

海相碳酸盐岩储层建模和表征技术进展及应用

乔占峰^{1,2}, 郑剑锋^{1,2}, 张杰^{1,2}, 陈薇^{1,2}, 李昌^{1,2}, 常少英^{1,2}, 沈安江^{1,2}

1 中国石油杭州地质研究院; 2 中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室

摘要 针对海相碳酸盐岩油气勘探开发中面临的储层非均质性表征和评价的难题,开展了多尺度储层地质建模和表征技术研发。分别以川东—鄂西三叠系飞仙关组、塔里木盆地奥陶系一间房组、四川盆地寒武系龙王庙组为例,阐述了宏观尺度、油藏尺度和微观尺度的储层地质建模、非均质性表征和评价技术的内涵和研究进展。宏观尺度储层地质建模和表征技术,解决储层地质体与非储层地质体的分布规律问题,揭示层序格架中储层的分布规律,并为地震储层预测提供储层地质模型的约束,其新进展是攻克了平躺露头数字采集的难题,该技术主要应用于勘探早期的储层预测和区带评价。油藏尺度储层地质建模和表征技术,解决单个储层地质体非均质性及主控因素问题,揭示流动单元和隔挡层的分布样式,其新进展是通过数字露头建模技术的引入,使储层地质模型由二维向三维延伸,该技术应用于有效储层预测、油气分布特征分析、探井和开发井部署。微观尺度储层孔喉结构表征技术,解决储层孔喉结构表征与评价问题,揭示孔喉结构的差异和对储层流动单元渗流机制的控制,其新进展是建立了渗透层和隔挡层的测井—地震识别图版,该技术主要应用于产能预测和评价。

关键词 储层建模; 储层表征; 储层评价; 储层非均质性; 孔喉结构; 露头数字化; 碳酸盐岩

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

0 前言

储层非均质性表征和评价已成为海相碳酸盐岩油气勘探开发中亟需解决的关键科学问题之一。前人在碳酸盐岩储层地质建模和表征方面做过大量的研究,取得了很多成果:刻画孔喉分布、可动流体分布的核磁共振法^[1-3],利用孔隙介质中有机质发光特性识别、计算孔隙或有机质分布状态的激光共聚焦法^[4-6],量化表征孔隙和喉道在三维空间展布特征的CT扫描法^[7-10],研究纳米级孔喉系统的场发射扫描电镜法和氮气吸附法^[11-14]等,均侧重于微观孔喉结构表征和评价研究;基于露头激光扫描仪(Lidar)等仪器的数字化露头技术侧重于宏观储层建模和表征^[15-20]。但是,这些成果只是从单一尺度开展工作。

笔者从勘探开发不同阶段的具体需求出发,开展了多尺度碳酸盐岩储层建模和表征工作,并在宏观尺度、油藏尺度和微观尺度的储层地质建模和表征技术方面取得进展。宏观尺度储层地质建模和表

征技术,解决储层地质体与非储层地质体的分布规律问题,揭示层序格架中储层的分布规律,并为地震储层预测提供储层地质模型的约束,该技术主要在勘探早期的储层预测和区带评价上发挥作用。油藏尺度储层地质建模和表征技术,解决单个储层地质体非均质性及主控因素问题,揭示流动单元和隔挡层的分布样式,该技术在有效储层预测、油气分布特征分析、探井和开发井部署上发挥作用。微观尺度储层孔喉结构表征技术,解决储层孔喉结构表征与评价问题,揭示孔喉结构的差异和对储层流动单元渗流机制的控制,孔喉结构不仅影响流体的渗流特征,还控制了油气产能和采收率,该技术主要在产能预测和评价上发挥作用。

1 宏观尺度储层地质建模和表征技术

这项技术主要适用于沉积型碳酸盐岩储层,其岩相的类型、规模、接触关系和分布在空间上具有较强的规律性,可把露头地质信息作为控制数据,通过

收稿日期: 2019-08-16; 改回日期: 2019-09-29

本文受国家科技重大专项下属课题“寒武系—中新元古界碳酸盐岩规模储层形成与分布研究”(编号:2016ZX05004-002)和中国石油天然气股份有限公司直属院所基础研究和战略储备技术研究基金项目“古老海相碳酸盐岩定年、定温与微量—稀土元素面扫描技术研发及应用”(编号:2018D-5008-03)共同资助

第一作者: 乔占峰, 硕士, 高级工程师, 主要从事碳酸盐岩沉积储层研究。通信地址: 310023 浙江省杭州市西湖区西溪路920号 中国石油杭州地质研究院; E-mail: qiaozf_hz@petrochina.com.cn

地质研究与地质统计学相结合,开展储层地质建模工作,从而较好地刻画储层的宏观非均质性,进而指导地下地震储层预测。

1.1 技术概述

宏观尺度储层地质建模和表征技术包括以下 5 个方面的技术内涵^[18]:

(1) 建模露头剖面筛选

这是整个建模过程的第一步。有以下 3 个要点:①所选露头储层地质体,要与地下储层地质体有可类比性,以保证模型的井下适用性;②露头出露条件决定模型质量,理想的露头建模剖面,应垂直相带方向,涵盖不同相带,剖面长度以 1~2 km 效果最好,最好有多条剖面纵横交错,这样形成的三维模型更接近真实;③做好露头数字化方案。

(2) 露头剖面地质研究

储层建模以露头地质认识为基础,研究内容包括:①露头剖面实测与采样,岩性和物性垂向变化的详细观察;②对关键层面和地质体进行横向追踪,如高频层序界面、典型岩相界面、关键地质体尖灭点等;③对采集的样品进行物性测定和薄片观察,建立岩性与物性以及声波速度之间的关系。基于若干条二维剖面的研究,形成沉积相模式、储层成因和分布规律的地质认识,作为建立岩性、孔隙度、渗透率模型的控制参数。

(3) 建立数字露头模型

利用先进的仪器和技术手段将露头剖面数字化,与地质信息和研究成果相结合,进而在三维空间中分析地质信息。常用的露头数字化仪有 Lidar、RTK-GPS、GPR、Gigapan 和 UAV 等^[18]。露头数字化获取的数据只是空间上的一系列点,不具任何地质意义,需将其与地质信息结合,才能实现数字露头的地质解译。建立数字露头模型的流程如下:首先,通过高分辨率照片比对,将实测剖面 and 取样点在 Lidar 数据体上标定;其次,利用软件(Polywork)将它们进行连线并加密内插,生成虚拟井;然后,根据取样点的岩相和厚度,将地质信息(包括岩相、孔隙度、渗透率等)加载到井轨迹上;最后,以虚拟井关键层面点为限定,在数字露头面上进行岩相和层面的追踪解释。与地质信息相结合的露头数字化体,称之为数字露头模型(DOM),构成了三维储层地质建模的输入数据。

(4) 建立露头储层地质模型

在 GoCad 或 Petrel 等软件上开展露头储层地质建模工作,包括 3 个步骤:①建立三维地层格架。以 DOM 中的层界线为出发点,选取合适的算法进行外推,得到三维空间上的层面,然后在三维层面间建立恰当的网格,形成三维地元体。②建立岩相模型。在所建立的三维地层格架内,以虚拟井携带的岩相信息作为输入数据,以每个小层内各岩相类型的分布概率作为控制信息,选择合适的变差函数和算法,在全部网格中进行岩相模拟。③建立物性模型。以实测孔隙度和渗透率数据作为输入数据,以岩相模型为控制参数,选取合适的算法,对孔隙度和渗透率在全部网格中进行模拟。

