

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

李纯泉^{1,2}, 陈红汉^{1,2}, 肖雪薇^{1,2}, 汪泽成³, 姜 华³

[1. 中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学(武汉)资源学院石油地质系, 湖北 武汉 430074; 3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083]

摘要:拉曼光谱分析是刻画有机质成熟度的一种有效技术方法。通过对四川盆地中部高石梯-磨溪地区21块震旦系灯影组储层样品中的沥青开展系统的拉曼光谱分析,并用经验公式获取沥青的等效镜质体反射率,表征了沥青所处的成熟阶段,进而探讨了储层经历的热演化及改造作用。结果表明,高石梯-磨溪地区震旦系灯影组储层溶蚀孔洞及裂缝充填沥青绝大多数都处于高-过成熟阶段,占比达81.1%;沥青拉曼光谱参数在等效镜质体反射率3.0%处存在明显的转折点,构成两段式变化趋势特征。沥青等效镜质体反射率偏离正常演化趋势的异常高值,记录了储层经历的热异常,是明显的高温热流体活动响应,其空间上的分布特征反映了热流体活动的多期性,表明储层经历了多期热液蚀变改造,佐证了原油裂解成气而构成现今全是气藏分布的格局。

关键词:拉曼光谱;成熟度;储层沥青;灯影组;震旦系;高石梯-磨溪地区;四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Raman spectroscopy of bitumen from the Sinian Dengying Formation reservoirs, Gaoshiti-Moxi area, central Sichuan Basin

Li Chunquan^{1,2}, Chen Honghan^{1,2}, Xiao Xuewei^{1,2}, Wang Zecheng³, Jiang Hua³

[1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education·China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China; 2. Department of Petroleum Geology, School of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China; 3. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China]

Abstract: As an effective technique to characterize the maturity of organic matter, Raman spectroscopy was employed to analyze bitumen in 21 samples from the Sinian Dengying Formation reservoirs in the Gaoshiti-Moxi area, central Sichuan Basin. The equivalent vitrinite reflectance values of the bitumen were calculated with empirical equations to determine the maturity stage of the bitumen and the thermal alternation of reservoirs sampled. The results indicate that most bitumen (81.1 %) filled dissolved pores and fractures are highly to over mature. The Raman spectrums change drastically near the equivalent vitrinite reflectance of 3.0 %, suggesting a two-section evolving trend. Anomalous high equivalent vitrinite reflectance values are typical responses of hot fluid activities, indicating thermal anomalies experienced by the reservoirs. The spatial distribution of the equivalent vitrinite reflectance values also points to the possibility of multiple thermal alteration, which may serve to confirm the assumption that gas is generated from oil cracking and to explain the distribution of current gas reservoirs in the area.

Key words: Raman spectroscopy, maturity, reservoir bitumen, Dengying Formation, Sinian, Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin

引用格式: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. DOI:10.11743/ogg20220217.

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. DOI:10.11743/ogg20220217.

收稿日期:2020-08-07;修订日期:2022-01-20。

第一作者简介:李纯泉(1974—),男,博士、副教授,油气成藏和流体包裹体系统分析。E-mail: chunquanli@cug.edu.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05004-001)。

石油在运移和聚集过程中会因生物降解、热裂解、气侵等作用蚀变为沥青而残留在储层中,因而储层沥青具有重要的油气地质意义^[1-2],并在油气勘探开发中得到广泛应用。通过有机岩石学、焦化结构及有机地球化学特征等分析,储层沥青被用于油气成因及油气源对比^[3-5]、油气运聚机制探究^[6-8]、油气成藏期次及过程重建^[9-10]、古油藏形成和破坏判识^[11-12]等诸多方面。沥青的 Pb-Pb 同位素和 Re-Os 同位素分析^[13-15],是油气成藏年代学研究的重要手段。沥青反射率因与镜质体反射率具有良好的相关关系^[16-19],更是被用作重要的热成熟度指标。而在非常规页岩油气储层研究中,沥青不仅是热成熟度指标的体现,更是有机孔隙发育的主体^[20],显得尤为重要。

在储层沥青众多的应用中,最基本的就是对热的反映,因而储层沥青的成熟度刻画非常重要。除了沥青反射率的直接测定外,通过拉曼光谱分析获得拉曼参数,从而反映沥青等效镜质体反射率已得到越来越多的研究和应用^[21-22]。拉曼光谱分析可克服或者避免沥青的成因识别等问题,很好地反映不同演化阶段沥青的成熟度。本文将对四川盆地中部高石梯-磨溪地区震旦系灯影组储层沥青开展较为系统的拉曼光谱分析,以刻画其热成熟度特征,从而探讨储层所经历的热演化程度等相关科学问题。

1 区域地质概况

高石梯-磨溪地区位于四川盆地川中平缓构造带中南部,处于近南北向展布的德阳-安岳克拉通内裂陷槽的中东部,面积达 $2.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1a)。四川盆地是一个在上扬子克拉通基础上发展起来的大型叠合盆地,经历了多期构造运动的改造^[23]。具有多幕活动的桐湾运动对震旦纪一早寒武世的构造演化、储层发育、油气形成、油气运聚及调整改造具有重要影响^[24-29]。由桐湾运动形成的高石梯-磨溪古隆起,寒武系发育近东西向、北东向和北西向 3 组走滑断层(图 1b),从构造上控制了安岳震旦系-寒武系特大型气田的形成与分布^[30-32]。

高石梯-磨溪地区上震旦统灯影组与下伏下震旦统陡山沱组呈整合接触,与上覆下寒武统筇竹寺组呈不整合接触,按岩性自下而上可分为 4 段:灯一段,灯二段,灯三段以及灯四段(图 1c)。灯二段和灯四段发育富藻白云岩,为主要的储集层发育层段,灯三段部分发育灰黑色泥岩,为潜在的烃源岩层段。受构造运动及热流体活动蚀变影响^[33],灯影组古油藏早期遭受生

