

沥青质碳酸盐岩储层孔隙结构及导电特征

——以四川盆地蓬莱气区震旦系灯影组为例

吴煜宇¹, 赖强¹, 李勇², 殷榕¹, 蒋国强³, 汪泽宇¹, 程路¹, 谌丽¹

(1. 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院, 四川成都 610041; 2. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川成都 610500; 3. 中国石油集团测井有限公司地质研究院, 陕西西安 710077)

摘要:四川盆地近年勘探实践表明, 深层-超深层碳酸盐岩储层普遍发育沥青。沥青的存在降低了储层的储集能力, 改变了储层的孔喉结构, 导致储层导电规律变得复杂, 增加了测井储层有效性评价与流体性质判别的难度。为定量表征沥青充填对碳酸盐岩储层孔隙结构和电阻率的影响规律, 以四川盆地蓬莱气区灯影组为研究对象, 开展全直径岩心高分辨率CT扫描实验, 基于孔喉网络模型研究了沥青充填前后岩心储集空间和喉道变化规律, 利用有限元算法开展不同沥青充填率条件下岩石导电数值模拟, 明确了沥青质碳酸盐岩储层孔隙结构和电阻率变化规律。研究表明:①沥青在CT扫描图像中的灰度值介于孔隙与骨架之间。对岩心和薄片中心沥青的充填特征和展布方式进行深度机器学习, 可显著提高CT扫描中沥青定性识别准确度和定量计算精度。②沥青充填导致地层中大孔隙孔隙体积减小。大孔隙和长路径喉道数量减少, 使得高配位数孔隙数量呈下降趋势。③沥青充填率与岩石电阻率成正相关关系, 表现出明显的两阶段特征, 两阶段电阻率变化率均具有由大到小的演变规律。第一阶段电阻率增大主要受沥青充填裂缝影响, 第二阶段电阻率增大则以沥青充填喉道为主导。

关键词: 沥青; 孔隙结构; 电阻率; 三维数字岩心; 碳酸盐岩储层; 蓬莱气区; 四川盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Pore structures and conductivity of asphaltic carbonate reservoirs: A case study of the Sinian Dengying Formation in the Penglai gas area, Sichuan Basin

WU Yuyu¹, LAI Qiang¹, LI Yong², YIN Rong¹, JIANG Guoqiang³, WANG Zeyu¹, CHENG Lu¹, CHEN Li¹

(1. Research Institute of Exploration and Development, Southwest Oil & Gas Field Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 3. Geological Research Institute, China National Logging Corporation, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

Abstract: Recent exploration practices in the Sichuan Basin reveal the extensive occurrence of bitumen in deep to ultradeep carbonate reservoirs. The existence of asphalt reduces the reservoir capacity, changes the pore-throat structure of the reservoir which leads to the complexity of the conductivity rule of the reservoir. This further affects the difficulty of reservoir logging evaluation of effectiveness and fluid property discrimination. To quantitatively characterize the impacts of bitumen infill on the pore structures and electrical resistivity of carbonate reservoirs, we investigate the Sinian Dengying Formation in the Penglai gas area, Sichuan Basin. Specifically, high-resolution computed tomography (CT) scanning experiments are conducted on full-diameter cores. Based on pore-throat network models, we examine the changes in the reservoir space and pore throats within the cores before and after bitumen infill. Finite element method (FEM) numerical simulations are conducted to assess rock conductivity under varying bitumen infill rates. Accordingly, the variation patterns of the pore structures and resistivity of asphaltic carbonate reservoirs are determined. The results indicate that the grayscale values of bitumen fall between those of pores and rock matrix as seen on CT images. Applying deep learning to the analysis of the infill characteristics and distribution patterns of bitumen in cores and thin sections can significantly enhance the accuracy of CT scanning-based bitumen identification and quantification. Bitumen infill reduces the volume of large pores and the quantity of long, large pore throats. As a result, the quantity of pores with high coordination numbers trends

收稿日期: 2024-11-20; 修回日期: 2025-04-27。

第一作者简介: 吴煜宇(1988—), 男, 高级工程师, 测井资料处理解释、方法研究及测井新技术推广应用。E-mail: wuyuyu01@petrochina.com.cn。

基金项目: 中国石油重大科技专项课题(2023ZZ16YJ04); 中国石油科技创新基金研究项目(2022DQ02-0105)。

downward. Rock resistivity is positively correlated with the bitumen infill rate, showing a distinct two-stage increase. Notably, the increase in the first stage is attributed primarily to bitumen infill in fractures, while that in the second stage is predominantly due to bitumen infill in pore throats. In both stages, the increasing rate of the resistivity diminishes.

Key words: bitumen, pore structure, electrical resistivity, 3D digital core, carbonate reservoir, Penglai gas area, Sichuan Basin

引用格式:吴煜宇,赖强,李勇,等. 沥青质碳酸盐岩储层孔隙结构及导电特征——以四川盆地蓬莱气区震旦系灯影组为例[J]. 石油与天然气地质, 2026, 47(1): 287–298. DOI: 10. 11743/ogg20260119.

WU Yuyu, LAI Qiang, LI Yong, et al. Pore structures and conductivity of asphaltic carbonate reservoirs: A case study of the Sinian Dengying Formation in the Penglai gas area, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(1): 287–298. DOI: 10. 11743/ogg20260119.

随着勘探持续深入,四川盆地碳酸盐岩勘探逐渐向深层-超深层迈进。从“十三五”初期川中安岳气田震旦系灯影组(埋深 5 000 ~ 6 000 m)到中、后期川西北剑门气田下二叠统栖霞组(埋深 6 000 ~ 7 000 m),再到“十四五”重点勘探区域川中北斜坡蓬莱气区灯影组(平均埋深 7 000 ~ 8 000 m),勘探深度不断加大。对比不同埋深碳酸盐岩储集空间特征发现,地层埋藏越深,溶蚀孔洞中沥青充填程度越高^[1-10]。以川中地区为例,2012年高石梯-磨溪地区灯影组二段勘探突破显示,该区溶蚀孔洞发育但未见或很少见沥青充填。但随着勘探向构造斜坡区低部位的蓬莱区块推进,发现灯影组二段溶蚀孔洞中发育大量沥青充填,这对储层物性、电性和含气性的测井评价带来了全新的挑战。

目前国内外对含沥青质储层的研究主要集中在沥青赋存形态和分布特征、油气示踪、成因机制、储层演化及其对储集层储集性能影响等方面^[11-16]。而沥青对储层孔隙结构的影响及其导电机理等方面的研究相对较少。地质研究方面,主要依靠镜下薄片和岩心观察定性描述沥青对孔隙空间的影响,缺乏对沥青充填后孔隙结构的定量研究。测井评价方面,段金宝、齐婷婷和宋泽章等基于常规测井建立了声波时差-电阻率交会和中子孔隙度-密度交会等沥青定性识别图版,探索性开展了基于常规测井的沥青定量计算和孔隙度、电阻率校正等研究^[17-21],冀昆和王琛等通过岩石物理实验明确了含沥青孔洞层的核磁响应特征^[22-23],赖强和李勇^[24-26]等针对四川盆地含沥青溶蚀孔洞岩心开展了沥青溶解实验,明确了沥青含量与电阻率增量的关系,但受限于化学试剂无法完全将高演化阶段的沥青完全溶解,岩心沥青定量计算存在误差,且沥青溶解过程中的动态变化并不明确。吴丰^[27]针对四川盆地龙王庙组含沥青溶洞-溶洞型岩心开展CT扫描,建立了三维岩石导电模型,明确了含沥青溶洞型和溶孔型电阻率与沥青含量的关系,揭示了沥青充填前、后岩石岩-电参数中胶结指数(m)和饱和度指数(n)的变化规律,但并未研

究沥青充填前、后岩心孔隙结构的变化规律,也缺少对裂缝-孔洞型储层电阻率随沥青充填的变化规律研究。

沥青是一种类似胶结物的存在,它会占据孔隙空间,降低储层的储集性能。同时,沥青作为油气的中间产物,其存在具有“双刃剑”特性:一方面,作为油气生成的中间产物,它是重要的油气运移示踪标志;另一方面,由于其在测井响应上和含油气储层段具有相似特征,常导致测井解释结果偏乐观,进而影响试油效果评估和资源量计算的准确性。

