



## 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

宋泽章, 柳广弟, 罗冰, 曾庆才, 田兴旺, 戴鑫, 姜仁, 王云龙, 李强, 赵珺仪, 阿比德·阿不拉, 臧建鹏

引用本文:

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.

### 相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

#### 塔里木盆地晚震旦世—中寒武世构造沉积充填过程及油气勘探地位

Tectonic-sedimentary Filling History through the Later Sinian to the Mid-Cambrian in Tarim Basin and Its Explorational Potential

沉积学报. 2020, 38(2): 398–410 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.045>

#### 汉南—川东北灯影组古地理演化:晚震旦世扬子西北缘拉张背景的沉积学证据

Paleogeographic Evolution of the Dengying Formation in Hannan-Northeastern Sichuan Basin: Sedimentary evidence of the extensional tectonic setting for the northwest margin of the Yangtze Block in the Late Sinian

沉积学报. 2019, 37(1): 189–199 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.146>

#### 富砂地层格架高分辨率层序地层学研究及储层甜点预测——以四川盆地合川地区须家河组为例

Using High Resolution Sequence Stratigraphy to Study the Framework of Sand-rich Strata and Predict the Sweet Spots of Reservoir: Taking Xujiache Formation in Hechuan area, Sichuan Basin as example

沉积学报. 2016, 34(4): 758–774 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2016.04.016>

#### 四川盆地早寒武世龙王庙期沉积特征与古地理

Sedimentary Characteristics and Lithofacies Palaeogeography during Longwangmiao Period of Early Cambrian, Sichuan Basin

沉积学报. 2016, 34(1): 33–48 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2016.01.003>

#### 四川盆地南部中二叠统茅口组二段沉积微相研究

Sedimentary Microfacies of the Second Member in Maokou Formation, Middle Permian, South Sichuan Basin

沉积学报. 2015, 33(6): 1182–1191 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2015.06.011>

文章编号:1000-0550(2021)01-0197-15

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2020.127

# 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

宋泽章<sup>1,2</sup>, 柳广弟<sup>1,2</sup>, 罗冰<sup>3</sup>, 曾庆才<sup>4</sup>, 田兴旺<sup>3</sup>, 戴鑫<sup>3</sup>, 姜仁<sup>1,2</sup>, 王云龙<sup>3</sup>, 李强<sup>1,2</sup>,  
赵珺仪<sup>1,2</sup>, 阿比德·阿不拉<sup>1,2</sup>, 臧建鹏<sup>1,2</sup>

1. 油气资源与探测国家重点实验室(中国石油大学(北京)), 北京 102249

2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

3. 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院, 成都 610041

4. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

**摘要** 超深、超老地层中的非常规油气成藏及演化、甜点区刻画、资源潜力定量评价是非常规油气沉积学的一大难点, 相关定量评价技术和理论的发展对推进我国“两深一非”油气勘探具有现实意义。沥青是古油藏存在的直接证据, 对探索古油藏分布、规模、成藏机制及论证研究区油气勘探潜力具有重要理论和实践意义。以川中地区上震旦统灯影组灯四段为研究对象, 先综合岩芯观察、铸体薄片镜下观察、图像法定量计算, 对固态沥青进行了表征; 而后建立了多矿物体积模型, 借助常规测井曲线组合(DEN-RT-R<sub>so</sub>-CNL-AC), 对储层固态沥青进行反演, 克服了储层固态沥青分布的强非均质性, 定量评价了灯四段固态沥青的含量及分布。研究结果表明: 1) 灯四段沥青多以半充填状态存在于孔隙中, 储层固态沥青含量可达4.62%, 平均为2.20%; 纵向上, 灯四上亚段固态沥青含量普遍高于灯四下亚段; 2) 高石梯—磨溪地区与德阳—安岳裂陷槽紧邻的台缘礁滩体是古油藏聚集的有利区域, 储层固态沥青含量普遍高于东侧的含气区; 3) 受自西向东油气充注控制, 高石梯—磨溪地区南北向固态沥青含量无明显差异。古隆起北斜坡灯四段固态沥青的存在证实了北斜坡古油藏的存在, 从侧面印证了北斜坡的油气成藏潜力。从固态沥青的角度, 坚定了继续深化川中古隆起北斜坡深层、超深层油气勘探的必要性。

**关键词** 固态沥青; 灯影组; 超深层; 川中古隆起北斜坡; 四川盆地

**第一作者简介** 宋泽章, 男, 1988年出生, 博士, 副教授, 油气田开发地质, E-mail: songzz@cup.edu.cn

**通信作者** 柳广弟, 男, 教授, E-mail: lgd@cup.edu.cn

**中图分类号** P618.13 **文献标志码** A

## 0 引言

储层沥青按成因可分为2类: 原生一同层沥青和原生—储层沥青<sup>[1]</sup>。原生一同层沥青是未能从烃源岩中顺利运移出的、相对重质馏分原地滞留而成, 可用于研究烃源岩排烃有效性。原生—储层沥青主要分布在储层中, 是古油藏存在的直接证据之一, 它的成因机制主要有三类: 热裂解、细菌降解、大气淡水

淋滤作用。本文研究的固态沥青为原油裂解机制形成的原生—储层沥青, 可借助其含量及分布, 判断油气运移优势路径、预测古油藏范围、确定油气藏成藏期次和恢复油气成藏过程<sup>[2-5]</sup>。此外, 由于沥青存在会明显降低储集层的孔隙度、渗透率, 严重影响储集层的物性及产能, 对储层的沥青含量进行评价, 不仅能有效指导测井资料采集优化及试气选层, 还能气藏开发井井位部署提供支撑。

收稿日期: 2020-06-10; 收修改稿日期: 2020-11-27

**基金项目** 国家重点研发计划(2017YFC0603106); 国家自然科学基金青年基金项目(41802148); 国家科技重大专项项目(2016ZX05047002); 中上扬子区烃源岩与油气成藏研究(JS2020-EDRI-043); 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室自主研究课题(PRP/indep-04-1611); 中国石油大学(北京)科研启动基金(2462017YJRC025) [Foundation: National Key R&D Program of China, No. 2017YFC0603106; Youth Program of National Natural Science Foundation of China, No. 41802148; National Science and Technology Major Project, No. 2016ZX05047002; Research on Source Rocks and Hydrocarbon Accumulation in the Middle-Upper Yangtze Area, No. JS2020-EDRI-043; Foundation of State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, No. PRP/indep-04-1611; Foundation from China University of Petroleum in Beijing, No. 2462017YJRC025]

川中古隆起震旦系储集层内沥青含量丰富<sup>[1,6-8]</sup>,属古油藏深埋时在高温、高压条件下热裂解形成的焦沥青<sup>[9-11]</sup>,储层沥青等效镜质体反射率( $R_o$ )值高(2.06%~3.0%,平均值2.62%)<sup>[7]</sup>,反映古油藏已基本完全裂解。

前人对川中地区震旦系灯影组储层固态沥青已进行了大量研究,包括固态沥青的岩芯赋存状态<sup>[12]</sup>、镜下赋存状态<sup>[12-13]</sup>、生物标志物<sup>[12,14-15]</sup>、来源<sup>[1,14]</sup>、饱和烃气相色谱特征<sup>[12,14]</sup>等,但尚未对储层沥青进行系统的定量评价。截至目前为止,尚未有文献对川中地区上震旦统灯四段储层固态沥青的平面展布及其对成藏的指示意义进行研究。

储层固态沥青的测井定量评价一直是个难题。近几年,不同学者尝试使用不同的方法对含沥青储层进行了测井评价。部分学者直接根据含沥青储层的测井响应对储层沥青进行定性、半定量评价。丛琳等<sup>[16]</sup>对塔河油田西部泥盆系和志留系含沥青砂岩储层进行研究,讨论了沥青的存在对测井响应、储层物性、测井解释孔隙度的影响。葛祥等<sup>[17]</sup>通过对比水层、高黏度油层、沥青层的测井响应,定性识别了中东Y油田白垩质灰岩储层沥青,并对沥青储层的厚度、分布进行了研究。陈明江等<sup>[18]</sup>将单GR法与中子密度交会图法(GR-CNL)求得的泥质含量差值作为储层沥青相对含量,评价了塔里木盆地泥盆系滨岸相砂岩储层沥青相对含量及其对油藏产能的影响。

以上所述均为间接评价,并未直接对储层沥青进行分析。在此基础上,部分学者直接对储层沥青进行实验室分析,再结合测井解释对其进行定量评价。齐婷婷等<sup>[19]</sup>识别了塔中11井区志留系柯坪塔格组岩屑砂岩、石英砂岩中的三类沥青,通过洗油、洗盐、洗沥青处理,探讨了沥青对储层物性、电性和孔隙结构的影响;综合GR-RT-DEN建立了孔隙度预测模型,定量评价沥青。赖强等<sup>[20]</sup>基于安岳气田龙王庙组沥青质碳酸盐岩储层洗沥青前后测井响应变化,分别采用常规测井孔隙度—核磁共振孔隙度重叠法、常规测井孔隙度—横波测井孔隙度叠合法两种方法对沥青分布进行了研究。

通过实验室岩电分析与孔隙度模型相结合的手段,对储层固态沥青进行定量评价,效果虽好,但却需要借助一些先进测井手段,如核磁共振测井、阵列声波测井等,在实际应用中由于许多探井并未完成这些测井项目,使得此类方法往往受到较大的应用

限制。因此,亟需研发一种利用常规测井组合对储层沥青进行定量评价的方法。

本文基于前人的研究成果,综合岩芯观察、铸体薄片观察,使用铸体薄片图像分析对固态沥青进行定量表征,并用其校准储层固态沥青含量;建立了多矿物反演模型,使用常规测井组合定量评价了川中地区灯四段储层固态沥青;从固态沥青的角度,证实了川中古隆起北斜坡的天然气成藏潜力。

本文所述方法能够为定量刻画超深、超老地层中的非常规油气富集及演化、资源潜力评价、甜点区刻画提供技术支撑,助力解决非常规油气沉积学所面临的定量化挑战,为寻找非常规油气资源发挥重要作用。

