

## 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

吴丰<sup>1</sup>, 梁芸<sup>2</sup>, 唐松<sup>3</sup>, 李昱翰<sup>3</sup>, 田兴旺<sup>4</sup>, 杨辉廷<sup>1</sup>, 李锋<sup>5</sup>

(1. 西南石油大学 地球科学与技术学院, 四川 成都 610500; 2. 中石化经纬有限公司 江汉测录井分公司, 湖北 武汉 430000;  
3. 中国石油 西南油气田分公司 川中油气矿, 四川 遂宁 629000; 4. 中国石油 西南油气田分公司 勘探开发研究院, 四川 成都 610041; 5. 中国石油集团 川庆钻探工程有限公司 试修公司, 四川 成都 610052)

**摘要:** 沥青广泛存在于深层碳酸盐岩储集空间中, 沥青不仅严重影响储层物性与含气性, 还导致储层测井电阻率响应复杂, 增加了含沥青碳酸盐岩储层有效性评价、流体性质判别与含水饱和度计算的难度。以四川盆地安岳气田高石梯—磨溪地区寒武系龙王庙组含沥青溶孔-溶洞型碳酸盐岩为研究对象, 开展微米CT扫描数据分析研究, 采用数字岩心技术对储层孔隙结构和沥青充填特征进行表征, 建立不同沥青含量和不同含水饱和度条件下的三维岩石导电模型, 利用有限元方法开展岩石导电数值模拟, 研究了沥青对碳酸盐岩导电特性的影响机理。研究结果表明: ①含沥青溶孔型与溶孔型碳酸盐岩电阻率值与沥青含量呈正相关、与含水饱和度呈负相关。②溶孔型碳酸盐岩的狭窄喉道更易被沥青堵塞, 使其导电性受沥青的影响较溶孔型碳酸盐岩更大。③低含水饱和度状态下, 地层水主要以束缚水膜的形式赋存于储集空间表面, 沥青使束缚水膜变得不完整, 导致溶孔型和溶孔型碳酸盐岩电阻率急剧增大。④相比含沥青溶孔型碳酸盐岩, 含沥青溶孔型碳酸盐岩具有更大的胶结指数( $m$ )和更小的饱和度指数( $n$ )。

**关键词:** 沥青; 电阻率; 数字岩心; 胶结指数; 溶孔; 碳酸盐岩; 高石梯—磨溪地区; 四川盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

## 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

WU Feng<sup>1</sup>, LIANG Yun<sup>2</sup>, TANG Song<sup>3</sup>, LI Yuhang<sup>3</sup>, TIAN Xingwang<sup>4</sup>, YANG Huiting<sup>1</sup>, LI Feng<sup>5</sup>

(1. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. Jiangnan Logging Company, Jingwei Co., Ltd., SINOPEC, Wuhan, Hubei 430000, China; 3. Chuazhong Oil & Gas Mine, Southwest Oil & Gasfield Company, PetroChina, Suining, Sichuan 629000, China; 4. Research Institute of Exploration and Development, Southwest Oil & Gasfield Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan 610041, China; 5. Well Testing and Workover Company, Chuazhong Drilling Engineering Co., Ltd., CNPC, Chengdu, Sichuan 610052, China)

**Abstract:** Bitumen, which is widely found in the storage spaces of deep carbonate reservoirs, significantly affects the physical and gas-bearing properties of the reservoirs and complicates their resistivity logging responses. This makes it more difficult to evaluate the effectiveness of bitumen-bearing carbonate reservoirs, determine fluid properties, and calculate water saturation. This study focuses on the bitumen-bearing carbonate rocks of dissolved pore and cavity types in the Cambrian Longwangmiao Formation in the Gaoshiti-Moxi area, Anyue gas field, Sichuan Basin. Based on the analysis of the micro-CT scanning data, we characterize the pore structures and bitumen-filling characteristics of the carbonate reservoirs using digital core modeling. As a result, 3D rock conductivity models with varying bitumen content and water saturation conditions are established. Then, numerical simulations of rock conductivity are conducted using the finite element method, and the mechanisms through which bitumen influences the conductivity of carbonate rocks are investigated. The results indicate that the resistivities of bitumen-bearing carbonate rocks of both types exhibit a positive

收稿日期: 2024-04-29; 修回日期: 2024-12-23。

第一作者简介: 吴丰(1983—), 男, 副教授, 测井原理及地质应用。E-mail: wfsupu@126.com。

基金项目: 中国石油-西南石油大学创新联合体科技合作项目(2020CX010300); 国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目(U20A20266)。

correlation with the bitumen content and a negative correlation with water saturation. Since the narrow throats in dissolved pore-type carbonate rocks are more prone to be blocked by bitumen, the conductivity of these rocks is more subjected to bitumen effect than the dissolved cavity-type carbonate rocks. Under low water saturation, formation water mainly occurs as irreducible water films on storage space surfaces. However, these water films become incomplete in the presence of bitumen, leading to a sharp increase in resistivity for both types of carbonate rocks. Compared to bitumen-bearing dissolved cavity-type carbonate rocks, the dissolved pore-type reservoirs exhibit a higher cementation exponent ( $m$ ) and a lower saturation exponent ( $n$ ).

**Key words:** bitumen, resistivity, digital core, cementation exponent, dissolved pore, carbonate rock, Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin

引用格式: 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. DOI: 10. 11743/ogg20250120.

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. DOI: 10. 11743/ogg20250120.

沥青广泛存在于全球的碳酸盐岩和碎屑岩储层中<sup>[1-4]</sup>, 其中深层碳酸盐岩储层的沥青充填现象尤为普遍。中国在塔里木盆地古城地区奥陶系<sup>[5-6]</sup>、鄂尔多斯盆地西北缘奥陶系<sup>[7]</sup>、四川盆地川中地区震旦系<sup>[8-10]</sup>以及川东北地区与川西地区二叠系和三叠系<sup>[11-14]</sup>等碳酸盐岩储层中, 发现了大量沥青充填孔隙的现象。目前, 学者们已对沥青的成因<sup>[15-16]</sup>、沥青对油气运移的影响<sup>[17-18]</sup>以及沥青对储层物性的影响<sup>[19-20]</sup>开展了较为广泛的研究。研究表明, 储层孔隙中的沥青充填会使测井曲线的响应特征复杂化, 增加储层测井评价的难度<sup>[21-22]</sup>。作为一种不导电的有机质, 沥青在储层中充填程度较高时, 会严重干扰电阻率测井信号, 增加储层流体性质判别的难度, 并导致含水饱和度计算结果的准确性大幅下降<sup>[23]</sup>。虽然一些学者已经注意到沥青对电阻率测井和岩电参数的显著影响<sup>[24]</sup>, 但其对岩石电阻率和岩-电参数影响的具体机理仍研究不足。

近年来, 随着CT(computed tomography)扫描分辨率的提高和数字岩心技术的快速发展, 学者们逐渐将数值模拟技术应用于岩石微观导电机理的研究, 这一跨界融合不仅拓宽了研究视角, 还推动了储层测井评价技术的快速进步<sup>[25-27]</sup>。数字岩心技术可以充分表征岩石的微观组构特征, 因此特别适用于研究孔隙中充填的沥青对岩石电阻率和岩电参数的影响。基于此, 本文以四川盆地安岳气田高石梯—磨溪地区寒武系龙王庙组含沥青溶孔-溶洞型碳酸盐岩为研究对象, 利用岩心微米CT扫描数据, 通过数字岩心技术表征储层的孔隙结构和沥青充填特征, 进一步建立了不同沥青含量下的饱水岩心模型和不同含水饱和度状态的岩心模型, 采用有限元方法开展岩心模型的导电数值模拟, 以揭示沥青对碳酸盐

岩导电特性的影响机理, 为提高含沥青溶孔-溶洞型碳酸盐岩储层的测井评价精度提供科学依据。

## 1 地质背景

高石梯—磨溪地区位于四川盆地中部川中古隆平缓构造带, 是乐山—龙女寺—加里东古隆起最东端的大型隐伏构造。研究层位为寒武系龙王庙组。尽管四川盆地在漫长的地质历史中经历了多次构造运动, 但受控于强刚性中-基性火成岩基底, 其构造变形主要表现为差异升降运动, 构造总体受力较弱, 形态相对平缓。中三叠世末, 印支运动使整个上扬子海盆抬升为陆地, 四川盆地北部、东部和南部皆为供给物源的古陆, 川中古隆起地区以整体隆升为主, 远离构造应力较强的盆缘区, 从而使高石梯—磨溪地区的寒武系龙王庙组构造形态较为平缓(图1)。此外, 高石梯—磨溪地区经历了加里东、海西、印支、燕山及喜马拉雅等多次构造运动, 其中以加里东构造运动最为显著, 控制了龙王庙组的天然气聚集成藏。

## 2 储集空间与沥青充填特征

### 2.1 储集空间特征

研究区龙王庙组储层岩性以残余砂屑白云岩、砂屑白云岩和晶粒白云岩为主, 储集空间类型多样, 包括溶洞、溶孔和裂缝等, 主要储层类型为溶洞型储层和溶孔型储层: 溶洞型储层主要发育生物碎屑和石膏结核被溶蚀后形成的溶洞(孔径 $\geq 2\text{mm}$ ); 溶孔型储层主要发

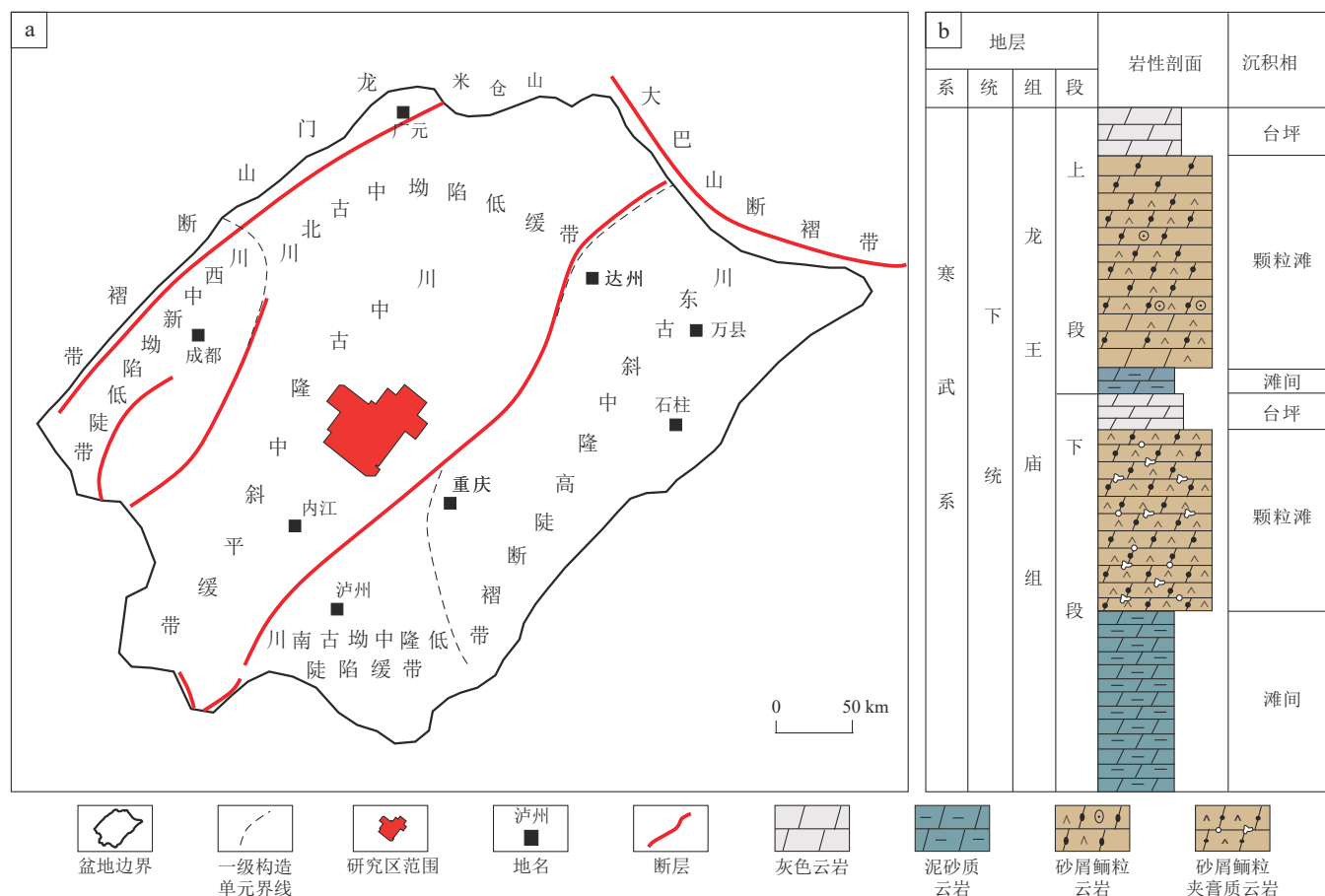


图1 四川盆地高石梯—磨溪地区构造位置(a)及寒武系龙王庙组柱状图(b)