本文以川中古隆起北斜坡蓬莱气区震旦系灯影组含沥青裂缝-孔洞型碳酸盐岩为研究对象,对实钻井全直径岩心开展高精度三维CT(computed tomography)扫描,通过岩心和薄片从宏观和微观两个尺度对含沥青岩心灰度图像进行解剖,同时基于卷积神经网络深度学习开展沥青含量的定量计算。在此基础上,基于腐蚀模型,采用有限元算法,明确不同沥青充填程度下的电阻率变化规律。该方法解决了沥青不能完全溶解,无法全面分析在沥青充填前、后储层孔隙结构和电阻率变化规律的问题,对国内外沥青质储层定量描述研究具有较强参考价值。

1 研究背景

蓬莱气区位于四川省中、北部,位于川中地区乐山-龙女寺加里东古隆起核部偏北的单斜构造带,南部紧邻安岳气田,地理位置西起德阳市中江县,东至阆中市仪陇县,北至绵阳市梓潼县和遂宁市射洪县,南靠遂宁市船山区和安居区,面积约 20 000 km²。2019年,PT1井在震旦系灯影组二段(灯二段)测试获得 121.98×10^4 m³/d 高产工业气流,拉开了该区灯二段勘探序幕^[28-30]。随着勘探持续推进,探井数增多,钻井取心和薄片观察显示灯二段大量发育沥青。以本次研究对象 ZS101 井为例,岩心上沥青全充填或半充填于溶蚀孔洞或微裂缝中(图 1a,b)。通过显微镜

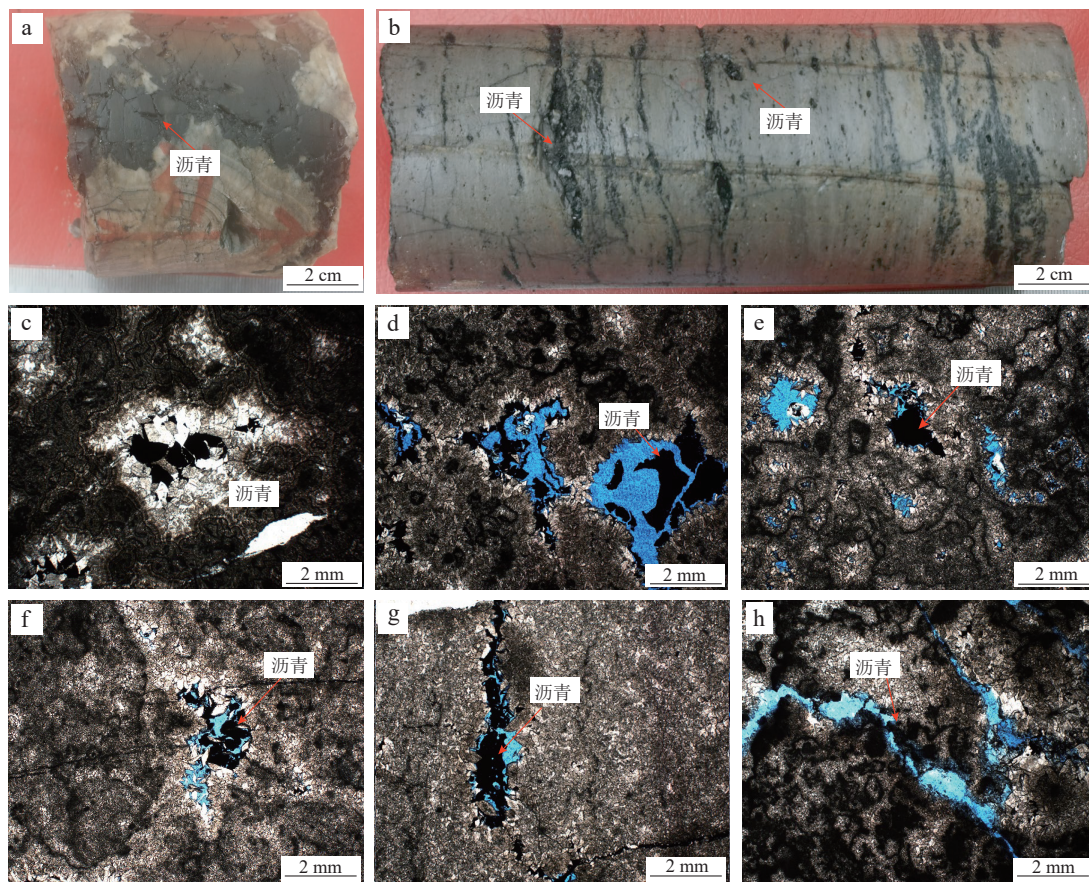


图1 四川盆地蓬莱气区ZS101井灯二段沥青充填状态类型显微照片

Fig. 1 Images of cores and casting thin sections showing bitumen infill patterns in the 2nd member of the Dengying Formation in well ZS101, Penglai gas area, Sichuan Basin

a. 埋深6 353.47 ~ 6 353.53 m, 藻凝块白云岩, 溶蚀孔洞被沥青全充填, 岩心; b. 埋深6 267.74 ~ 6 267.93 m, 泥-粉晶白云岩, 溶蚀孔洞和微裂缝被沥青半充填, 岩心; c. 埋深6 268.38 m, 藻凝块白云岩, 格架孔被白云石和沥青全充填, 铸体薄片; d. 埋深6 233.54 m, 颗粒黏连白云岩, 粒间孔被沥青半充填, 铸体薄片; e. 埋深6 265.64 m, 泡沫棉层状白云岩, 晶间孔和格架孔被沥青半充填, 铸体薄片; f. 埋深6 234.61 m, 颗粒黏连白云岩, 残余孔被沥青半充填, 铸体薄片; g. 埋深6 243.80 m, 泥晶云岩, 溶孔和微裂缝被沥青全充填, 铸体薄片; h. 埋深6 233.54 m, 藻黏结白云岩, 微裂缝被沥青半充填, 铸体薄片

下观察发现,ZS101井灯二段储层具有残余孔隙结构特征,沥青分布于格架孔(图1c,e)、粒间孔(图1d,e)、残余孔(图1f)和晶间孔(图1e)等原生孔隙以及少量溶蚀孔、缝(图1g,h)等次生孔隙中。根据充填特征可划分为3种类型:全充填型(完全占据孔隙空间,图1a,g)、半充填型(部分占据孔隙空间,图1b,d—f,h)和联合充填型(与胶结物共同充填孔隙空间,图1c)。

2 样品与实验

根据沥青在岩心中的分布特征,选取四川盆地蓬莱气区ZS101井灯二段5块全直径岩心样品,开展高分辨率三维CT扫描实验。

实验采用天津三英精密仪器有限公司研发的高分

辨率CT系统 nanoVoxel-3000 型仪器,每块样品获取2 800张1 800 × 1 800像素的二维岩心X射线CT扫描图片,每个像素的大小(分辨率)为50 μm。

地层中各种矿物和充填物的密度不同,对X射线的衰减量不同。基于不同物质对X射线衰减系数的差异,CT图像灰度值可反映物质密度差异:图像越亮的区域,灰度值越大,该区物质密度越大;图像越暗的区域,灰度值越小,该区物质密度越小^[31]。

实验测定沥青的密度为1.3 g/cm³,低于岩石骨架白云岩的密度。CT图像中,骨架为亮色区域,孔隙为深黑色区域,沥青则为介于二者之间的灰黑色区域。通过对CT扫描二维切片灰度图上岩石骨架、沥青和孔隙进行标定,明确各自灰阶范围,并在构建出的三维数字岩心上定量计算孔隙和沥青体积含量(图2)。