(5) 井下类比研究

基于数字露头的储层地质模型,可以对地下储层研究提供重要信息:①可作为刻画地下地质体岩相类型和展布的概念模型,使地下井资料和地震资料的解释更逼近地质实际;②用于地震正演模型的建立,为地震储层预测提供参数选择依据,提高地震储层预测的精度。

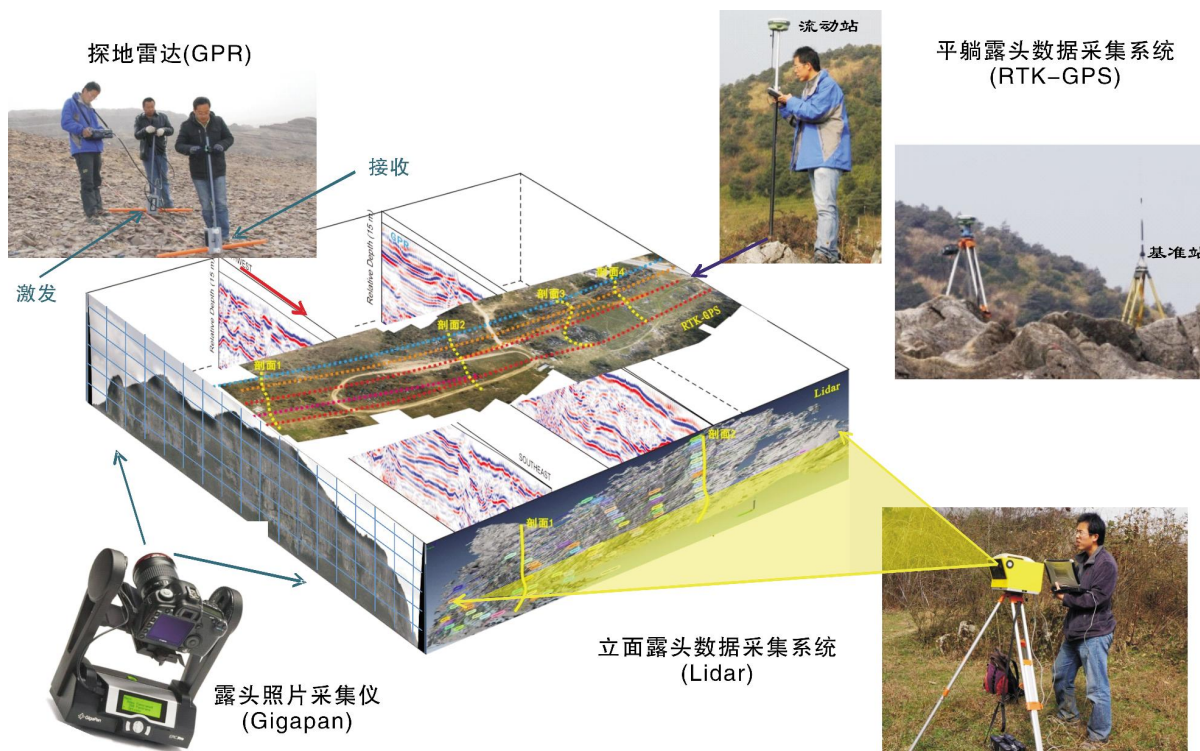
1.2 技术进展

针对国内外露头条件的差异,笔者对露头数字化技术进行了以下 3 个方面的改进(图 1),解决了露头数据采集的难题,使宏观尺度储层地质建模和表征技术更符合中国露头剖面分布的特点:

(1) 北美地台基本是直立露头,地层出露好且连续平直,用激光扫描仪(Lidar)即可完成露头剖面的数字化。而国内大多为平躺露头,且构造复杂,连续性差,单用 Lidar 无法对露头剖面进行数字化。通过引入动态 GPS(RTK-GPS),对平躺露头的关键地质信息进行数字化,实现了对全地形露头的地质信息采集。

(2) 北美地台交叉出露的露头剖面多,地层出露和连续性好,若干条交叉的露头剖面可较好地构成三维地质信息,故只需采集露头剖面的地质信息即可。而国内很难找到能体现三维立体形态的交叉出露的剖面,尤其在高覆盖区,地层出露和连续性差。通过引入探地雷达(GPR)采集地表浅层的地质信息,尽可能与露头剖面一起构成三维地质信息。

(3) 加强露头储层综合地质研究,包括层序追踪和地层格架的建立、层序格架中沉积相和分布规律

图1 数字露头采集系统示意图^[18]

的分析、层序格架中储层成因和分布规律的分析,为三维储层地质模型的构建提供更符合地质实际的标定依据。

1.3 技术应用

以川东—鄂西齐岳山三叠系飞仙关组鲕粒白云岩储层为例,阐述宏观尺度储层地质建模和表征技术在有利储层预测研究中的应用实效。

(1) 建模露头剖面筛选

工区露头地形平坦,飞仙关组地层倾角约 45° ,于核桃园附近 $2000\text{m}\times 200\text{m}$ 的范围内出露良好,可作为建模区,顶面以下 70m (飞仙关组三段—四段)作为建模主体。在建模区设计实测剖面8条,剖面间隔 $50\sim 200\text{m}$ 。同时确定对比标志层,开展剖面间的横向追踪,搞清岩相的展布特征、接触关系、发育尺度。以岩性变化为单元,取柱塞样420件,取样间隔 $10\sim 100\text{cm}$,用于孔隙度、渗透率和储层特征分析。

(2) 露头剖面地质研究

在区域地质背景分析和建模区实测剖面精细地质研究的基础上,明确飞仙关组三段—四段为缓坡颗粒滩沉积体系^[20]。通过剖面实测及薄片观察,识别

出13种岩相类型,及具有3种不同岩相(潮下砂屑滩、潮下一潮间鲕粒滩、潮坪相)叠置特征的高频旋回;识别出4类储层,即(白云质)砂屑粘结灰岩储层、晶粒白云岩储层、(含膏)白云质鲕粒灰岩储层和泥晶白云岩储层。潮下(白云质)砂屑粘结灰岩储层位于斜坡部位,白云石化程度越高,孔渗越好。晶粒白云岩储层、(含膏)白云质鲕粒灰岩储层和泥晶白云岩储层,发育于高频旋回上部的潮坪相带。潮上泥晶白云岩储层和潮间上部的(含膏)白云质鲕粒灰岩储层,发育在台缘鲕滩后侧,而晶粒白云岩和潮下(白云质)砂屑粘结灰岩储层则发育在台缘鲕滩下方,由此构成上下2个储层组合,并随台缘迁移呈前积叠置发育。据此,建立了飞仙关组三段—四段露头二维储层地质模型(图2)。

(3) 建立数字露头模型

由于露头平坦且地层倾角大,采用动态GPS(RTK-GPS)进行露头数字化,对露头实测剖面、采样点、岩相界面、尖灭点等地质信息进行空间定位(数字化),共采集2040个数据点。