Fig. 1 Map showing the structural location of the Gaoshiti-Moxi area in the Sichuan Basin (a) and the stratigraphic column of the Cambrian Longwangmiao Formation in this area (b)

育表生岩溶改造作用弱的残余粒间孔(孔径 $0.015 \sim 0.075 \text{ mm}$ ),其次为晶间孔(孔径 $0.030 \sim 0.100 \text{ mm}$ ,常受到一定程度的溶蚀,与晶间溶孔伴生)。

## 2.2 沥青分布特征

通过统计研究区单井的沥青含量与厚度乘积,计算得到沥青含量指数,并绘制沥青含量平面分布图(图2)。平面分布特征显示(图2a):研究区中部与北部沥青含量较高,南部沥青含量较低。高沥青含量井(MX202井)与低沥青含量井(MX206井)的气层电阻率测井曲线对比显示(图2b),尽管两井的三孔隙度曲线差异较小,但MX202井的双侧向电阻率值明显高于MX206井,且后者的双侧向电阻率差异较前者更大,说明沥青在一定程度上影响了储层电阻率测井响应特征,沥青含量增加导致储层电阻率增大。高沥青含量井(MX11井)与低沥青含量井(MX48井)的水层电阻率测井曲线对比显示(图2b),MX11井水层平均深侧向电阻率为 $1150 \Omega \cdot \text{m}$ ,远高于MX48井水层平均深侧

向电阻率 $106 \Omega \cdot \text{m}$ 。综合不同沥青含量区域的地层电阻率曲线对比结果,沥青分布一定程度上增大了地层电阻率。基于研究区试气结果和测井数据建立的声波时差-深侧向电阻率(AC-RT)图版表明(图2c):含沥青气层与含沥青水层的分界线不明显,沥青的存在使部分水层呈现高阻特征,导致常规流体识别方法难以有效对其进行区分。这一现象进一步证明,沥青对储层电阻率的影响不可忽略,不仅干扰了对储层流体性质的判别,还对地层含水饱和度的准确计算产生了显著影响。

## 2.3 沥青充填特征

研究区岩心照片显示,黑色的固体沥青不同程度充填于碳酸盐岩孔、洞、缝中。如图3a所示,MX110井灯影组5372.14~5372.27 m深度段灰褐色溶孔藻云岩,岩心截面显示部分溶孔中充填沥青。如图3b所示MX51井灯影组5332.82~5333.04 m深度段深灰色溶孔云岩,断面见溶洞被白云石、沥青半充填。如图3c所示,MX110井灯影组四段(灯四段)5358.36~

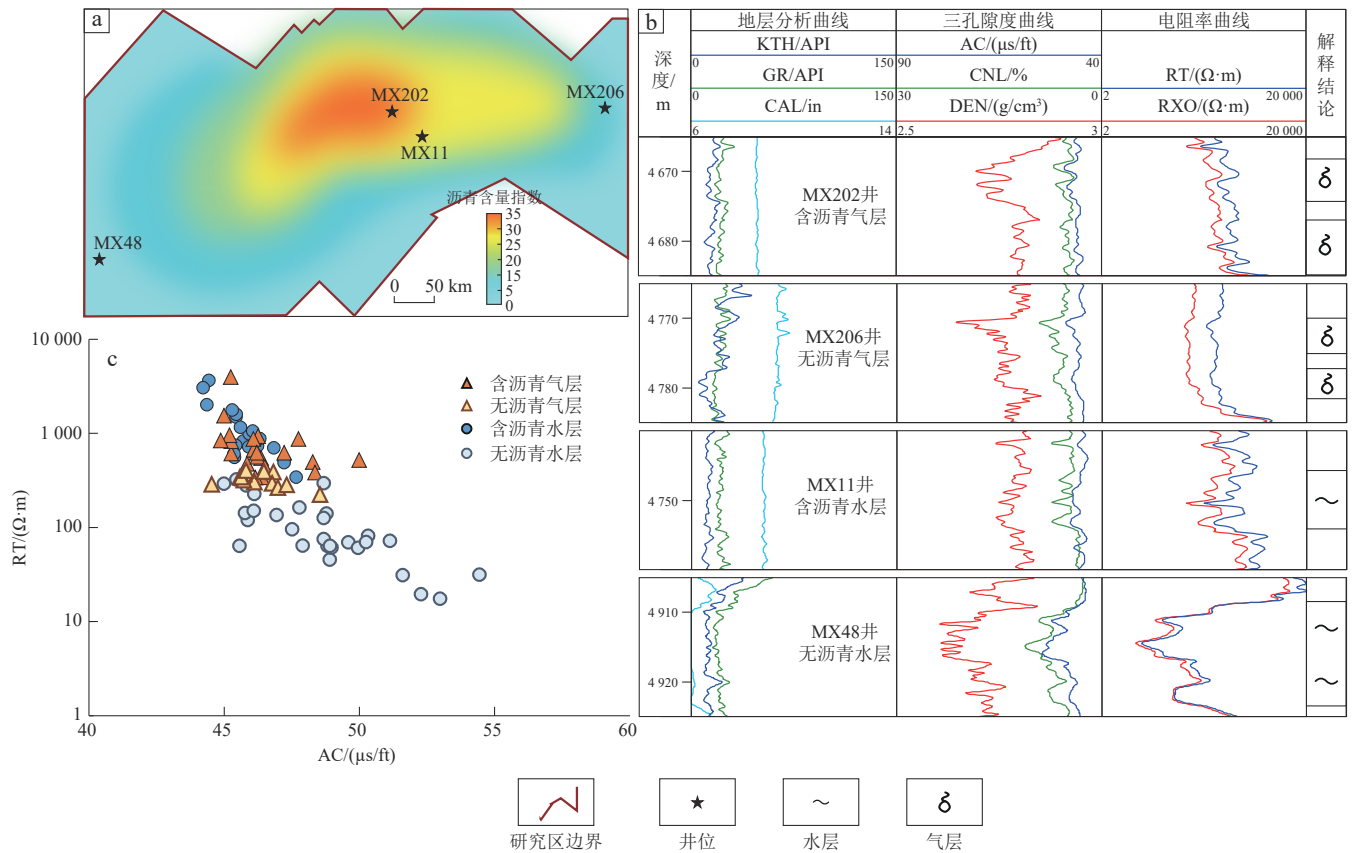


图2 四川盆地高石梯—磨溪地区龙王庙组沥青平面分布及沥青与电阻率相关性

Fig. 2 Planar distribution of bitumen content index and correlation between bitumen and resistivity for the Longwangmiao Formation, Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin

a. 沥青含量指数分布; b. 不同沥青含量储层测井曲线对比; c. 声波时差-深侧向电阻率(AC-RT)关系图版

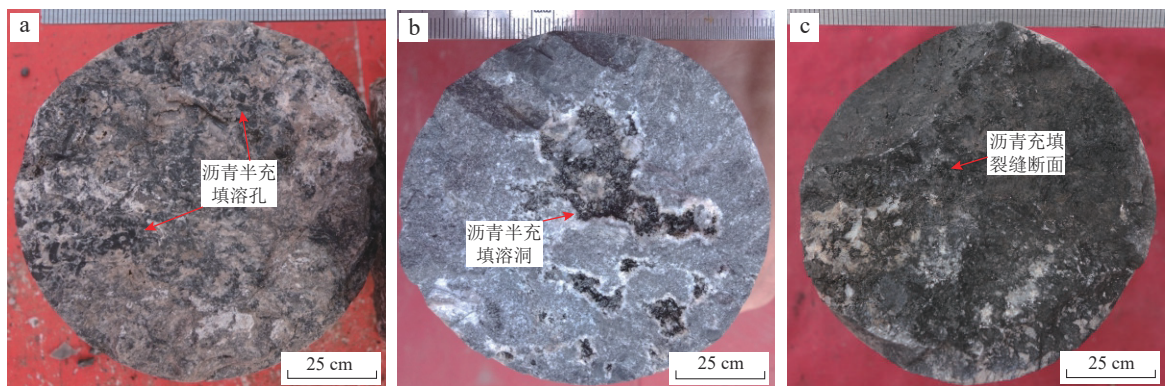


图3 四川盆地高石梯—磨溪地区龙王庙组碳酸盐岩沥青充填岩心照片

Fig. 3 Core photos showing bitumen filling in carbonate rocks in the Longwangmiao Formation, Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin

a. MX110井,灯影组,埋深5 372.14~5 372.27 m,灰褐色溶孔藻云岩,沥青半充填;b. MX51井,灯影组,埋深5 332.82~5 333.04 m,深灰色溶孔云岩,断面见溶洞被白云石、沥青半充填;c. MX110井,灯四段,埋深5 358.36~5 358.45 m,灰褐色溶孔藻云岩,溶孔分布不均,微裂缝发育,顶面为裂缝断面,断面见大量沥青质

5 358.45 m深度段灰褐色溶孔藻云岩,溶孔分布不均,微裂缝发育,顶面为裂缝断面,断面见大量固体沥青。

Jacob<sup>[28]</sup>将沥青定义为固体沥青,认为其是液态石油在蚀变过程中的残余物质。刘洛夫等<sup>[29]</sup>将固体沥青划分为5类:表生-浅层氧化沥青、水洗沥青、热变质

沥青、蒸发分馏沥青和储层分异沥青。本文所研究的固体沥青存在于深层碳酸盐岩储层中,是烃类物质受深埋藏增温作用发生热裂解形成的焦沥青<sup>[30]</sup>,其典型特征是镜质体反射率普遍高于2.0%,且常规条件下极难溶解,与其他类型沥青有明显区别。沥青在储集空

间中的存在形式多种多样。结合岩心资料和铸体薄片显微照片,总结得到沥青在研究区储层中的充填特征,按照储集空间类型的不同分为以下4类:①溶洞半充填,大部分溶洞中沥青呈团块状半充填特征(图4a,b),少部分溶洞中沥青呈环边状附着半充填特征(图4c,d)。②粒间溶孔半充填,孔径较大的粒间溶孔中沥青多呈边缘半充填特征(图4e),孔径较小的粒间溶孔中沥青多呈全充填特征(图4f)。③晶间溶孔半充填,晶间溶孔中常见沥青半充填于孔隙边缘(图4g,h)。④裂缝全充填,部分裂缝也呈现沥青全充填特征(图4i)。相对而言,溶孔的沥青充填程度明显高于溶洞的。对

溶洞型储层而言,沥青大多呈团块状分布,对孔隙度的影响较大,对渗透率的影响相对小一些;而对溶孔型储层而言,由于溶孔的连通性较差,其喉道极易被沥青堵塞,导致沥青充填后的溶孔储层孔隙度和渗透率均急剧降低<sup>[31-32]</sup>。