物降解、晚期经历热裂解破坏^[34-37]而形成现今的气藏格局,并在储层中残留大量沥青,充填于溶蚀孔洞、晶间孔及裂缝中^[38]。

2 样品和方法

用于沥青拉曼光谱分析的样品共 21 件,全为岩心样品,分别采自高石梯-磨溪地区的高石 102、磨溪 13、磨溪 39、磨溪 51、磨溪 105 和磨溪 109 共 6 口钻井的灯四段,各井的分布位置见图 1b,各井的具体样品信息见表 1。所采样品岩性均为白云岩,且裂缝和溶蚀孔洞发育。从岩心手标本和磨制的薄片可见裂缝和溶蚀孔洞具有两期沥青发育(图 2a—d)。镜下观察表明,早期沥青(Bit. 1)和晚期沥青(Bit. 2)均不发荧光(图 2f, i),前者介于基质白云石与裂缝或溶蚀孔洞充填白云石之间,颗粒细小且分散(图 2g, j),不适于激光拉曼分析,而后者充填于裂缝中心或溶蚀孔洞中残余孔隙空间,颗粒粗大且多为块状(图 2e—n),适于激光拉曼分析。晚期沥青为原油裂解成因^[34],反映了储层后期热改造过程。因此,本文主要对裂缝和溶蚀孔洞中充填的晚期沥青开展拉曼光谱分析,以反映储层经历的热演化程度。

沥青拉曼光谱分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,使用仪器为英国 Renishaw 公司的 RM-1000 型显微激光拉曼光谱仪。主要实验条件为:532 nm 波长 Ar⁺激光器,狭缝宽 25 μm ,抵达样品功率约 2 mW;显微镜观测物镜 50 倍,采谱范围 $900 \sim 2\,000 \text{ cm}^{-1}$,采谱时间 30 s,叠加次数 3 次。不同的拉曼光谱处理方法,其效果及对结果的影响不同^[39]。为避免过于复杂的分峰拟合等处理方法存在的较大人为因素影响,本次按照 Henry 等的处理方法^[40],所有谱线的处理均在 GRAMS/32 光谱数据处理软件中完成,统一以 900, 1 050, 1 850 和 $2\,000 \text{ cm}^{-1}$ 4 个拉曼位移点为控制点,经过 3 次多项式基线校准去背景值,平滑并标准化,从而获得各拉曼光谱参数。

拉曼光谱参数如图 3 所示,主要包括 4 类:①位置及高度参数,包括 D 峰、G 峰和鞍部 S 位置(W_D , W_C 和 W_S)及其相应高度(I_D , I_C 和 I_S);②距离参数,包括 D 峰、G 峰半峰宽($FWHM_D$ 和 $FWHM_C$)和峰间距(RBS);③比值参数,包括 D 峰、G 峰峰高比 $R_1(I_D/I_C)$ 和鞍部指数 $SI(I_C/I_S)$;④面积参数,指拉曼位移 $1\,100 \sim 1\,700 \text{ cm}^{-1}$ 所围限的面积 SSA。第一类是拉曼光谱形态刻画的基础性参数,而后 3 类除了刻画形态,更是

