415-1425.
- [5] 胡勇,彭先,李莺,等. 四川盆地深层海相碳酸盐岩气藏开发技术进展与发展方向[J]. 天然气工业, 2019, 39(9): 48-57.
HU Yong, PENG Xian, LI Qian, et al. Progress and development direction of technologies for deep marine carbonate gas reservoirs in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(9): 48-57.
- [6] HOULDING S W. 3D Geoscience modeling: Computer techniques for geological characterization [M]. Heidelberg: Springer, 1994: 1-2.
- [7] 李阳,侯加根,李永强. 碳酸盐岩缝洞型储集体特征及分类分级地质建模[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 600-606.
LI Yang, HOU Jiagen, LI Yongqiang. Features and hierarchical modeling of carbonate fracture-cavity reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4): 600-606.
- [8] 谭雪群,廉培庆,邱茂君,等. 基于岩石类型约束的碳酸盐岩油藏地质建模方法——以扎格罗斯盆地碳酸盐岩油藏A为例[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(4): 558-563.
TAN Xuequn, LIAN Peiqing, QIU Maojun, et al. Rock type-constrained geological modeling of carbonate reservoirs: A case study of carbonate reservoir A in the Zagros Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(4): 558-563.
- [9] 胡向阳,郑文波,游瑜春,等. 四川盆地元坝长兴组礁滩相气藏概率体约束地质建模[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(1): 157-163.
HU Xiangyang, ZHENG Wenbo, YOU Yuchun, et al. Probability body-constrained geomodeling of reef-shoal reservoir in Changxing Formation, Yuanba area, Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(1): 157-163.
- [10] 王松,王贵文,赖锦,等. 塔北地区一间房组碳酸盐岩储层测井识别方法及应用[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(6): 2462-2470.
WANG Song, WANG Guiwen, LAI Jin, et al. Logging identification method and application of carbonate reservoir in Yijianfang Formation, northern Tarim Basin [J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(6): 2462-2470.

- [11] 王晓畅, 张军, 李军, 等. 基于交会图决策树的缝洞体类型常规测井识别方法——以塔河油田奥陶系为例[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 805–812.
WANG Xiaochang, ZHANG Jun, LI Jun, et al. Conventional logging identification of fracture-vug complex types data based on crossplots-decision tree: A case study from the Ordovician in Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(4): 805–812.
- [12] 赵军, 刘彦斌, 王菲菲, 等. 碳酸盐岩缝洞型储层类型识别与分类预测[J]. 中国岩溶, 2018, 37(4): 584–591.
ZHAO Jun, LIU Yanbin, WANG Feifei, et al. Identification and classification prediction of fractured-vuggy reservoir type in carbonate rocks[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(4): 584–591.
- [13] 任杰. 碳酸盐岩裂缝性储层常规测井评价方法[J]. 岩性油气藏, 2020, 32(6): 129–137.
REN Jie. Conventional logging evaluation method for carbonate fractured reservoir [J]. Lithologic Reservoirs, 2020, 32(6): 129–137.
- [14] 邓少贵, 莫宣学, 卢春利, 等. 缝-洞型地层缝洞的双侧向测井响应数值模拟[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(6): 706–712.
DENG Shaogui, MO Xuanxue, LU Chunli, et al. Numerical simulation of the dual laterolog response to fractures and caves in fractured-cavernous formation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(6): 706–712.
- [15] 史飞洲, 王彦春, 陈剑光. 碳酸盐岩地层电成像测井孔隙度谱截止值计算方法[J]. 测井技术, 2016, 40(1): 60–64.
SHI Feizhou, WANG Yanchun, CHEN Jianguang. Calculation of porosity spectrum threshold of electrical images in carbonate reservoirs[J]. Well Logging Technology, 2016, 40(1): 60–64.
- [16] 张宏悦, 韩艺. 岩电实验和数值模拟相结合精确评价致密气储层饱和度[J]. 当代化工, 2019, 48(4): 795–798, 803.
ZHANG Hongyue, HAN Yi. Accurate evaluation of saturation of tight gas reservoir by combining rock electricity experiment and numerical simulation [J]. Contemporary Chemical Industry, 2019, 48(4): 795–798, 803.
- [17] 陈义祥, 任小锋, 牟瑜, 等. 基于电成像测井的致密碳酸盐岩储层有效性评价方法[J]. 测井技术, 2020, 44(1): 49–54.