(4) 建立露头储层地质模型

理论上,应该对3~5个类似建模区开展工作,

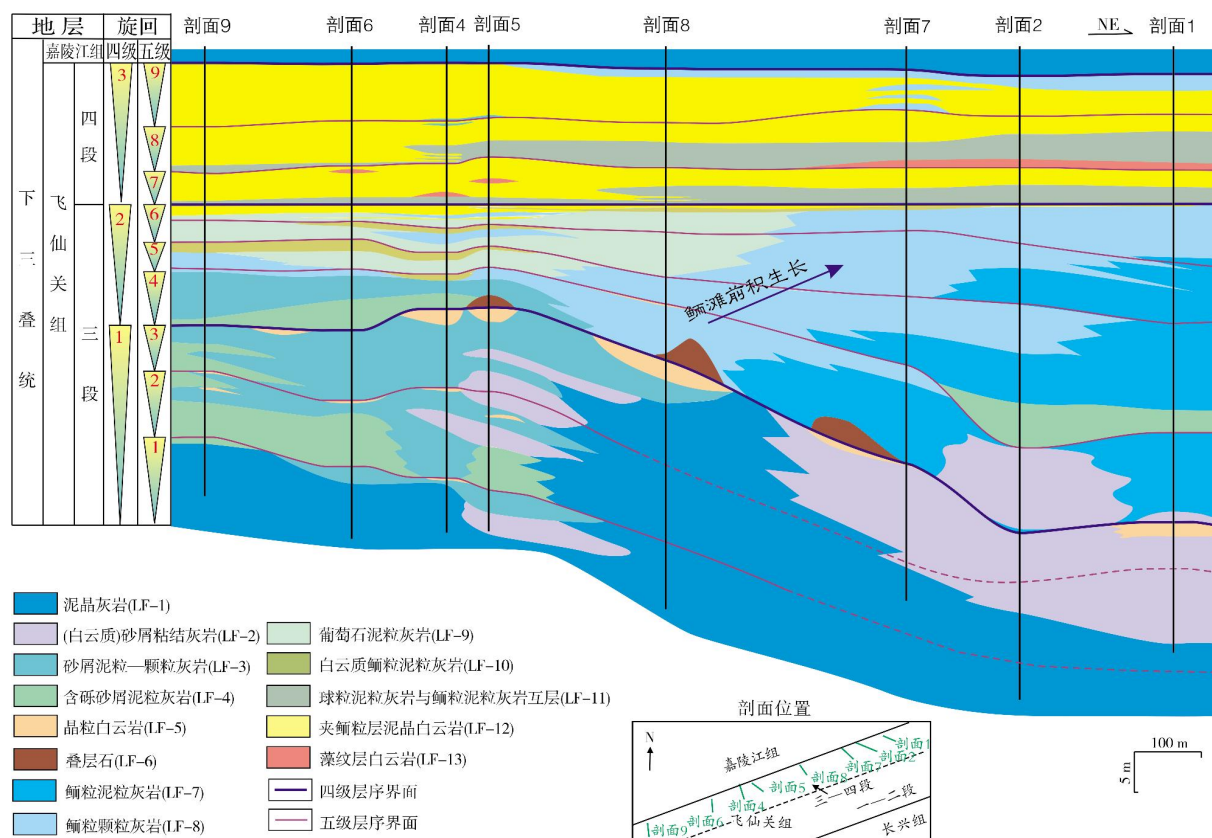


图 2 川东—鄂西齐岳山三叠系飞仙关组三段—四段露头二维储层地质模型

才能具有更多的约束剖面,建立的三维储层地质模型才能代表更大的范围并更符合地质实际。由于这种平行建模区很难找,故本文只基于川东—鄂西齐岳山建模区开展飞仙关组储层地质建模。

应用 Petrel 软件,把 RTK-GPS 获取的含有空间信息的采样点和岩相界面点构成虚拟井,把 RTK-GPS 解释得到的层序界面和岩相界面作为不同级别的层面。根据不同级别层面开展确定性与随机模拟相结合的地质建模,把剖面追踪得到的岩相尺度、接触关系、发育频率等作为控制参数,开展储层模拟。

基于前述对岩相和储层特征的认识,利用地表起伏揭示的空间信息,通过确定性与随机模拟结合,在建立岩相模型的基础上,结合白云石含量模型的约束,建立孔隙度和渗透率模型,构成三维储层地质模型,更清晰地展现各岩相及储层的发育分布、尺度规模、接触关系及演化规律(图3),这为解释地下颗粒滩相关沉积体系和储层特征提供了重要的类比依据。

上述地质模型反映储层发育具有 3 个方面的规律:①储层发育具有明显的相控性,礁滩相仅 4 种岩相可构成储层,且分别发育于台缘滩侧后方和前下方;②层序界面控制储层的形成和发育,储层主要发育于四级层序界面之下,在潮坪相环境,五级层序的控制作用明显;③虽然白云石化作用对储层形成不起决定性作用,但是目前的表现是储层发育与白云石化作用关系密切。因此,储层模拟应在层序格架下,在岩相和白云石化程度控制的基础上开展;相应地,储层预测应在层序地层格架下,按滩体→白云石化范围的思路展开。

(5) 井下类比研究

基于露头建模的认识,以露头储层地质模型为基础开展地震正演模拟,揭示出前积滩体在低频条件下表现为空白反射,在高频条件才显示出前积形态。目前地下地震资料主频均偏低(低于 60 Hz),以空白反射为主,无法表现出前积形态。对川东地区的地震资料进行重新分析发现,飞仙关组对应空白反射,类比露头模型,认为其代表前积滩体,进而在区