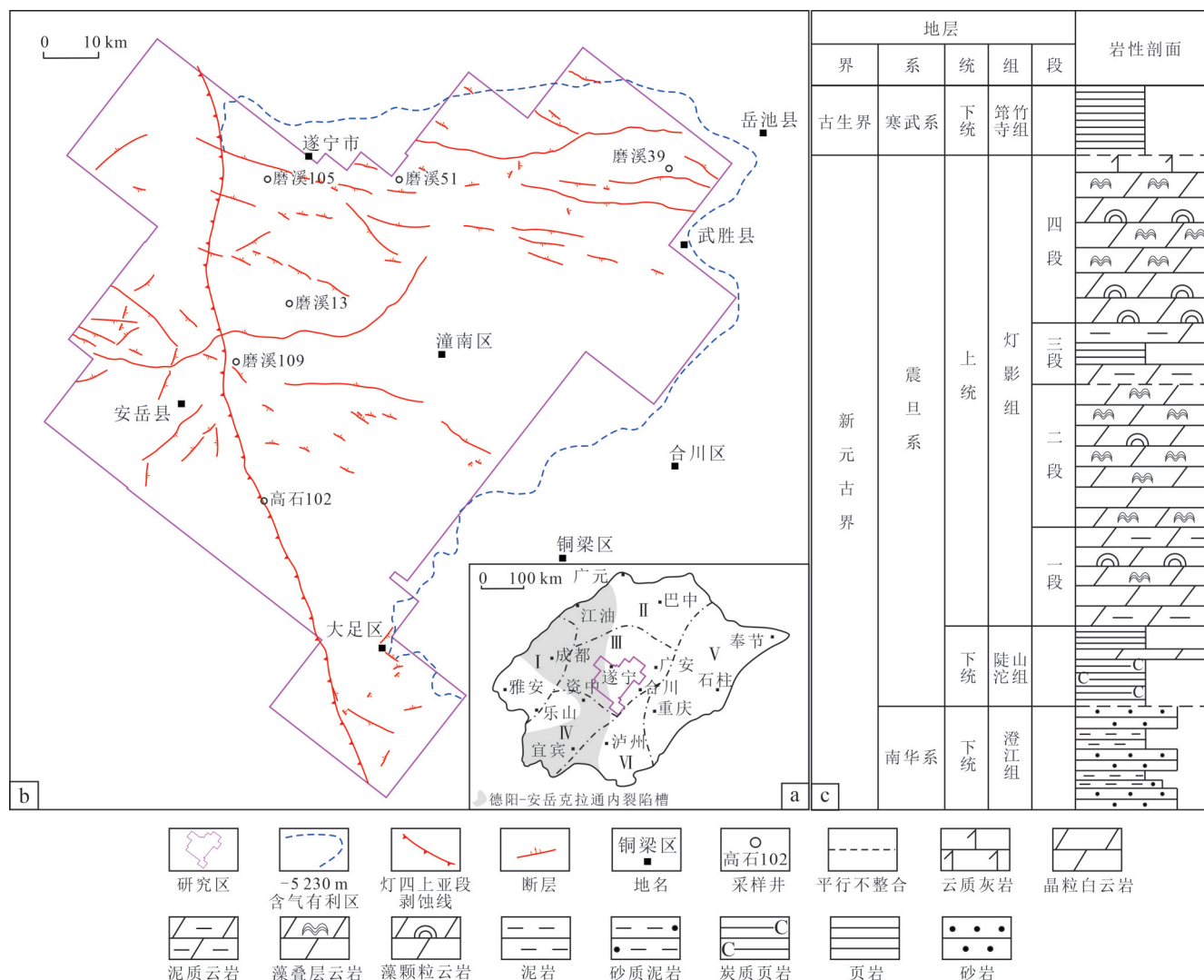


图1 高石梯-磨溪地区构造位置(a)及寒武系底界断裂构造(b)和震旦系地层柱状图(c)
Fig. 1 Sketch maps showing the locations of structures (a), the faults at the Cambrian bottom boundary (b), and the stratigraphic column of the Sinian system in the Gaoshiti-Moxi area

I. 川西低陡构造带; II. 川北低缓构造带; III. 川中平缓构造带; IV. 川西南低褶构造带; V. 川东高陡构造带; VI. 川南低陡构造带

作为成熟度指标等被广泛采用的参数。

3 拉曼光谱及其定量化结果

根据样品中沥青的发育情况以及测试的难易程度,每块样品中少则获得1个测点,多则获得3个测点,21块样品共获得39条激光拉曼光谱及其定量化拉曼参数(图4;表2)。在39条激光拉曼光谱中,有两条未能获得D峰半峰宽,且其形态等与其他光谱存在较大差异,因而在此标记为异常(图4中虚线光谱),不参与后续的分析。从表2和图4可以看出,本次获得的灯影组储层沥青拉曼光谱D峰位于 $1\,325 \sim 1\,335\text{ cm}^{-1}$,且具有单峰分布特征,主要集中于 $1\,327 \sim 1\,330\text{ cm}^{-1}$;G峰主要位于 $1\,598 \sim 1\,608\text{ cm}^{-1}$,且具有明

显的双峰分布特征,主要集中于 $1\,599 \sim 1\,601\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,603 \sim 1\,606\text{ cm}^{-1}$ 两个峰值范围;鞍部S位于 $1\,455 \sim 1\,487\text{ cm}^{-1}$,且具有单峰分布特征,主要集中于 $1\,462 \sim 1\,478\text{ cm}^{-1}$ 。

此外,在距离参数上,D峰较宽,其半峰宽 $FWHM_D$ 平均值为 155 cm^{-1} ,且变化范围较大,位于 $119 \sim 198\text{ cm}^{-1}$,而G峰较窄,其半峰宽 $FWHM_G$ 平均值为 62 cm^{-1} ,且变化范围较小,位于 $49 \sim 84\text{ cm}^{-1}$;D峰和G峰峰间距 RBS 平均值为 274 cm^{-1} ,变化范围为 $267 \sim 278\text{ cm}^{-1}$ 。比值参数中,D峰、G峰峰高比 R_1 的变化范围为 $0.60 \sim 0.72$,平均值为 0.67 ;鞍部指数 SI 的变化范围为 $2.99 \sim 5.96$,平均值为 4.53 。而面积参数 SSA 变化范围为 $330\,855 \sim 487\,656$,平均值为 $387\,969$ 。

表1 高石梯-磨溪地区震旦系灯影组储层沥青激光拉曼分析样品清单

Table 1 Bitumen samples for Raman spectroscopy analysis from the Sinian Dengying Formation of the Gaoshiti-Moxi area

井号	样品编号	深度/m	岩性及胶结物充填序次
高石 102	1	5 039. 62	砂屑白云岩,发育裂缝并充填白云石—Bit. 2—闪锌矿/石英
	2	5 051. 80	泥晶凝块石白云岩,溶蚀孔洞并充填白云石—Bit. 2—石英
	3	5 059. 50	白云岩,发育白云石脉,溶蚀孔充填白云石—Bit. 2
	4	5 063. 60	砂屑白云岩,溶洞充填白云石—石英—Bit. 2/闪锌矿
	5	5 065. 50	砂屑白云岩,溶洞充填白云石—Bit. 2—石英
	6	5 075. 25	砂屑白云岩,溶洞充填白云石—Bit. 2/石英
	7	5 087. 24	白云岩,溶洞充填白云石—Bit. 2—石英
	8	5 088. 53	白云岩,溶洞充填白云石—Bit. 2—石英
	9	5 092. 73	白云岩,溶洞充填白云石—Bit. 2—石英
	10	5 097. 40	白云岩,溶洞充填白云石—Bit. 2—石英
	11	5 110. 35	粉屑白云岩,溶洞充填粗晶白云石—Bit. 2/石英
	12	5 125. 33	泥晶凝块石白云岩,溶洞充填白云石—Bit. 2—石英
	13	5 137. 09	白云岩,发育裂缝并充填 Bit. 1—白云石—Bit. 2
	14	5 145. 80	粉屑白云岩,溶洞充填白云石—Bit. 2/石英
	15	5 174. 21	白云岩,溶洞充填白云石—Bit. 2—石英
	16	5 176. 65	白云岩,发育裂缝并充填白云石—Bit. 1—白云石—Bit. 2
磨溪 13	17	5 104. 72	白云岩,溶蚀孔洞充填白云石—Bit. 2—石英
磨溪 39	18	5 255. 68	纹层状白云岩,局部角砾化,溶洞充填白云石—Bit. 2
磨溪 51	19	5 370. 02	白云岩,溶蚀孔洞充填白云石—Bit. 2—石英
磨溪 105	20	5 357. 91	泥晶白云岩,溶蚀孔洞发育,且充填沥青—白云石
磨溪 109	21	5 128. 45	粒屑白云岩,溶蚀孔洞充填白云石+沥青+石英