CHEN Yixiang, REN Xiaofeng, MU Yu, et al. Effectiveness evaluation method for tight carbonate reservoirs based on electrical imaging logging data [J]. Well Logging Technology, 2020, 44(1): 49–54.
- [18] 陆云龙, 崔云江, 关叶钦, 等. 基于阵列声波测井的裂缝有效性定量评价方法[J]. 测井技术, 2022, 46(1): 64–70.
LU Yunlong, CUI Yunjiang, GUAN Yeqin, et al. Quantitative evaluation method of fracture effectiveness based on array acoustic logging[J]. Well Logging Technology, 2022, 46(1): 64–70.
- [19] 侯克均, 吴见萌, 葛祥, 等. 基于二维核磁共振弛豫谱的雷四段孔隙度计算方法[J]. 波谱学杂志, 2020, 37(2): 162–171.
HOU Kejun, WU Jianmeng, GE Xiang, et al. Calculating porosity from two-dimensional NMR relaxation spectra of the Leikoupo Group's 4th section [J]. Chinese Journal of Magnetic Resonance, 2020, 37(2): 162–171.
- [20] ZHAO Luanxiao, GENG Jianhua, CHENG Jiubing, et al. Probabilistic lithofacies prediction from prestack seismic data in a heterogeneous carbonate reservoir [J]. Geophysics, 2014, 79(5): M25–M34.
- [21] 徐旺林, 张繁昌, 郭彦如, 等. 贝叶斯全频信息同时反演在鄂尔多斯盆地碳酸盐岩储层预测中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(4): 723–728.
XU Wanglin, ZHANG Fanchang, GUO Yanru, et al. Bayesian full frequency simultaneous inversion for carbonate reservoir in Erdos Basin [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(4): 723–728.
- [22] 周衍, 饶莹. 地震反Q滤波应用于碳酸盐岩储层特征描述[J]. 地球物理学报, 2018, 61(1): 284–292.
ZHOU Yan, RAO Ying. Seismic inverse Q filtering for carbonate reservoir characterization [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(1): 284–292.
- [23] 刘军, 任丽丹, 龚伟. 叠前各向异性裂缝预测技术在顺南地区碳酸盐岩领域中的应用研究[J]. 工程地球物理学报, 2017, 14(4): 463–467.
LIU Jun, REN Lidan, GONG Wei. The application of pre-stack anisotropy fracture predicting technology to carbonate rock in Shunnan area [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2017, 14(4): 463–467.
- [24] GHON G, GRANA D, RANKEY E C, et al. Bayesian facies inversion on a partially dolomitized isolated carbonate platform: A case study from Central Luconia Province, Malaysia [J]. Geophysics, 2021, 86(2): B97–B108.
- [25] 裘怿楠. 石油开发地质方法论(一)[J]. 石油勘探与开发, 1996, 23(2): 43–47.
QIU Yinan. The methodology of petroleum development geology (I) [J]. Petroleum Exploration and Development, 1996, 23(2): 43–47.
- [26] 王晖, 赵建辉. 油田开发方案设计阶段储集层地质模型的建立[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(3): 83–85.
WANG Hui, ZHAO Jianhui. Building reservoir model at the design phase of oilfield development plan [J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(3): 83–85.
- [27] 乔占峰, 沈安江, 郑剑锋, 等. 基于数字露头模型的碳酸盐岩储集层三维地质建模[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(3): 328–337.
QIAO Zhanfeng, SHEN Anjiang, ZHENG Jianfeng, et al. Three-dimensional carbonate reservoir geomodeling based on the digital outcrop model [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(3): 328–337.
- [28] 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): 458–465.
SONG Xinmin, RAN Qiquan, SUN Yuanhui, et al. Fine description and geologic modeling for volcanic gas reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(4): 458–465.
- [29] 吴键, 曹代勇, 邓爱居, 等. 三维地质建模技术在油田基础地质研究中的应用[J]. 地球科学与环境学报, 2005, 27(2): 52–55.

- WU Jian, CAO Daiyong, DENG Aiju, et al. 3D geological modeling in studying oilfield geology [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2005, 27(2): 52-55.
- [30] 江同文, 唐明龙, 王洪峰. 克拉2气田稀井网储层精细三维地质建模[J]. *天然气工业*, 2008, 28(10): 11-14, 134.