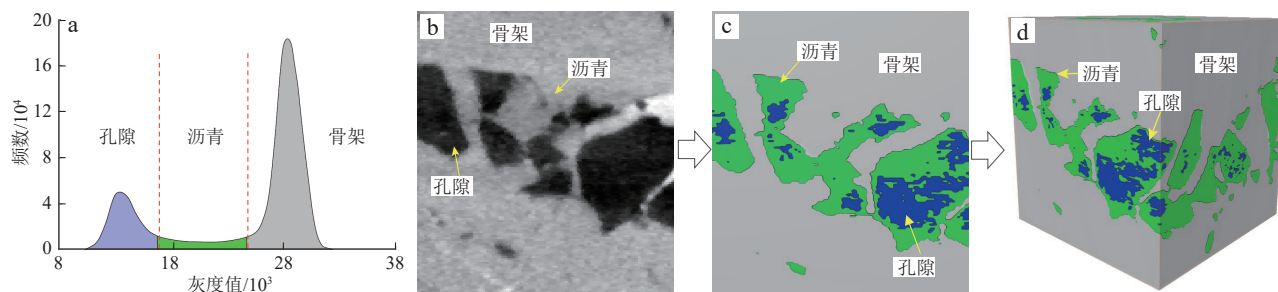


图2 CT扫描岩石骨架、沥青和孔隙灰度值相对强度分布及三维建模流程

Fig. 2 CT scanning-based grayscale value distribution and 3D modeling process of rock matrix, bitumen, and pores

a. CT扫描岩石骨架、沥青和孔隙灰度值相对强度分布; b. CT扫描二维切片岩石骨架、沥青和孔隙定性识别; c. CT扫描二维切片岩石骨架、沥青和孔隙定量刻画; d. CT扫描岩石骨架、沥青和孔隙三维建模

3 图像处理与计算

在实际研究中发现,受填充空间、填充程度和分布状态等因素影响,沥青灰度值区间变化较大,部分甚至低于孔隙灰度值,因此采用单一域值计算孔隙和沥青含量会产生较大误差。为解决这一问题,本研究采用基于卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)的深度机器学习方法进行岩心CT扫描图像中沥青与孔隙空间的识别与划分。卷积神经网络类似于人工神经网络多层感知器,是一种主要用于视觉图像分析的深度学习模型^[32-33],其结构通常由3部分组成:卷积层(负责初步特征识别)、池化层(进行主要特征提取)和全连接层(整合特征并生成分类器进行识别)(图3)。

在模型训练过程中,本研究采用多尺度特征提取策略:宏观尺度上,选取含沥青的岩心图像,提取溶蚀孔洞中沥青的形态和展布特征;微观尺度上,选取典型含沥青铸体薄片,提取微裂缝或喉道中沥青的形态学特征。

基于前期建立的岩石骨架、沥青和孔隙的灰阶关系,结合沥青填充方式、展布方式和形态特征等约束条件,实现了沥青与有效孔隙和基质的有效区分,由此建立了5块全直径样品三维CT扫描数字模型(图4)。

采用“最大球法”(maxima-ball)对数字模型进行孔隙网络结构提取与建模。该方法将不同尺寸的球体系统性地填充至三维岩心图像的孔隙空间中,并建立各尺寸填充球之间基于半径大小的连接关系,进而通过相互交叠和包含的球串来表征岩心内部孔隙结构。该方法中,在某一孔隙空间内,较大球体表征孔隙,较小球体表征喉道。通过在球串中寻找局部最大球(表征孔隙)和两个最大球之间的最小球(表征喉道),将孔隙空间表征为球形的孔隙体与喉道体。其中,每个“孔隙”所连接的“喉道”数目为配位数。因此,通过该模型可以获取孔喉半径、孔喉形状因子和配位数等描述孔隙结构的相关参数^[34-38]。

图5展示了5块实验样品沥青三维空间模型和基于“最大球法”构建的三维孔喉网络模型。具体而言,岩心A沥青(体积占比1.20%)集中分布在岩心中部,主要呈团块状,孔喉网络模型以中、小孔为主,且孔间多以喉道连接;岩心B沥青(体积占比0.59%)集中分布在岩心底部,呈团块状,孔喉网络模型以喉道连接的大孔和小孔为主;岩心C沥青(体积占比0.52%)主要分布在岩心顶部和底部,顶部呈团块状和片状分布,底部呈孤立团块状分布,孔喉网络模型上顶部以喉道连接的中孔和小孔为主,含少量大孔,底部以连通性较差的小孔为主。岩心D沥青(体积占比0.06%)分布在岩心中部,呈孤立团块状,孔喉网络模

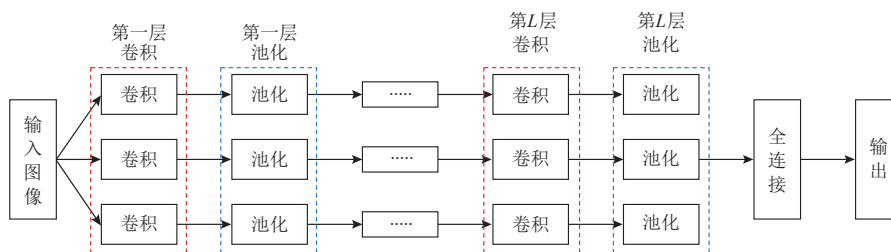


图3 卷积神经网络图像识别流程图

Fig. 3 Flow chart showing image identification using a convolutional neural network

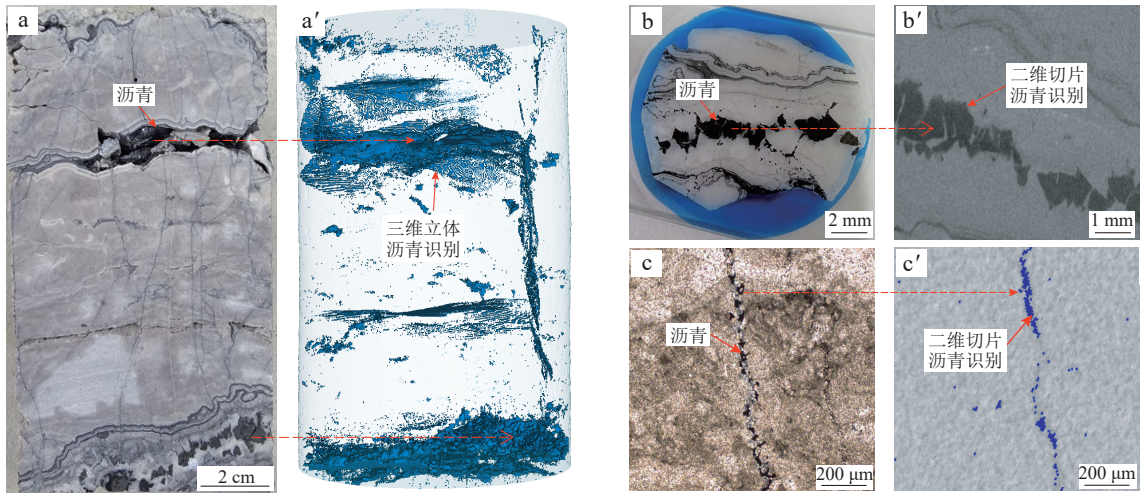


图4 四川盆地蓬莱气区ZS101井灯二段岩心与铸体薄片的沥青识别及CT扫描标定

Fig. 4 Bitumen identification and CT slice calibration of core and cast thin sections of ZS101 well in the Member 2 of Dengying Formation, Penglai gas area, Sichuan Basin

a, a'. 分别为岩心宏观尺度沥青识别和对应的三维CT扫描沥青标定结果; b, b'. 分别为铸体薄片微观尺度沥青识别和对应的二维CT扫描切片标定结果(铸体薄片全域); c, c'. 分别为铸体薄片微观尺度微裂缝沥青识别和对应的二维CT扫描切片标定结果(铸体薄片局部)

样品号	ZS101-A	ZS101-B	ZS101-C	ZS101-D	孔隙半径-E
沥青三维空间模型					
三维孔喉网络模型					
沥青体积占比/%	1.20	0.59	0.52	0.06	0.24