注:Bit. 1 为早期沥青, Bit. 2 为晚期沥青。

4 讨论

4.1 热成熟度分布特征

在表征热成熟度方面,沥青反射率与镜质体反射率相关关系的有效性和适用范围得到进一步的评价^[41-43]。有机质拉曼光谱分析因拉曼参数与镜质体反射率之间的相关关系而成为热成熟度评价的一种有效技术方法并得以应用^[44-45],且已建立多种拉曼参数计算等效镜质体反射率的经验关系式^[21-22,40]。沥青作为有机质热演化的中间产物,其拉曼光谱特征反映了所经历的热成熟程度。鉴于前人研究成果表明拉曼参数中G峰半峰宽与镜质体反射率关系最好,且本文是根据 Henry 等^[40]的处理方式获得的各项拉曼参数,因此采用其建立的相关关系式计算灯影组储层沥青的等效镜质体反射率 eqR_h ,其结果见表2。

由表2可知,不考虑异常拉曼光谱的结果,计算获得的等效镜质体反射率均在成熟范围以上,最小值为0.64%,最大值为4.94%,平均值为2.66%。前人获得四川盆地灯影组储层随机沥青反射率平均值为3.39%^[38],由丰国秀和陈盛吉^[16]论文中建立的公式

(3)换算成等效镜质体反射率为2.62%,与本次获得的等效镜质体反射率平均值非常吻合。从等效镜质体反射率统计直方图(图5)可以看出,高石梯-磨溪地区震旦系灯影组储层沥青的等效镜质体反射率绝大部分都大于1.3%,处于高-过成熟阶段,占比达81.1%,等效镜质体反射率大于2.0%(过成熟阶段)的占比达64.9%,说明灯影组储层经历了较高的热改造作用,也佐证了原油裂解过程的存在。由图5还可直观看出,磨溪地区灯四段的沥青等效镜质体反射率总体较高(分布范围:2.46%~4.94%,平均值为3.82%),普遍高于高石梯地区灯四段的沥青等效镜质体反射率(分布范围:0.64%~4.15%,平均值为2.28%)。

4.2 拉曼峰特征与成熟度关系

沥青具有多种成因机制^[38,41],可以形成于油气的生、运、聚、散等过程中,具体表现为不同的热成熟度阶段产物。原油裂解实验表明不同热成熟度阶段形成的沥青,其拉曼光谱特征(主要体现在拉曼峰位)也表现出一些与成熟度相关的规律性变化^[46-47]。随着有机质成熟度增加,拉曼光谱的G峰和D峰均表现出变窄的趋势^[22,48-49],高石102井灯影组储层沥青的分析结果也表现出该趋势,即G峰和D峰半峰宽均减小(图6e,f)。关