JIANG Tongwen, TANG Minglong, WANG Hongfeng. Fine 3D geologic modelling of reservoirs under control of wide spacing in the Kela-2 Gas Field [J]. *Natural Gas Industry*, 2008, 28(10): 11-14, 134.
- [31] 白振强, 王清华, 杜庆龙, 等. 曲流河砂体三维构型地质建模及数值模拟研究[J]. *石油学报*, 2009, 30(6): 898-902, 907.
BAI Zhenqiang, WANG Qinghua, DU Qinglong, et al. Study on 3D architecture geology modeling and digital simulation in meandering reservoir [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(6): 898-902, 907.
- [32] 尹艳树, 张昌民, 李少华, 等. 一种基于沉积模式的多点地质统计学建模方法[J]. *地质论评*, 2014, 60(1): 216-221.
YIN Yanshu, ZHANG Changmin, LI Shaohua, et al. A pattern-based multiple point geostatistics method [J]. *Geological Review*, 2014, 60(1): 216-221.
- [33] 刘可可, 侯加根, 刘钰铭, 等. 多点地质统计学在点坝内部构型三维建模中的应用[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(4): 577-583.
LIU Keke, HOU Jiagen, LIU Yuming, et al. Application of multiple-point geostatistics in 3D internal architecture modeling of point bar [J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(4): 577-583.
- [34] 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(1): 96-103.
WANG Mingchuan, SHANG Xiaofei, DUAN Taizhong. A review of the establishment methods of training image in multiple-point statistics modeling [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2022, 28(1): 96-103.
- [35] 王立鑫, 尹艳树, 冯文杰, 等. 多点地质统计学中训练图像优选方法及其在地质建模中的应用[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(4): 703-709.
WANG Lixin, YIN Yanshu, FENG Wenjie, et al. A training image optimization method in multiple-point geostatistics and its application in geological modeling [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(4): 703-709.
- [36] 陈欢庆, 李文青, 洪垚. 多点地质统计学建模研究进展[J]. *高校地质学报*, 2018, 24(4): 593-603.
CHEN Huanqing, LI Wenqing, HONG Yao. Advances in multiple-point geostatistics modeling [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2018, 24(4): 593-603.
- [37] 黄渊, 段太忠, 樊太亮, 等. 塔河地区寒武纪碳酸盐岩台地沉积演化史与成因机制——来自地层沉积正演模拟的启示[J]. *石油学报*, 2022, 43(5): 617-636.
HUANG Yuan, DUAN Taizhong, FAN Tailiang, et al. Depositional evolution history and formation mechanism of Cambrian carbonate platforms in Tahe area: Insights from stratigraphic forward modelling [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(5): 617-636.
- [38] 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研究[J/OL]. *地球科学*: 1-18 [2022-09-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220621.1503.016.html>.
TANG Jiafan, TANG Mingming, LU Shuangfang, et al. Three-dimensional modeling of estuary reservoir based on coupling sedimentary dynamics simulation and multipoint geostatistics method [J/OL]. *Earth Science*: 1-18 [2022-09-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220621.1503.016.html>.
- [39] 刘彦峰, 张文彪, 段太忠, 等. 深度学习油气藏地质建模研究进展[J]. *地质科技通报*, 2021, 40(4): 235-241.
LIU Yanfeng, ZHANG Wenbiao, DUAN Taizhong, et al. Progress of deep learning in oil and gas reservoir geological modeling [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2021, 40(4): 235-241.
- [40] SAIKIA P, BARUAH R D, SINGH S K, et al. Artificial neural networks in the domain of reservoir characterization: A review from shallow to deep models [J]. *Computers & Geosciences*, 2020, 135: 104357.
- [41] 何治亮, 孙建芳, 郭攀红, 等. 碳酸盐岩储集层知识库构建方法及其在缝洞型油藏地质建模中的应用[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(4): 710-718.
HE Zhiliang, SUN Jianfang, GUO Panhong, et al. Construction method of carbonate reservoir knowledge base and its application in fracture-cavity reservoir geological modeling [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(4): 710-718.
- [42] 何治亮, 马永生, 张军涛, 等. 中国的白云岩与白云岩储层: 分布、成因与控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(1): 1-14.
HE Zhiliang, MA Yongsheng, ZHANG Juntao, et al. Distribution, genetic mechanism and control factors of dolomite and dolomite reservoirs in China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(1): 1-14.