图5 四川盆地蓬莱气区ZS101井灯二段实验样品沥青三维空间模型及三维孔喉网络模型

Fig. 5 Three-dimensional spatial model and three-dimensional pore-throat network model of bitumen in the experimental samples of ZS101 well in the Member 2 of Dengying Formation, Penglai gas area, Sichuan Basin

型以不连通的中孔和小孔为主。岩心E沥青(体积占比0.24%)主要分布在岩心中上部和下部,中上部呈片状,下部呈团块状,孔喉网络模型中上部以连通性较好的中孔和小孔为主,岩心下部以喉道连通的中孔为主。

为研究沥青充填前的原始孔隙特征,本研究将三维空间模型中已识别的沥青区域视为孔隙空间,构建出仅有孔隙和骨架两相的数字岩心,并同样采用最大球法建立充填前的孔隙网络模型,进而计算获得各项关键参数用于对比分析。

4 沥青充填前、后孔喉结构变化规律

4.1 孔隙半径

通过对5块样品不同孔隙半径区间的孔隙体积占比统计分析发现,沥青充填对孔隙半径分布具有显著影响,主要表现为较大孔隙半径的孔隙体积占比显著减小与较小孔隙半径的孔隙体积占比明显增加(图6)。沥青充填后,大孔隙半径的孔隙体积占比明显减小,小孔隙半径的

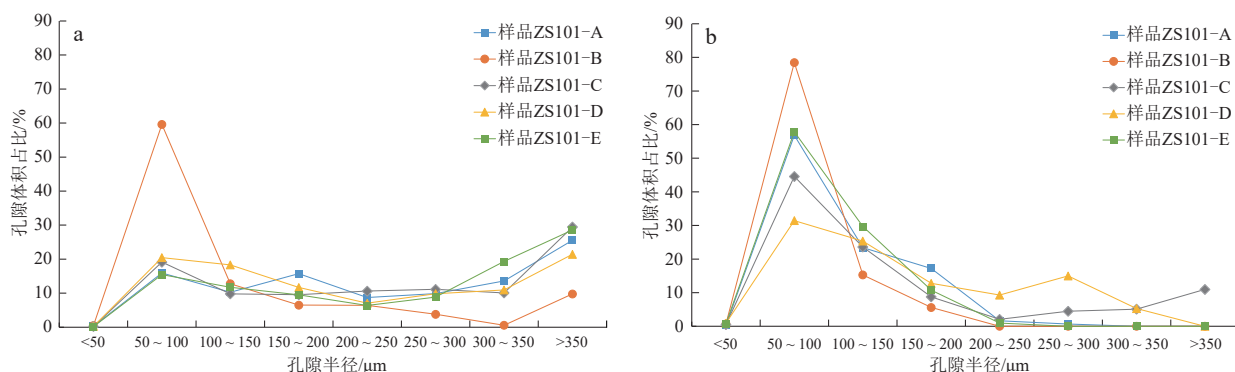


图6 四川盆地蓬莱气区ZS101井灯二段实验样品沥青充填前(a)、后(b)不同孔隙半径孔隙体积占比对比

Fig. 6 Comparison of the volumetric proportions of pores with varying radii before (a) and after (b) bitumen infill in core samples from the 2nd member of the Dengying Formation in well ZS101, Penglai gas area, Sichuan Basin

孔隙体积占比明显增大,尤其是孔隙半径大于300 μm 的孔隙体积和孔隙半径小于150 μm 的孔隙体积变化较大。孔隙半径大于300 μm 的孔隙体积占比从充填前的10.36%~47.90%(平均值33.88%)下降至充填后的0~16.07%(平均值4.27%),较充填前减小了34.73%;孔隙半径小于150 μm 的孔隙体积占比从充填前的26.52%~72.90%(平均值39.00%)上升至57.69%~94.42%(平均值77.91%),较充填前增大了43.18%。

4.2 喉道半径与长度

喉道作为岩石中连通不同类型储集空间的狭窄通道,是决定储层渗流能力的关键因素。对比5块样品沥青充填前、后喉道半径和喉道长度的变化情况发现,在喉道半径方面,沥青充填前、后喉道半径的变化较小,总体趋势是较大半径的喉道数量减少,较小半径的喉道数量增多。通过定量统计分析发现,沥青充填后,半径小于100 μm 的喉道数量平均增加5.64%(图7)。

在喉道长度方面,沥青充填前、后喉道长度有一定变化,总体趋势是短喉道长度占比增多,长喉道长度占

比减少。沥青充填后长度小于150 μm 的喉道明显增多。通过定量统计分析发现,沥青充填后长度小于150 μm 的喉道数量平均增加9.15%(图8)。分析认为,沥青是原油运移或氧化作用下的后期产物,原油黏度大,在喉道中充填后很容易遇到狭小空间而停滞,后经固化成为沥青,对原来相对连续的较长喉道形成切割,导致短喉道的数量增多。

4.3 配位数

配位数是指一个孔隙具有的喉道数量,是评价储层孔隙结构的重要参数。配位数越高,与孔隙相连的喉道数量越多,孔隙之间连通性越好;配位数越低,与孔隙相连的喉道数量越少,孔隙之间的连通性越差。

对比5块样品沥青充填前、后的配位数,发现其变化比较显著,主要表现在高配位数孔隙占比明显减少与低配位数孔隙占比明显增多。沥青充填前,配位数 ≥ 2 的孔隙占比较多,5块样品的配位数平均值为3.44;沥青充填后,配位数 < 2 的孔隙占比显著增大,5块样品的配位数平均值为2.13(图9;表1)。这一变

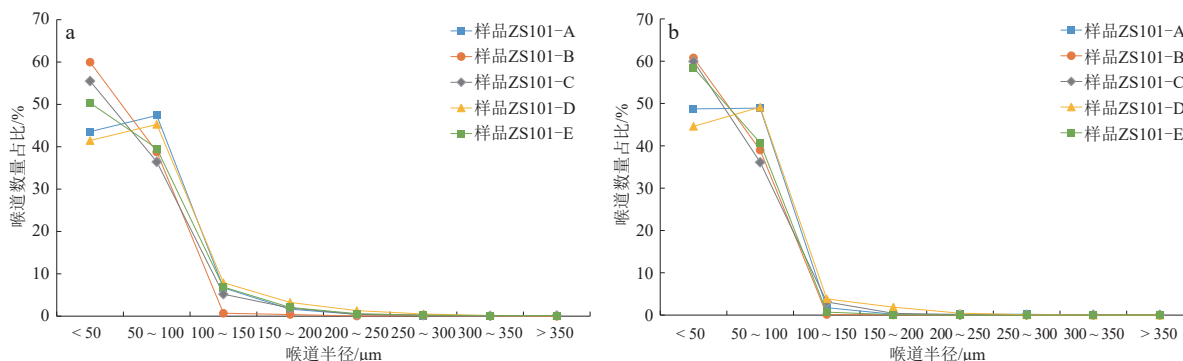


图7 四川盆地蓬莱气区ZS101井灯二段实验样品沥青充填前(a)、后(b)不同喉道半径喉道数量占比对比

Fig. 7 Comparison of quantity proportion of pore throats with different throat radius before (a) and after (b) bitumen filling of the experimental samples of ZS101 well in the Member 2 of Dengying Formation, Penglai gas area, Sichuan Basin