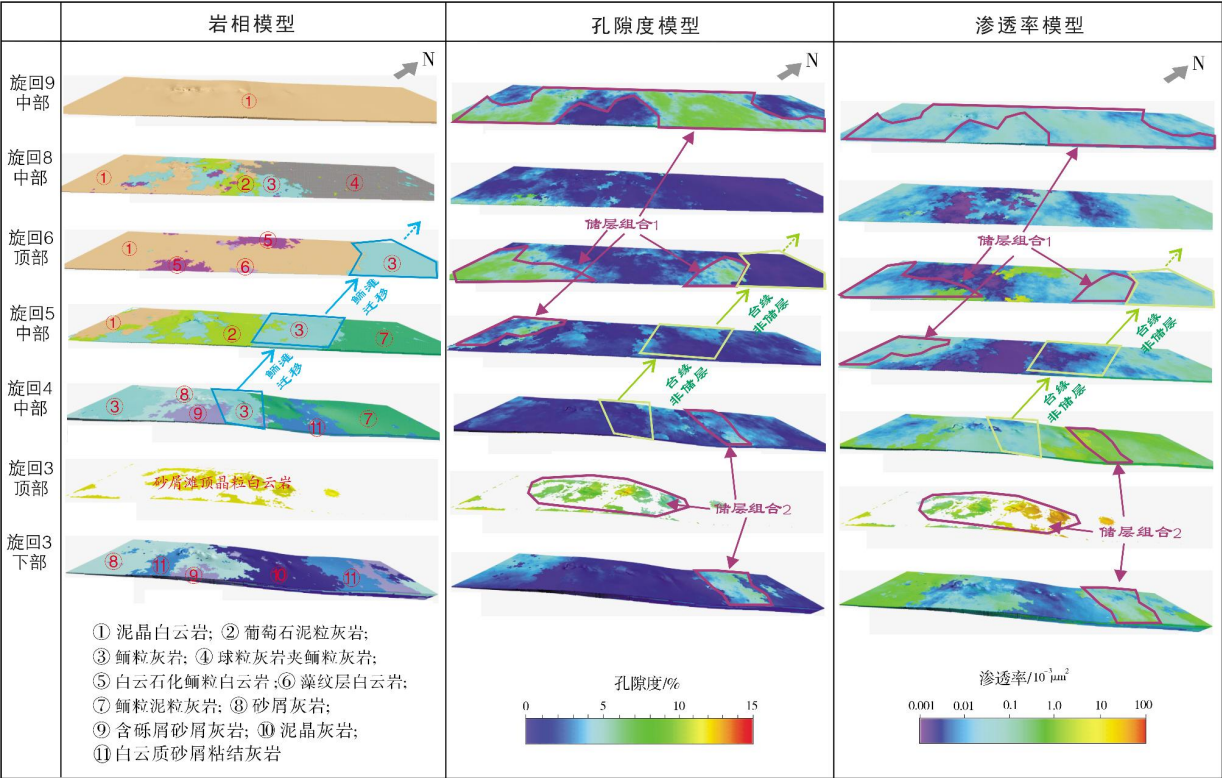


图3 川东—鄂西齐岳山建模区飞仙关组三段—四段三维储层地质模型时间切片

域上预测了颗粒滩的分布，并指出该区的储层预测应围绕颗粒滩带寻找相关的白云石化储层。

2 油藏尺度储层地质建模和表征技术

宏观尺度储层地质模型较客观地展示了层序格架中储集体与非储集体的分布规律，为油藏尺度储层地质建模剖面的筛选奠定了基础。

2.1 技术概述

油藏尺度储层地质建模和表征技术也主要适用于沉积型碳酸盐岩储层。其地质统计学基础是：不同沉积背景下不同岩相类型的接触关系、发育尺度、形态特征、分布范围和垂向上的相序存在规律性变化，符合威尔逊相律；相带与岩相发育特征、储层特征、储层成因和分布密切相关。基于露头储集体的精细解剖(包括储集体的类型、特征、成因和分布、岩性和物性的相关性等)开展油藏尺度储层非均质性研究，为地下渗透层和隔挡层分布提供露头类比模型。油藏尺度三维露头碳酸盐岩储层地质模型的建立包括以下技术：

区域地质调查技术 筛选露头建模剖面，研究层序格架中储集体的展布规律。

露头剖面实测技术 开展以岩相为单元的分层和地层真厚度测量。

宏观与微观相结合的岩相识别技术 明确岩相和沉积微相类型以及垂向上的变化规律，建立岩相组合类型、相序及与海平面升降的关系。

露头岩相横向追踪技术 明确实测剖面间岩相对比关系、相变和空间展布。

以岩相为单元的储层评价技术 开展储层物性评价、储层孔喉结构评价，建立岩相、沉积微相与储层物性的关系，明确储层发育的主控因素。

露头剖面三维储层地质建模技术 通过建立二维储层地质模型，表征储层在二维剖面上的非均质性，研究储层非均质性的主控因素和变化规律；在此基础上，利用露头数字化技术，建立三维储层地质模型。

2.2 技术进展

笔者将露头数字化技术引入到油藏尺度储层地

质建模和表征技术中,使露头储层地质模型由二维向三维延伸,更好地为地下油藏内渗透层和隔挡层的三维空间分布提供露头标定。同时,建立了油藏尺度三维露头碳酸盐岩储层地质建模技术流程和规范。

(1) 露头数字化技术的引入

应用Lidar、RTK-GPS、GPR、Gigapan等数字化仪采集露头剖面数据,为覆盖区通过内插法判识岩相和储集体三维构建提供数据体;基于内插法原理和Petrel软件,在二维露头剖面标定的基础上,对数据体开展地质意义的解译,构建储集体三维岩相、孔隙度、渗透率模型。

(2) 工业化图件类型与要求

明确了油藏尺度三维露头碳酸盐岩储层地质建模的成果图件,主要包括:基于区域地质调查的储集体露头分布图,地层实测剖面图(建议建模剖

面垂直于相带,展布宽度>2 km,视岩相侧向变化频率实测10条以上剖面,精度达到岩相或微相单元),与地层实测剖面相对应的储层评价图(包括以岩相为单元的相序及组合类型、沉积微相和沉积相类型、海平面变化曲线、孔隙度和渗透率曲线等内容),露头剖面二维储层地质模型(揭示储层、隔挡层在二维剖面上的分布规律),三维地层结构模型图,三维沉积微相模型图,三维孔隙度模型图,三维渗透率模型图。

(3) 建模和表征技术流程

整合了建模所涉及的露头建模剖面筛选、储集体精细解剖、储集体三维地质模型构建以及建模技术系列图件种类和规范要求等内容,建立了油藏尺度三维露头碳酸盐岩储层地质建模技术与流程(图4),为理解地下类似储集体非均质性表征和优质储层、隔挡层三维空间分布提供了技术支撑。

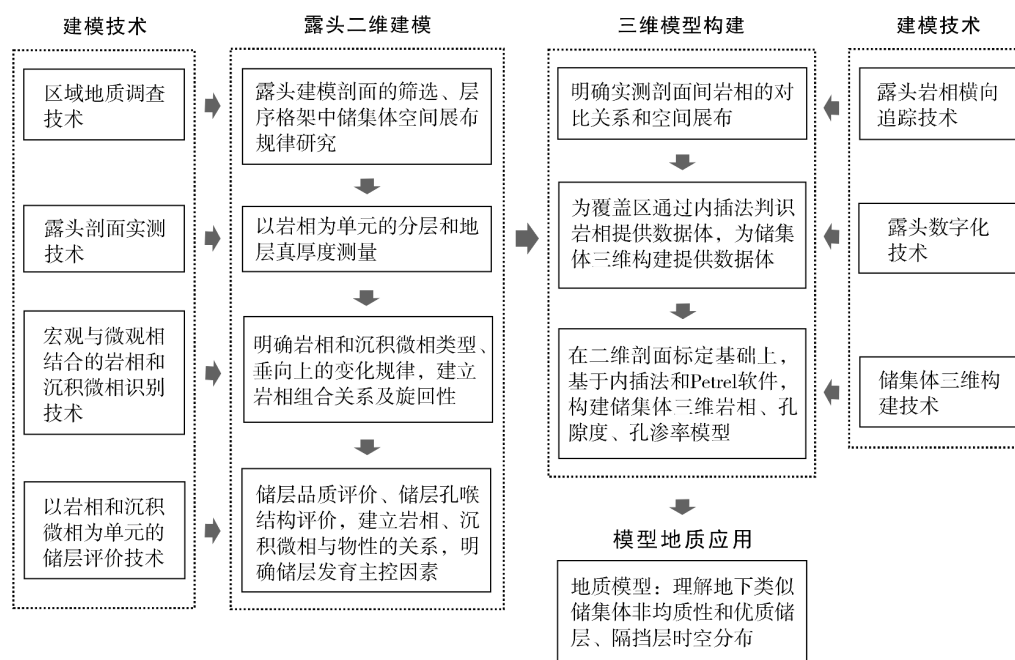


图 4 油藏尺度三维露头碳酸盐岩储层地质建模技术与流程图

2.3 技术应用

以塔里木盆地奥陶系一间房组礁滩储层为例,阐述油藏尺度储层地质建模和表征技术在渗透层、隔挡层分布研究和探井部署中的应用实效。

(1) 露头二维储层地质模型的建立

露头建模剖面筛选 巴楚地区一间房剖面,一间

房组自下而上可划分下、中、上3段。礁滩体主要分布于中段,由3期礁滩旋回构成,平均厚度为29 m,主要由亮晶棘屑灰岩夹托盘-海绵类生物与灰质、泥质组成,代表障积礁与棘屑滩的间互沉积。平面上,一间房组中段礁滩体可分为3个带:台缘带为礁滩体规模发育区,礁滩体具有数量多、规模大(>10 m×5 m)、延伸远和侧向连续性好的特征,礁间相距300~500 m;

紧邻台缘的台地外侧礁滩体发育较差,具有数量少、规模小、零星分布、延伸短和侧向连续性较差的特征,礁间相距2~3 km;远离台缘的台地内侧礁滩体基本不发育。在露头踏勘基础上,优选出露完整的位于台缘带的8号、22号、27号礁滩体和位于台内的25号、28号礁滩体为建模对象,剖面连线垂直于相带方向,长度>6 km。