## 1 地质概况

安岳气田是位于川中古隆起以东的古隆起平缓构造区威远至龙女寺构造群上的特大型海相碳酸盐岩(白云岩)气田,其生烃中心受德阳—安岳台内裂陷控制,天然气近源成藏;圈闭受川中古隆起控制(龙王庙组发育构造—岩性圈闭油气藏;灯影组发育构造—地层圈闭油气藏);勘探目的层为寒武系龙王庙组、上震旦统灯四段、灯二段;具有年代老(震旦—寒武系)、埋藏深(产层中间深度多大于4 500 m)、含气面积大(有利含气面积大于7 500 km<sup>2</sup>)、储量规模大(探明天然气地质储量为8 487亿方,三级储量超万亿立方米,2017年底数据)、产能高(龙王庙组和灯影组分别于2017年完成年产110亿方和15亿方产能建设)等特点。本文研究的层位为上震旦统灯四段。

灯四段顶部发育小段灰岩,内部发育少量致密的硅质岩、砂岩夹层,整体以块状、砾状白云岩为主。硅化作用是导致灯影组储层物性急剧变差的主要破坏性成岩作用之一<sup>[21]</sup>。灯四段白云岩储层发育受藻丘、颗粒滩亚相及岩溶作用共同控制,大面积层状分布,孔隙空间以裂缝—孔隙型及裂缝—孔洞型为主。

研究区5口井61样次全直径岩芯孔、渗交会图(图1)显示:灯四段为典型的致密碳酸盐岩储层,储层低孔、超低渗,有效孔隙度基本低于5%,平均值为1.6%;有效渗透率多低于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;有效孔隙度和渗透率之间无明显相关关系,反映了致密白云岩储层较强的非均质性。

研究区66口单井灯四上亚段(图2左)、下亚段



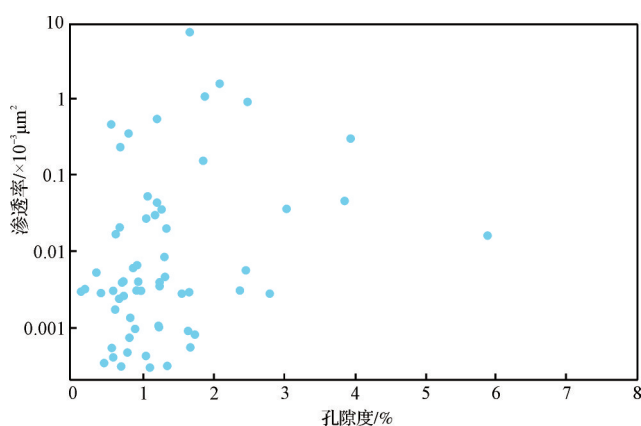


图1 研究区灯四段储层全直径岩芯物性测试  
孔—渗交会图

Fig.1 Porosity-permeability crossplot of the fourth member of Dengying Formation in the research area, obtained by physical testing using full diameter core

(图2右)的测井解释孔隙度与全直径岩芯物性测试结果较为一致——灯四段白云岩储层的有效孔隙度低于5%,属于典型的致密碳酸盐岩储层。灯四上亚段的白云岩储层有效孔隙度多低于4%,显示出两个明显的峰值:低于2%和2%~4%;而灯四下亚段的白云岩储层测井解释有效孔隙度仅显示出一个峰值:低于2%。从测井解释成果来看,灯四上亚段的物性优于下亚段。

## 2 储层固态沥青特征

### 2.1 沉积特征

灯四段顶部的小段灰岩和内部的硅质岩夹层整体致密,物性差,罕见沥青充填;储层固态沥青主要赋存于白云岩储层中。

虽然白云岩储层构成了灯四段的主体,然而,其

岩相却体现出较强的非均质性,还可进一步细分为6类:藻凝块云岩、藻叠层云岩、藻砂屑云岩、细—粉晶白云岩、泥晶白云岩、角砾云岩。储层固态沥青的含量及赋存状态在这六类白云岩中存在较大的差别。

藻凝块云岩发育不规则的团块状藻,颜色多为灰白色,溶蚀孔洞、裂缝较为发育,沥青呈颗粒状、脉状、半充填于溶蚀孔洞、裂缝中(图3a)。藻纹层白云岩则以明暗相间的条带为特征,溶蚀孔洞发育,沥青呈颗粒状半充填于溶蚀孔洞中(图3b)。藻砂屑云岩中的藻多呈不规则的块状或者块状—层状复合状;当藻砂屑云岩整体呈灰白色时,溶蚀孔洞一般较为发育,沥青多呈半充填状态分布于溶蚀孔洞中(图3c);而当藻砂屑云岩整体呈灰黑色时,储层致密,溶蚀孔洞不发育,无沥青充填(图3d)。

相比于藻白云岩,泥—粉晶白云岩(3f~g)总体物性较差,溶蚀孔洞、裂缝不发育,少见沥青充填;仅当顺层岩溶发育时,可见沥青半充填于溶蚀孔洞中(图3e)。灯四段还发育较多的角砾云岩(图3h),其物性较差,致密,无沥青充填。

综合岩芯观察发现:1)从岩性上看,灯四段储层固态沥青多发育于生物白云岩(藻凝块云岩、藻叠层云岩、藻砂屑云岩,形成主要受蓝细菌生物活动控制<sup>[22]</sup>)的溶蚀孔洞、裂缝中;而暗色粉—泥晶白云岩、角砾云岩储层致密,物性一般较差,溶蚀孔洞不发育,岩芯尺度一般观测不到明显的沥青充填现象。2)从赋存状态上看,灯四段固态沥青颜色深黑,多呈脉状(充填于裂缝中)、颗粒状(充填于溶蚀孔洞中),形态取决于孔隙空间类型;并且,固态沥青质地坚硬,不染手,反映了其高温热裂解成因特征<sup>[7]</sup>。3)从含量上看,灯四段储层固态沥青多呈半充填状态,约占据了原始孔隙度的一半左右,极大地降低了有效孔隙空间。

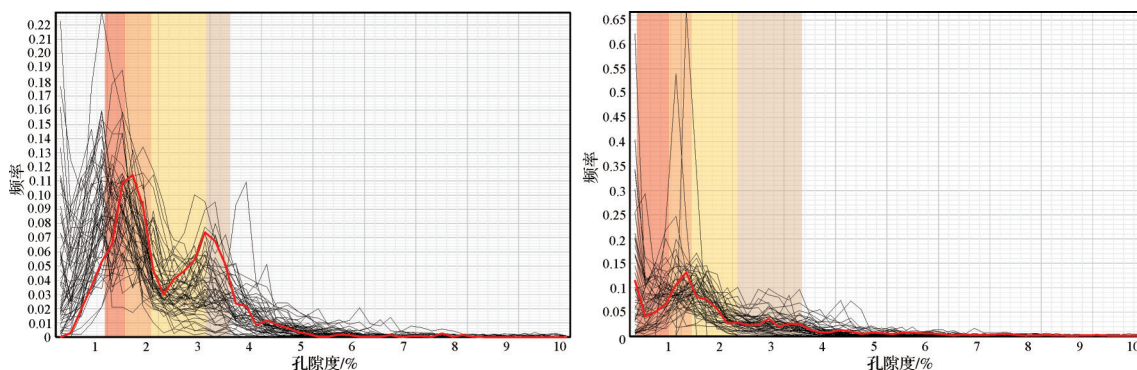


图2 研究区灯四段上亚段(左)、下亚段(右)储层有效孔隙度(测井)频率分布直方图(66口井)

Fig.2 Porosity histogram of the upper (left) and lower layer of of the fourth member of Dengying Formation, obtained from logging interpretation of 66 wells





图3 灯四段岩芯固态沥青观察

(a)磨溪8井,5 160.08~5 160.22 m,灯四段,灰色藻凝块云岩,孔洞和裂缝均很发育,缝形态不规则,缝壁不平整,延伸约20 cm,缝宽1 mm左右,裂缝和孔洞中均有沥青充填;(b)磨溪8井,5 111.93~5 112.03 m,灯四段,灰色藻叠层云岩,孔洞发育,沥青半充填;(c)磨溪8井,5 112.50~5 115.72 m,灯四段,藻砂屑云岩,孔洞发育,孔洞直径多小于3 mm,孔洞中沥青半充填;(d)磨溪8井,5 158.23~5 158.45 m,灯四段,藻砂屑云岩,发育白色条带状藻,溶孔不发育,未见明显沥青充填;(e)磨溪41井,5 185.56 m,灯四段,灰白色粉—细晶白云岩,顺层溶蚀孔洞发育,孔洞中沥青呈半充填状态;(f)磨溪8井,5 155.52~5 155.75 m,灯四段,灰白色泥—粉晶云岩,溶蚀孔洞、裂缝不发育;(g)磨溪8井,5 171.8 m,灯四段,灰黑色泥晶白云岩,储层致密,溶蚀孔洞和裂缝均不发育,未见明显沥青充填;(h)磨溪8井,5 108.46~5 108.52 m,灯四段,灰黑色角砾云岩,储层致密,角砾充填,溶孔不发育

Fig.3 Observation of solid bitumen in the cores from the fourth member of Dengying Formation

## 2.2 储层固态沥青镜下分布特征

为进一步研究沥青微观赋存状态,对灯四段白云岩储层铸体薄片进行镜下观察:1)藻白云岩基质以颗粒白云石为主,溶蚀孔洞、裂缝均很发育(图4a~b),沥青充填于孔隙中:图4a中藻白云岩发育明显的微裂缝和溶蚀孔洞,沥青几乎完全充填微裂缝和溶蚀孔洞;图4b中的溶蚀孔洞较图4a更为明显,沥青几乎完全充填了所有溶蚀孔洞,而微裂缝也仅保留了少量孔隙空间;2)砂质云岩(图4c)重结晶作用明显,基质以白云石颗粒和石英颗粒为主,颗粒粒度较粗、自形,发育溶蚀孔,微裂缝不太发育;沥青主要存在于溶蚀孔隙中,部分完全充填于较小的孔隙中,部分半充填于大孔内部和边缘;3)细粉晶白云岩(图4d)的基质主要为泥晶白云石,可见明显微生物作用,发育溶蚀孔,沥青完全充填于部分相对小的孔中,或者部分充填于大孔的边缘。