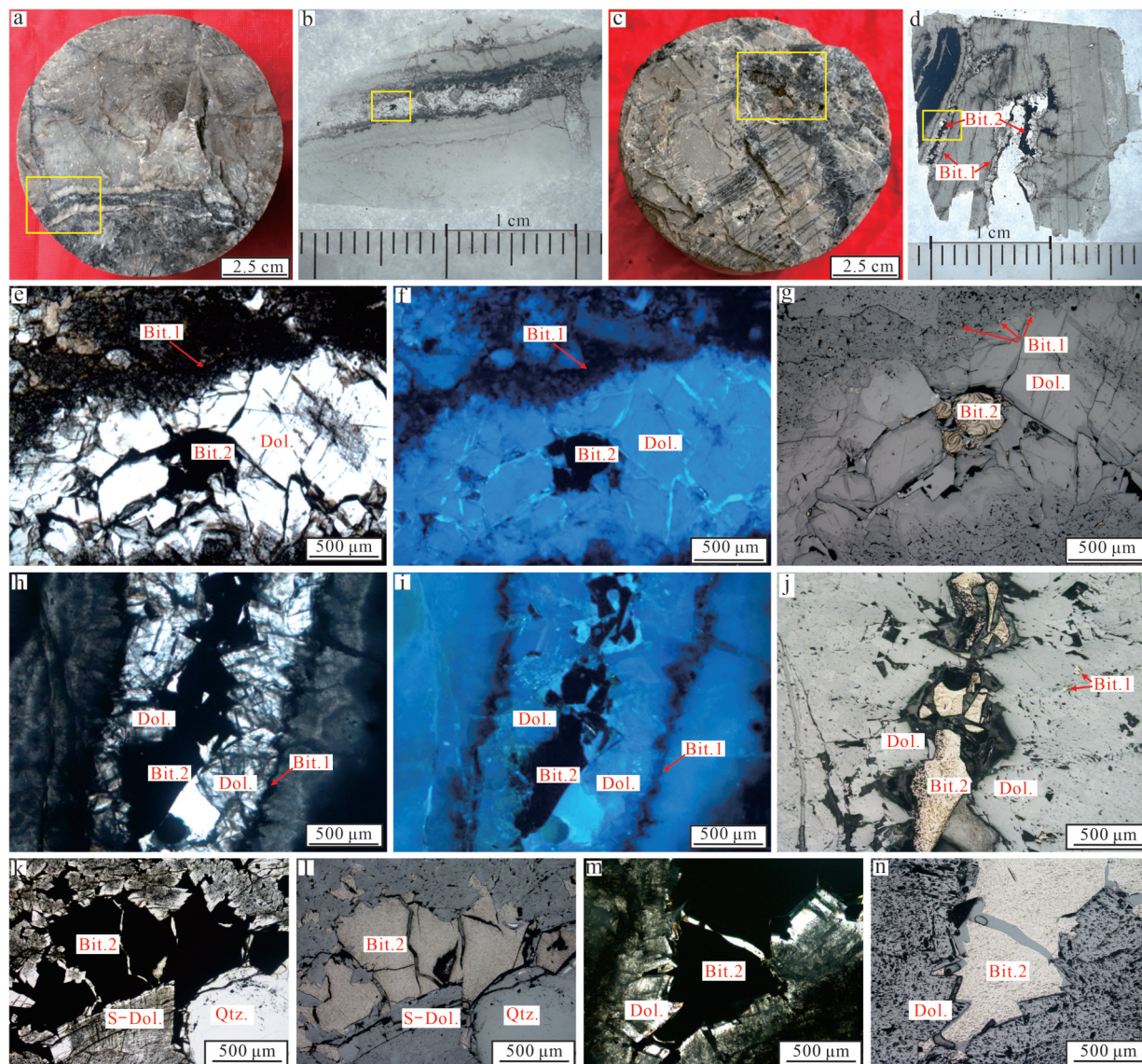


图2 高石梯-磨溪地区震旦系灯四段储层沥青特征

Fig. 2 Images showing the characteristics of bitumen from the Sinian Dengying Formation, Gaoshiti-Moxi area

a, b. 高石 102 井, 埋深 5 176.65 m, 白云岩, 裂缝发育, 充填白云石-沥青-白云石-沥青, a 为岩心, b 为 a 中黄色范围薄片; c, d. 磨溪 105 井, 埋深 5 357.91 m, 泥晶白云岩, 溶蚀孔洞缝发育, 充填沥青-白云石-沥青, c 为岩心, d 为 c 中黄色范围薄片; e—g. b 中黄色范围显微照相, e 为透射光照片, f 为荧光照片, g 为反射光照片; h—j. d 中黄色范围显微照相, h 为透射光照片, i 为荧光照片, j 为反射光照片; k, l. 高石 102 井, 埋深 5 051.80 m, 泥晶凝块白云岩, 溶洞充填鞍型白云石、沥青和石英, k 为透射光照片, l 为反射光照片; m, n. 磨溪 109 井, 埋深 5 128.45 m, 粒屑白云岩, 溶洞充填白云石和沥青, m 为透射光照片, n 为反射光照片

Bit. 1. 早期沥青; Bit. 2. 晚期沥青; Dol. 白云石; S-Dol. 鞍型白云石; Qtz. 石英

于有机质拉曼峰位随成熟度变化关系, Spötl 等^[48]对干酪根的分析结果表明, G 峰和 D 峰都随成熟度增加而向高波数拉曼位移移动, 但高石 102 井灯影组储层沥青的分析结果表明, G 峰虽向高波数拉曼位移移动, 但明显以等效镜质体反射率 3.0% 为界呈现不同增速的两段式特征(图 6a), 而 D 峰则以 3.0% 为界呈现先减小再增大的两段式特征(图 6b), 鞍部 S 的位置数据点虽然比较离散, 但仍然具有同 D 峰相同的变化规律(图 6d)。高石 102 井灯影组储层沥青表现出的拉曼峰位随成熟度

变化趋势与王茂林等^[22]对页岩中固体沥青分析得到的趋势一致, 但其趋势转折点为沥青反射率 3.58% ~ 3.73%, 存在一定差异。对于峰间距, Kelemen 和 Fang^[49]对煤及不同类型干酪根的拉曼分析表明, 随成熟度的增加, 峰间距增大。高石 102 井灯影组储层沥青的结果也显示出峰间距随成熟度增加而增大的特征, 但同样明显具有以 3.0% 为界的不同增速两段式特征(图 6c)。可见, 对于高石 102 井灯影组储层沥青而言, 等效镜质体反射率 3.0% 为其拉曼光谱形态变化转折点, 从

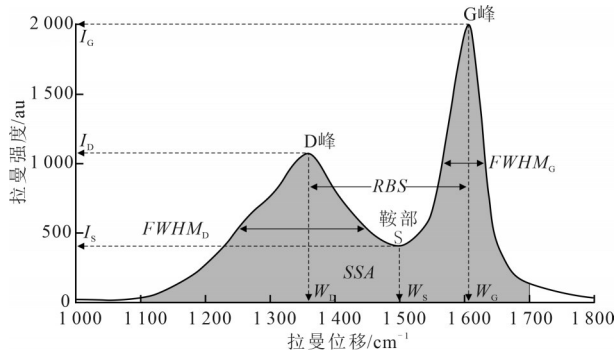


图3 拉曼参数图解

Fig. 3 Illustration of Raman parameters

W_D , D峰位置; W_G , G峰位置; W_S , 鞍部S位置; I_D , D峰高度;
 I_G , G峰高度; I_S , 鞍部S高度; $FWHM_D$, D峰半峰宽;
 $FWHM_G$, G峰半峰宽; RBS , D峰和G峰峰间距;
 SSA , 拉曼位移1 100 ~ 1 700 cm^{-1} 所围限的面积

图6g可见不同成熟度沥青拉曼光谱形态变化特征。

4.3 热流体活动响应

有机质的成熟过程是埋藏过程中时、温效应的综合反映。随着埋深加大,有机质成熟度增加,代表成熟度的镜质体反射率增大,异常的热作用也会在镜质体反射率上留下相应的记录^[40]。高石102井沥青等效镜质体反射率与深度关系(图7a)表明,震旦系灯影组

层沥青的等效镜质体反射率存在一个随深度增加而增大的正常演化趋势。同时,在多个深度段存在热异常记录。结合灯影组储层发育特征分析认为,这些沥青的等效镜质体反射率相对正常演化趋势的异常高值,代表了震旦系灯影组储层高温热流体活动的响应。沥青的这一热流体活动响应,在沥青拉曼光谱的各个拉曼参数上均有明显的表现(图7b—g)。

四川盆地中部高石梯-磨溪地区震旦系灯影组储层受高温热流体活动改造是普遍的,从白云岩储层溶蚀孔洞十分发育,且多充填鞍型白云石、石英、萤石、方解石等热液矿物可得到充分体现(图2)。流体包裹体显微测温也表明热流体活动具有多期性。进一步分析沥青等效镜质体反射率在垂向上的分布特征,发现热流体活动的多期性特征同样被记录了下来,表现为同一层位具有不同幅度的热异常(图7a)。