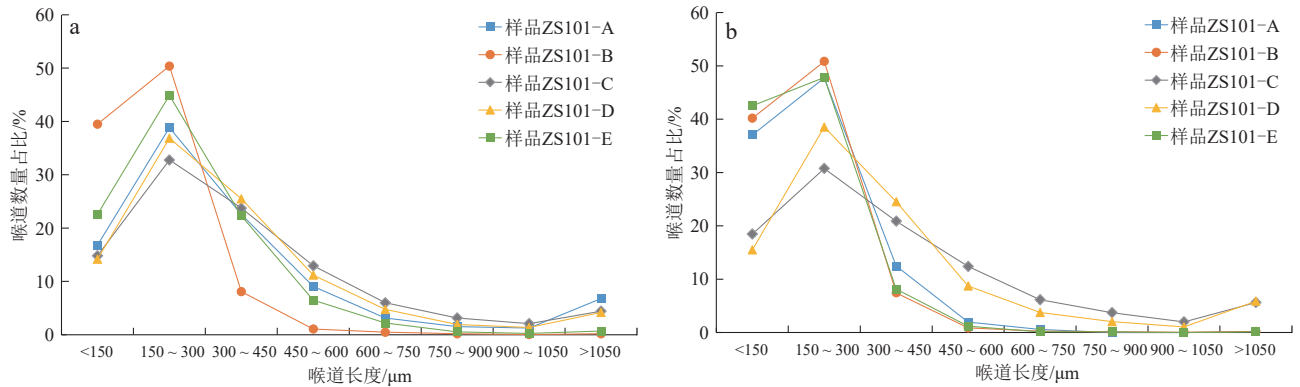


图8 四川盆地蓬莱气区 ZS101 井灯二段实验样品沥青充填前(a)、后(b)不同喉道长度吼道数量占比对比

Fig. 8 Comparison of quantity proportion of pore throats with different throat lengths before (a) and after (b) bitumen filling of the experimental samples of ZS101 well in the Member 2 of Dengying Formation, Penglai gas area, Sichuan Basin

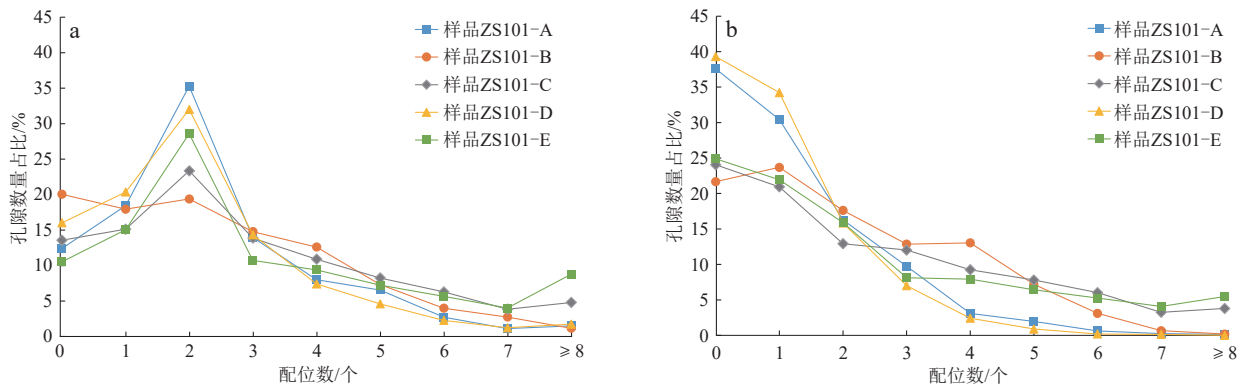


图9 四川盆地蓬莱气区 ZS101 井灯二段实验样品沥青充填前(a)、后(b)不同配位数孔隙数量占比对比

Fig. 9 Comparison of quantity proportion of pore throats with different coordination number before (a) and after (b) bitumen filling of the experimental samples of ZS101 well in the Member 2 of Dengying Formation, Penglai gas area, Sichuan Basin

表1 四川盆地蓬莱气区 ZS101 井灯二段实验样品沥青充填前、后配位数对比

Table 1 Comparison of the coordination numbers of pores before and after bitumen infill in core samples from the 2nd member of the Dengying Formation in well ZS101

样品号	平均配位数	
	沥青充填前	沥青充填后
ZS101-A	3.66	3.14
ZS101-B	2.26	1.95
ZS101-C	3.57	2.15
ZS101-D	3.60	2.33
ZS101-E	3.25	2.00
平均值	3.44	2.14

化表明,沥青充填后孔隙之间的连通性明显降低。

5 沥青充填前、后电阻率变化规律

本研究基于三维数字岩心采用有限元算法进行电阻率模拟,具体研究过程如下:①对三维数字岩心中

孔隙流体和岩石骨架完成电阻率赋值后,设定岩心两端电压,在电压的驱动下电流从岩心一端流向另一端,岩心中每个位置间的电流流动满足欧姆定律,构建出各个位置电压、电阻和电流的大型方程组;②通过变分原理将大型方程组的求解转化为能量最小的优化问题,求解出各个位置的电压分布,从而计算出流经岩心的电流,依据电压和电流获取岩心的电阻率^[39-40]。

为研究沥青含量对数字岩心电阻率的影响规律,对其中一块孔隙结构较丰富的三维数字岩心样品采用腐蚀算法模拟得到不同沥青含量^[41]。结合岩心和薄片上沥青在溶蚀孔洞、裂缝和喉道中的分布方式,采用沥青在孔、洞、缝中从内壁向中心充填方式进行建模,研究电阻率随沥青充填量的变化规律。考虑到沥青充填的绝对含量与地层绝对孔隙的相对关系,引入沥青充填率这一参数描述沥青对电阻率影响的变化规律,并定义:

$$D_{\text{沥青}} = \frac{\Phi_{\text{沥青}}}{\Phi_{\text{沥青}} + \Phi_{\text{有效孔洞}}} \times 100 \quad (1)$$

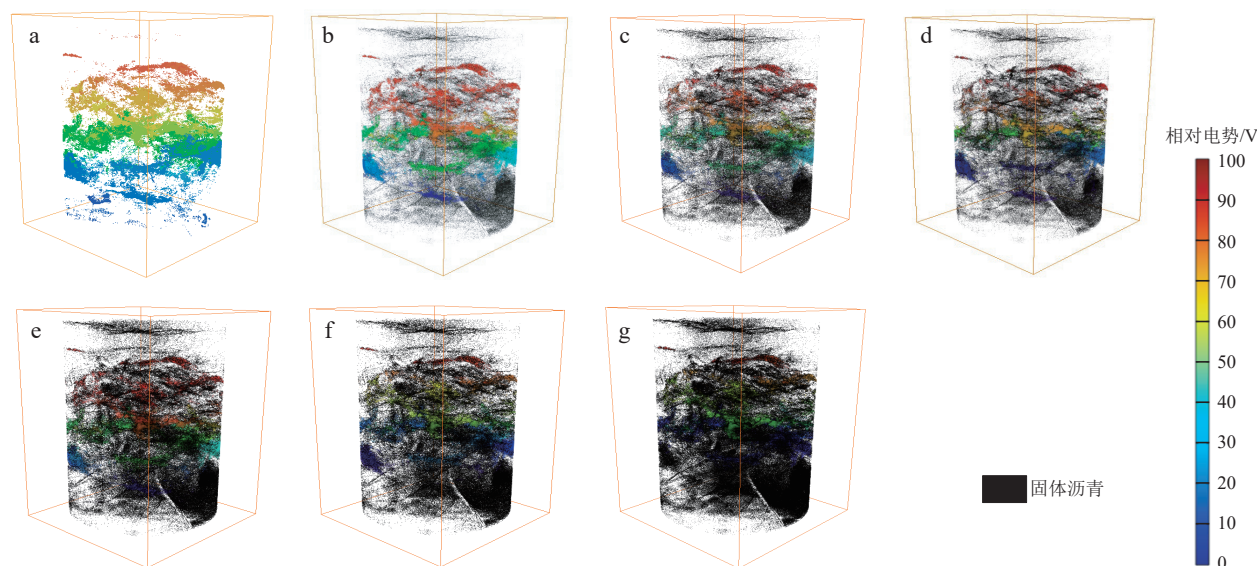


图10 导电数值模拟实验中不同沥青充填率下电流场分布立体图

Fig. 10 3D diagrams showing the distributions of electric current fields under varying bitumen infill rates derived using numerical simulation experiments on conductivity

a. 沥青充填率0%; b. 沥青充填率5%; c. 沥青充填率10%; d. 沥青充填率20%; e. 沥青充填率30%; f. 沥青充填率50%; g. 沥青充填率70%

表2 导电数值模拟实验中各矿物导电参数

Table 2 Conductivity parameters of various minerals in numerical simulation experiments on conductivity