铸体薄片观察结果从侧面反映了灯四段固态沥青定量评价的难点——细粉晶白云岩在岩芯尺度上未观测到明显的沥青充填,但在镜下观测到了。

通过岩芯和铸体薄片镜下观察可以推测:川中磨溪—高石梯地区上震旦统灯四段白云岩储层孔隙空间中很可能普遍存在固态沥青,仅仅是因为含量的多少和观察尺度限制,有些未能在岩芯上得到体现。类似地,田兴旺等统计了川中地区高科1井等取芯井样品发现,完全不含固态沥青的样品不足10%,固态沥青在地层剖面中广泛分布<sup>[7]</sup>,与本文所述观点一致。

## 2.3 储层固态沥青定量评价

为进一步定量评价储层固态沥青,借助图像分析处理技术,对铸体薄片的面孔率(有效面孔率)、储层固态沥青面孔率进行评价,流程如下:1)沥青提取:读取图像后,将RGB图像转化为灰度图,设定灰度值范围,对固态沥青进行提取并计算其像素值;2)有效孔隙空间提取:对图像进行聚类分析,提取铸体并计算其像素值;3)计算有效孔隙空间面孔率和储层固态沥青面孔率,将储层固态沥青面孔率近似当做沥青体积分数,用于标定测井固态沥青含量;结果如表1所示。

值得引起注意的是,由于镜下观察的视域只反



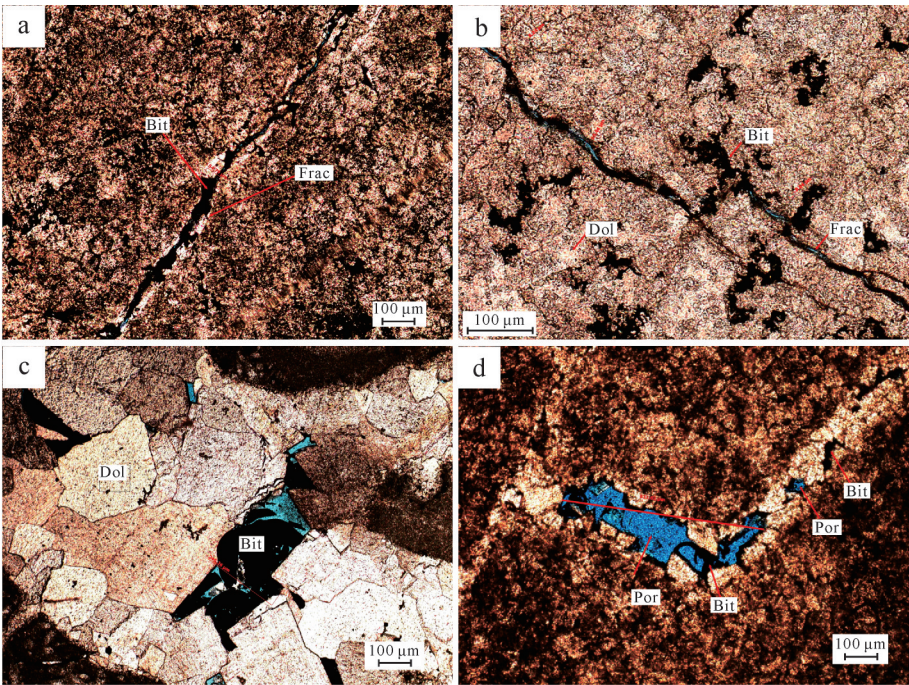


图4 研究区灯四段储层沥青镜下特征观察(Por:孔隙;Bit:沥青;Frac:裂缝;Dol:白云石)  
(a)高石20井,5 182.30 m,灯四段,细粉晶白云岩,发育一条裂缝,裂缝最大直径54.79 μm,亦可可见溶蚀孔隙,沥青几乎完全充填溶蚀孔隙和裂缝;(b)高石7井,5 296.07~5 296.14 m,灯四段,藻白云岩,溶蚀孔隙、微裂缝均发育,沥青几乎完全充填溶蚀孔隙和微裂缝;(c)高石20井,5 204.13 m,灯四段,砂质云岩,溶蚀孔较发育,最大直径为631.76 μm,沥青半充填于溶蚀孔隙中;(d)高石20井,5 186.96 m,灯四段,细粉晶白云岩,发育多条构造缝,但大多被白云石晶体后期充填,白云石晶体后期又被溶蚀形成溶蚀孔洞,视域中相对较小的溶蚀孔隙几乎被沥青完全充填,正中心的溶蚀孔洞最大直径为632.62 μm,边缘可见沥青

Fig.4 Microscopic features of solid bitumen of the fourth member of Dengying Formation on thin section



图5 固态沥青铸体薄片图像分析处理(Bit:沥青;Dol:白云石)  
(a)原始图片;(b)固态沥青分布;(c)铸体分布(有效孔隙空间分布)

Fig.5 Image processing for analysis of solid bitumen on thin section image

映“局部”的情况,所得的储层固态沥青面孔率有可能显著偏大或者偏小。以图4a~4b为例,虽然该视域很好地展示了藻白云岩储层固态沥青充填裂缝、溶孔的情况,然而,图像分析结果显示,沥青对孔隙空间的充填率分别达到了99.49%和94.83%(折算沥青体积分别达到7.24%和5.15%),显著高于该深度点的实际沥青充填程度。针对这种情况,在实际评价中,需要在一张铸体薄片选定多个区域进行评价后取算数平均值,所得沥青面孔率算数平均值方可用于后续固态沥青测井定量评价的标定。

表1 孔隙空间固态沥青图像处理计算  
Table 1 Image Processing for calculation of Solid Bitumen in Pore Space

| 编号 | 总面积/<br>像素点 | 沥青面积/<br>像素点 | 铸体面积/<br>像素点 | 面孔率/% | 沥青面<br>孔率/% | 沥青占孔隙<br>空间比例/% |
|----|-------------|--------------|--------------|-------|-------------|-----------------|
| 4A | 5002624     | 362434       | 1869         | 7.28  | 7.24        | 99.49           |
| 4B | 5002624     | 257482       | 14030        | 5.43  | 5.15        | 94.83           |
| 4C | 5002624     | 369504       | 16303        | 7.71  | 7.39        | 95.77           |
| 4D | 5002624     | 337357       | 13017        | 7.00  | 6.74        | 96.28           |

### 3 固态沥青测井评价

#### 3.1 传统思路评价固态沥青的局限性

基于灯四段岩性组成,依照传统测井评价思路,储层固态沥青测井定量评价应遵循以下流程:1)确定白云岩储层所在位置:根据测井响应和岩性之间的关系,使用图版法对灯四段的岩性进行识别(白云岩—灰岩—硅质岩三大类),剔除致密的硅质岩、灰岩段,寻找白云岩储层段;2)含固态沥青白云岩储层的测井识别(定性判断):对比含沥青、不含沥青的白云岩储层的测井响应之间的差别,定性判断沥青对储层测井响应的影响;3)综合岩—电实验、测井响应,建立孔隙度模型,定量评价沥青。

以高石18井为例,对灯四段不同岩性的测井响应进行对比(图6)。从四个交会图可以看出, $CNL$ 、 $RT$ 、 $GR$ 对三类岩性的辨识能力均不太理想, $DEN$ 略好,总体能反映出硅质岩和白云岩储层的密度比灰岩大,但不足以区分三类岩性;前人使用较多的 $CNL-GR$ 、 $AC-RT$ 、 $DEN-GR$ 、 $CNL-GR$ 等图版在本研究区划分三类岩性效果均不太理想。前人在工作中提出的硅质岩的“两降两升”测井响应: $DEN$ 、 $CNL$ 降低, $AC$ 、 $RT$ 增大,在几类图版中未能体现。因此,使用传统方

法,依据 $CNL$ 、 $AC$ 、 $DEN$ 、 $RT$ 、 $GR$ 交会图识别白云岩储层存在一定的困难。

进一步对白云岩储层段进行深入研究。同样以高石18井为例(图7),选取藻白云岩(有沥青充填)、泥晶云岩(有沥青充填)、泥晶云岩(无沥青充填)、硅质岩层段,综合岩芯观察和测井响应,对储层固态沥青测井响应进行探索。

前人对储层固态沥青测井响应较为一致的认识是:固态沥青的存在会导致储层测井响应呈现“三升两降”特征——声波时差普遍增大( $AC/DTC$ 略微增大,而 $DTS$ 增大幅度较大)、 $RT$ 、 $GR$ 增大( $GR$ 增大明显,无铀自然伽马 $GR_{KTh}$ 增大不明显,高铀特征明显), $CNL$ 、 $DEN$ 降低。

对比岩性相同(二者均为泥晶云岩)、取芯深度接近、沥青充填差异明显的岩芯b(沥青充填)和岩芯c(无沥青充填),含沥青储层 $AC$ 更低,与前人认识不一致;与含沥青的泥晶云岩(岩芯b)相比,含沥青的藻白云岩(岩芯a)孔、渗更好,含有更多的固态沥青,但其 $GR$ 、 $GR_{KTh}$ 更低,而 $DEN$ 、 $CNL$ 更高,与前人认识相悖;硅质岩无沥青充填,却体现出高阻( $RT$ 、 $R_{X0}$ )、低 $CNL$ 、 $DEN$ 等含沥青储层的测井响应特征;含沥青的藻白云岩(岩芯a)与岩芯尺度不含沥青的泥晶云岩