露头剖面礁滩体精细解剖 对每个礁滩体沿垂直相带方向实测8~10条剖面,以岩相为单元密集取样,在实测剖面上开展精细的岩相、沉积微相、高频旋回和孔渗分析,建立岩相与物性的关系;在剖面连线上追踪岩相和物性的变化,建立渗透层和隔挡层的

分布样式,并分析主控因素。

露头二维储层地质模型的建立 在礁滩体区域地质特征分析的基础上,通过精细解剖礁滩体,按台缘礁与礁间、台内礁与礁间2种背景,建立露头二维储层地质模型(图5)。台地边缘背景下(图5a),由于礁滩体规模大,台缘滩及礁基发育,延伸远,加上礁与礁之间相距不远,各礁滩体的台缘滩和礁基侧向相连(小礁大滩),有效储层发育。台内背景下(图5b),由于礁滩体规模小,台内滩及礁基不发育,延伸短,加上礁与礁之间相距远,各礁滩体的台内滩和礁基侧向上不相连,呈零星状分布(小礁小滩),有效储层不发育。

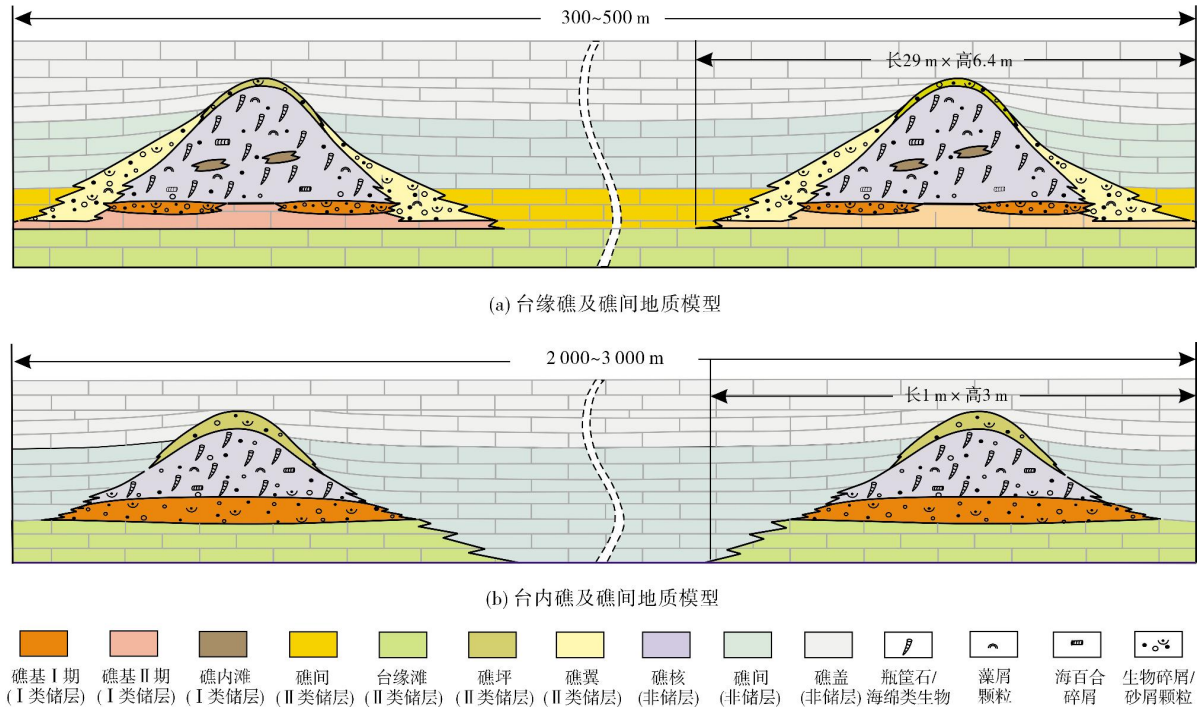


图5 塔里木盆地巴楚地区一间房组二维礁滩体储层地质模型

(2)露头数字化及向三维储层地质模型的延伸
在二维地质建模的基础上,应用数字露头储层地质建模技术,建立三维储层地质模型,从而得到礁滩在三维空间的分布规律。将每一个精细解剖的礁滩体数字化,相当于建立了一条数字化露头剖面,若干条不同相带和不同方向的数字化露头剖面就构成了三维数据体(DOM)。与宏观尺度储层地质建模和表征技术一样,在GoCad或Petrel等软件上对三维数据体开展三维露头储层地质建模工作,包括三维地层格架的建立、三维岩相模型的建立和三维物性模

型的建立。在此基础上,可对巴楚地区一间房组的3期礁滩体在任意选定的区域和时间切片上展示岩相、渗透层和隔挡层的分布。

图6为选定的8号礁滩体分布区及周缘第1、第2期礁滩体的时间切片,展示了该区岩相、孔隙度和渗透率的平面分布,为理解井下类似储集体的非均质性、优质储层和隔挡层的分布提供了类比依据,为基于有限井和地震资料条件而构建更加符合地质实际的井下油藏尺度三维储层地质模型提供了露头标定依据。