5 结论

1) 四川盆地中部高石梯-磨溪地区震旦系灯影组储层沥青热演化程度都处于成熟阶段以上,其等效镜质体反射率绝大部分高于1.3%,占比81.1%,处于高-过成熟阶段,佐证了原油裂解过程的存在。

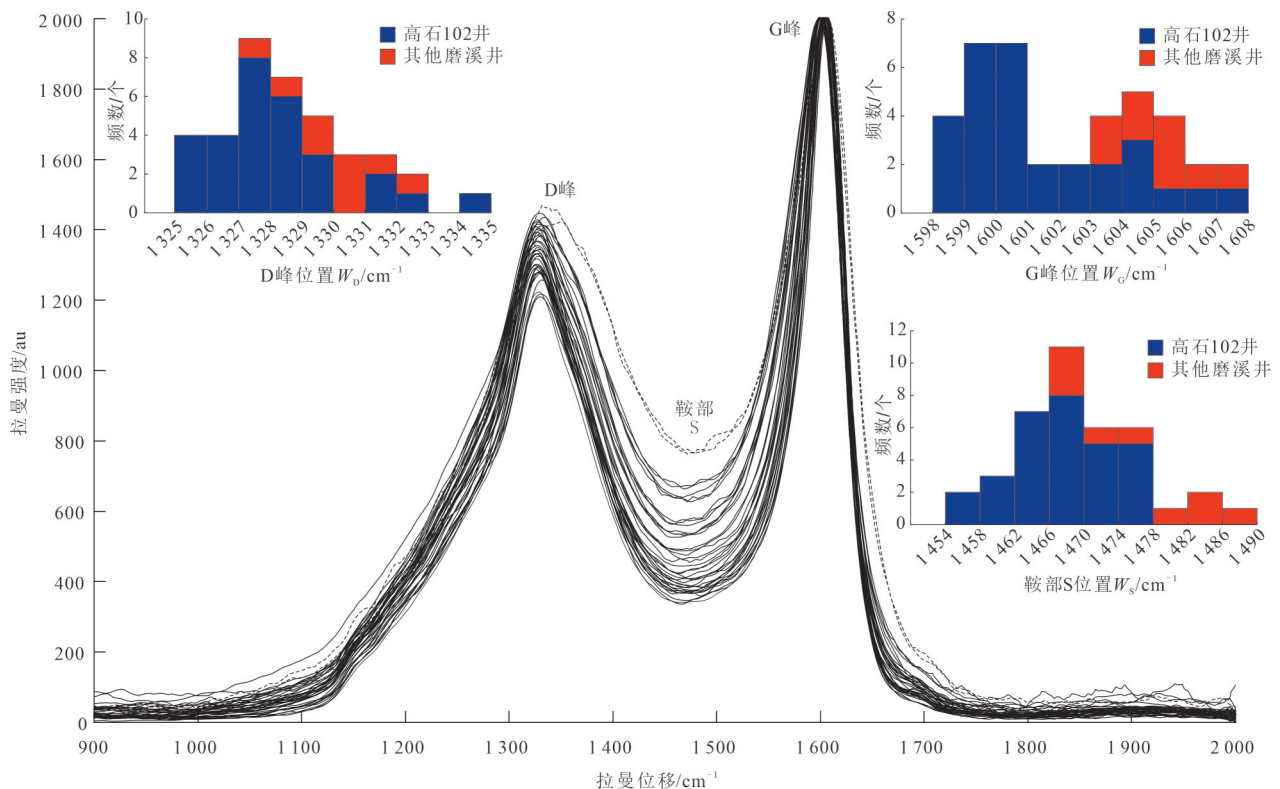


图4 高石梯-磨溪地区震旦系灯影组储层沥青拉曼光谱及位置参数统计直方图

Fig. 4 Raman spectrums and position parameter histograms of bitumen from the Sinian Dengying Formation, Gaoshiti-Moxi area

表2 高石梯-磨溪地区震旦系灯影组储层沥青拉曼光谱参数及等效镜质体定量化结果
Table 2 Results of Raman parameters and equivalent vitrinite reflectance of bitumen from the Sinian Dengying Formation, Gaoshiti-Moxi area