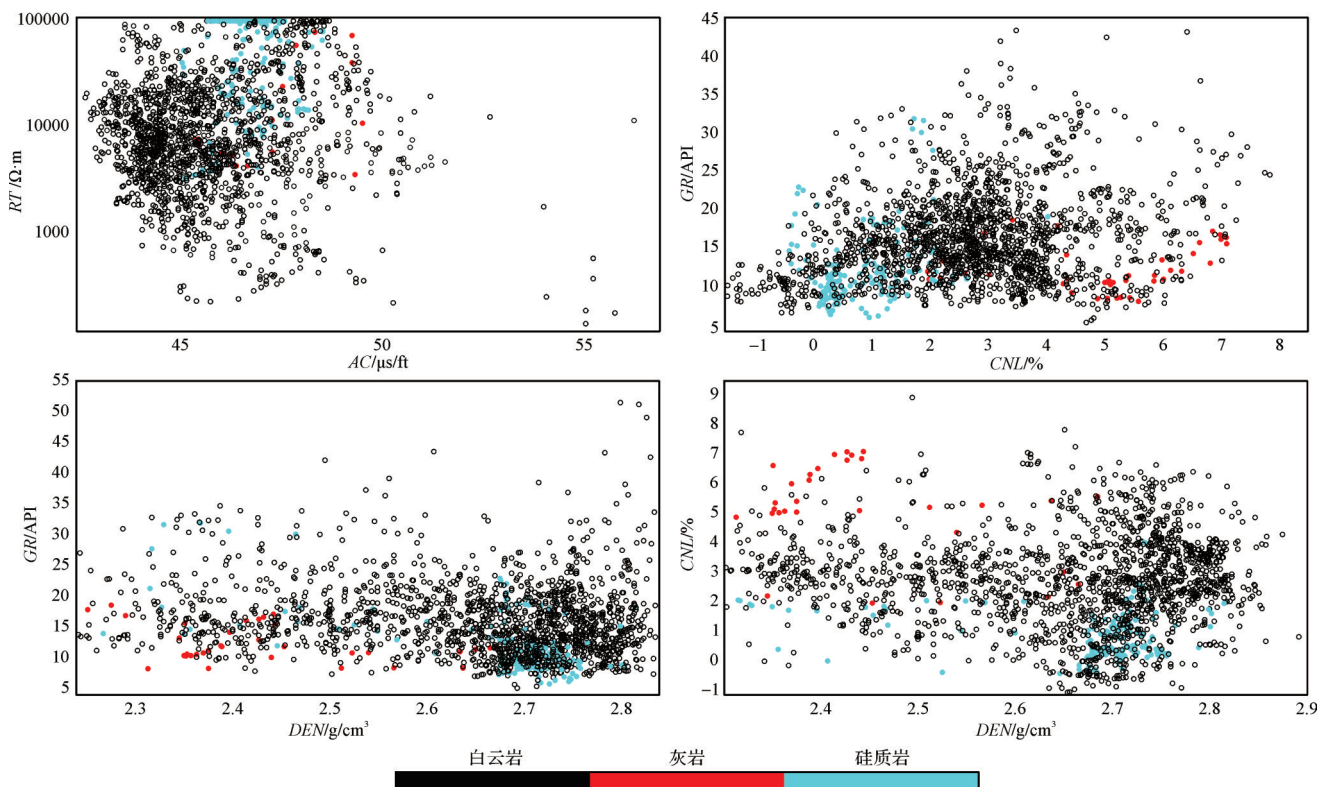


图6 灯四段不同岩性测井响应对比(高石18井)

Fig.6 Logging responses of different rock-types of the fourth member of Dengying Formation (Gaoshi-18 well)



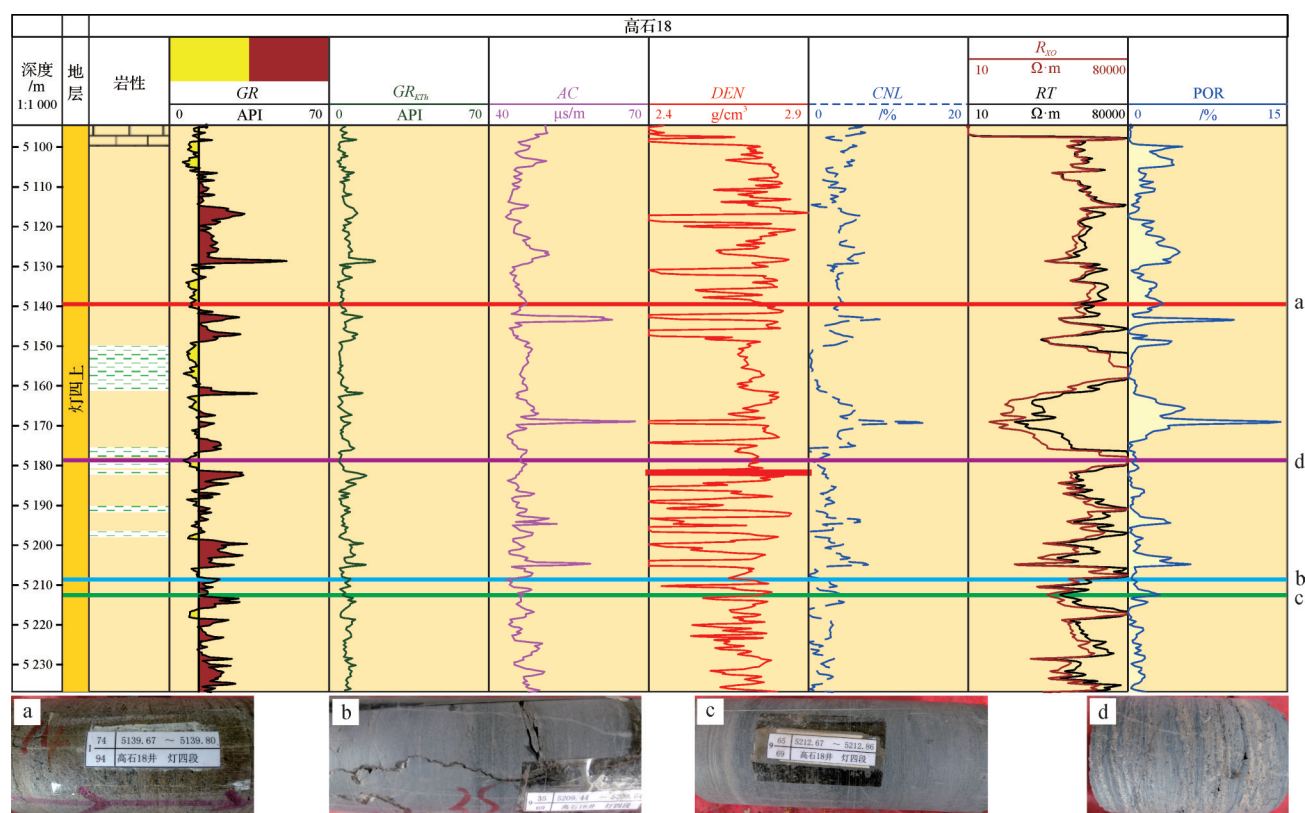


图7 灯四段含固态沥青储层典型测井响应(高石18井)

(a) 藻白云岩, 溶孔发育, 可见裂缝, 沥青充填溶孔较明显,  $GR(10.0 \text{ API})$ 、 $GR_{KTh}(5.0 \text{ API})$ 、 $AC(46.5 \mu\text{s/m})$ 、 $DEN(2.73 \text{ g/cm}^3)$ 、 $CNL(3.86\%)$ 、 $RT(8900 \Omega \cdot \text{m})$ 、 $R_{10}(5026 \Omega \cdot \text{m})$ , 测井解释孔隙度较好(2.9%); (b) 泥晶云岩, 可见明显裂缝, 沥青充填裂缝,  $GR(22.0 \text{ API})$ 、 $GR_{KTh}(9.8 \text{ API})$ 、 $AC(43.3 \mu\text{s/m})$ 、 $DEN(2.70 \text{ g/cm}^3)$ 、 $CNL(3.05\%)$ 、 $RT(7163 \Omega \cdot \text{m})$ 、 $R_{10}(2836 \Omega \cdot \text{m})$ , 测井解释孔隙度差(0.49%); (c) 泥晶云岩, 不发育溶孔、裂缝, 未观测到沥青充填, 致密,  $GR(12.8 \text{ API})$ 、 $GR_{KTh}(5.8 \text{ API})$ 、 $AC(46.6 \mu\text{s/m})$ 、 $DEN(2.74 \text{ g/cm}^3)$ 、 $CNL(3.57\%)$ 、 $RT(1665 \Omega \cdot \text{m})$ 、 $R_{10}(813 \Omega \cdot \text{m})$ , 测井解释孔隙度较好(2.5%); (d) 硅质岩, 可见石英条带, 无沥青充填, 致密,  $GR(6.1 \text{ API})$ 、 $GR_{KTh}(3.8 \text{ API})$ 、 $AC(46.18 \mu\text{s/m})$ 、 $DEN(2.72 \text{ g/cm}^3)$ 、 $CNL(1.13\%)$ 、 $RT(9990 \Omega \cdot \text{m})$ 、 $R_{10}(9990 \Omega \cdot \text{m})$ , 测井解释孔隙度差(0.7%)

Fig.7 Typical logging responses of solid-bitumen-bearing reservoir of the fourth member of Dengying Formation (Gaoshi-18 well)

(岩芯c)相比,放射性( $GR$ 、 $GR_{KTh}$ )更低、 $CNL$ 更大,  $AC$ 、 $DEN$ 基本一致,与前人认识不一致。这些差异说明:简单地以测井响应值的高低来判断储层是否含有沥青不太可靠,岩相等其他因素造成的测井响应差异可能更大。

综合以上研究可以发现,川中地区深层、超深层致密白云岩储层固态沥青测井定量评价存在以下的困难:

1) 白云岩储层段测井识别困难,很难依据传统的交会图法,使用测井曲线组合对储层段进行识别。2) 沥青带来的测井响应变化微弱,很难依据测井响应的数值差异直接判断储层是否含有固态沥青。3) 岩相引起的测井响应变化与沥青带来的测井响应变化孰强孰弱很难界定,给测井定量评价增加了难度。4) 储层是否含沥青不易界定,难以找到一段“干净”的、不含固态沥青的储层段用于对比。由于观测尺度的原因,虽未在岩芯尺度上观测到泥晶云岩中

有沥青充填,但铸体薄片却证实了沥青的存在(图4d)。勘探实践证明,灯四段储层普遍含气,从成藏的角度来看,古油藏很可能曾在灯四段普遍分布,造成沥青普遍分布。

以上所述限制了传统的固态沥青测井半定量、定量评价,因此,使用传统的方法建立岩性识别模板,并在此基础上根据沥青所带来的测井响应变化对沥青进行半定量、定量评价在本研究区存在一定的困难。

### 3.2 多矿物体积模型反演法计算沥青含量

鉴于使用常规思路进行储层固态沥青测井定量评价存在以上难题,本文尝试使用多矿物体积模型反演法、基于常规测井曲线组合对储层固态沥青进行定量评价,其意义体现在如下几个方面:

从本质上说,储层测井响应直接受控于储层的矿物和流体组成,借助多矿物体积模型反演储层固体沥青含量理论上是可行的;碳酸盐岩储层的矿物

组成相比碎屑岩地层(如页岩储层)简单,使用多矿物体积模型反演效果更好;多矿物体积模型反演不仅能够定量评价纵向上沥青含量的变化,还能呈现矿物组成、流体、孔隙度的连续变化。此外,目前较有效的ECS(元素俘获测井)、核磁共振测井等不属于常规测井项目,在许多井中并无此类测井项目,且该类测井项目造价较高,经济性低。因此,利用常规测井资料,使用多矿物反演模型,根据矿物和流体的理论测井响应参数反向求解各组分体积分数,对地层的组分进行研究,不仅能够定量评价储层固态沥青含量,还能为沉积相研究、层序地层格架建立、储层精细刻画提供支撑,具有重要的现实意义,能够为油田节能、增产提供助力。

碳酸盐岩多矿物反演需要先建立地层体积物理模型和测井响应方程,而后使用常规测井资料进行最优化解释,从而实现矿物组分反演,总体上,可以分为以下几个步骤(图8):

1)对测井曲线进行环境校正、均一化,优选校正后的、能够真实反映目的层地质特征的测井曲线组合;2)确定多矿物体积模型,建立测井响应方程,优选区域性地质解释参数;3)建立多矿物反演地质约束条件;4)反演各测井曲线理论测井值并与实际测

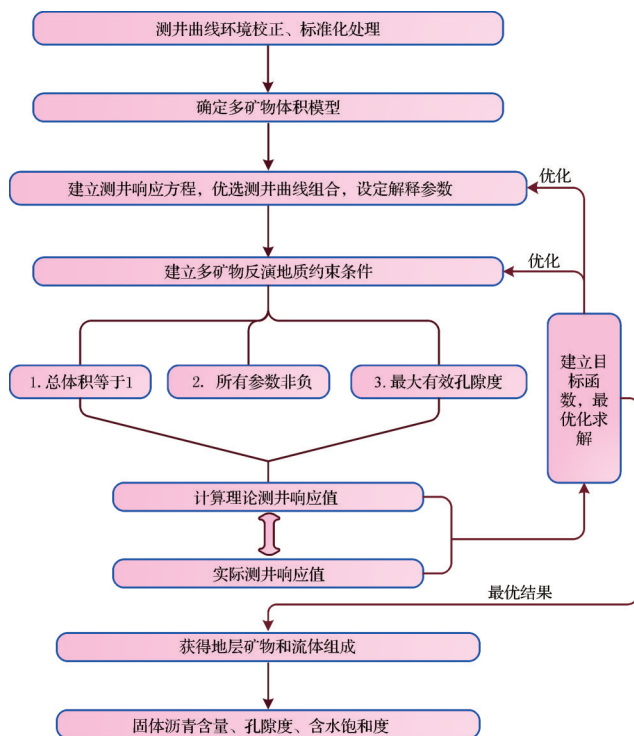


图8 多矿物体积模型反演流程

Fig.8 Flow diagram of inversion interpretation using multi-minerals-volumetric model

井曲线进行比较;建立目标函数,借助最优化求解不断调整参数值,当反演测井曲线与实测测井曲线逼近时,求得的矿物组成即为实际地层矿物组成。

### 3.2.1 简化的多矿物反演体积模型

建立多矿物反演体积模型是进行矿物反演的基础。建立模型的过程中,并不需要将所有矿物组分都纳入模型中,也不需要9条常规测井曲线均用于反演。反演的测井曲线并不是越多越好,相反,当选择的测井曲线过多时,反而会降低模型的准确性。本论文优选了DEN、RT、 $R_{xo}$ 、AC、CNL五条测井曲线进行反演。

灯四段致密白云岩储层矿物组成以白云石(DOL)、方解石(CAL)、石英(Qtz)为主,泥质含量很低;与以往的测井解释体积模型略微不同,本研究并未将固态沥青(Bitumen)作为流体的一部分,而是作为基质的一部分进行研究;而孔隙流体则由水(Water)和天然气(Gas)构成。综上,确定了如图9所示的多矿物测井响应体积模型。

### 3.2.2 多矿物反演体积模型响应方程

使用线性模型对多矿物响应进行研究,响应方程具有如下通用形式:

$$\text{测井响应} = \sum V_i \times R_i \quad (1)$$

其中: $V_i$ 为某种组分的体积百分数,%; $R_i$ 为该组分体积为100%时的测井响应。

与测井响应体积模型相对应的,对每一个深度点,均有如下测井响应方程组:

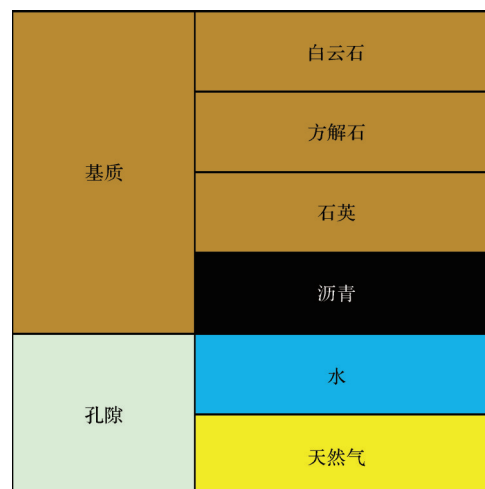


图9 四川盆地上震旦统灯四段碳酸盐岩地层多矿物测井响应体积模型

Fig.9 Multi-mineral-volumetric model for logging response of the fourth member of Dengying Formation, Upper Sinian, Sichuan Basin



$$\left\{ \begin{array}{l}
 RE(DEN) = DEN_{DOL}V_{DOL} + DEN_{CAL}V_{CAL} + DEN_{Qtz}V_{Qtz} + DEN_{Bitumen}V_{Bitumen} + DEN_{\Phi}\Phi \\
 RE(RT) = RT_{DOL}V_{DOL} + RT_{CAL}V_{CAL} + RT_{Qtz}V_{Qtz} + RT_{Bitumen}V_{Bitumen} + RT_{\Phi}\Phi \\
 RE(Rxo) = Rxo_{DOL}V_{DOL} + Rxo_{CAL}V_{CAL} + Rxo_{Qtz}V_{Qtz} + Rxo_{Bitumen}V_{Bitumen} + Rxo_{\Phi}\Phi \\
 RE(AC) = \frac{\Phi}{AC_{\Phi}} + \frac{(1-\Phi)^2}{\frac{AC_{DOL}V_{DOL} + AC_{CAL}V_{CAL} + AC_{Qtz}V_{Qtz} + AC_{Bitumen}V_{Bitumen}}{AC_{DOL} + AC_{CAL} + AC_{Qtz} + AC_{Bitumen}}} \quad (Raymer \text{ model}) \\
 RE(CNL) = CNL_{DOL}V_{DOL} + CNL_{CAL}V_{CAL} + CNL_{Qtz}V_{Qtz} + CNL_{Bitumen}V_{Bitumen} + CNL_{\Phi}\Phi \\
 1 = V_{DOL} + V_{CAL} + V_{Qtz} + V_{Bitumen} + \Phi \\
 V_j > 0, \quad j = 1, 2, \dots, 5
 \end{array} \right. \quad (2)$$

式中:  $RE$  代表反演重构曲线,  $DEN$  为补偿密度测井,  $g/cm^3$ ;  $RT$  和  $R_{xo}$  分别代表原状地层、冲洗带地层电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;  $AC$  为声波时差,  $\mu s/ft$ ;  $CNL$  为补偿中子测井,  $v/v$  或%;  $\Phi$  为有效孔隙度, %;  $V$  为体积百分比, %。

由于四川盆地上震旦统灯影组和下寒武统龙王庙组具有共同的烃源岩(筇竹寺组), 在灯四段和龙王庙组中均普遍发育固态沥青, 此外, 二者层位临近、埋藏演化史相近, 虽然在地球化学等微观指标上, 二者存在一些差别, 但地球物理响应可近似等价处理。因此, 在文献调研的基础上, 直接采用赖强等<sup>[20]</sup>对安岳气田龙王庙组固态沥青所做的岩电实验结果进行储层多矿物体积模型反演——沥青的密度为  $1.3 g/cm^3$ , 声波时差为  $393.7 \mu s/ft$ 。由于本地区沥青演化程度高, 含氢指数低, 故以 45% 进行计算; 而电阻率为异常高值, 以灯四段的  $RT$  响应高值进行计算,  $90\ 000 \Omega \cdot m$ ; 其他测井响应参数参考

Schlumberger 公司的矿物测井响应参数。

从本质上说, 多矿物体积模型反演过程是线性或者非线性约束条件下的最优化求解过程, 最优化算法的选择对于反演结果影响较大。最优化求解的过程, 是建立目标函数、求解反演测井响应与实际测井响应之间的偏差、并不断调整参数使这种偏差最小化的过程。此外, 在最优化求解过程中, 还需要设定一些边界条件/限制条件, 使得模型求解的结果符合地质规律:

1) 矿物和流体的体积比均需在 (0,1) 区间内, 并且, 矿物和流体体积总和为 1; 2) 理论上, 多矿物体积模型的孔隙度需在 (0,1) 区间内, 而本研究区白云岩储层测井孔隙度主峰位于 0~5% 之间, 因此, 增设反演限定条件: 将孔隙度模型中的孔隙度上限设置为 5% (个别井如果出现异常, 可适当调整); 目标函数 (Min) 和约束条件可以表示为:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 Min = \left| \frac{RE(DEN) - DEN}{DEN} \right|^2 + \left| \frac{RE(RT) - RT}{RT} \right|^2 + \left| \frac{RE(R_{xo}) - R_{xo}}{R_{xo}} \right|^2 + \left| \frac{RE(AC) - AC}{AC} \right|^2 \\
 \quad + \left| \frac{RE(CNL) - CNL}{CNL} \right|^2 + M \times \left| \sum_{i=1}^5 V_i + \Phi - 1 \right|^2 \\
 \sum V_i = 1 \\
 0 \leq V_i < 1 \\
 0 \leq \Phi \leq 0.05
 \end{array} \right. \quad (3)$$