### 3 导电模拟方法

#### 3.1 样品CT扫描

本文选取溶洞型和溶孔型碳酸盐岩岩心各1块,

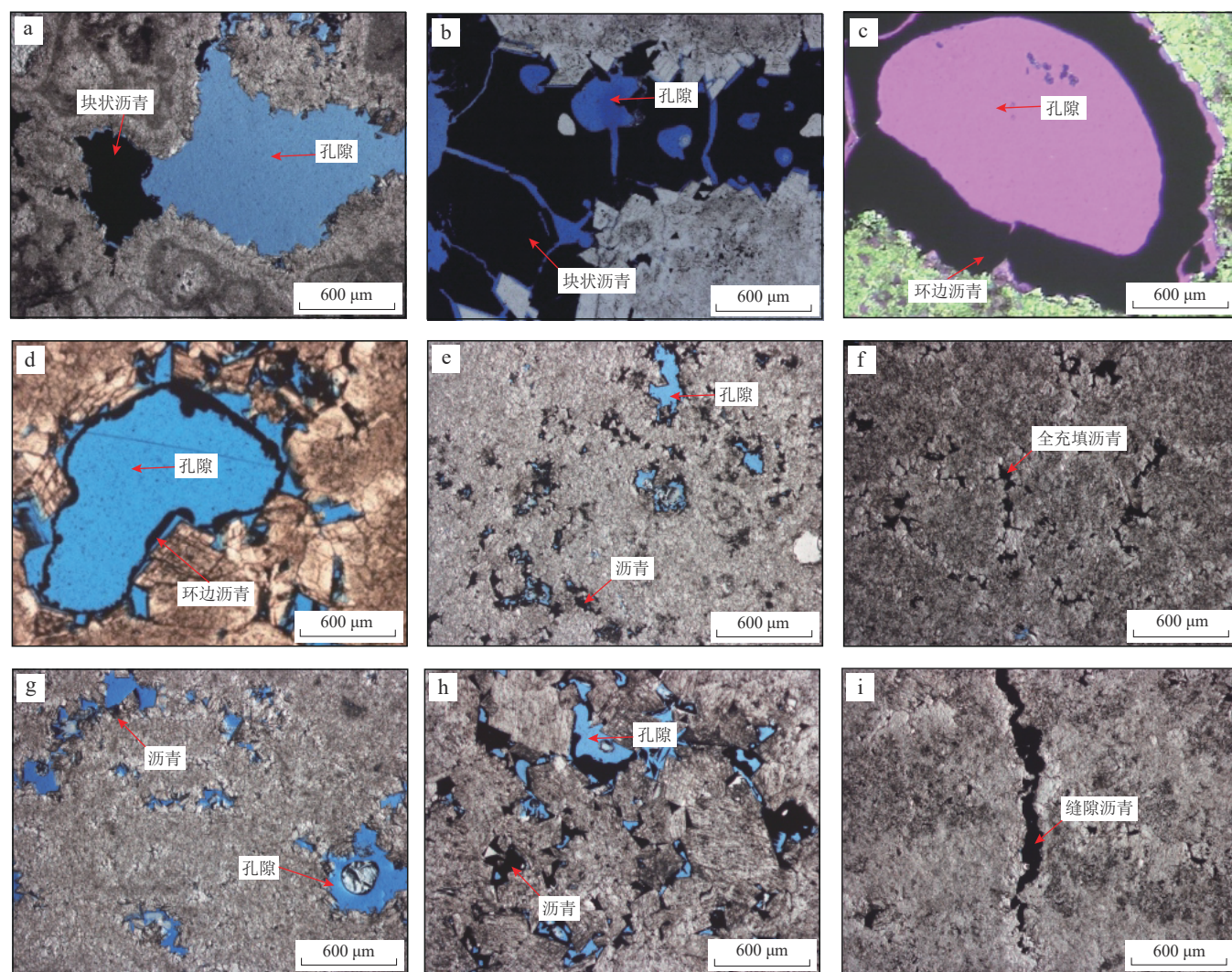


图4 四川盆地高石梯—磨溪地区龙王庙组碳酸盐岩储集空间沥青充填特征(铸体薄片显微照片)

Fig. 4 Micrographs of cast thin sections showing the bitumen-filling characteristics of storage spaces in carbonate rocks in the Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin

a. MX9井,灯四段,埋深5 046.31 m,溶洞中沥青呈团块状半充填;b. GS1井,灯四段,埋深4 960.22 m,溶洞中沥青呈团块状半充填;c. MX204井,龙王庙组,埋深4 656.59 m,溶洞中沥青呈环边状附着半充填;d. MX13井,灯四段,埋深4 608.64 m,溶洞中沥青呈环边状附着半充填;e. MX8井,灯四段,埋深5 111.81 m,半径较大粒间溶孔中沥青呈边缘半充填;f. MX10井,灯二段,埋深5 466.52 m,半径较小粒间溶孔中沥青全充填;g. HS1井,灯二段,埋深5 326.00 m,晶间溶孔中沥青半充填;h. GS1井,灯四段,埋深4 957.76 m,晶间溶孔中沥青半充填;i. W117井,灯三段,埋深2 997.50 m,裂缝沥青全充填

采用微米CT仪器进行扫描,扫描分辨率为每个像素点 $43\text{ }\mu\text{m}$ 。在此扫描图像的基础上,选取其中大小为 $6.5\text{ mm}\times 6.5\text{ mm}\times 6.5\text{ mm}$ 的典型孔隙结构区域(溶洞区域和溶孔区域)作为样品岩心,用于后续的导电模拟实验。

### 3.2 CT图像分割

本文基于X射线CT扫描原理对基质、沥青和天然气等不同组分进行图像分割<sup>[33-34]</sup>。X射线CT扫描的本质是通过多个不同角度的X射线扫描,获取岩石样本的内部结构信息,当X射线穿过物体时,由于不同组分和材料对X射线的吸收程度不同,从而产生不同程度的衰减,这些衰减信息会被探测器记录下来,生成灰度图像。利用已知成分和密度的标准样本进行CT扫描,记录其灰度值作为参考,结合岩心分析资料确定不同组分的灰度值作为标准进行图像分割。在已知不同组分灰度值的前提下,图像分割的具体操作步骤如下:

先利用高斯滤波对岩心CT扫描图像进行降噪处理,以提高CT图像质量,便于准确地对各组分进行分割<sup>[35-36]</sup>。以溶洞型储层岩心CT扫描图像切片为例,原始切片图像存在大量噪点(图5a),滤波后切片图像中单一组分内的大部分噪音被消除(图5b)。对比滤波前后

2张切片图像A—B—C3点连线的X射线强度:①射线强度高值对应灰度图像浅色部分,射线强度低值对应灰度图像深色部分。②滤波后切片图像的射线强度曲线(图5d)较原始切片图像更平滑、尖刺更少(图5c),单一组分内射线强度的均匀性有助于提高阈值分割的准确度。

在滤波后CT图像的基础上,利用阈值分割、膨胀算法和腐蚀算法等方法提取岩石基质、沥青、天然气、束缚水膜、可动水等组分。以溶洞型储层岩心CT扫描图像切片为例,各组分提取的步骤包括:①选择岩石基质、溶洞空间和沥青之间的阈值,采用阈值法对滤波后岩心CT图像进行分割,以提取基质、溶洞空间/天然气和沥青(图6a)。②在低含水饱和度状态下,溶洞中只存在束缚水,无自由水,束缚水可以水膜形式附着于溶洞未被沥青充填的内壁,而沥青具有疏水特性使得其表面无法吸附束缚水,因此沥青的存在导致水膜不再完整(图6b,c),该步骤需要用到膨胀算法和腐蚀算法。③随着含水饱和度增加,自由水逐渐出现,由于溶洞尺寸较大,自由水的空间分布受重力影响明显强于毛管力影响,自由水界面由低到高逐渐填充溶洞剩余空间。

### 3.3 模型网格剖分

在进行模型网格剖分时,为了兼顾模拟的准确性与

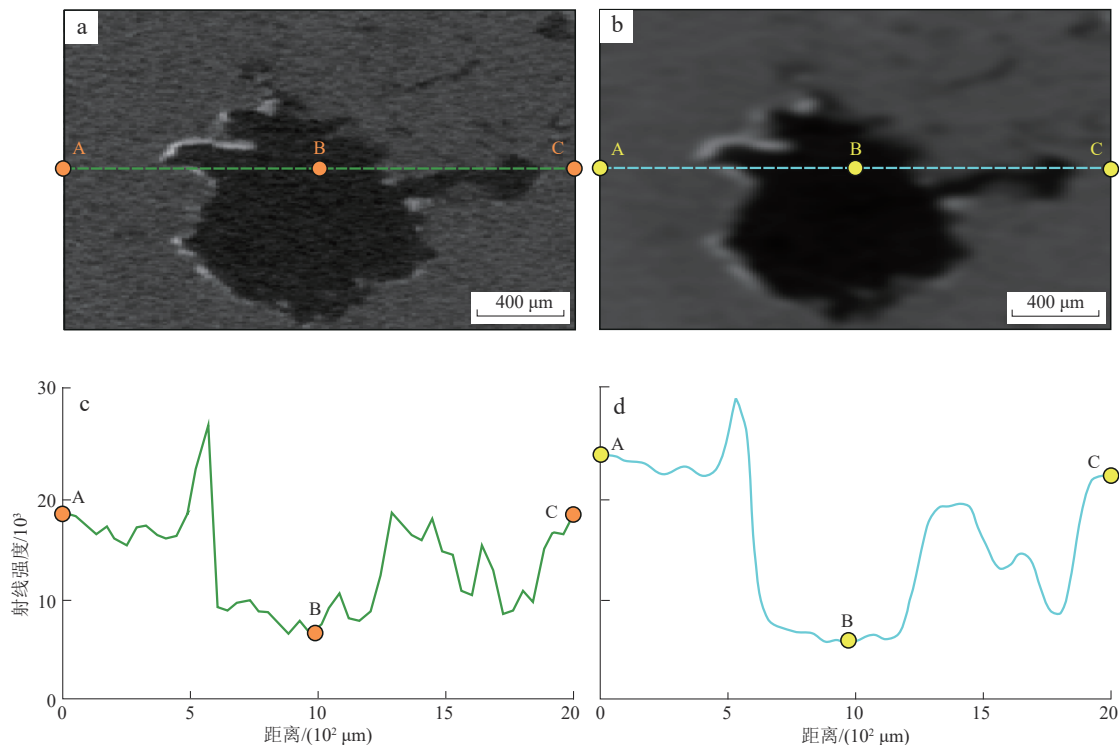


图5 高斯滤波前后岩心CT扫描图像及射线强度曲线对比

Fig. 5 Comparison of CT scanning images and X-ray intensity curves of cores before and after Gaussian filtering