- [43] RESOP J P, LEHMANN L, HESSION W C. Drone laser scanning for modeling riverscape topography and vegetation: Comparison with traditional aerial lidar [J]. *Drones*, 2019, 3(2): 35.
- [44] SONG Lei, NING Zhengfu, DUAN Lian. Research on reservoir characteristics of Chang7 tight oil based on nano-CT [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, 11(16): 472.
- [45] WANG Jingbin, HE Zhiliang, ZHU Dongya, et al. Petrological and geochemical characteristics of the botryoidal dolomite of Dengying Formation in the Yangtze Craton, South China: Constraints on terminal Ediacaran "dolomite seas" [J]. *Sedimentary Geology*, 2020, 406: 105722.
- [46] ZHU Dongya, LIU Quanyou, ZHANG Juntao, et al. Types of fluid alteration and developing mechanism of deep marine carbonate reservoirs [J]. *Geofluids*, 2019, 2019: 3630915.
- [47] EILER J M. "Clumped-isotope" geochemistry—The study of naturally-occurring, multiply-substituted isotopologues [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 262(3/4): 309-327.
- [48] RIECHELMANN S, MAVROMATIS V, BUHL D, et al. Controls on formation and alteration of early diagenetic dolomite: A multi-

- proxy $\delta^{44/40}\text{Ca}$, $\delta^{26}\text{Mg}$, $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ approach[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, 283: 167–183.
- [49] HANSMAN R J, ALBERT R, GERDES A, et al. Absolute ages of multiple generations of brittle structures by U–Pb dating of calcite[J]. *Geology*, 2018, 46(3): 207–210.
- [50] DROST K, CHEW D, PETRUS J A, et al. An image mapping approach to U–Pb LA–ICP–MS carbonate dating and applications to direct dating of carbonate sedimentation[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2018, 19(12): 4631–4648.
- [51] BRIGAUD B, ANDRIEU S, BLAISE T, et al. Calcite uranium–lead geochronology applied to hardground lithification and sequence boundary dating[J]. *Sedimentology*, 2021, 68(1): 168–195.
- [52] WANG Xiaolin, CHOU Iming, HU Wenxuan, et al. In situ observations of liquid–liquid phase separation in aqueous MgSO_4 solutions: Geological and geochemical implications[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, 103: 1–10.
- [53] WANG Xiaolin, CHOU Iming, HU Wenxuan, et al. Raman spectroscopic measurements of CO_2 density: Experimental calibration with high-pressure optical cell (HPOC) and fused silica capillary capsule (FSCC) with application to fluid inclusion observations[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(14): 4080–4093.
- [54] LUQUOT L, GOUZE P, NIEMI A, et al. CO_2 -rich brine percolation experiments through Heletz reservoir rock samples (Israel): Role of the flow rate and brine composition[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2016, 48(Part 1): 44–58.
- [55] CHOU Iming. In situ observations and quantitative Raman spectroscopic analyses of samples in high-pressure optical cells in hydrothermal experiments[J]. *Science Bulletin*, 2021, 66(19): 1933–1935.
- [56] 刘诗琦, 陈森然, 刘波, 等. 基于原位溶蚀模拟实验的四川盆地二叠系栖霞组–茅口组白云岩孔隙演化[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(3): 702–716.
- LIU Shiqi, CHEN Senran, LIU Bo, et al. Pore evolution of the Permian Qixia–Maokou Formations dolomite in Sichuan Basin based on in-situ dissolution simulation experiment[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(3): 702–716.
- [57] NOIRIEL C, SOULAIN C. Pore-scale imaging and modelling of reactive flow in evolving porous media: tracking the dynamics of the fluid – rock interface[J]. *Transport in Porous Media*, 2021, 140(1): 181–213.
- [58] 丁茜, 何治亮, 王静彬, 等. 生烃伴生酸性流体对碳酸盐岩储层改造效应的模拟实验[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(1): 223–234.
- DING Qian, HE Zhiliang, WANG Jingbin, et al. Simulation experiment of carbonate reservoir modification by source rock-derived acidic fluids[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(1): 223–234.
- [59] MOLINS S, TREBOTICH D, YANG Li, et al. Pore-scale controls on calcite dissolution rates from flow-through laboratory and numerical experiments[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(13): 7453–7460.
- [60] CHEN Li, KANG Qijun, CAREY B, et al. Pore-scale study of diffusion–reaction processes involving dissolution and precipitation using the lattice Boltzmann method[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 75: 483–496.