式中,  $M$  为惩罚因子,  $Min$  指代求解最小值,  $RE$  (reconstructed) 为重建的理论测井响应值。

### 3.2.3 反演模型标定

从本质上看, 多矿物体积模型反演法属于数理统计方法中的概率统计法的一种, 其结果存在多解性, 即存在数学统计角度的多种“正确”的结果。因此, 需要使用多手段对求解结果进行标定, 多角度验证模型的地质有效性。以磨溪 9 井为例, 反演结果如图 10 所示, 可以从以下几个方面来标定、评估模型的有效性。

#### (1) 重构测井曲线标定

从图 10 可以直观看出, 重构的测井曲线 ( $DEN$ 、 $CNL$ 、 $AC$ 、 $RT$ 、 $R_{xo}$ ) 均与原始测井曲线“贴合”良好, 指示重构曲线的精度较高。为进一步定量评价, 借助散点图, 以  $DEN$  为例, 对重构的测井曲线 ( $DEN_{RE}$ ) 与原始测井曲线 ( $DEN$ ) 之间的关系进行分析 (图 11)。散点图显示拟合曲线的斜率达到 0.83, 确定系数达到 95.4%, 指示重构精度良好。

#### (2) 反演岩性剖面标定

从反演的岩性剖面可以看出, 除了顶部有一小

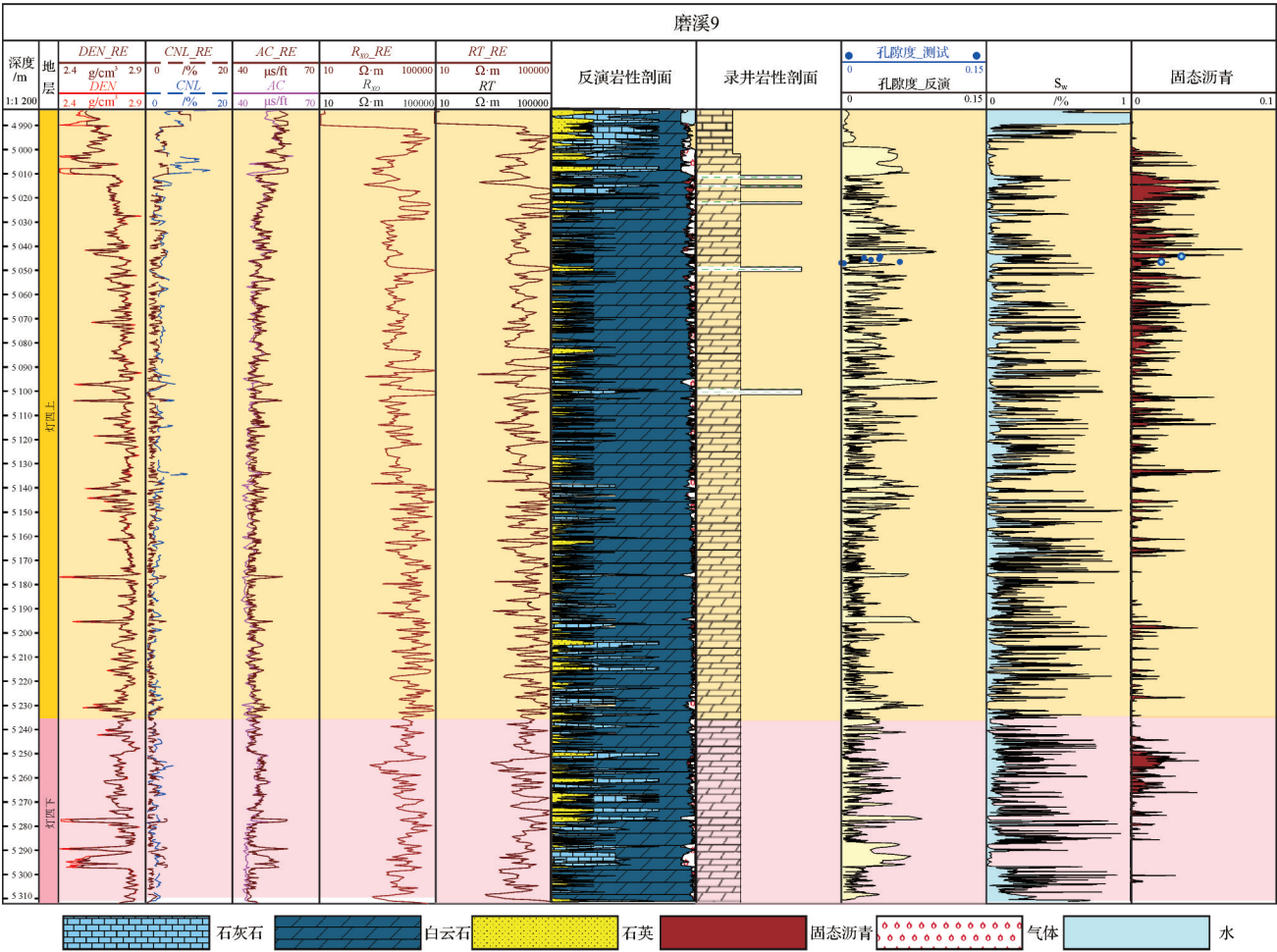


图 10 磨溪 9 井灯四段多矿物反演重构曲线特征

Fig.10 The features of reconstructed logging curves of the fourth member of Dengying Formation, Moxi9 well

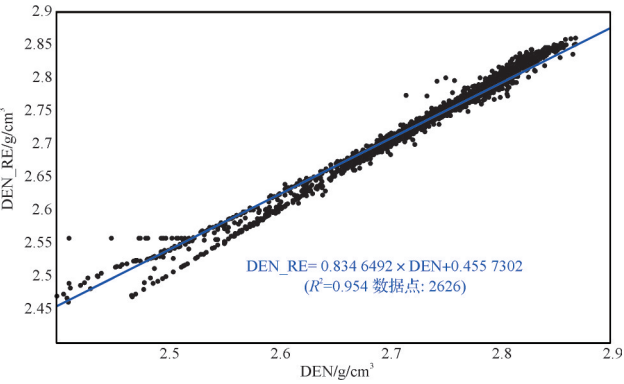


图 11 重构测井曲线 (DEN\_RE) 与原始测井曲线 (DEN) 交会图

Fig.11 Cross-plot of reconstructed logging curve (DEN\_RE) versus original logging curve (DEN)

段岩性组成以石灰石为主,灯四段主体以显著的白云石主导为特征。这与灯四段“除顶部有一小段灰岩,整体为白云岩储层”的地质认识是相符的。多矿

物体积模型反演所得的岩性剖面与录井岩性剖面匹配度达到 95% 以上。此外,反演岩性剖面还反映出灯四段中含有较多“富石英”夹层。这些“富石英”夹层与录井剖面所识别的硅质岩夹层匹配性较好,进一步说明了多矿物体积模型反演的岩性剖面能够较好地反映纵向岩性变化。值得一提的是,反演所得硅质岩层段储层致密、反演孔隙度低、储层固态沥青含量低,与实际情况相符。

(3) 反演孔隙度校正

反演所得的有效孔隙度与全直径岩芯实测孔隙度匹配度高(图 10 右数第三道),验证了模型的有效性。

(4) 反演含气性标定

反演结果显示:灯四段整体含气,上亚段含气性优于下亚段,这与磨溪 9 井的含气性测试所反映的结果一致。



(5) 反演固态沥青含量标定

对磨溪9井5 044.7 m、5 047.2 m两个深度的铸体薄片进行镜下观察,并分别挑选5个典型镜下照片进行图像法固态沥青定量分析,将分析结果取平均值,用于标定测井反演所得的固态沥青含量。对比结果(如表2)显示,两个深度的测井反演固态沥青含量与图像法求得的固态沥青含量较为接近,绝对误差分别为0.27%和0.36%。考虑到固态沥青分布的强非均质性,该结果能够较好地证明多矿物反演体积模型预测固态沥青含量的有效性。

(6) 沥青含量纵向分布规律

磨溪9井灯四上亚段的沥青含量总体高于下亚段,这与研究区油气来源主要为灯四段顶部的筇竹寺组、油气充注在垂向上的方向为自上而下倒灌有关。从油气充注成藏的角度来看,模拟结果符合地质规律。磨溪9井灯四段储层固态沥青含量(图12)最大可达7.73%,平均值为0.64%。值得注意的是,2 626个数据点的75%分位点在0.87%,而90%分位

点在2.36%,指示磨溪9井纵向上约有10%的层段储层固态沥青含量高于2.36%。由于该井灯四段有效孔隙度平均值为1.93%(最大值10.87%,最小值0.01%),固态沥青在孔隙空间平均占比约为31%。该统计结果与镜下、岩芯观察得到的沥青处于半充填状态的地质认识是一致的。

通过以上6个方面的验证,一方面,证明了在本研究区使用多矿物体积模型反演储层固态沥青含量的可靠性;另一方面,也凸显出使用多矿物体积模型反演相比于其他测井方法评价储层固态沥青的优越性:不仅能够反演储层固态沥青含量,还能同时提供纵向连续的地层矿物组成、孔隙度、含气性等信息,支撑深层、超深层致密碳酸盐岩储层甜点区评价、非常规油气成藏与资源潜力评价等方面的研究,推动非常规油气沉积学理论在深层、超深层领域的发展<sup>[23]</sup>。

4 沥青平面分布

利用建立的多矿物体积模型对研究区74口井进行反演,计算储层固态沥青含量。以杨跃明等<sup>[24]</sup>制作的灯四段沉积微相展布图为底图,绘制研究区储层固态沥青体积含量平面分布图(图13)。目前普遍将磨溪以北地区称为川中古隆起北斜坡,从马奎等<sup>[25]</sup>制作的构造图来看,基本可以将磨溪22井—磨溪23井一线以北地区视为川中古隆起北斜坡地区,而南部为继承性古隆起区(主体为高石梯—磨溪—龙女寺地区)。继承性古隆起区于加里东期定型后,继承性发育,古油藏原油聚集成藏并于燕山期原位裂解、原位聚集形成天然气藏<sup>[9]</sup>,保存至今<sup>[24]</sup>。川中古隆起北斜坡与继承性古隆起区在印支晚期前构造演化基本一致,而在印支晚期—喜马拉雅期发生了明显分异<sup>[25]</sup>,逐渐形成了当今的构造格局。