a. 原始CT扫描图像;b. 高斯滤波后CT扫描图像;c. 原始图像对应的射线强度曲线;d. 高斯滤波后扫描图像对应的射线强度曲线

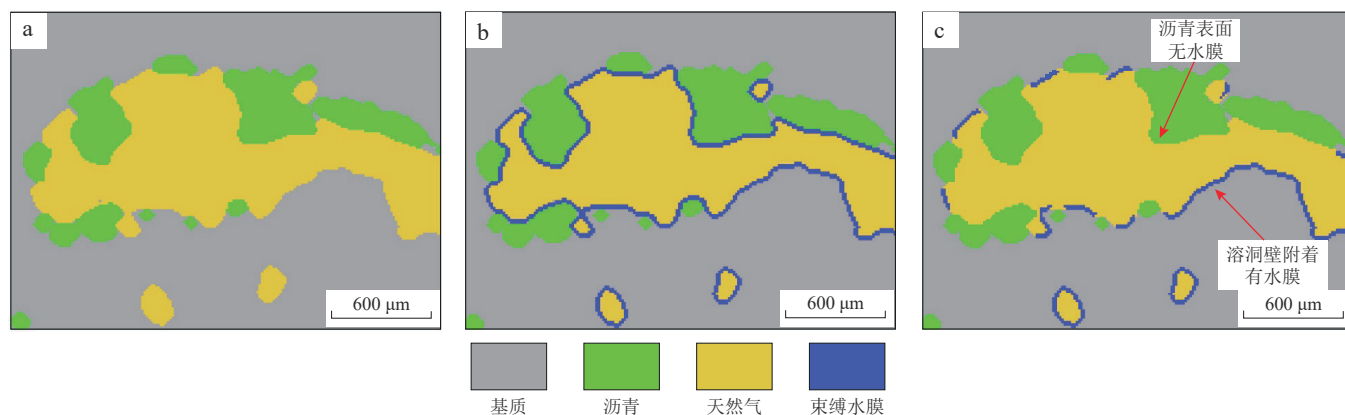


图6 导电模拟实验中CT图像分割的溶洞型碳酸盐岩心组分

Fig. 6 CT image segmentation-derived core components of dissolved cavity-type carbonate rocks used in conductivity simulation experiments

a. 基质、沥青和天然气的分割结果; b. 基质、沥青、天然气与束缚水膜的初步分割结果; c. 基质、沥青、天然气和束缚水膜的最终分割结果

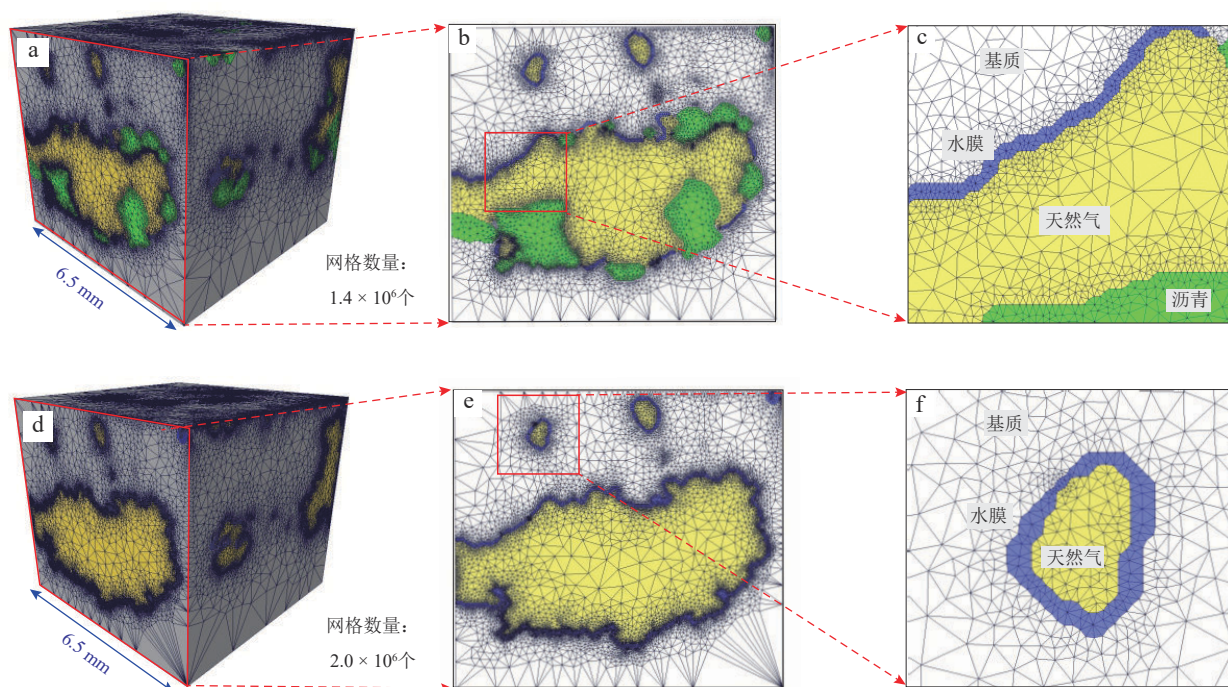


图7 导电模拟实验中含沥青与无沥青溶洞型岩心模型网格剖分

Fig. 7 Gridding of core models for bitumen-bearing and bitumen-free dissolved cavity-type carbonate rocks used in conductivity simulation experiments

a. 含沥青溶洞型模型三维网格剖分; b, c. 含沥青溶洞网格剖分细节; d. 无沥青溶洞型模型三维网格剖分; e, f. 无沥青溶洞网格剖分细节

计算效率,本文针对模型不同组分和界面交界处进行不同密度的网格剖分<sup>[37-38]</sup>。以大小为6.5 mm × 6.5 mm × 6.5 mm 溶洞型岩心模型为例,含沥青型岩心模型剖分网格数量为 $1.4 \times 10^6$ 个(图7a),无沥青型岩心模型剖分网格数量为 $2.0 \times 10^6$ 个(图7d),由于2个模型的组分构成与复杂程度不同,因此两者的网格剖分数量有一定差异。为了提高模拟结果的准确性,这2个模型在细微构造和不同组分交界面的网格剖分均较为密集,例如束缚水膜,沥青与基质、天然气的交界面等(图7c, f)。在低

含水饱和度状态下,束缚水膜属于重要的导电介质,因此对其进行了较为密集的网格剖分。随着含水饱和度增加,自由水出现后,自由水与沥青、束缚水、天然气的交界面也需要进行密集的网格剖分。为了提高模拟的计算效率,模型在次要导电组分中心部位的网格剖分均较为粗略,如天然气与基质组分中心处(图7b, e)。

### 3.4 模型参数设置

考虑到原位状态的地层温度压力等条件与实验模

拟的情况有所出入,为了减小误差并使模拟结果尽可能接近实际情况,本文综合分析研究区碳酸盐岩的矿物成分和结构特性,设置合理的模型参数以提高模拟结果精度。研究区岩性主要为白云岩,虽然组成白云岩的白云石矿物电阻率极高( $10^7 \sim 10^{12} \Omega \cdot m$ ),但组成白云岩的组分除了白云石外还有孔隙及其中的流体。论文中碳酸盐岩的孔隙空间被分为3类:溶孔、溶洞和微孔(主要包括尺寸小于CT扫描分辨率的孔隙)。由于微孔尺寸小于CT扫描分辨率,因此并不作为单独组分出现,而是与白云石矿物混在一起当作基质。基质中的微孔存在束缚水,具有一定导电作用,因此基质电阻率远小于白云石矿物电阻率,根据研究区致密白云岩层段的双侧向电阻率测井响应平均值,设置基质电阻率为  $15\,000 \Omega \cdot m$ 。一般沥青电阻率较高,但研究区没有沥青的微区电阻率测量结果。已有研究表明,研究区沥青中存在纳米孔,可能会在一定程度上降低其电阻率,因此设置沥青电阻率为  $15\,000 \Omega \cdot m$ 。天然气为非导电组分,其电阻率远大于地层水的电阻率,考虑地下高温高压条件下,天然气中可能混有少量水蒸气,参考气层段电阻率,将天然气电阻率值设置为  $100\,000 \Omega \cdot m$ 。由于碳酸盐岩的孔隙主要由溶蚀作用、成岩作用或构造作用形成,这些孔隙在形成后往往具有一定的稳定性,能够在较高的压力下保持其形态和大小,所以地层压力对孔隙结构的直接影响相对较小。与压力相比,温度对碳酸盐岩中流体性质的影响更为显著。地层水作为碳酸盐岩储层中的重要流体,其电阻率随温度的变化而变化。一般来说,随着温度的升高,地层水中离子的热运动加剧,导致电阻率降低。在模拟过程中,为了准确反映地层条件下地层水电阻率、提高模拟结果的准确性,模拟实验设置的地层水电阻率根据研究区水分析资料确定,设置为  $0.097 \Omega \cdot m$ 。各组分的电导率和电阻率参数设置见表1。

### 3.5 导电模拟原理

本文使用有限元方法进行岩心导电模拟,首先基于已构建的溶洞型与溶孔型岩心模型,设置好模型各

表1 溶孔-溶洞型碳酸盐岩岩心模型导电参数  
Table 1 Conductivity parameters of core models for carbonate rocks of dissolved pore and cavity types

| 材料  | 电导率/(S/m)  | 电阻率/( $\Omega \cdot m$ ) |
|-----|------------|--------------------------|
| 基质  | 0.000 067  | 15 000.000               |
| 沥青  | 0.000 067  | 15 000.000               |
| 天然气 | 0.000 010  | 100 000.000              |
| 地层水 | 10.310 000 | 0.097                    |

组分属性与边界条件,在模型两端输入恒定电压形成电流回路,计算得到恒定电流场中岩心模型的电流密度分布图。然后基于Maxwell方程关于电场和磁场的微分方程理论,应用电流的连续性定理,测量电流回路中任一截面的电流值[公式(1)],进一步可通过公式(2)计算出岩心模型的电阻率值。

$$I = \iint_S J_n \cdot dS \quad (1)$$

式中: $I$ 为电流,A; $J_n$ 为电流密度,A/m<sup>2</sup>;S为岩心模型的横截面积,m<sup>2</sup>;n为x,y或z方向。

$$R = r \frac{S}{L} = \frac{U_1 - U_0}{I} \times \frac{S_{yz}}{L_x} \quad (2)$$

式中: $R$ 为岩心模型的电阻率, $\Omega \cdot m$ ;  $U_1$ 、 $U_0$ 分别为电流入口和出口的电势值,V; $r$ 为电阻, $\Omega$ ;  $S_{yz}$ 为岩心模型的横截面积(垂直于电势施加方向),m<sup>2</sup>;  $L_x$ 为岩心模型的长度(平行于电势施加方向),m。

## 4 导电模拟结果

### 4.1 沥青对电流密度的影响

#### 4.1.1 饱和和地层水状态

论文设计了完全饱和和地层水状态下( $S_w = 100\%$ )不同孔隙沥青含量( $S_{bit}$ )的溶洞型岩心模型( $S_{bit} = 15\%, 25\%, 35\%, 40\%, 60\%, 80\%$ )与不同孔隙沥青含量的溶孔型岩心模型( $S_{bit} = 5\%, 10\%, 20\%, 25\%, 35\%, 40\%$ )。图8和图9分别展示了几种典型孔隙沥青含量的溶洞型岩心模型电流密度分布图和溶孔型岩心模型电流密度分布图。由于岩心模型中的基质并非主要导电组分,论文将基质设置为隐藏状态,只展示储集空间的电流密度分布,以便更清晰地观察岩心模型内部导电情况。对于相同原始孔隙度的溶洞型岩心模型,在完全饱和和地层水状态下,随孔隙沥青含量的增加,溶洞型岩心模型和溶孔型岩心模型中的高电流密度区域逐渐减少(红色区域减少),模型的导电能力均明显变差。但溶洞型岩心模型和溶孔型岩心模型中的电流密度区域分布受沥青的影响程度也有一定差异:溶洞型岩心模型中,沥青很难完全阻断电流通道(图8);溶孔型岩心模型中,沥青容易在喉道等狭窄区域形成堵塞,导致电流流动受阻(图9)。