- [61] XU Tianfu, SONNENTHAL E, SPYCHER N, et al. TOUGHREACT—A simulation program for non-isothermal multiphase reactive geochemical transport in variably saturated geologic media: Applications to geothermal injectivity and CO_2 geological sequestration[J]. *Computers & Geosciences*, 2006, 32(2): 145–165.
- [62] DENG Hang, SPYCHER N. Modeling reactive transport processes in fractures[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2019, 85(1): 49–74.
- [63] 吴天江, 杨海恩, 陈荣环, 等. 基于R/S分析法的调剖注入压力动态变化特征量化评价[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2016, 31(2): 65–69.
- WU Tianjiang, YANG Haien, CHEN Ronghuan, et al. Quantitative evaluation of dynamic varying characteristics of injection pressure in profile control based on rescaled range (R/S) analysis method[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2016, 31(2): 65–69.
- [64] 张子涵, 魏文, 张杰, 等. 基于CT扫描红层砂岩孔隙多尺度分形维数的确定方法[J]. *地质科技通报*, 2022, 41(3): 254–263.
- ZHANG Zihan, WEI Wen, ZHANG Jie, et al. Determining method of multiscale fractal dimension of red bed sandstone pores based on CT scanning[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(3): 254–263.
- [65] 韩存鸽, 叶球孙. WEKA平台下的聚类分析算法比较研究[J]. *重庆科技学院学报(自然科学版)*, 2019, 21(1): 90–93, 118.
- HAN Cunge, YE Qiusun. Comparison of clustering analysis algorithms based on WEKA platform[J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition)*, 2019, 21(1): 90–93, 118.
- [66] ZHAO Luanxiao, ZOU Caifeng, CHEN Caifeng, et al. Fluid and lithofacies prediction based on integration of well-log data and seismic inversion: A machine-learning approach[J]. *Geophysics*, 2021, 86(4): M151–M165.
- [67] ZOU Caifeng, ZHAO Luanxiao, XU Minghui, et al. Porosity prediction with uncertainty quantification from multiple seismic attributes using random forest[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(7): e2021JB021826.
- [68] CHEN Yuanyuan, ZHAO Luanxiao, PAN Jianguo, et al. Deep carbonate reservoir characterisation using multi-seismic attributes via machine learning with physical constraints[J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2021, 18(5): 761–775.
- [69] WANG Yingying, NIU Liping, ZHAO Luanxiao, et al. Gaussian mixture model deep neural network and its application in porosity prediction of deep carbonate reservoir[J]. *Geophysics*, 2022, 87(2): M59–M72.
- [70] 王鸣川, 段太忠. 基于图型矢量距离的多点地质统计相建模算

- 法[J]. 石油学报, 2018, 39(8): 916-923.
- WANG Mingchuan, DUAN Taizhong. Multipoint geostatistical facies modeling algorithm based on pattern vector distance [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(8): 916-923.
- [71] 段太忠, 王光付, 廉培庆, 等. 油气藏定量地质建模方法与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2019.
- DUAN Taizhong, WANG Guangfu, LIAN Peiqing, et al. Method and application of quantitative geological modeling for oil and gas reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2019.
- [72] 刘彦锋, 段太忠, 龚伟, 等. 基于深度学习的沉积模拟代理模型构建与应用[J/OL]. 沉积学报: 1-16[2022-09-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=CJXB20211217002&DbName=CAPJ2021>. DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2021.152.
- LIU Yanfeng, DUAN Taizhong, GONG Wei, et al. Construction and application of a proxy model for stratigraphic forward modeling based on deep learning[J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica*: 1-16[2022-09-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=CJXB20211217002&DbName=CAPJ2021>. DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2021.152.
- [73] 沈禄银, 潘仁芳, 段太忠, 等. 基于地层沉积反演的深时海平面变化曲线恢复方法[J/OL]. 地学前缘: 1-12[2022-09-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=DXQY20220507000&DbName=CAPJ2022>. DOI: 10.13745/j.esf.sf.2022.2.64.
- SHEN Luyin, PAN Renfang, DUAN Taizhong, et al. Recovery method of deep time sea level change curve based on stratigraphic inverse modeling[J/OL]. *Earth Science Frontiers*: 1-12[2022-09-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=DXQY20220507000&DbName=CAPJ2022>. DOI: 10.13745/j.esf.sf.2022.2.64.