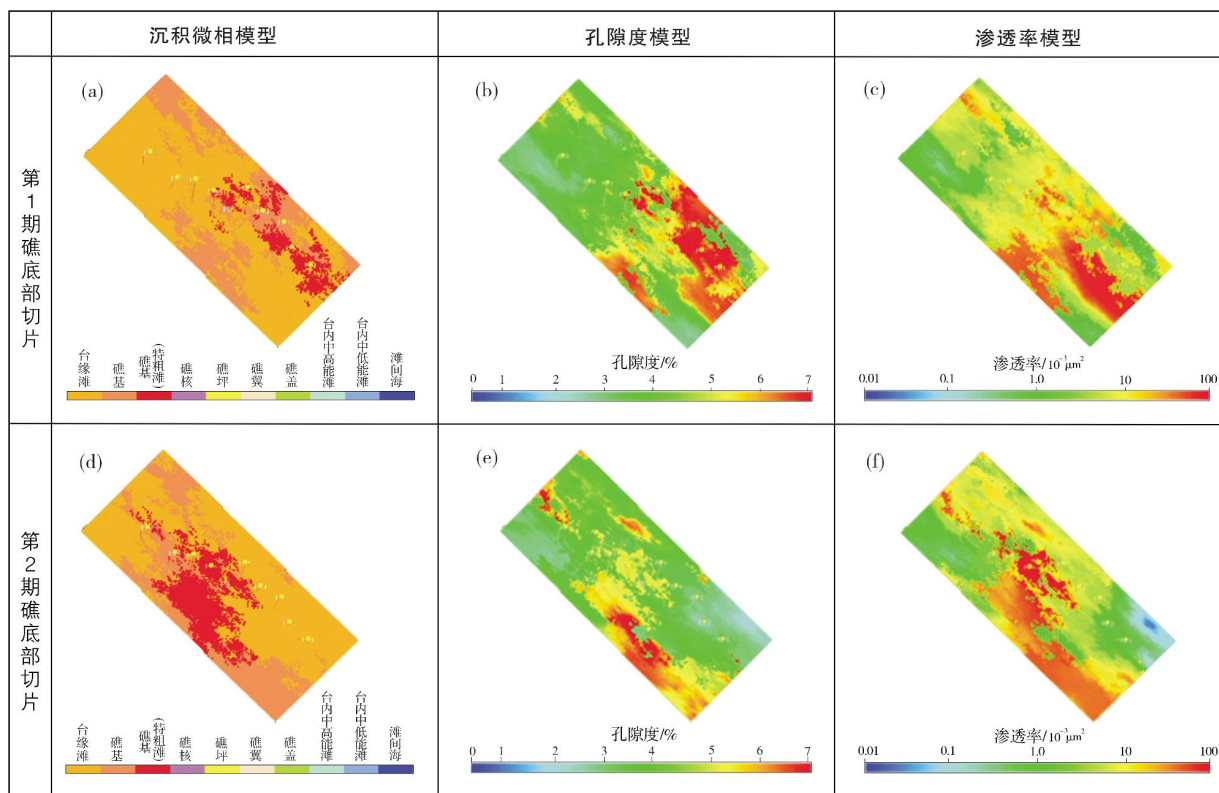


图6 塔里木盆地一间房剖面一间房组8号礁滩体分布区及周缘三维地质模型切片

3 微观尺度储层孔喉结构表征技术

油藏尺度储层地质模型较客观细致地刻画了储集体的岩石类型、储集空间类型、储层非均质性和渗透层、隔挡层的分布样式,为微观尺度储层孔喉结构表征代表性样品的筛选奠定了基础。

3.1 技术概述

微观孔喉结构表征主要指孔喉类型、特征、丰度及组合的表征,分析孔喉结构及组合的控制因素,常用的方法有岩心观察、铸体薄片鉴定、压汞数据分析,以及激光共聚焦薄片、扫描电镜、工业CT检测数据分析和井震资料分析等。尤其是基于工业CT技术的储层孔喉结构表征,可以对岩石进行三维可视化刻画,并定量计算微观孔喉结构参数。

(1) 储层孔喉结构类型及组合

碳酸盐岩发育4类储集空间,按孔径大小依次为微孔隙(孔径 $<0.01\text{ mm}$)、孔隙(孔径为 $0.01\sim 2\text{ mm}$)、孔洞(孔径为 $2\sim 50\text{ mm}$)、洞穴(孔径 $\geq 50\text{ mm}$),其中孔隙可根据其在岩心和成像测井上的表现进一步划

分为小孔隙(孔径 $<1\text{ mm}$,针孔状)和大孔隙(孔径为 $1\sim 2\text{ mm}$,斑点状);发育4类连通通道,包括喉道、微裂缝、裂缝和断裂。碳酸盐岩的微裂缝、裂缝和断裂系统非常发育,如大型的岩溶洞穴往往由断裂系统连通,孔隙和孔洞往往由裂缝连通,微孔隙往往由微裂缝连通。

碳酸盐岩储层可以由单孔喉介质组成,也可以由多重孔喉介质组合而成,主要构成微孔型、孔隙型、孔隙-孔洞型、孔洞型、洞穴型、孔洞-洞穴型等6类储集空间组合。

(2) 储层孔喉结构类型主控因素

岩相、表生溶蚀作用、埋藏溶蚀作用控制储集空间类型及组合。岩相控制原生孔隙的类型,以建造孔隙型储层为主;表生溶蚀作用以建造溶蚀孔洞和洞穴为主;埋藏溶蚀作用以建造溶蚀孔洞为主。特定岩相经历不同的成岩改造可以形成不同的储集空间类型和组合。一般而言,岩溶储层以孔洞-洞穴型、洞穴型为主,少量为孔洞型;白云岩储层和礁滩储层以孔隙型、孔洞型和孔隙-孔洞型为主。

3.2 技术进展

碳酸盐岩储层具有强烈的非均质性,表现在不同岩相甚至同一岩相的不同部位,由于经历的改造不同,都会形成不同的储集空间类型及组合。微观储层表征从以下2个层面进行了改进:

(1) 储层非均质性表征

可以是露头尺度或岩心尺度的非均质性表征,目的是识别和划分相对均一的储层单元,为微观储层表征建立框架单元。如图7所示,即使是岩心尺度,受岩相和后期成岩改造的控制,也可能存在致密层、孔隙型、孔洞型和孔隙-孔洞型储集空间类型和组合的差异。地质家的主要任务是要通过露头和岩心的详细观察,将非均质储层单元划分成若干个相对均一的储层单元,建立露头或岩心级别的储层非均质性表征定量模型,分析非均质性的主控因素。

(2) 相对均一储层单元的孔喉结构表征

不同尺度的储集空间类型及组合有不同的表征技术和手段(图8)。对于大的岩溶洞穴及断裂,利用井筒和地震资料就可以进行识别和表征;地震剖面上的串珠状反射、钻具放空和泥浆漏失、常规测井或成像测井揭示的大段泥质或碎屑充填物等都指示了岩溶洞穴及断裂的发育;这类储层具有极强的非均质性,围岩致密,不能代表岩溶储层的真实物性,缝洞率是表征储层物性的最佳参数。岩心级别的孔洞

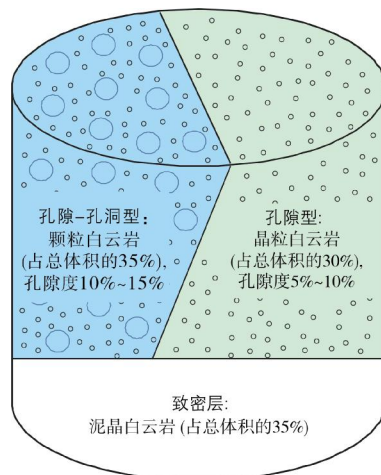


图7 岩心尺度的储层非均质性表征定量模型

及裂缝,通过肉眼就可以进行识别和表征,利用成像测井也可以对孔洞及裂缝进行识别和表征。在显微镜下观察岩石薄片是识别和表征孔隙最有效的方法,同时辅以扫描电镜和工业CT等手段,可以精细表征孔隙的大小、形态、充填物特征及相关的孔喉结构参数。微孔隙则可以通过扫描电镜、工业CT、激光共聚焦等手段进行识别和表征,但存在仪器检测精度的限制。压汞分析是获得孔隙型、孔隙-孔洞型储层的各类孔喉结构参数非常重要的手段;至于工业CT扫描,虽然也能计算孔喉结构参数,但其精度远不如压汞分析,其优点是孔喉结构的三维可视化。