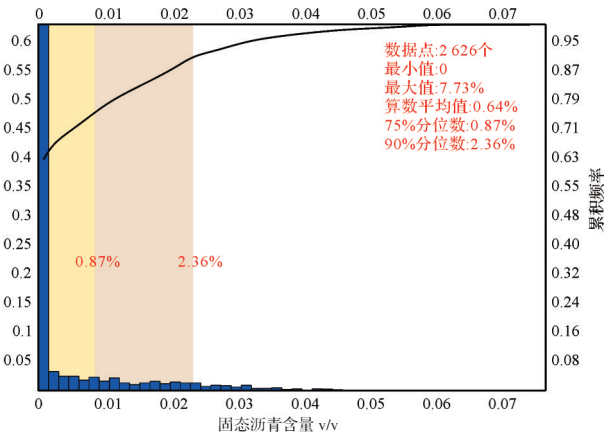


图12 磨溪9井灯四段固态沥青含量(体积百分数)频率分布直方图

Fig.12 Histogram of solid bitumen content (volumetric fraction) of the fourth member of Dengying Formation, Moxi9 Well

表2 图像法标定测井反演固态沥青含量

| Table 2 Calibration of Solid Bitumen Content Obtained by Logging Inversion Using Image Processing Method |    |         |          |          |       |         |              |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|---------|----------|----------|-------|---------|--------------|------------|
| 深度/m                                                                                                     | 编号 | 总面积/像素点 | 沥青面积/像素点 | 铸体面积/像素点 | 面孔率/% | 沥青面孔率/% | 图像法沥青体积平均值/% | 测井反演沥青体积/% |
| 5 044.7                                                                                                  | 1  | 4915200 | 146837   | 272647   | 8.53  | 2.99    | 3.27         | 3.54       |
|                                                                                                          | 2  | 4915200 | 47240    | 60834    | 2.20  | 0.96    |              |            |
|                                                                                                          | 3  | 4915200 | 7728     | 401865   | 8.33  | 0.16    |              |            |
|                                                                                                          | 4  | 4915200 | 269473   | 606183   | 17.82 | 5.48    |              |            |
|                                                                                                          | 5  | 4915200 | 331165   | 554422   | 18.02 | 6.74    |              |            |
| 5 047.2                                                                                                  | 6  | 4915200 | 30745    | 390122   | 8.56  | 0.63    | 1.78         | 2.14       |
|                                                                                                          | 7  | 4915200 | 188002   | 113634   | 6.14  | 3.82    |              |            |
|                                                                                                          | 8  | 4915200 | 42877    | 109933   | 3.11  | 0.87    |              |            |
|                                                                                                          | 9  | 4915200 | 76658    | 85288    | 3.29  | 1.56    |              |            |
|                                                                                                          | 10 | 4915200 | 98543    | 48038    | 2.98  | 2.00    |              |            |

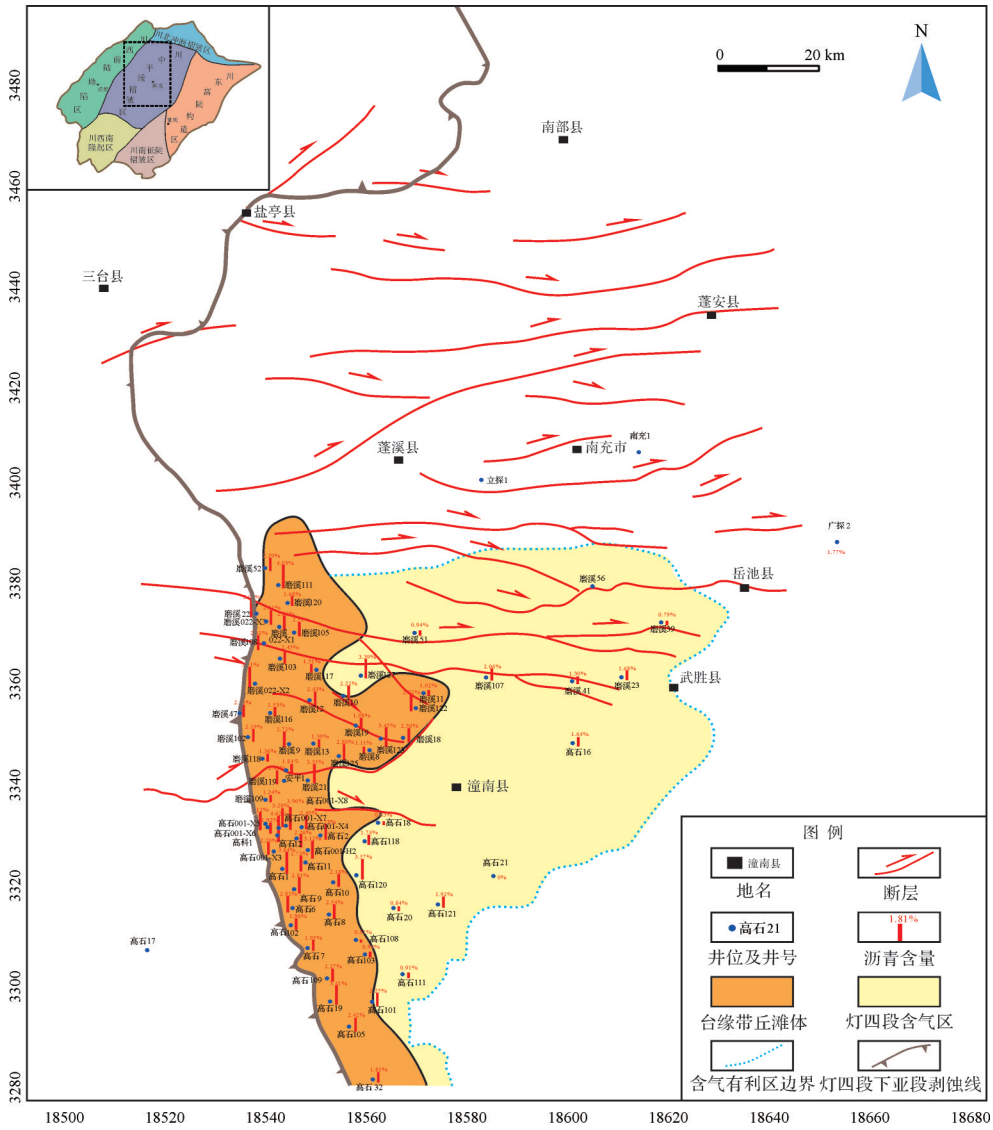


图 13 研究区灯四段固态沥青含量平面展布图(基于文献[24])

Fig.13 Plane distribution of solid bitumen content of the fourth member of Dengying Formation in the research area (modified from reference[24])

4.1 继承性古隆起区沥青分布特征

总体上,继承性古隆起区灯四段储层普遍含有固态沥青,这是由天然气的原油裂解成因决定的,说明原油在地史时期曾普遍分布于研究区灯四段储层。沥青含量最大可达4.62%,平均为2.20%。

从东—西向来看,西侧邻近德阳—安岳裂陷槽的台缘带礁滩体固态沥青含量普遍较高,而东侧的台内含气区固态沥青含量则相对较低。一方面,这可能与德阳—安岳裂陷槽的烃源岩与高石梯—磨溪地区的台缘带礁滩体形成侧接式匹配、油气在平面上自西向东充注有关;另一方面,台缘带礁滩体的物性普遍较优,导致固态沥青含量在台缘带礁滩体普遍较高。

此外,除整体展现出来的规律之外,含气区存在个别固态沥青高值点、台缘带礁滩体存在个别固态沥青低值点,体现了储层的强非均质性。

从南—北向来看,在磨溪—高石梯地区,不论是台缘带礁滩体还是台内含气区,固态沥青含量并无明显南北差异。这从侧面上进一步证实了油气充注成藏以自西向东为主,造成了南北分异较小。

4.2 川中古隆起北斜坡沥青分布特征

随着安岳气田龙王庙、灯影组气藏开发逐渐深化,亟需寻找天然气接替领域—与古隆起紧邻的斜坡带。川中古隆起北斜坡(磨溪地区以北)成为当前勘探的重点区域。从加里东至印支晚期,斜坡区同样处



于构造高部位,是油气长期运移的优势方位;继续探索斜坡区的古油藏分布、规模、成藏机制对深化川中地区超深层油气勘探开发具有重要理论和实践意义。

从图13可以看出,紧邻磨溪的北斜坡南侧地区灯四段普遍含有固态沥青,钻井也证实了其含气性。偏北的磨溪56井、南充1井、立探1井等,由于尚未钻至灯影组,导致无法进行测井固态沥青定量评价。然而,这些井的龙王庙组均揭示固态沥青充填严重<sup>[24]</sup>,证实了古油藏的形成。研究区龙王庙组、灯影组储层中的天然气均源于筇竹寺组,这些井的龙王庙组含气性好、固态沥青充填严重,从一定程度上可以预示其灯影组也具有较好的含气性。此外,北斜坡的广探2井灯四段固态沥青含量为1.77%,这不仅直接证实了川中古隆起北斜坡古油藏的存在;还从侧面上印证了马奎等<sup>[24]</sup>关于研究区构造分异模拟的结论——川中古隆起北斜坡在印支晚期之前均形成了古油藏,只是在印支晚期之后并发生了油气裂解并且构造分异。通过对川中古隆起北斜坡固态沥青分布的分析,本文从沥青的角度证实了北斜坡震旦系灯四段古油藏的存在,印证了北斜坡的油气成藏潜力。

## 5 结论

(1) 通过建立多矿物体积模型(以白云石、方解石、石英、固态沥青为基质,以天然气和地层水为流体),优选常规测井曲线组合( $DEN-RT-R_{xo}-CNL-AC$ )对储层固态沥青进行反演,不仅能克服深层、超深层致密碳酸盐岩储层的强非均质性,精确计算储层固态沥青含量;还能同时提供纵向连续的地层矿物组成、孔隙度、含气性等信息,支撑储层其他方面的研究。