#### 4.1.2 不同含水饱和度状态

论文设计了不同含水饱和度( $S_w$ )状态下的含沥青

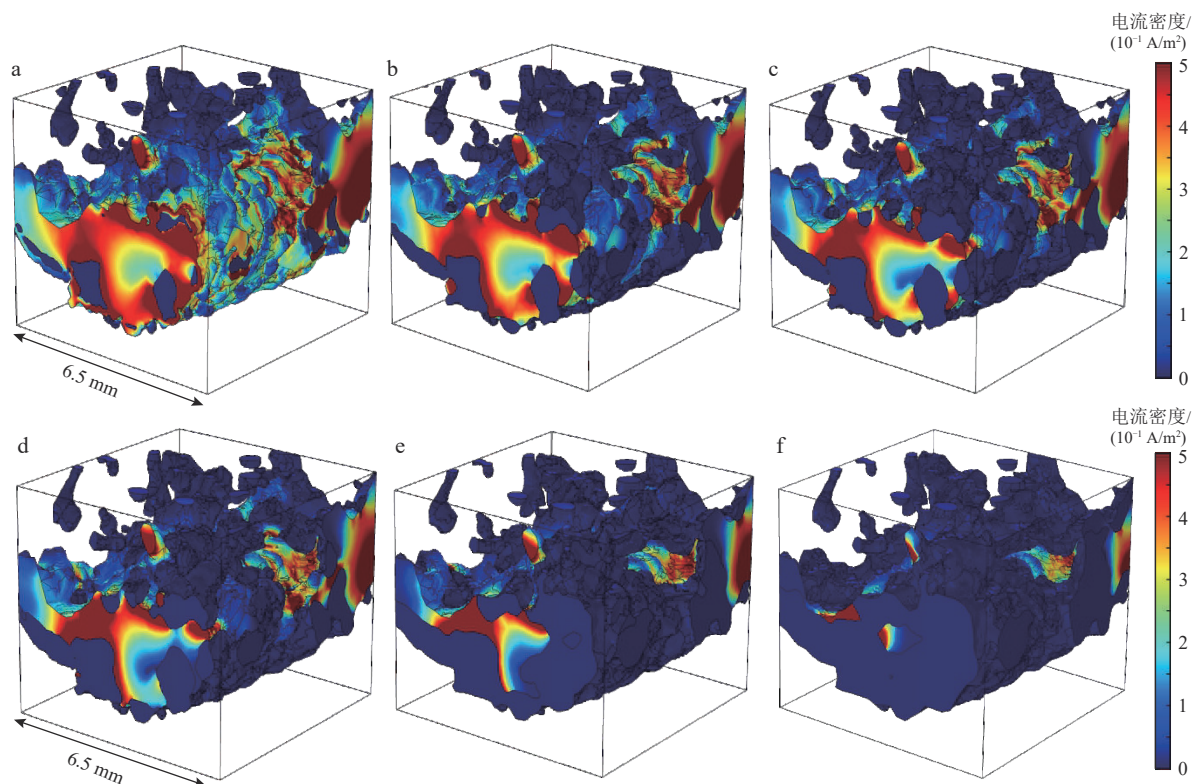


图8 导电模拟实验中饱和地层水状态下不同孔隙沥青含量溶洞型岩心模型电流密度分布立体图

Fig. 8 3D current density distribution in core models for dissolved cavity-type carbonate rocks with varying bitumen contents and saturated with formation water in conductivity simulation experiments

a. 沥青含量 15 %; b. 沥青含量 25 %; c. 沥青含量 35 %; d. 沥青含量 40 %; e. 沥青含量 60 %; f. 沥青含量 80 %

溶洞型岩心模型 ( $S_w=10\%$ ,  $15\%$ ,  $25\%$ ,  $40\%$ ,  $60\%$ ,  $80\%$ ,  $100\%$ ) 与不同含水饱和度状态下的含沥青溶孔型岩心模型 ( $S_w=35\%$ ,  $50\%$ ,  $65\%$ ,  $75\%$ ,  $85\%$ ,  $100\%$ )。图 10 和图 11 分别展示了几种典型含水饱和度状态下的含沥青溶洞型岩心模型电流密度分布图 ( $S_w=15\%$ ,  $60\%$ ) 和含沥青溶孔型岩心模型电流密度分布图 ( $S_w=35\%$ ,  $50\%$ ,  $65\%$ )。

在溶洞型岩心模型中,岩心低含水饱和度状态下 ( $S_w \leq 15\%$ ),地层水仅以束缚水膜状态分布在溶洞表面(图 10a, b);岩心较高含水饱和度状态下 ( $S_w > 15\%$ ,例如  $S_w=60\%$ ),除了存在溶洞表面的束缚水膜,还存在受重力影响分布于溶洞底部的自由水(图 10c, d)。在低含水饱和度状态下,岩石的导电主要依靠束缚水膜。在无沥青溶洞型岩心模型中,导电束缚水膜完整,构成了较好的导电网络(图 10a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>);但在含沥青溶洞型岩心模型中,导电束缚水膜变得不完整,导电网络连续性明显变差(图 10a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>)。在高含水饱和度状态下,岩石的导电更多依靠自由水。无沥青溶洞型岩心模型的电流密度(图 10c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>)强于含沥青的溶洞型岩心模型的电流密度(图 10d<sub>1</sub>, d<sub>2</sub>),但两者的差距

并不是特别大。

在溶孔型岩心模型中,单个溶孔的尺寸较小,地层水更多以束缚水状态存在,自由水的比例进一步降低,沥青的存在进一步加强了储集空间的复杂性,沥青不仅占据了孔隙空间,更堵塞了孔喉通道,导致溶孔岩心导电能力下降。随着含水饱和度增加 ( $S_w=35\%$ ,  $50\%$  和  $65\%$ ),由于沥青仍然占据大量孔喉通道,使得岩心模型的导电通道连续性仍然较差,因此含沥青溶孔型岩心模型的导电能力提升有限(图 11)。

## 4.2 沥青对岩石电阻率的影响

### 4.2.1 饱和地层水状态

岩心模型导电数值模拟电流密度进一步积分计算,最终得到每个岩心模型的电阻率。从孔隙沥青含量与饱和地层水岩心模型电阻率的关系可以看出(图 12),无论是溶洞型岩心模型还是溶孔型岩心模型,随着沥青含量增加,饱和地层水岩石电阻率增大。但两者的饱和地层水岩石电阻率增大规律有一定差异。在沥青含量

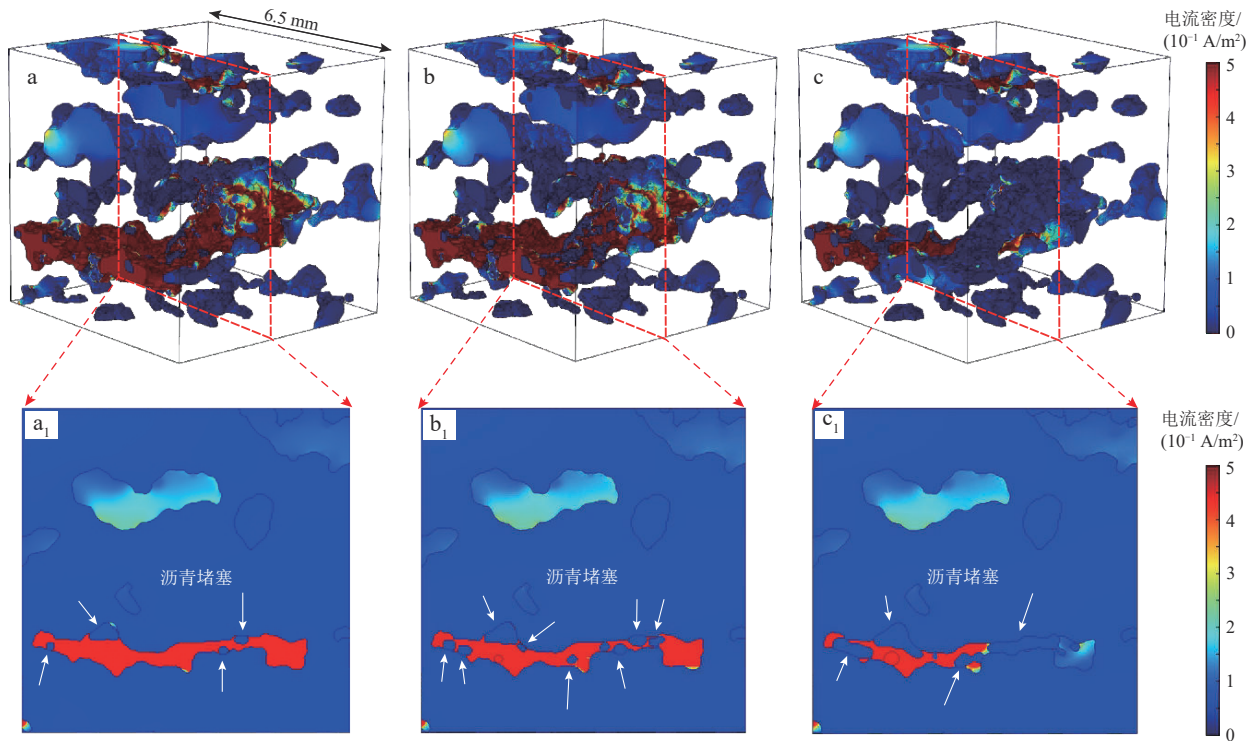


图9 导电模拟实验中饱和地层水状态下不同孔隙沥青含量溶孔型岩心模型电流密度分布

Fig. 9 3D current density distribution in core models for dissolved pore-type carbonate rocks with varying bitumen contents and saturated with formation water in conductivity simulation experiments

a, a<sub>1</sub>. 沥青含量 7%; b, b<sub>1</sub>. 沥青含量 12%; c, c<sub>1</sub>. 沥青含量 20%

(a—c 为电流密度分布立体图; a<sub>1</sub>—c<sub>1</sub> 为各立体图相应切片电流密度分布平面图, 图中除孔隙部分外, 其余为基质和沥青。)

变化程度相同的情况下, 溶孔型岩心模型(图 12b)相比溶洞型岩心模型(图 12a)的电阻率值增大更快, 即溶孔型岩心模型的电阻率值受沥青影响更大。

在溶洞型岩心模型中, 孔隙沥青含量由 10% 增加到 45%, 电阻率从约 450 Ω·m 增大到约 850 Ω·m, 增幅相对较小; 沥青含量由 45% 增加到 80%, 电阻率由约 850 Ω·m 增大到 4 200 Ω·m, 增幅有明显加大。当溶洞中充填沥青含量超过 45% 界限时( $S_{\text{bit}} > 45\%$ ), 受物性变差的影响, 含沥青溶洞型岩心电阻率明显增大(图 12a)。

在溶孔型岩心模型中, 孔隙沥青含量由 5% 增加到 25%, 电阻率从约 2 250 Ω·m 增大到约 5 820 Ω·m, 增幅较大; 孔隙沥青含量由 25% 增加到 40%, 电阻率由约 5 820 Ω·m 增大到 12 300 Ω·m, 增幅巨大。当溶孔中充填沥青含量超过 25% 界限时( $S_{\text{bit}} > 25\%$ ), 受物性变差和流体分布变复杂的双重影响, 含沥青溶孔岩心电阻率急剧增大(图 12b)。

#### 4.2.2 不同含水饱和度状态

从含水饱和度与岩心模型电阻率的关系可以看出(图 13), 无论是溶洞型岩心模型还是溶孔型岩心

模型, 含水饱和度与岩石电阻率均呈负相关, 即随着含水饱和度的增加, 岩心模型电阻率逐渐减小。整体而言, 溶洞型岩心模型较溶孔型岩心模型的含水饱和度范围更宽; 在相同含水饱和度条件下, 溶孔型岩心模型(图 13b)较溶洞型岩心模型(图 13a)的电阻率更高。

在溶洞型岩心模型中, 当含水饱和度超过 40% 界限时( $S_w > 40\%$ ), 含沥青溶洞型岩心模型与无沥青溶洞型岩心模型电阻率值的差距比较稳定, 与含水饱和度的高低关系不大; 但当含水饱和度低于 40% 界限时( $S_w \leq 40\%$ ), 随着含水饱和度的降低, 含沥青溶洞型岩心模型与无沥青溶洞型岩心模型电阻率值的差距明显增大, 其原因在于该状态下水膜对岩心模型的导电越来越重要(图 13a)。