矿物	电导率/(S/m)	电阻率/($\Omega \cdot m$)
岩石骨架	0.000 010	100 000.000
沥青	0.000 033	30 000.000
地层水	40.000 000	0.025

式中: $D_{\text{沥青}}$ 为沥青充填率,%; $\Phi_{\text{沥青}}$ 为沥青体积分数,%; $\Phi_{\text{有效孔隙}}$ 为未被沥青充填的有效孔隙体积分数,%。

当储集空间中未充填沥青时,电势在孔隙中的分布呈现均匀降低的特征。随着沥青含量的逐渐增加,数字岩心中的电势分布也随之发生变化。在沥青含量较低的初始阶段,电势在岩心两端的降低仍然保持相对均匀,这说明岩心中仍存在较好的导电路径。然而随着沥青含量的逐渐增大,微裂缝、喉道和孔隙依次被沥青充填,电势下降速度明显加快(图10)。数值模拟过程中采用的各矿物导电参数见表2。

从数值模拟的定量分析结果可以看出,沥青充填率与地层电阻率成正相关关系,总体上表现为随着沥青充填程度的增大,电阻率逐渐增大的变化趋势。对于裂缝-孔洞型储层,电阻率增大过程表现出两阶段趋势且这两个阶段均表现出电阻率变化率由大变小的特征(图11)。为深入探究这种变化规律的成因,对数值模拟过程中某二维切片不同沥青充填程度下沥青占

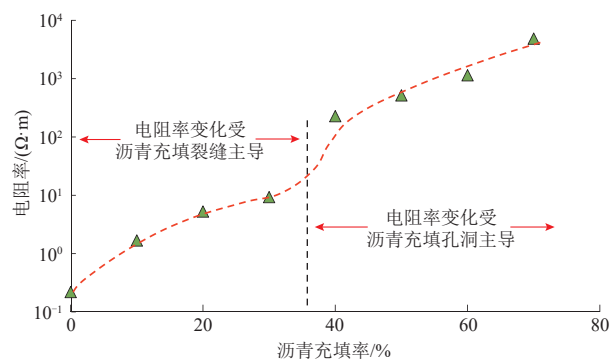


图11 导电数值模拟实验中沥青充填率与电阻率关系

Fig. 11 Bitumen infill rate vs. resistivity derived from numerical simulation experiments on conductivity

据孔隙空间的演化规律进行了研究。

图12展示了样品在不同沥青充填率条件下的二维切片图像,反映了沥青在多孔介质中的充填演化过程。图中绿色区域为沥青,黑色区域为有效储集空间(包括裂缝和孔洞),灰色区域为骨架。

图12a为原始CT切片,呈现了储层中的裂缝和孔隙结构,可见裂缝多呈线性贯通,而孔隙分布则相对孤立或零散。

图12b—f模拟了沥青在储层中的逐步充填过程,呈现出裂缝优先充填、大孔隙逐渐被占据、小孔隙最终完全覆盖的动态演化特征:图12b中,裂缝被优先充填。这是因为在致密碳酸盐岩储层中,裂缝通常作为

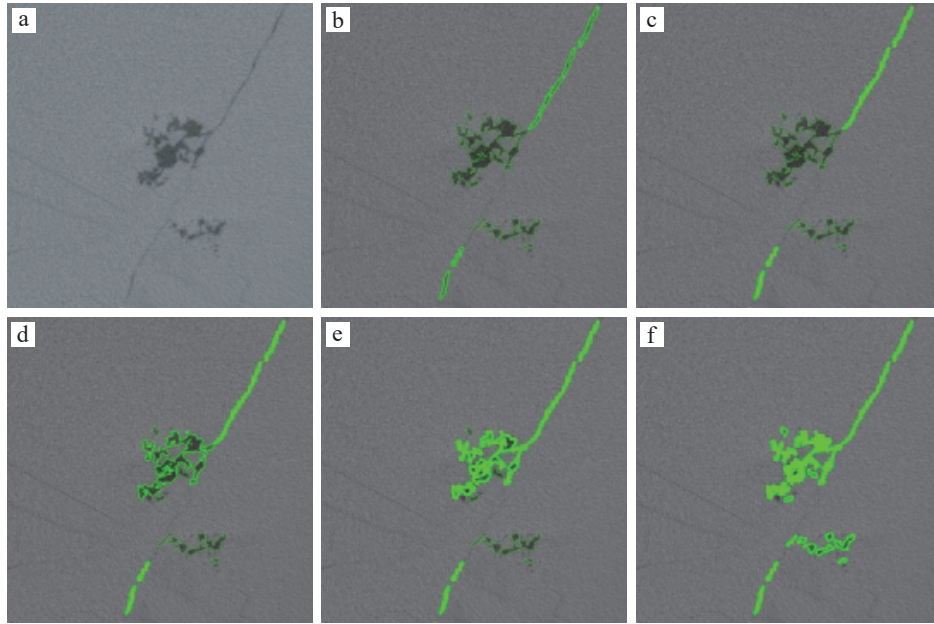


图12 导电数值模拟实验中沥青充填多孔介质演化过程

Fig. 12 Evolutionary process of porous media during bitumen infill derived from numerical simulation experiments on conductivity

a. 沥青充填率0%; b. 沥青充填率10%; c. 沥青充填率30%; d. 沥青充填率50%; e. 沥青充填率70%; f. 沥青充填率90%

(图中绿色区域为沥青;黑色区域为有效储集空间;灰色区域为骨架。)

主要的流体运移通道,其大长宽比和贯通性使得沥青优先在裂缝中滞留,这一过程形成了储集空间改造的首要区域,导致地层连通性和渗透性下降,引发第一阶段的电阻率增大;图12c, d中,随着沥青充填比例的增加,沥青逐步向相邻的大孔隙区域扩展。这一现象既反映了裂缝与大孔隙之间的连通性对流体充填过程的影响,也体现了流体总是优先选择低阻力路径运移的特点;图12e, f显示,小孔隙和相对孤立的孔隙开始被沥青逐步充填和占据。这一过程反映了随着沥青含量的持续增加,在突破运移压力后,沥青开始通过小喉道向各类孔隙空间充填的过程,此时地层的连通性和渗透性进一步降低,导电通路基本被完全堵塞。

因此,对于裂缝-孔洞型储层而言,沥青充填导致电阻率呈现两阶段变化规律的原因在于:在初始充填阶段,沥青优先占据较大孔洞和裂缝,由于较大孔洞具有较多连通喉道,且沥青主要分布在孔洞内表面,这部分沥青对电流通道的的影响相对有限;但对于充填在裂缝中的沥青,则会对电流通道的产生明显的阻隔效应,因此这一阶段的电阻率增大主要受沥青充填裂缝的影响。随着沥青充填程度的持续增加,孔洞中的沥青含量显著增多,更多喉道被沥青充填,原连通喉道转变为“死”喉道,储层的配位数降低,地层的导电路径进一步减少,此时电阻率的增大则主要受沥青充填喉道的影响。

6 结论及展望

1) 沥青在CT扫描图像中的灰度值介于孔隙与骨架之间,对岩心和薄片中的沥青的充填特征和展布方式进行深度机器学习,显著提高了CT扫描中沥青定性识别准度和定量计算精度。

2) 沥青充填导致地层中大孔径孔隙体积减小,大孔径和长路径喉道数量减少,使得高配位数孔隙数量呈下降趋势。

3) 沥青充填率与岩石电阻率成正相关关系,且表现出明显的两阶段特征,两阶段均呈现电阻率变化率由大到小的演变规律:第一阶段电阻率增大主要受沥青充填裂缝影响;第二阶段电阻率增大则以沥青充填喉道为主导。

4) 基于CT扫描构建三维孔喉网络模型为储层孔隙结构、渗流特性和导电机理研究提供了一种有效的技术手段。本研究中CT扫描精度为 $50\mu\text{m}$,对微小喉道分辨率不够,低估了岩心中实际配位数,后续研究可以将纳米级高精度小尺度岩心CT扫描和微米级全直径CT扫描有机结合构建高精度三维数字岩心模型,为储层岩电规律研究提供更可靠的数据支持。