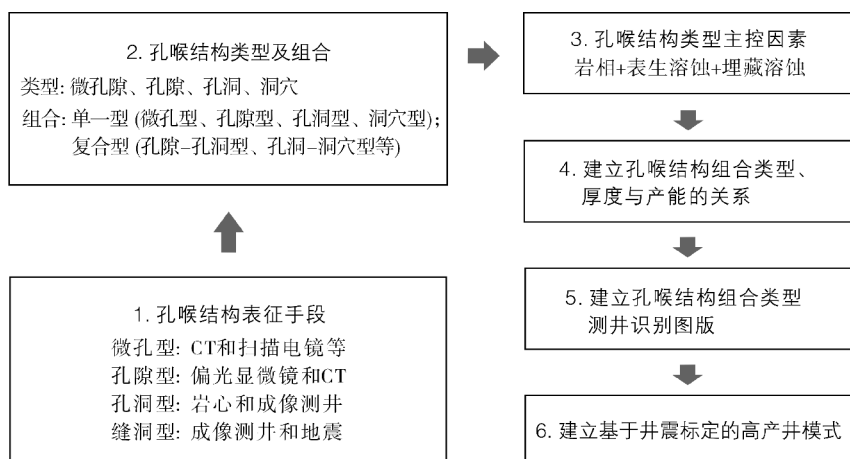


图8 以CT为核心的孔喉结构表征技术流程

储层孔喉结构表征的目的是建立单井储层非均质性表征定量模型,建立储层孔喉结构组合类型与产能的关系。笔者在储层孔喉结构类型及组合、储层

孔喉结构类型主控因素研究的基础上,开展了孔喉结构类型与产能关系分析、孔喉结构类型的测井识别、基于井约束的渗透层和隔挡层的地震识别及预

测研究,建立了测井和地震识别图版。具体见下文的案例解剖。

3.3 技术应用

以四川盆地寒武系龙王庙组白云岩储层为例,阐述微观尺度储层孔喉结构表征技术在高效开发井部署中的应用实效。

四川盆地寒武系龙王庙组在缓坡台地的背景上发育了一套颗粒滩相白云岩储层,局部发生重结晶

形成细晶白云岩储层,储集空间以粒间孔、晶间(溶)孔及溶蚀孔洞为主。储集空间类型、孔喉结构及组合对产能有很大的影响,是建立高产井模式和高效开发井部署的关键。

在全岩心观察和CT扫描基础上,精选柱塞样品(直径2.5 cm)和3 mm样品,确保样品的代表性,并对样品进行不同尺度与精度的CT扫描及数据处理,得到龙王庙组白云岩储层的微观孔喉结构类型及组合(表1)。

表 1 四川盆地寒武系龙王庙组白云岩储层微观孔喉结构组合类型

类 型	岩心特征	薄片特征	物性特征		产能/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	储层 评价
			孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$		
微孔隙+小孔隙型	少量针孔状小孔隙	晶间微孔和少量粒间孔	<2	<0.01	低产(0.1~1)	Ⅲ-2
小孔隙型	针孔状小孔隙发育	晶间微孔和粒间孔为主,白云石晶体未被溶蚀	2~4	0.01~0.5	中低产(1~10)	Ⅲ-1
大孔隙型	斑点状大孔隙发育	晶间溶孔为主,白云石晶体被溶蚀	4~6	0.5~2	中产(10~50)	Ⅱ
小孔隙+孔洞型	针孔状小孔隙与孔洞共生	晶间孔+粒间孔+溶蚀孔洞,白云石晶体被溶蚀	6~8	2~5	中高产(50~100)	I-2
大孔隙+孔洞型	斑点状大孔隙与孔洞共生	晶间溶孔+溶蚀孔洞,白云石晶体被溶蚀	8~12	≥ 5	高产(≥ 100)	I-1

油气产能的控制因素包括2个方面:一是储层的孔隙度、渗透率和孔喉结构组合类型,尤其是孔洞的发育情况;二是储层厚度。综合分析安岳气田开发井储层孔喉结构组合类型、储层厚度和产能数据(图9),

指出大孔隙型、小孔隙+孔洞型、大孔隙+孔洞型储层,只要厚度在20~30 m以上,就可达到中高产;而微孔隙+小孔隙型、小孔隙型储层,即使储层厚度再大,也达不到工业产能的要求(表1)。

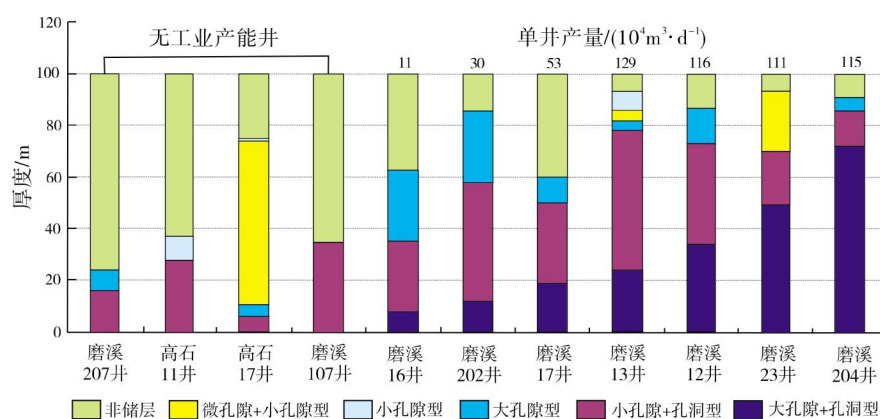

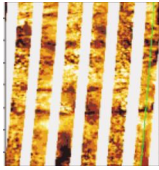
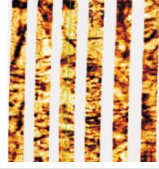
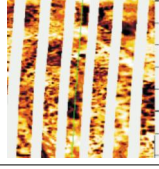
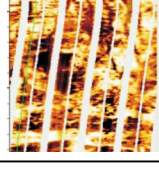


图9 四川盆地安岳气田单井储层孔喉结构组合类型、储层厚度与产能关系

通过已知井储层孔喉结构组合类型的地质标定,建立了储层孔喉结构组合类型测井识别图版(表2)。这为基于井约束的优质高产储层地震预测

提供了地质标定依据,使得预测结果与地质的实际情况更为吻合,从而为高效开发井的部署提供了更好的支撑。

表 2 储层孔喉结构组合类型测井识别图版

储层类型	常规测井特征		成像测井特征		斯通利波能量衰减幅度/%	代表井
	定性特征	定量特征	图像特征	动态图像实例		
微孔隙 + 小孔隙型	自然伽马中低—较高, 低声波, 中低中子, 为低孔隙特征; 电阻率为高阻背景下低电阻率特征, 深、浅电阻率具有幅度差	GR: 20~80 API, AC<46 $\mu\text{s}/\text{ft}$, 200 $\Omega\cdot\text{m}$ <LLD<7 000 $\Omega\cdot\text{m}$	静态图像和动态图像颜色近似, 为黄色, 动态图像显示少量溶孔和孤立孔洞发育, 少量裂缝		< 5	高石 17 井
小孔隙型	低自然伽马, 中等声波, 中低密度, 中等中子, 为中等孔隙特征; 电阻率为高阻背景下低电阻率特征, 深、浅电阻率具有幅度差	GR<20 API, AC>46 $\mu\text{s}/\text{ft}$, 100 $\Omega\cdot\text{m}$ <LLD<7 000 $\Omega\cdot\text{m}$	静态图像和动态图像颜色近似, 为暗黄色, 动态图像显示有较多点状溶孔发育, 少量孔洞发育, 裂缝不发育		5~15	磨溪 21 井
大孔隙型	低自然伽马, 中高声波, 中低密度, 高中子, 为中高孔隙特征; 电阻率为高阻背景下低阻特征, 深、浅电阻率具有幅度差	GR<20API, AC>46 $\mu\text{s}/\text{ft}$, 100 $\Omega\cdot\text{m}$ <LLD<7 000 $\Omega\cdot\text{m}$	静态图像为褐色, 动态图像显示溶孔、溶洞发育, 少量裂缝发育		15~30	磨溪 18 井
小孔隙 + 孔洞型	低自然伽马, 高声波, 低密度, 高中子, 为高孔隙特征, 电阻率为高阻背景下低电阻率特征, 深、浅电阻率具有幅度差	GR<20API, AC>48 $\mu\text{s}/\text{ft}$, 100 $\Omega\cdot\text{m}$ <LLD<7 000 $\Omega\cdot\text{m}$	静态图像为褐色, 动态图像显示溶孔很发育, 孔洞较发育		≥ 30	磨溪 23 井
大孔隙 + 孔洞型	低自然伽马, 高声波, 低密度, 高中子, 为高孔隙特征; 孔洞越发育, 密度降低幅度越大; 电阻率为高阻背景下低电阻率特征, 深、浅电阻率具有较大幅度差	GR<20API, AC>50 $\mu\text{s}/\text{ft}$, 100 $\Omega\cdot\text{m}$ <LLD<7 000 $\Omega\cdot\text{m}$	静态图像为暗褐色, 动态图像显示溶蚀孔洞非常发育, 偶有少量裂缝		≥ 30	磨溪 204 井