在溶孔型岩心模型中, 当含水饱和度超过 75% 界限时( $S_w > 75\%$ ), 含沥青溶孔型岩心模型与无沥青溶孔型岩心模型电阻率值的差距比较稳定, 与含水饱和度的高低关系不大; 但当含水饱和度低于 75% 界限时( $S_w \leq 75\%$ ), 随着含水饱和度的降低, 含沥青溶孔型岩心模型与无沥青溶孔型岩心模型电阻率值的差距明显增大(图 13b)。对比发现, 导致溶洞

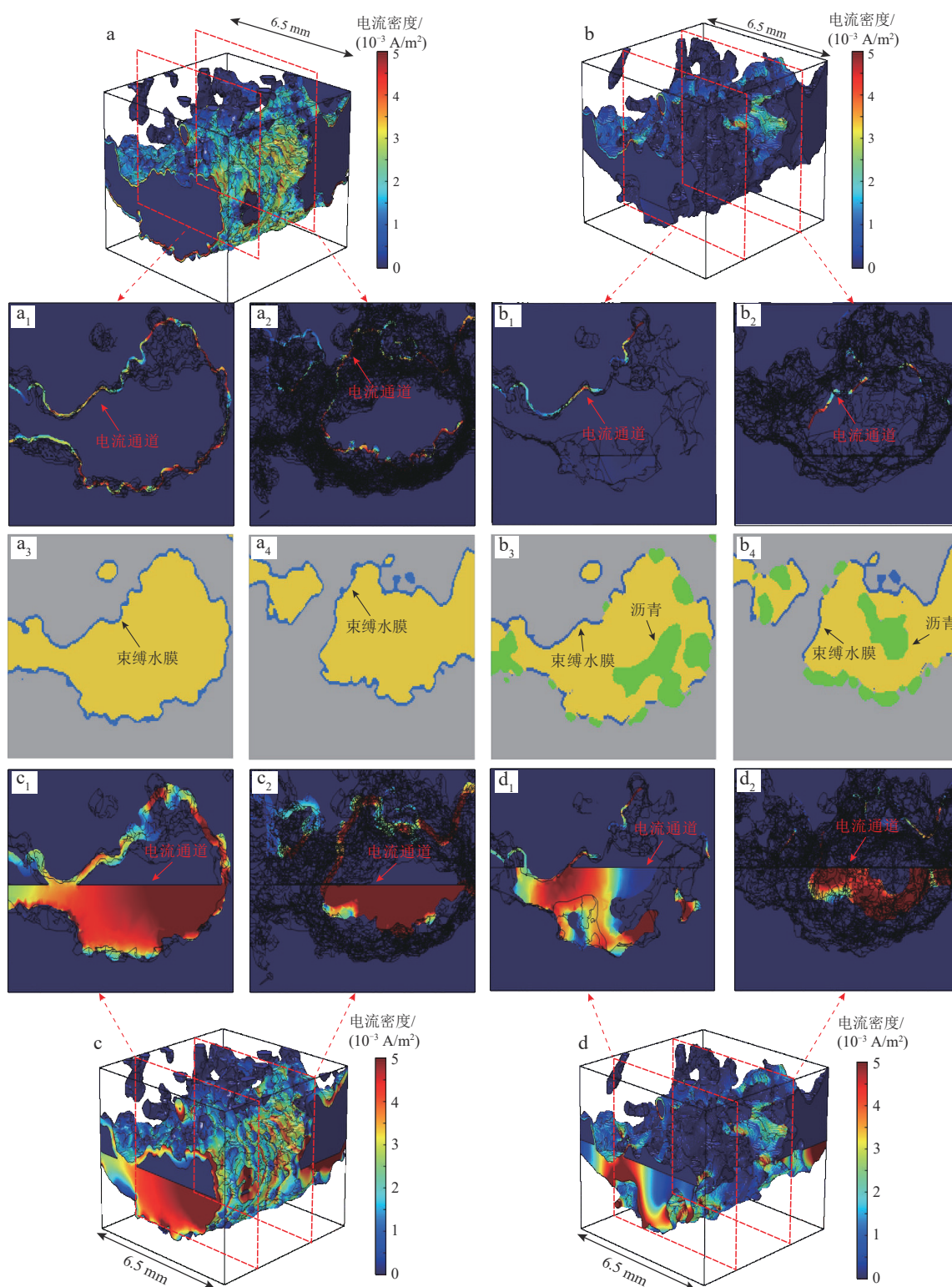


图10 不同含水饱和度状态下无沥青与含沥青溶洞型岩心模型电流密度分布对比

Fig. 10 Comparison of current density distribution in core models for bitumen-free and bitumen-bearing dissolved cavity-type carbonate rocks under varying water saturation conditions

a, a<sub>1</sub>—a<sub>4</sub>. 无沥青溶洞型岩心模型含水饱和度15%条件下电流密度分布与流体分布; b, b<sub>1</sub>—b<sub>4</sub>. 含沥青溶洞型岩心模型含水饱和度15%条件下电流密度分布与流体分布; c, c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>. 无沥青溶洞型岩心模型含水饱和度60%条件下电流密度分布; d, d<sub>1</sub>, d<sub>2</sub>. 含沥青溶洞型岩心模型含水饱和度60%条件下电流密度分布

型岩心模型电阻率差异的含水饱和度界限为40%，而溶孔型岩心模型电阻率差异的含水饱和度界

限为70%，这说明沥青对溶孔型岩心模型电阻率的影响更大。

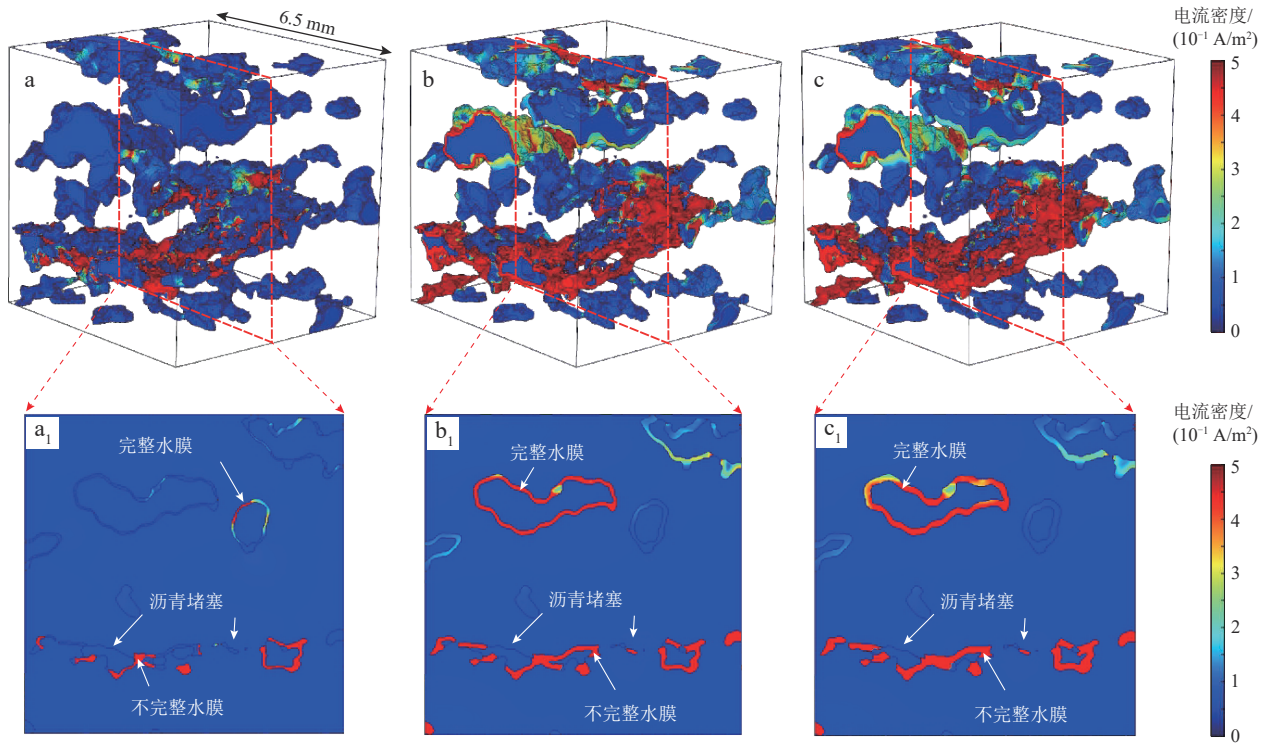


图 11 导电模拟实验中不同含水饱和度状态下含沥青溶孔型岩心模型电流密度分布

Fig. 11 Current density distribution in core models for bitumen-bearing dissolved pore-type carbonate rocks under varying water saturation conditions in conductivity simulation experiments

a, a<sub>1</sub>. 含水饱和度 35 %; b, b<sub>1</sub>. 含水饱和度 50 %; c, c<sub>1</sub>. 含水饱和度 65 %

(a—c 为电流密度分布立体图; a<sub>1</sub>—c<sub>1</sub> 为各立体图相应切片电流密度分布平面图, 图中除孔隙部分外, 其余为基质和沥青。)

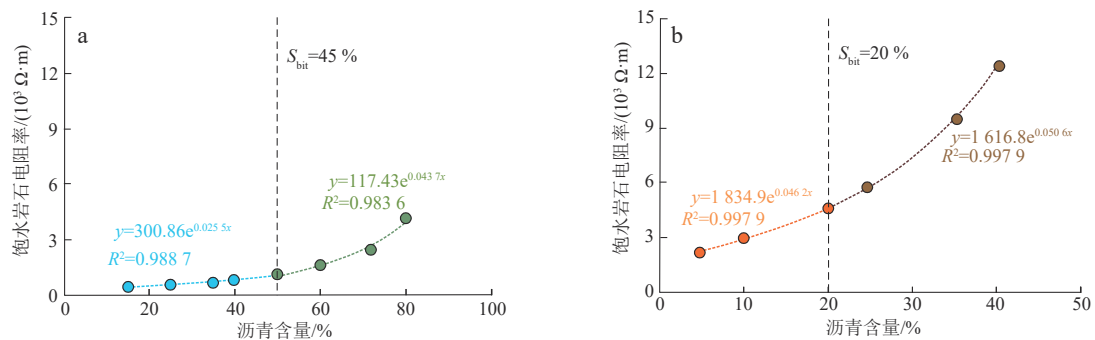


图 12 导电模拟实验中溶洞型岩心模型(a)与溶孔型岩心模型(b)孔隙沥青含量-饱水岩石电阻率关系

Fig. 12 Relationship between bitumen content and resistivity of rocks saturated with formation water for core models of dissolved cavity-type (a) and dissolved pore-type (b) carbonate rocks in conductivity simulation experiments

### 4.3 沥青对岩电参数的影响

#### 4.3.1 地层因素与胶结指数

根据不同孔隙度的含沥青溶洞型与含沥青溶孔型岩心模型电阻率模拟结果, 建立孔隙度( $\Phi$ )与地层因素( $F$ )的关系(图 14)。根据阿尔奇第一公式, 得到含沥青溶洞型岩心模型的胶结指数  $m = 1.48$ (图 14a)和含沥青溶孔型岩心模型的胶结指数  $m = 2.44$ (图 14b)。

一般对于砂岩而言, 胶结指数( $m$ )反映了岩石的胶结程度; 对于碳酸盐岩而言, 胶结指数反映了岩石孔隙的连通程度。针对本文的含沥青溶洞型/溶孔型碳酸盐岩, 胶结指数不仅反映了岩石原始孔隙的连通程度, 还反映了沥青对原始孔隙的破坏性改造作用。由于溶洞型岩心的孔隙空间连通性原本就很好, 即使受到沥青的影响, 其胶结指数仍然低于理论值 2 ( $m = 1.48$ )。而溶孔型岩心的孔隙空间连通性相对差, 在受到沥青影响后, 狭窄喉道大量堵塞, 其胶结指数高