5) 沥青质碳酸盐岩储层测井评价难点在于岩心沥青含量的定量表征和沥青对电阻率影响的量化研

究。本研究提供了一种岩心沥青含量的定量计算方法,为测井定量计算沥青提供了一种标定手段;同时,揭示了沥青对储层电阻率的影响规律,为后续含沥青质碳酸盐岩储层电阻率校正、测井饱和度定量计算和储层含气性评价提供了基础。

参 考 文 献

- [1] 杨雨, 文龙, 宋泽章, 等. 川中古隆起北部蓬莱气区多层系天然气勘探突破与潜力[J]. 石油学报, 2022, 43(10): 1351-1368, 1394.
YANG Yu, WEN Long, SONG Zechang, et al. Breakthrough and potential of natural gas exploration in multi-layer system of Penglai gas area in the north of central Sichuan paleo-uplift [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(10): 1351-1368, 1394.
- [2] 杨雨, 汪泽成, 文龙, 等. 扬子克拉通西北缘震旦系油气成藏条件及勘探潜力[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(2): 238-248.
YANG Yu, WANG Zecheng, WEN Long, et al. Sinian hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential at the northwest margin of the Yangtze region, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(2): 238-248.
- [3] 沈浩, 汪华, 文龙, 等. 四川盆地西北部上古生界天然气勘探前景[J]. 天然气工业, 2016, 36(8): 11-21.
SHEN Hao, WANG Hua, WEN Long, et al. Natural gas exploration prospect in the Upper Paleozoic strata, NE Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(8): 11-21.
- [4] 周红飞, 戴鑫, 贾敏, 等. 川中古隆起北斜坡震旦系灯影组二段油气成藏特征[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(5): 130-138.
ZHOU Hongfei, DAI Xin, JIA Min, et al. Hydrocarbon accumulation characteristics of the second member of Sinian Dengying Formation in the North slope of central Sichuan paleo-uplift [J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(5): 130-138.
- [5] 田兴旺, 胡国艺, 李伟, 等. 四川盆地乐山—龙女寺古隆起地区震旦系储层沥青地球化学特征及意义[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(5): 982-990.
TIAN Xingwang, HU Guoyi, LI Wei, et al. Geochemical characteristics and significance of Sinian reservoir bitumen in Leshan-Longnvsi paleo-uplift area, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(5): 982-990.
- [6] 谷志东, 殷积峰, 袁苗, 等. 四川盆地东部深层盐下震旦系—寒武系天然气成藏条件与勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(2): 137-149.
GU Zhidong, YIN Jifeng, YUAN Miao, et al. Accumulation conditions and exploration directions of natural gas in deep subsalt Sinian-Cambrian System in the eastern Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(2): 137-149.
- [7] 史今雄, 赵向原, 潘仁芳, 等. 川中地区震旦系灯影组碳酸盐岩天然裂缝特征及其对气井产能影响[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 393-405.
SHI Jinxiang, ZHAO Xiangyuan, PAN Renfang, et al. Characteristics of natural fractures in carbonate reservoirs and their impacts on well productivity in the Sinian Dengying Formation, central Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 393-405.
- [8] 邹才能, 谢增业, 李剑, 等. 典型碳酸盐岩大气田规模聚集差异性及其主控因素——以四川盆地安岳气田和鄂尔多斯盆地靖边气田为例[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(1): 1-15.
ZOU Caineng, XIE Zengye, LI Jian, et al. Differences and main controlling factors of large-scale gas accumulations in typical giant carbonate gas fields: A case study on Anyue Gas Field in the Sichuan Basin and Jingbian Gas Field in the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(1): 1-15.
- [9] 李剑, 杨春龙, 谢武仁, 等. 四川盆地安岳气田震旦系台缘带和台内地区天然气成藏差异性及勘探领域[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(1): 34-45.
LI Jian, YANG Chunlong, XIE Wuren, et al. Differences of natural gas accumulation and play fairways in the marginal zone and interior of Sinian platform in Anyue Gas Field, Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(1): 34-45.
- [10] 韩月卿, 张军涛, 何治亮, 等. 川西中二叠统栖霞组白云岩特征与成因[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(1): 75-88.
HAN Yueqing, ZHANG Juntao, HE Zhiliang, et al. Characteristics and genesis of the Middle Permian Qixia Formation dolostone in western Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(1): 75-88.
- [11] 纪友亮, 张世奇, 李红南, 等. 固态沥青对储层储集性能的影响[J]. 石油勘探与开发, 1995, 22(4): 87-91, 114.
JI Youliang, ZHANG Shiqi, LI Hongnan, et al. The effect of solid reservoir bitumen on reservoir quality [J]. Petroleum Exploration and Development, 1995, 22(4): 87-91, 114.
- [12] JACOB H. Classification, structure, genesis and practical importance of natural solid oil bitumen (“migrabitumen”) [J]. International Journal of Coal Geology, 1989, 11(1): 65-79.
- [13] 刘树根, 李泽奇, 邓宾, 等. 四川盆地震旦系灯影组深层碳酸盐岩储层沥青赋存形态及其油气藏示踪作用[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 102-112.
LIU Shugen, LI Zeqi, DENG Bin, et al. Occurrence morphology of bitumen in Dengying Formation deep and ultra-deep carbonate reservoirs of the Sichuan Basin and its indicating significance to oil and gas reservoirs [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 102-112.
- [14] 宋泽章, 葛冰飞, 王文之, 等. 超深层古油藏的定量表征及其对气藏形成的指示意义: 以川中古隆起北斜坡灯影组为例[J]. 地球科学, 2023, 48(2): 517-532.
SONG Zechang, GE Bingfei, WANG Wenzhi, et al. Quantitative characterization of ultra-deep paleo-oil reservoirs and its indication for deep gas accumulation: A case study on the Dengying Formation, the north slope of central Sichuan paleo-uplift [J].