井号	深度/m	样品编号	测点	W_D/cm^{-1}	I_D	W_G/cm^{-1}	I_G	W_S/cm^{-1}	I_S	R_I	RBS/cm^{-1}	$FWHM_G/\text{cm}^{-1}$	$FWHM_D/\text{cm}^{-1}$	SSA	SI	$\text{eq}R_o\%$
高石102	5 039.62	1	a	1 331.28	1 410.32	1 598.73	1 997.50	1 467.11	664.20	0.71	267	84	192	459 366	3.01	0.64
			b	1 329.31	1 434.90	1 599.17	1 984.24	1 461.47	662.66	0.72	270	77	198	460 455	2.99	0.97
	5 051.80	2	a	1 334.15	1 394.42	1 600.65	1 945.45	1 474.27	608.21	0.72	267	78	179	441 800	3.20	0.91
			b	1 327.92	1 412.01	1 598.64	1 995.95	1 466.88	636.99	0.71	271	82	190	468 313	3.13	0.72
	5 059.50	3	a	1 327.70	1 348.64	1 600.20	1 973.39	1 468.54	522.77	0.68	273	68	165	416 776	3.77	1.63
			b	1 326.04	1 304.04	1 601.14	1 980.46	1 468.54	438.11	0.66	275	58	154	384 374	4.52	2.92
	5 063.60	4	c	1 327.21	1 282.48	1 600.25	1 971.71	1 465.41	414.10	0.65	273	60	151	375 091	4.76	2.60
			a	1 327.97	1 327.67	1 599.44	1 977.60	1 476.15	529.46	0.67	271	70	171	420 001	3.74	1.45
	5 065.50	5	b	1 329.35	1 359.39	1 599.80	1 969.28	1 455.47	516.45	0.69	270	69	163	420 226	3.81	1.54
			a	1 327.07	1 419.55	1 599.62	1 996.30	1 461.69	567.45	0.71	273	72	172	441 092	3.52	1.29
	5 075.25	6	b	1 325.77	1 322.52	1 600.16	1 973.88	1 464.51	418.27	0.67	274	59	155	382 448	4.72	2.76
			a	1 326.49	1 316.19	1 602.44	1 977.54	1 468.58	392.45	0.67	276	56	146	369 621	5.04	3.29
	5 087.24	7	a	1 325.10	1 281.46	1 600.52	1 987.62	1 462.14	400.71	0.64	275	58	148	371 856	4.96	2.92
高石102	5 088.53	8	a	1 331.24	1 338.45	1 599.04	1 914.29	1 471.27	599.65	0.70	268	79	189	428 597	3.19	0.86
			b	1 328.15	1 352.19	1 598.77	1 953.33	1 473.42	520.29	0.69	271	70	168	418 060	3.75	1.45
	5 092.73	9	a	1 326.62	1 390.89	1 599.08	1 977.06	1 467.06	552.87	0.70	272	72	174	436 154	3.58	1.29
			b	1 326.31	1 362.09	1 598.68	1 956.90	1 457.93	548.66	0.70	272	69	171	427 056	3.57	1.54
	5 097.40	10	c	1 327.43	1 344.19	1 599.85	1 986.28	1 465.59	486.88	0.68	272	63	158	403 369	4.08	2.19
			a	1 325.82	1 319.27	1 600.83	1 983.63	1 468.27	406.79	0.67	275	58	151	379 254	4.88	2.92
	5 110.35	11	b	1 325.55	1 292.17	1 601.86	1 992.08	1 465.45	365.04	0.65	276	55	140	359 656	5.46	3.48
			a	1 350.17	1 403.62	1 607.30	1 975.17	1 472.52	751.52	0.71	257	94	—	489 998	2.63	0.36
	5 125.33	12	a	1 332.30	1 432.78	1 603.20	1 953.29	1 477.72	746.95	0.73	271	90	—	487 656	2.62	0.45
			b	1 327.21	1 354.19	1 600.65	1 984.33	1 465.18	482.75	0.68	273	65	157	411 114	4.11	1.94
	5 137.09	13	a	1 328.15	1 316.40	1 604.19	1 988.30	1 469.93	470.16	0.66	276	62	156	388 649	4.23	2.32
			b	1 328.41	1 202.51	1 604.23	1 968.04	1 463.75	333.40	0.61	276	52	134	333 227	5.90	4.15
	5 145.80	14	a	1 328.10	1 267.07	1 604.01	1 985.42	1 458.29	361.07	0.64	276	54	136	350 987	5.50	3.69
			b	1 327.65	1 330.60	1 602.98	1 972.44	1 474.05	448.14	0.67	275	58	150	378 384	4.40	2.92
磨溪13	5 174.21	15	a	1 328.86	1 309.49	1 603.52	1 967.82	1 471.09	375.91	0.67	275	55	138	356 765	5.23	3.48
	5 176.65	16	a	1 329.67	1 256.90	1 605.08	1 965.35	1 471.18	360.24	0.64	275	53	135	345 006	5.46	3.91
			b	1 328.55	1 270.24	1 606.02	1 988.50	1 474.14	362.58	0.64	277	52	133	348 197	5.48	4.15
	5 104.72	17	a	1 330.07	1 267.12	1 603.47	1 988.80	1 466.88	460.86	0.64	273	61	164	388 530	4.32	2.46
			b	1 332.09	1 266.32	1 605.67	1 973.83	1 484.12	352.28	0.64	274	51	142	330 855	5.60	4.40
	5 255.68	18	a	1 327.03	1 411.12	1 604.19	1 978.30	1 469.66	377.90	0.71	277	55	125	359 500	5.24	3.48
			b	1 328.50	1 385.82	1 606.52	1 978.17	1 466.26	331.72	0.70	278	51	119	335 458	5.96	4.40
	5 370.02	19	a	1 329.18	1 278.46	1 605.53	1 977.26	1 471.41	341.23	0.65	276	49	129	341 570	5.79	4.94
			a	1 329.13	1 287.03	1 604.37	1 985.71	1 479.60	403.14	0.65	275	56	152	370 577	4.93	3.29
	5 357.91	20	b	1 330.79	1 199.91	1 605.67	1 974.00	1 487.30	377.73	0.61	275	54	149	350 552	5.23	3.69
			a	1 331.77	1 232.04	1 607.19	1 961.23	1 485.51	375.56	0.63	275	50	151	350 489	5.22	4.66
	5 128.45	21	b	1 330.30	1 201.04	1 603.74	1 985.72	1 475.34	370.23	0.60	273	57	148	351 417	5.36	3.10

注:深灰色底纹为异常拉曼光谱相关数据;浅灰色底纹为热流体活动响应相关数据;*据 Henry 等(2019)计算式: $\text{eq}R_o = 85.783\ 038\ 5291\ \text{EXP}(-0.058\ 254\ 813\ FWHM_G)$ 。