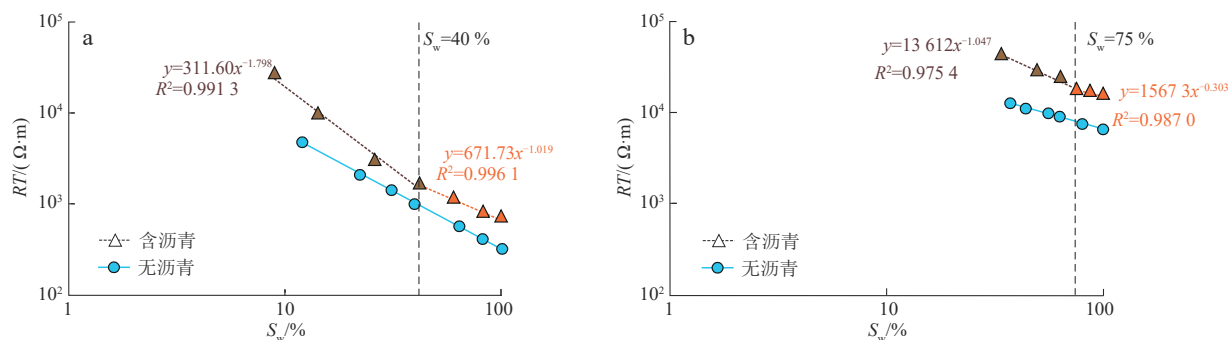


图13 导电模拟实验中溶洞型岩心模型(a)与溶孔型岩心模型(b)含水饱和度( $S_w$ )-电阻率( $RT$ )关系

Fig. 13 Relationship between water saturation ( $S_w$ ) and resistivity ( $RT$ ) for core models of dissolved cavity-type (a) and dissolved pore-type (b) carbonate rocks in conductivity simulation experiments

于理论值2( $m = 2.44$ )。

#### 4.3.2 电阻率增大系数与饱和度指数

根据不同含水饱和度状态的含沥青溶洞型与含沥青溶孔型岩心模型电阻率模拟结果,建立含水饱和度( $S_w$ )与电阻率增大系数( $I$ )的关系(图15,图16)。根据阿尔奇第二公式,得到含沥青溶洞型岩心模型的饱和

度指数  $n = 1.49$  和无沥青溶孔型岩心模型的饱和度指数  $n = 1.27$ (图15a,b),得到含沥青溶孔型岩心模型的饱和度指数  $n = 0.99$  和无沥青溶孔型岩心模型的饱和度指数  $n = 0.66$ (图16a,b)。一般而言,饱和度指数( $n$ )与岩石湿润性等因素有关,亲水岩石  $n$  值低于疏水(憎水)岩石。即岩石由亲水状态转变为疏水状态,  $n$  值会急剧增加,溶洞型和溶孔型岩心模型的有沥青状态相

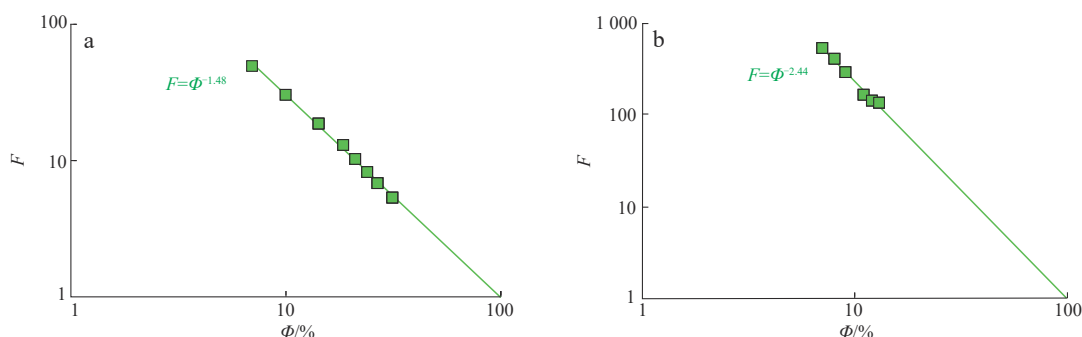


图14 导电模拟实验中含沥青溶洞型岩心模型(a)与溶孔型岩心模型(b)孔隙度( $\Phi$ )-地层因素( $F$ )关系

Fig. 14 Relationship between porosity ( $\Phi$ ) and formation factor ( $F$ ) for core models of bitumen-bearing dissolved cavity-type (a) and dissolved pore-type (b) carbonate rocks in conductivity simulation experiments

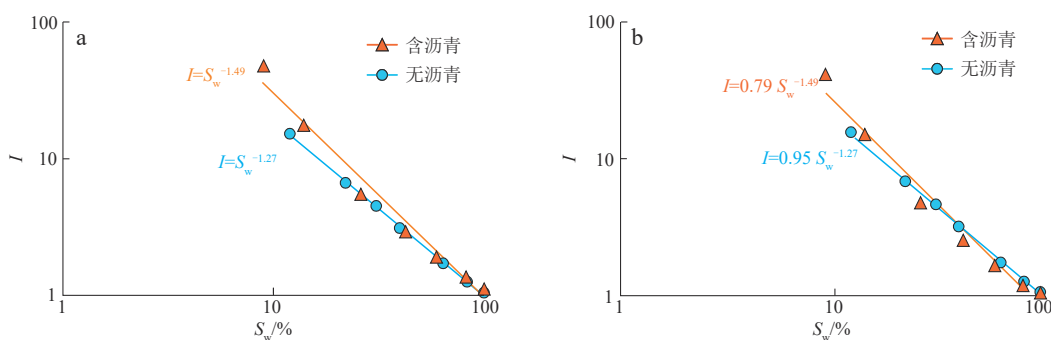


图15 导电模拟实验中溶洞型岩心模型含水饱和度( $S_w$ )-电阻率增大系数( $I$ )关系

Fig. 15 Relationship between water saturation ( $S_w$ ) and resistivity increase coefficient ( $I$ ) for core models of dissolved cavity-type carbonate rocks in conductivity simulation

a. 过1点;b. 不过1点

(过1点表示通过改变系数使得拟合函数通过坐标为(1,1)的点;不过1点表示原始数据通过拟合得到关系式。)

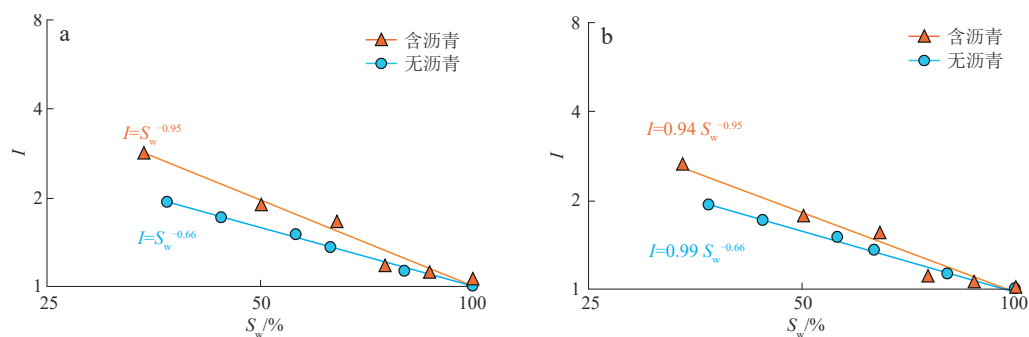


图16 导电模拟实验中溶孔型岩心模型含水饱和度( $S_w$ )-电阻率增大系数( $I$ )关系

Fig. 16 Relationship between water saturation ( $S_w$ ) and resistivity increase coefficient ( $I$ ) for core models of dissolved pore-type carbonate rocks in conductivity simulation experiments

a. 过1点; b. 不过1点

(过1点表示通过改变系数使得拟合函数通过坐标为(1,1)的点;不过1点表示原始数据通过拟合得到关系式。)

比无沥青状态,  $n$  值出现明显增大, 与该规律保持一致。受沥青的影响, 溶孔型岩心模型饱和度指数的变化幅度 ( $n = 0.66 \sim 0.99$ ) 明显高于溶洞型岩心模型的变化幅度 ( $n = 1.27 \sim 1.49$ ), 这是由于沥青在溶孔型岩心模型中容易填充狭窄喉道, 导致地层水在低饱和度状态下的连通性更容易受到影响。现有资料表明, 复杂碳酸盐岩储层大部分具有较大的  $n$  值 (一般  $n > 2.5$ ), 本文数值模拟得出的  $n$  值较小 ( $n < 1$ ), 可能有如下两个方面原因: ① 本文重点关注较大孔隙空间对碳酸盐岩电阻率的影响, 所采用的 CT 扫描仪的分辨率有限, 导致一部分微孔隙未在三維模型中还原; ② 材料润湿性对流体在孔隙空间中的分布具有重要影响, 本文模型主要考虑了材料的单一润湿性, 实际情况中岩石的润湿性更复杂, 可能随层位、孔隙成因、流体组分和油气充注期次等多种因素而变化, 呈现出强非均质性。后续研究将考虑从润湿性实验测试和润湿性地質成因方面开展研究, 并引入动态润湿性模型, 考虑润湿性随环境条件 (如压力、温度和流体成分) 变化的可能性, 从而更准确地评估含沥青碳酸盐岩的饱和度指数变化特征。

## 5 结论

1) 提出了一套基于 X 射线 CT 扫描数据的含沥青溶孔-溶洞型碳酸盐岩导电性有限元数值模拟技术, 能获得岩石微观电流密度分布特征、岩石电阻率变化规律及岩-电参数 (胶结指数  $m$  和饱和度指数  $n$ ) 变化规律等, 为更好地理解沥青对深层碳酸盐岩电阻率的影响提供了新思路。

2) 深层碳酸盐岩储集空间中容易充填团块状、环边状等形态的沥青, 随沥青含量增加, 溶洞型碳酸盐岩

和溶孔型碳酸盐岩电阻率均明显增大。但溶孔型碳酸盐岩储集空间狭窄, 沥青极易堵塞狭窄孔喉通道, 导致溶孔型碳酸盐岩电阻率受沥青影响更显著。

3) 在低含水饱和度状态下, 地层水主要以束缚水膜的形式赋存于储集空间表面, 沥青使得束缚水膜变得不完整, 从而影响岩石导电网络的完整性, 导致溶洞型碳酸盐岩和溶孔型碳酸盐岩电阻率急剧增大。

4) 沥青导致碳酸盐岩的胶结指数增加, 含沥青溶孔型碳酸盐岩的胶结指数仍然低于 2, 而溶孔型碳酸盐岩的胶结指数则高于 2, 原因是溶孔型岩心的孔隙空间连通性相对较差, 受到沥青影响后, 狭窄喉道被大量堵塞。含沥青溶孔型岩心模型饱和度指数的变化幅度明显高于含沥青溶洞型岩心模型的, 原因是沥青在溶孔型岩心模型中填充狭窄喉道, 导致地层水在低饱和度状态下的连通性更容易受到影响。

## 参 考 文 献

- [1] STASIUK L D. The origin of pyrobitumens in upper Devonian Leduc Formation gas reservoirs, Alberta, Canada: An optical and EDS study of oil to gas transformation[J]. Marine and Petroleum Geology, 1997, 14(7/8): 915-929.
- [2] 谷志东, 殷积峰, 袁苗, 等. 四川盆地东部深层盐下震旦系一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.
- [3] 杨平, 谭富文, 施美凤, 等. 尼泊尔低喜马拉雅推覆带油源对比及油气成藏[J]. 地质学报, 2021, 95(11): 3426-3441.  
YANG Ping, TAN Fuwen, SHI Meifeng, et al. Oil-source correlation and hydrocarbon accumulation in the Lesser Himalayan belt of Nepal[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(11): 3426-