- Earth Science, 2023, 48(2): 517-532.
- [15] 郝彬, 赵文智, 胡素云, 等. 川中地区寒武系龙王庙组沥青成因与油气成藏史[J]. 石油学报, 2017, 38(8): 863-875.
HAO Bin, ZHAO Wenzhi, HU Suyun, et al. Bitumen genesis and hydrocarbon accumulation history of the Cambrian Longwangmiao Formation in central Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(8): 863-875.
- [16] 牛思琪, 柳广弟, 王云龙, 等. 川中地区震旦系灯影组—寒武系龙王庙组储层焦沥青赋存特征与成因机制[J]. 石油实验地质, 2024, 46(5): 1039-1049.
NIU Siqi, LIU Guangdi, WANG Yunlong, et al. Occurrence characteristics and genesis mechanism of pyrobitumen in Sinian Dengying to Cambrian Longwangmiao reservoirs in central Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2024, 46(5): 1039-1049.
- [17] 齐婷婷, 赵慧, 付甲. 沥青砂岩储层特征分析、岩性识别及其应用[J]. 测井技术, 2019, 43(6): 647-651.
QI Tingting, ZHAO Hui, FU Jia. Characteristic analysis and lithology identification of bituminous sandstone reservoirs [J]. Well Logging Technology, 2019, 43(6): 647-651.
- [18] 宋泽章, 柳广弟, 罗冰, 等. 深层、超深层致密碳酸盐岩储层固态沥青测井评价——以川中地区上震旦统灯四段为例[J]. 沉积学报, 2021, 39(1): 197-211.
SONG Zezhang, LIU Guangdi, LUO Bing, et al. Logging evaluation of solid bitumen in tight carbonate in deep-buried and ultra-deep-buried strata of the central Sichuan Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(1): 197-211.
- [19] 殷榕, 赖强, 吴煜宇, 等. 碳酸盐岩储层沥青质测井识别与孔隙度校正——以四川盆地安岳气田龙王庙组为例[J]. 天然气勘探与开发, 2022, 45(2): 31-38.
YIN Rong, LAI Qiang, WU Yuyu, et al. Asphaltene in carbonate reservoirs identified and corrected by logging and porosity: An example from Longwangmiao Formation, Anyue Gasfield, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2022, 45(2): 31-38.
- [20] 陈明江, 任兴国. 含沥青储层的测井识别及评价[J]. 测井技术, 2012, 36(3): 272-276.
CHEN Mingjiang, REN Xingguo. Log identification and evaluation for bitumen-bearing reservoir [J]. Well Logging Technology, 2012, 36(3): 272-276.
- [21] 段金宝, 蔡忠贤. 用测井方法确定砂岩储层中固体沥青含量方法的探讨[J]. 新疆石油天然气, 2006, 2(2): 29-32.
DUAN Jinbao, CAI Zhongxian. Probe into the method to calculate the content of solid bitumen in sandstone reservoir by logging [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2006, 2(2): 29-32.
- [22] 冀昆, 郭少斌, 李新, 等. 溶孔发育的含沥青质碳酸盐岩核磁共振特征分析——以四川盆地高磨地区龙王庙组储层为例[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(8): 1257-1263.
JI Kun, GUO Shaobin, LI Xin, et al. The nuclear magnetic resonance (NMR) characteristics of the carbonate rock reservoir which has dissolved pores and asphalt [J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(8): 1257-1263.
- [23] 王琛, 李天太, 赵金省, 等. 利用核磁共振技术研究沥青质沉积对低渗储层孔隙结构的影响[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(4): 1700-1706.
WANG Chen, LI Tiantai, ZHAO Jinsheng, et al. Study on effect of asphaltene precipitation on the pore structure of low permeability reservoir by Nuclear Magnetic Resonance (NMR) [J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(4): 1700-1706.
- [24] 赖强, 谢冰, 吴煜宇, 等. 沥青质碳酸盐岩储集层岩石物理特征及测井评价——以四川盆地安岳气田寒武系龙王庙组为例[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(6): 889-895.
LAI Qiang, XIE Bing, WU Yuyu, et al. Petrophysical characteristics and logging evaluation of asphaltene carbonate reservoirs: A case study of the Cambrian Longwangmiao Formation in Anyue Gas Field, Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(6): 889-895.
- [25] LI Yong, CHEN Shijia, LU Jungang, et al. The logging recognition of solid bitumen and its effect on physical properties, AC, resistivity and NMR parameters [J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 112: 104070.
- [26] LI Yong, CHEN Shijia, LIU Xiangjun, et al. Study on the logging response characteristics and the quantitative identification method of solid bitumen at different thermal evolution stages [J]. Fuel, 2022, 316: 123424.
- [27] 吴丰, 梁芸, 唐松, 等. 深层含沥青溶孔—溶洞型碳酸盐岩微观导电特性——以四川盆地高石梯—磨溪地区寒武系龙王庙组为例[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(1): 288-303.
WU Feng, LIANG Yun, TANG Song, et al. Microconductivity of deep, bitumen-bearing carbonate rocks of dissolved pore and cavity types: A case study of the Cambrian Longwangmiao Formation in the Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(1): 288-303.
- [28] 张自力, 乔艳萍, 豆霜, 等. 四川盆地蓬莱气区震旦系灯影组二段岩溶古地貌与控储模式[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 200-214.
ZHANG Zili, QIAO Yanping, DOU Shuang, et al. Karst paleogeomorphology and reservoir control model of the 2nd member of Dengying Formation in Penglai gas area, Sichuan Basin, China [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(1): 200-214.
- [29] 夏茂龙, 张本健, 曾乙洋, 等. 川中地区蓬莱气田震旦系灯影组二段储层发育主控因素及分布规律[J]. 岩性油气藏, 2024, 36(3): 50-60.
XIA Maolong, ZHANG Benjian, ZENG Yiyang, et al. Main controlling factors and distribution of reservoirs of the second member of Sinian Dengying Formation in Penglai Gas Field, central Sichuan Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2024, 36(3): 50-60.
- [30] 文龙, 张建勇, 潘立银, 等. 川中蓬莱—中江地区灯二段微生物白云岩储层特征、发育主控因素与勘探领域[J]. 石油实验地

- 质, 2023, 45(5): 982-993.
- WEN Long, ZHANG Jianyong, PAN Liyin, et al. Characteristics, controlling factors and exploration prospects of microbial dolomite reservoirs in the second member of Dengying Formation, Penglai-Zhongjiang area of central Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2023, 45(5): 982-993.
- [31] HU Dong. Micro-CT imaging and pore network extraction [D]. London: Imperial College London, 2007: 80-95.
- [32] 孙歧峰, 李克昊, 段友祥, 等. 基于卷积神经网络与特征聚类的荧光薄片分析方法[J]. *石油学报*, 2024, 45(3): 548-558.
- SUN Qifeng, LI Kehao, DUAN Youxiang, et al. Fluorescent thin section analysis method based on convolutional neural network and feature clustering [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(3): 548-558.
- [33] 李振春, 孙加星, 杨继东, 等. 卷积神经网络在AVA反演应用中影响因素研究[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2024, 48(4): 57-67.
- LI Zhenchun, SUN Jiaying, YANG Jidong, et al. Research on influencing factors of deep learning in AVA inversion application [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2024, 48(4): 57-67.
- [34] 白斌, 朱如凯, 吴松涛, 等. 利用多尺度CT成像表征致密砂岩微观孔隙结构[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(3): 329-333.
- BAI Bin, ZHU Rukai, WU Songtao, et al. Multi-scale method of nano (micro) -CT study on microscopic pore structure of tight sandstone of Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(3): 329-333.
- [35] 董怀民, 孙建孟, 林振洲, 等. 基于CT扫描的天然气水合物储层微观孔隙结构定量表征及特征分析[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2018, 42(6): 40-49.
- DONG Huaimin, SUN Jianmeng, LIN Zhenzhou, et al. Quantitative characterization and characteristics analysis of microscopic pore structure in natural gas hydrate based on CT scanning[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2018, 42(6): 40-49.
- [36] 朱文涛, 李小刚, 任勇, 等. 基于CT扫描的煤岩孔隙结构全孔径表征[J]. *特种油气藏*, 2024, 31(4): 71-80.
- ZHU Wentao, LI Xiaogang, REN Yong, et al. Full pore size characterization of coal pore structure based on CT scanning [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2024, 31(4): 71-80.
- [37] 李文涛, 涂利辉, 鲁明宇, 等. 基于数字岩心的碳酸盐岩复杂孔隙特征研究——以普光气田飞仙关组储层为例[J]. *断块油气田*, 2024, 31(1): 114-122.
- LI Wentao, TU Lihui, LU Mingyu, et al. Study on complex pore characteristics of carbonate reservoirs based on digital core: A case study of Feixianguan Formation in Puguang Gas Field [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2024, 31(1): 114-122.
- [38] 吴翔, 肖占山, 张永浩, 等. 多尺度数字岩石建模进展与展望[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2024, 54(5): 1736-1751.
- WU Xiang, XIAO Zhanshan, ZHANG Yonghao, et al. Progress and prospect of multiscale digital rock modeling [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2024, 54(5): 1736-1751.
- [39] 张强, 李炎龙, 徐平, 等. 基于有限元法的数字岩心导电性数值模拟[J]. *地球物理学进展*, 2017, 32(5): 2148-2151.
- ZHANG Qiang, LI Yanlong, XU Ping, et al. Numerical simulation of electrical conductivity in digital cores based on finite element method [J]. *Progress in Geophysics*, 2017, 32(5): 2148-2151.
- [40] 孙建孟, 姜黎明, 刘学锋, 等. 数字岩心技术测井应用与展望[J]. *测井技术*, 2012, 36(1): 1-7.
- SUN Jianmeng, JIANG Liming, LIU Xuefeng, et al. Log application and prospect of digital core technology [J]. *Well Logging Technology*, 2012, 36(1): 1-7.
- [41] 吴宁. 基于CT技术的碳酸盐岩反应流孔隙结构表征研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2020: 27-46.
- WU Ning. Study on pore structure characterization of carbonate reaction flow based on CT [D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2020: 27-46.

(编辑 王 迪)