- [74] 张文彪, 段太忠, 刘彦锋, 等. 综合沉积正演与多点地质统计模拟碳酸盐岩台地——以巴西Jupiter油田为例[J]. 石油学报, 2017, 38(8): 925-934.
- ZHANG Wenbiao, DUAN Taizhong, LIU Yanfeng, et al. Integrated sedimentary forward modeling and multipoint geostatistics in carbonate platform simulation: A case study of Jupiter Oilfield in Brazil[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(8): 925-934.
- [75] ZHANG Wenbiao, HE Zhiliang, DUAN Taizhong, et al. Architecture characteristics and characterization methods of fault-controlled karst reservoirs: A case study of the Shunbei 5 fault zone in the Tarim Basin, China[J/OL]. *Interpretation*, 2022: SA47-SA62 [2022-09-01]. <https://doi.org/10.1190/INT-2022-0014.1>. DOI: 10.1190/INT-2022-0014.1.
- [76] 吕心瑞, 孙建芳, 郭兴威, 等. 缝洞型碳酸盐岩油藏储层结构表征方法——以塔里木盆地塔河S67单元奥陶系油藏为例[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(3): 728-737.
- LYU Xinrui, SUN Jianfang, WU Xingwei, et al. Internal architecture characterization of fractured-vuggy carbonate reservoirs: A case study on the Ordovician reservoirs, Tahe Unit S67, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(3): 728-737.
- [77] 胡向阳, 李阳, 权莲顺, 等. 碳酸盐岩缝洞型油藏三维地质建模方法——以塔河油田四区奥陶系油藏为例[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(3): 383-387.
- HU Xiangyang, LI Yang, QUAN Lianshun, et al. Three-dimensional geological modeling of fractured-vuggy carbonate reservoirs: A case from the Ordovician reservoirs in Tahe-IV Block, Tahe Oilfield[J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(3): 383-387.
- [78] 吕心瑞, 李红凯, 魏荷花, 等. 碳酸盐岩储层多尺度缝洞体分类表征——以塔河油田S80单元奥陶系油藏为例[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 813-821.
- LYU Xinrui, LI Hongkai, WEI Hehua, et al. Classification and characterization method for multi-scale fractured-vuggy reservoir zones in carbonate reservoirs: An example from Ordovician reservoirs in Tahe Oilfield S80 Unit [J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(4): 813-821.
- [79] 刘彦锋, 张文彪, 段太忠, 等. 基于细胞自动机的断控岩溶过程数值模拟方法[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(9): 3550-3555.
- LIU Yanfeng, ZHANG Wenbiao, DUAN Taizhong, et al. Numerical simulation method for the formation of fault-karst carbonate reservoir process based on cellular automaton [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(9): 3550-3555.
- [80] DUAN Taizhong, ZHANG Wenbiao, LU Xinbian, et al. Architectural characterization of Ordovician fault-controlled paleokarst carbonate reservoirs, Tahe Oilfield, China [J]. *Interpretation*, 2020, 8(4): T953-T965.
- [81] 张文彪, 段太忠, 李蒙, 等. 塔河油田托甫台区奥陶系断溶体层级类型及表征方法[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(2): 314-325.
- ZHANG Wenbiao, DUAN Taizhong, LI Meng, et al. Architecture characterization of Ordovician fault-controlled paleokarst carbonate reservoirs in Tuoputai, Tahe Oilfield, Tarim Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(2): 314-325.
- [82] 张文彪, 段太忠, 何治亮, 等. 碳酸盐岩古溶洞层级约束地质建模方法探讨: 以塔河油田奥陶系某缝洞单元为例[J]. 地质科技通报, 2022, 41(3): 273-281.
- ZHANG Wenbiao, DUAN Taizhong, HE Zhiliang, et al. Hierarchical constraint geological modelling method for carbonate paleokarst caves: A case study of Ordovician fracture-cavern unit in Tahe Oilfield [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(3): 273-281.
- [83] 张文彪, 张亚雄, 段太忠, 等. 塔里木盆地塔河油田托甫台区奥陶系碳酸盐岩断溶体系统层次建模方法[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 207-218.
- ZHANG Wenbiao, ZHANG Yaxiong, DUAN Taizhong, et al. Hierarchy modeling of the Ordovician fault-karst carbonate reservoir in Tuoputai area, Tahe Oilfield, Tarim Basin, NW China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(1): 207-218.