- 3441.
- [4] 陈榜巧, 梁斌, 郝雪峰, 等. 四川西昌米市盆地砂岩型铜铼矿中沥青特征及与铜、铼富集成矿的关系[J]. 地质科技通报, 2023, 42(2): 11-18.
- CHEN Bangqiao, LIANG Bin, HAO Xuefeng, et al. Characteristics of bitumen in sandstone-type copper-rhenium deposits in the Mishi Basin, Xichang, Sichuan Province, and its relationship with copper and rhenium enrichment mineralization [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(2): 11-18.
- [5] 曹彦清, 张友, 沈安江, 等. 塔里木盆地古城地区奥陶系碳酸盐岩成储与油气成藏[J]. 海相油气地质, 2020, 25(4): 303-311.
- CAO Yanqing, ZHANG You, SHEN Anjiang, et al. Carbonate reservoir formation and hydrocarbon accumulation of Ordovician in Gucheng area, Tarim Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2020, 25(4): 303-311.
- [6] BIAN Lihao, LIU Xianfeng, NAN Wu, et al. Identification of high-quality transverse transport layer based on Adobe Photoshop quantification (PSQ) of reservoir bitumen: A case study of the Lower Cambrian in Bachu-Keping area, Tarim Basin, China [J]. Energies, 2022, 15(9): 2991.
- [7] 张春林, 孙粉锦, 刘锐娥, 等. 鄂尔多斯盆地南部奥陶系沥青及古油藏生气潜力[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6): 668-673.
- ZHANG Chunlin, SUN Fenjin, LIU Ruie, et al. Bitumen and hydrocarbon generation potential of paleo-reservoirs in the Ordovician, south Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(6): 668-673.
- [8] LI Wei, HU Guoyi, ZHOU Jingao. Asphalt features and gas accumulation mechanism of Sinian reservoirs in the Tongwan Palaeo-uplift, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry B, 2015, 2(4): 314-322.
- [9] 范俊佳, 姜华, 鲁雪松, 等. 四川盆地蓬莱地区震旦系灯影组气藏压力演化与成藏过程[J]. 天然气工业, 2022, 42(12): 32-43.
- FAN Junjia, JIANG Hua, LU Xuesong, et al. Pressure evolution and hydrocarbon accumulation process of Sinian Dengying Formation gas reservoirs in the Penglai area, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(12): 32-43.
- [10] 李纯泉, 陈红汉, 肖雪薇, 等. 四川盆地中部高石梯-磨溪地区震旦系灯影组储层沥青拉曼光谱分析[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 456-466.
- LI Chunquan, CHEN Honghan, XIAO Xuewei, et al. Raman spectroscopy of bitumen from the Sinian Dengying Formation reservoirs, Gaoshiti-Moxi area, central Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 456-466.
- [11] 秦建中, 付小东, 刘效曾. 四川盆地东北部气田海相碳酸盐岩储层固体沥青研究[J]. 地质学报, 2007, 81(8): 1065-1071, 1161.
- QIN Jianzhong, FU Xiaodong, LIU Xiaozeng. Solid bitumens in the marine carbonate reservoir of gas field in the northeast area of the Sichuan Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(8): 1065-1071, 1161.
- [12] SHI Chunhua, CAO Jian, TAN Xiucheng, et al. Discovery of oil bitumen co-existing with solid bitumen in the Lower Cambrian Longwangmiao giant gas reservoir, Sichuan Basin, southwestern China: Implications for hydrocarbon accumulation process [J]. Organic Geochemistry, 2017, 108: 61-81.
- [13] CHENG Bin, TAN Wenjing, WU Zepeng, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon in solid reservoir bitumen from the central Sichuan Basin [J]. Petroleum Science and Technology, 2018, 36(12): 875-881.
- [14] 吴小奇, 陈迎宾, 翟常博, 等. 川西坳陷中三叠统雷口坡组沥青地球化学特征及气源示踪[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 407-418.
- WU Xiaoqi, CHEN Yingbin, ZHAI Changbo, et al. Geochemical characteristics of bitumen and tracing of gas source in the Middle Triassic Leikoupo Formation, Western Sichuan Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 407-418.
- [15] 胡瀚文, 张元元, 郭召杰, 等. 准噶尔盆地南缘深层侏罗系储层沥青成因及其对油气成藏的启示[J]. 地质学报, 2020, 94(6): 1883-1895.
- HU Hanwen, ZHANG Yuanyuan, GUO Zhaojie, et al. Origins and hydrocarbon accumulation significance of bitumen in the deeply buried Jurassic reservoirs in the Southern Junggar Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(6): 1883-1895.
- [16] 邱振, 王清晨, 贾望鲁, 等. 广西崇左柳桥地区上二叠统礁灰岩中沥青的地球化学特征[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(6): 836-844.
- QIU Zhen, WANG Qingchen, JIA Wanglu, et al. Geochemical characteristics of bitumen in the Upper Permian reef limestone in Liuzhao (Chongzuo) area, Guangxi province [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(6): 836-844.
- [17] 刘玉祥, 张金功, 王永诗, 等. 断层输导封闭性能及其油气运移机理研究现状[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2008, 44(增刊1): 54-57.
- LIU Yuxiang, ZHANG Jingong, WANG Yongshi, et al. Analysis hydrocarbon migration mechanism and the status of the fault conduit and fault close [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2008, 44(S1): 54-57.
- [18] 陈世加, 姚涇利, 路俊刚, 等. 储层沥青成因及其对油气运聚的影响——以鄂尔多斯盆地华庆地区长8油层组1砂组为例[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(1): 37-44.
- CHEN Shijia, YAO Jingli, LU Jungang, et al. Reservoir bitumen genesis and its impacts on hydrocarbon migration and accumulation: A case study from Chang 8<sup>1</sup> of Yangchang Formation in Huaqing area, the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(1): 37-44.
- [19] 王跃祥, 谢冰, 赖强, 等. 深层含沥青白云岩储层岩石物理特征与测井评价方法[J]. 天然气勘探与开发, 2021, 44(1): 63-70.
- WANG Yuexiang, XIE Bing, LAI Qiang, et al. Petrophysical characteristics of deep dolomite reservoirs with bitumen and well-logging evaluation methods [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2021, 44(1): 63-70.
- [20] 李峰峰, 叶禹, 余义常, 等. 碳酸盐岩成岩作用研究进展[J]. 地质科技通报, 2023, 42(1): 170-190.
- LI Fengfeng, YE Yu, YU Yichang, et al. Research progress of carbonate rock diagenesis [J]. Bulletin of Geological Science and

- Technology, 2023, 42(1): 170–190.
- [21] SAIDIAN M, RASMUSSEN T, NASSER M, et al. Qualitative and quantitative reservoir bitumen characterization: A core to log correlation methodology[J]. Interpretation, 2015, 3(1): SA143–SA158.
- [22] ZHANG Shimao, ZHANG Shaonan, XIANG Ge, et al. Evaluation of bitumen intervals in the carbonate reservoir, case study in Y oilfield of Iran[J]. Petroleum Science and Technology, 2018, 36(2): 115–121.
- [23] 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.
- [24] 齐婷婷, 苏波, 廖茂杰. 沥青对储层特征的影响及测井定量评价[J]. 测井技术, 2018, 42(2): 169–174.
- QI Tingting, SU Bo, LIAO Maojie. Asphalt influence on reservoir characteristics and quantitative evaluation [J]. Well Logging Technology, 2018, 42(2): 169–174.
- [25] 孔强夫, 周灿灿, 李潮流, 等. 数字岩心电性数值模拟方法及其发展方向[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(1): 69–77.
- KONG Qiangfu, ZHOU Cancan, LI Chaoliu, et al. Numerical simulation method of digital core electrical property and its development orientations [J]. China Petroleum Exploration, 2015, 20(1): 69–77.
- [26] WU Feng, CONG Linlin, MA Wenxing, et al. Finite element method-based resistivity simulation and water saturation calculation of irregular laminated shaly sandstone [J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2023, 9(1): 2.
- [27] LIU Xuefeng, SUN Jianmeng, WANG Haitao. Numerical simulation of rock electrical properties based on digital cores[J]. Applied Geophysics, 2009, 6(1): 1–7.
- [28] JACOB H. Disperse solid bitumens as an indicator for migration and maturity in prospecting for oil and gas[J]. Erdol and Kohle, 1985, 38: 364–366.
- [29] 刘洛夫, 赵建章, 张水昌, 等. 塔里木盆地志留系沥青砂岩的成因类型及特征[J]. 石油学报, 2000, 21(6): 12–17, 127.
- LIU Luofu, ZHAO Jianzhang, ZHANG Shuichang, et al. Genetic types and characteristics of the Silurian asphaltic sandstones in Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(6): 12–17, 127.
- [30] 徐亮, 杨威, 姜振学, 等. 四川盆地川西坳陷三叠系须家河组页岩有机孔演化及成因[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 325–340.
- XU Liang, YANG Wei, JIANG Zhenxue, et al. Evolution and genesis of organic pores in Triassic Xujiahe Formation shale, western Sichuan Depression, Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 325–340.
- [31] 屈海洲, 郭新宇, 徐伟, 等. 碳酸盐岩微孔隙的分类、成因及对岩石物理性质的影响[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(5): 1102–1117.
- QU Haizhou, GUO Xinyu, XU Wei, et al. Classification and origin of micropores in carbonates and their effects on physical properties of rocks[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(5): 1102–1117.
- [32] 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 Jinxiong, 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.
- [33] 吴国铭, 李熙喆, 高树生, 等. 基于分形理论探究碳酸盐岩CT图像二值化最佳阈值[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(5): 1025–1032.
- WU Guoming, LI Xizhe, GAO Shusheng, et al. Optimal thresholding in carbonate reservoir CT image binarization based on fractal theory [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(5): 1025–1032.
- [34] 韩俊, 董少峰, 尤东华, 等. 塔里木盆地顺南地区深层碳酸盐岩热液溶蚀及其油气勘探意义——以顺南蓬1井为例[J]. 石油实验地质, 2023, 45(4): 770–779.
- HAN Jun, DONG Shaofeng, YOU Donghua, et al. Hydrothermal dissolution of deep-buried carbonate rocks and its significance for hydrocarbon exploration in Shunnan area, the Tarim Basin: taking well Peng-1 in Shunnan area as a case [J]. PETROLEUM GEOLOGY & EXPERIMENT, 2023, 45(4): 770–779.
- [35] 李茜, 胡安平, 沈安江, 等. 白云岩的成因、储集空间及实验技术研究新进展[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(5): 1456–1482.
- LI Xi, HU Anping, SHEN Anjiang, et al. Recent advances in the study of the origin and reservoir space of dolomites and emerging experimental techniques[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(5): 1456–1482.
- [36] 龚训, 金之钧, 马新华, 等. 川南地区志留系龙马溪组页岩力学性质及微观破裂机理[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(5): 1447–1455.
- GONG Xun, JIN Zhijun, MA Xinhua, et al. Mechanical properties of the Silurian Longmaxi Formation shale, southern Sichuan Basin and its microfracturing mechanisms[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(5): 1447–1455.
- [37] 蔡振忠, 张辉, 徐珂, 等. 超深层断控碳酸盐岩油藏地质力学建模及其在开发中的应用[J]. 石油实验地质, 2024, 46(4): 868–879.
- CAI Zhenzhong, ZHANG Hui, XU Ke, et al. Geomechanics modeling of ultra-deep fault-controlled carbonate reservoirs and its application in development [J]. PETROLEUM GEOLOGY & EXPERIMENT, 2024, 46(4): 868–879.
- [38] 吕心瑞, 孙建芳, 李红凯, 等. 塔里木盆地深层碳酸盐岩缝洞型油藏精细地质建模技术[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(5): 1195–1210.
- LYU Xinrui, SUN Jianfang, LI Hongkai, et al. Fine geological modelling technology for deep fractured-vuggy carbonate oil reservoirs in the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(5): 1195–1210.