4 结 论

针对海相碳酸盐岩储层非均质性表征和评价的难题,中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室项目团队开展了多尺度的储层地质建模和表征技术研发,以满足油气勘探开发不同阶段对储层预测和评价的需求,并取得了重要进展:

(1)针对宏观尺度储层地质建模和表征技术,在引进和学习的基础上,进一步完善和发展了适用于平躺露头和高覆盖区的露头数字化技术,为层序格架中储层分布规律的认识和有利储层发育区的预测提供了技术手段。

(2)针对油藏尺度储层地质建模和表征技术,应用改进的露头数字化技术,使露头储层地质模型由二维向三维延伸,可以展示任意选定区域和时间点的岩

相、孔隙度和渗透率三维地质模型切片,为理解地下渗透层和隔挡层的时空分布提供了更好的类比依据。

(3)针对微观尺度储层孔喉结构表征技术,建立了以从地球物理到CT扫描为手段的储集空间识别技术和流程,明确了岩相和溶蚀作用对孔喉结构组合类型的控制,建立了孔喉结构组合类型与产能的关系以及孔喉结构组合类型的测井识别图版,为基于井约束的高产储层地震预测提供了标定依据,为高效开发井部署提供了支撑。

参 考 文 献

[1] 肖立志. 核磁共振成像测井与岩石核磁共振及其应用[M]. 北京:科学出版社,1998.

[2] 李爱芬,任晓霞,王桂娟,等. 核磁共振研究致密砂岩孔隙结构的方法及应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015,39(6): 92-98.

- [3] AL-YASERI A Z, LEBEDEV M, VOGT S J, et al. Pore-scale analysis of formation damage in Bentheimer sandstone with in-situ NMR and micro-computed tomography experiments [J]. *Journal of petroleum science and engineering*, 2015, 129: 48-57.
- [4] 应凤祥, 杨式升, 张敏, 等. 激光扫描共聚焦显微镜研究储层结构[J]. *沉积学报*, 2002, 20(1): 75-79.
- [5] 孙先达, 李宜强, 戴琦雯. 激光扫描共聚焦显微镜在微孔隙研究中的应用[J]. *电子显微学报*, 2014, 34(2): 123-128.
- [6] 孙先达, 索丽敏, 张民志, 等. 激光共聚焦扫描显微检测技术在大庆探区储层分析研究中的新进展[J]. *岩石学报*, 2005, 21(5): 1479-1488.
- [7] JOUINI M S, VEGA S, MOKHTAR E A. Multiscale characterization of pore spaces using multifractals analysis of scanning electronic microscopy images of carbonates[J]. *Nonlinear processes in geophysics*, 2011, 18(6): 941-953.
- [8] 白斌, 朱如凯, 吴松涛, 等. 利用多尺度 CT 成像表征致密砂岩微孔隙喉结构[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(3): 329-333.
- [9] 张天付, 谢淑云, 王鑫, 等. 孔隙型储层的孔隙系统三维量化表征: 以四川、塔里木盆地白云岩为例[J]. *海相油气地质*, 2016, 21(4): 1-10.
- [10] 盛军, 杨晓菁, 李纲, 等. 基于多尺度 X-CT 成像的数字岩心技术在碳酸盐岩储层微孔隙结构研究中的应用[J]. *现代地质*, 2019, 33(3): 653-661.
- [11] 邹才能, 朱如凯, 白斌, 等. 中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值[J]. *岩石学报*, 2011, 27(6): 1857-1864.
- [12] 杨峰, 宁正福, 孔德涛, 等. 高压压汞法和氮气吸附法分析页岩孔隙结构[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(3): 450-455.
- [13] 白斌, 朱如凯, 吴松涛, 等. 非常规油气致密储层微孔隙喉结构表征新技术及意义[J]. *中国石油勘探*, 2014, 19(3): 78-86.
- [14] 孙寅森, 郭少斌. 基于图像分析技术的页岩微孔隙特征稳定性及定量表征[J]. *地球科学进展*, 2016, 31(7): 751-763.
- [15] BELLIAN J A, KERANS C, JENNETTE D C. Digital outcrop models: applications of terrestrial scanning lidar technology in stratigraphic modeling[J]. *Journal of sedimentary research*, 2005, 75(2): 166-176.
- [16] JANSON X, KERANS C, BELLIAN J A, et al. Three-dimensional geological and synthetic seismic model of Early Permian redeposited basinal carbonate deposits, Victoria Canyon, west Texas[J]. *AAPG bulletin*, 2007, 91: 1405-1436.
- [17] 朱如凯, 白斌, 袁选俊, 等. 利用数字露头模型技术对曲流河三角洲沉积储层特征的研究[J]. *沉积学报*, 2013, 31(5): 867-877.
- [18] 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.
- [19] QIAO Zhanfeng, JANSON X, SHEN Anjiang, et al. Lithofacies, architecture, and reservoir heterogeneity of tidal-dominated platform marginal oolitic shoal: an analogue of oolitic reservoirs of Lower Triassic Feixianguan Formation, Sichuan Basin, SW China [J]. *Marine and petroleum geology*, 2016, 76: 290-309.
- [20] QIAO Zhanfeng, SHEN Anjiang, ZHENG Jianfeng, et al. Digitized outcrop geomodeling of ramp shoals and its reservoirs: as an example of Lower Triassic Feixianguan Formation of Eastern Sichuan Basin [J]. *Acta geologica sinica (English edition)*, 2017, 91(4): 1393-1412.

编辑:董庸

The latest progress on reservoir characterization for marine carbonate and its significance

QIAO Zhanfeng, ZHENG Jianfeng, ZHANG Jie, CHEN Wei,
LI Chang, CHANG Shaoying, SHEN Anjiang

Abstract: Considering the strong heterogeneity, the multiple-scale characterization and evaluation of carbonate reservoir has been studied in order to meet the needs in different stages of exploration and development. Lower Triassic Feixianguan Formation in Chuandong-Exi area, Middle Ordovician Yijianfang Formation in Tarim Basin, and Lower Cambrian Longwangmiao Formation in Sichuan Basin were taken as examples to clarify the advances of reservoir-modeling, heterogeneity characterization and evaluation at macro scale, reservoir scale, and micro scale. With the advance in digital data collection of flat outcrop, the reservoir modeling and characterization at macro scale mainly reveals the distribution of reservoir and non-reservoir geo-bodies, and the reservoir distribution in sequence stratigraphy framework, which could constrain the seismic reservoir prediction in the early stage of exploration. By means of importing the digitized outcrop modeling, the reservoir modeling and characterization at reservoir scale is able to characterize the heterogeneity in single reservoir geo-body, and present the distribution pattern of flow unit and barriers, which is important in the prediction of effective reservoir, oil and/or gas distribution in reservoir, and well deployment. With the advance in logging and seismic templates of permeable and barrier layers, reservoir characterization at micro scale can reveal the differences in pore-throat structure and their controls on percolation feature in flow units as well as the productivity and recovery.

Key words: reservoir modeling; reservoir characterization; reservoir evaluation; reservoir heterogeneity; pore throat structure; outcrop digitization; carbonate rock

QIAO Zhanfeng, First author: Senior Geologist, engaged in carbonate sedimentary and reservoir research. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, No. 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China