(2) 灯四段沥青多以半充填状态存在于孔隙中,储层固体含量可达4.62%,平均为2.20%;纵向上,灯四段上亚段固态沥青含量普遍高于灯四段下亚段。

(3) 高石梯—磨溪地区与德阳—安岳裂陷槽紧邻的台缘礁滩体是古油藏聚集的有利区域,储层固态沥青含量普遍高于东侧的含气区。

(4) 受自西向东油气充注控制,高石梯—磨溪地区南北向固态沥青含量无明显差异。古隆起北斜坡多口井固态沥青的存在证实了北斜坡古油藏的存在,从侧面印证了北斜坡的油气成藏潜力。从固态沥青的角度,肯定了继续深化川中古隆起北斜坡深层、超深层油气勘探的必要性。

## 参考文献(References)

- [1] 刘丹,李剑,谢增业,等. 川中震旦系灯影组原生一同层沥青的成因及意义[J]. 石油实验地质, 2014, 36(2): 218-223, 229. [Liu Dan, Li Jian, Xie Zengye, et al. Origin and significance of Sinian original and coexist bitumen of central Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2014, 36(2): 218-223, 229.]
- [2] 李勇,陈世加,尹相东,等. 储层中固体沥青研究现状、地质意义及其发展趋势[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(3): 732-746. [Li Yong, Chen Shijia, Yin Xiangdong, et al. Research status, geological significance and development trend of solid bitumen in reservoirs[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(3): 732-746.]
- [3] Mastalerz M, Drobnik A, Stankiewicz A B. Origin, properties, and implications of solid bitumen in source-rock reservoirs: A review[J]. International Journal of Coal Geology, 2018, 195: 14-36.
- [4] Li Y, Chen S J, Lu J G, 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.
- [5] Liu S G, Zhang Z J, Huang W M, et al. Formation and destruction processes of upper Sinian oil-gas pools in the Dingshan-Lintanchang structural belt, southeast Sichuan Basin, China[J]. Petroleum Science, 2010, 7(3): 289-301.
- [6] 高平. 川中地区震旦系沥青的成因及来源[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016. [Gao Ping. Origin and source of Sinian bitumen in the central Sichuan Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2016.]
- [7] 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.]
- [8] 周正,王兴志,谢林,等. 川中地区震旦系灯影组储层特征及物性影响因素[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(5): 701-708. [Zhou Zheng, Wang Xingzhi, Xie Lin, et al. Reservoir features and physical influences of the Sinian Dengying Formation(Sinian) in central Sichuan, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(5): 701-708.]
- [9] 邹才能,杜金虎,徐春春,等. 四川盆地震旦系—寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 278-293. [Zou Caineng, Du Jinhu, Xu Chunchun, et al. Formation, distribution, resource potential and discovery of the Sinian-Cambrian giant gas field, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 278-293.]
- [10] 吴伟,罗冰,罗文军,等. 再论四川盆地川中古隆起震旦系天

- 然气成因[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(8): 1447-1453. [Wu Wei, Luo Bing, Luo Wenjun, et al. Further discussion about the origin of natural gas in the Sinian of central Sichuan paleo-uplift, Sichuan Basin, China [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(8): 1447-1453. ]
- [11] 魏国齐, 杜金虎, 徐春春, 等. 四川盆地高石梯—磨溪地区震旦系—寒武系大型气藏特征与聚集模式[J]. 石油学报, 2015, 36(1): 1-12. [Wei Guoqi, Du Jinhu, Xu Chunchun, et al. Characteristics and accumulation modes of large gas reservoirs in Sinian-Cambrian of Gaoshiti-Moxi region, Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(1): 1-12. ]
- [12] 袁海锋, 刘勇, 徐昉昊, 等. 川中安平店-高石梯构造震旦系灯影组流体充注特征及油气成藏过程[J]. 岩石学报, 2014, 30(3): 727-736. [Yuan Haifeng, Liu Yong, Xu Fanghao, et al. The fluid charge and hydrocarbon accumulation, Sinian reservoir, Anpingdian-Gaoshiti structure, central Sichuan Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(3): 727-736. ]
- [13] 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. ]
- [14] 徐国盛, 袁海锋, 马永生, 等. 川中—川东南地区震旦系一下古生界沥青来源及成烃演化[J]. 地质学报, 2007, 81(8): 1143-1152. [Xu Guosheng, Yuan Haifeng, Ma Yongsheng, et al. The source of Sinian and Lower-Palaeozoic bitumen and hydrocarbon evolution in the middle and southeast of the Sichuan Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(8): 1143-1152. ]
- [15] 王国芝, 刘树根, 刘伟, 等. 川中高石梯构造灯影组油气成藏过程[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2014, 41(6): 684-693. [Wang Guozhi, Liu Shugen, Liu Wei, et al. Process of hydrocarbon accumulation of Sinian Dengying Formation in Gaoshiti structure, central Sichuan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2014, 41(6): 684-693. ]
- [16] 丛琳, 李志军. 沥青质的测井响应特征及对储层物性参数的影响[J]. 油气田地面工程, 2011, 30(2): 28-29. [Cong Lin, Li Zhijun. Well logging response characteristics of asphaltine and the effect on parameter of reservoir physicality [J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2011, 30(2): 28-29. ]
- [17] 葛祥, 周贤杰, 张世懋. 中东Y油田碳酸盐岩油藏沥青层测井评价[J]. 测井技术, 2018, 42(2): 149-155. [Ge Xiang, Zhou Xianjie, Zhang Shimao. Log evaluation of bitumen intervals in a carbonate reservoir in the Y oilfield, Middle East area [J]. Well Logging Technology, 2018, 42(2): 149-155. ]
- [18] 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. ]
- [19] 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. ]
- [20] 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. ]
- [21] 刘树根, 马永生, 黄文明, 等. 四川盆地上震旦统灯影组储集层致密化过程研究[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(4): 485-496. [Liu Shugen, Ma Yongsheng, Huang Wenming, et al. Densification process of upper Sinian Dengying Formation, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(4): 485-496. ]
- [22] 方少仙, 侯方浩, 董兆雄. 上震旦统灯影组中非叠层石生态系兰细菌白云岩[J]. 沉积学报, 2003, 21(1): 96-105. [Fang Shaonian, Hou Fanghao, Dong Zhaoxiong. Non-stromatolite ecological system cyanobacteria dolostone in Dengying Formation of Upper-Sinian [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(1): 96-105. ]
- [23] 邱振, 邹才能. 非常规油气沉积学: 内涵与展望[J]. 沉积学报, 2020, 38(1): 1-29. [Qiu Zhen, Zou Caineng. Unconventional petroleum sedimentology: Connotation and prospect [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2020, 38(1): 1-29. ]
- [24] 杨跃明, 杨雨, 杨光, 等. 安岳气田震旦系、寒武系气藏成藏条件及勘探开发关键技术[J]. 石油学报, 2019, 40(4): 493-508. [Yang Yueming, Yang Yu, Yang Guang, et al. Gas accumulation conditions and key exploration & development technologies of Sinian and Cambrian gas reservoirs in Anyue gas field [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(4): 493-508. ]
- [25] 马奎, 沈平, 汪泽成, 等. 从“四古”特征论四川盆地川中古隆起北斜坡龙王庙组天然气勘探潜力[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(10): 1451-1464. [Ma Kui, Shen Ping, Wang Zecheng, et al. Natural gas exploration potential of Longwangmiao Formation on the north slope of Chuanzhong paleo-uplift from the characteristics of “Four Paleo” [J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(10): 1451-1464. ]

## Logging Evaluation of Solid Bitumen in Tight Carbonate in Deep-buried and Ultra-deep-buried Strata of the Central Sichuan Basin

SONG ZeZhang<sup>1,2</sup>, LIU GuangDi<sup>1,2</sup>, LUO Bing<sup>3</sup>, ZENG QingCai<sup>4</sup>, TIAN XingWang<sup>3</sup>, DAI Xin<sup>3</sup>,  
JIANG Ren<sup>1,2</sup>, WANG YunLong<sup>3</sup>, LI Qiang<sup>1,2</sup>, ZHAO JunYi<sup>1,2</sup>, ABULA Abide<sup>1,2</sup>, ZANG JianPeng<sup>1,2</sup>

1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Southwest Oil and Gas Field Company PetroChina, Chengdu 610041, China

4. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China

**Abstract:** The accumulation and evolution of unconventional oil and gas, locating sweet spots and quantitative evaluation of resource potential in ultra-deep, ultra-old strata are the major difficulties in unconventional petroleum sedimentology. The development of relevant quantitative evaluation techniques and theories is of practical significance to promote "two deep and one unconventional" petroleum exploration policy in China. Solid bitumen is direct evidence of the existence of paleo-reservoirs, which is of great theoretical and practical significance to explore the distribution, scale and petroleum accumulation mechanism of paleo-reservoirs, and to demonstrate the exploration potential of oil and gas in the study area. In this paper, the fourth member of the Dengying Formation of Upper Sinian in Central Sichuan was taken as the research object. Firstly, the solid bitumen was characterized by core observation, microscopic observation in thin section and image processing method. Then, a multi-mineral volumetric model was established, and the inversion of the solid bitumen was carried out with the aid of the conventional logging curve combination ( $DEN-RT-R_{xo}-CNL-AC$ ), which overcame the substantial heterogeneity of the distribution of solid bitumen and quantitatively evaluated the content and distribution of the solid bitumen in the fourth member of the Dengying Formation. The results show that: (1) Most of the Dengsi member bitumens exist in the pores in a half-filled state, and the solid content of the reservoir can reach 4.62%, with an average value of 2.20%; vertically, the content of the solid bitumen in the upper subsection of the fourth member of Dengying Formation is generally higher than that in the lower subsection. (2) The reef-flat facies in the platform margin of Gaoshiti-Moxi area, which closed to the Deyang-Anyue rift trough, are the desirable areas for the formation of paleo-oil-reservoirs. The content of solid bitumen in reef-flat facies is generally higher than that in the eastern gas-bearing area. (3) There is no significant difference in the content of solid bitumen in the north-south direction due to oil charging from west to East. The existence of solid bitumen in the fourth member of Dengying formation in the north slope of the paleo-uplift confirms the existence of the paleo oil reservoir in the north slope and also confirms the oil and gas resources potential of the north slope from the side. From the point of view of solid bitumen, it is necessary to continue to deepen the deep and ultra-deep oil and gas exploration in the north slope of the Central Sichuan Paleo-Uplift.

**Key words:** solid bitumen; Dengying Formation; ultra-deep buried strata; the north slope of Central Sichuan Paleo-Uplift; Sichuan Basin