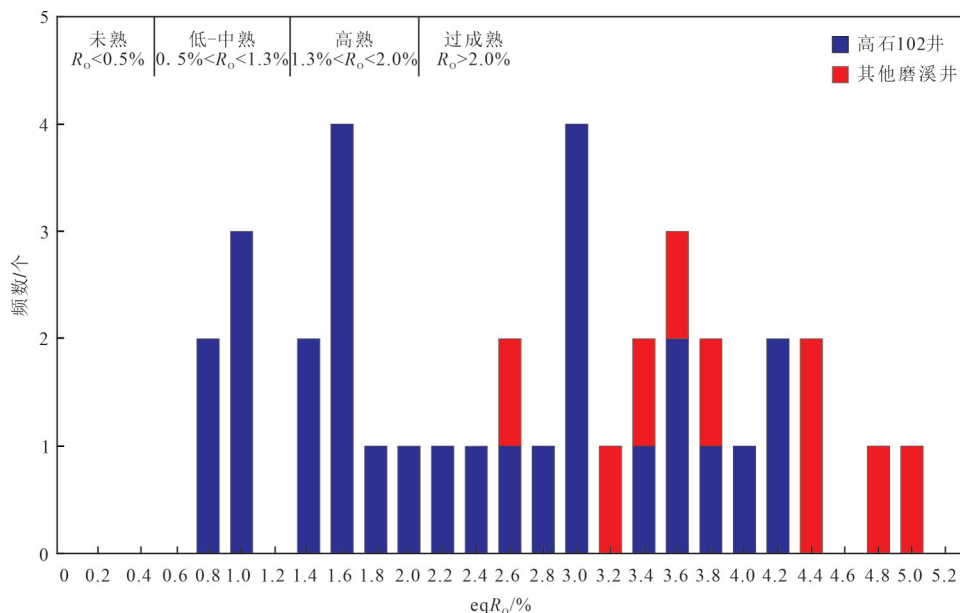


图5 高石梯-磨溪地区震旦系灯影组储层沥青等效镜质体反射率统计直方图

Fig. 5 Histogram of the equivalent vitrinite reflectance of bitumen from the Sinian Dengying Formation, Gaoshiti-Moxi area

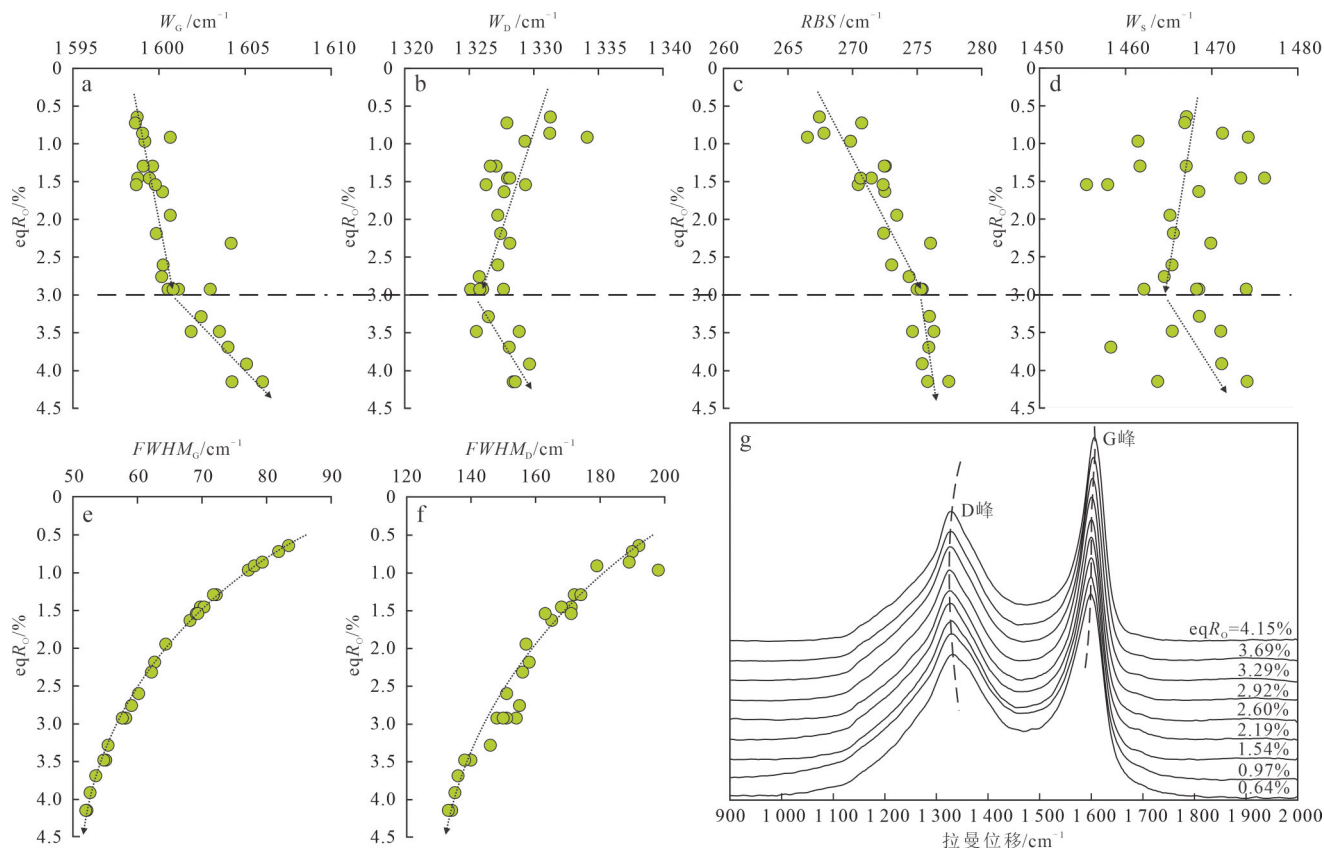


图6 高石梯-磨溪地区高石102井震旦系灯影组储层沥青拉曼光谱及参数与等效镜质体反射率相关关系

Fig. 6 Relationship between the Raman spectrums and parameters as well as the equivalent vitrinite reflectance of bitumen from Well

Gaoshi 102 in the Sinian Dengying Formation, Gaoshiti-Moxi area

a—f. 依次分别为 G 峰位置 W_G 、D 峰位置 W_D 、峰间距 RBS 、鞍部位置 W_s 、G 峰半峰宽 $FWHM_G$ 和 D 峰半峰宽 $FWHM_D$ 等效镜质体反射率 (eqR_o) 的相关关系; g. 不同成熟度沥青拉曼光谱形态变化特征

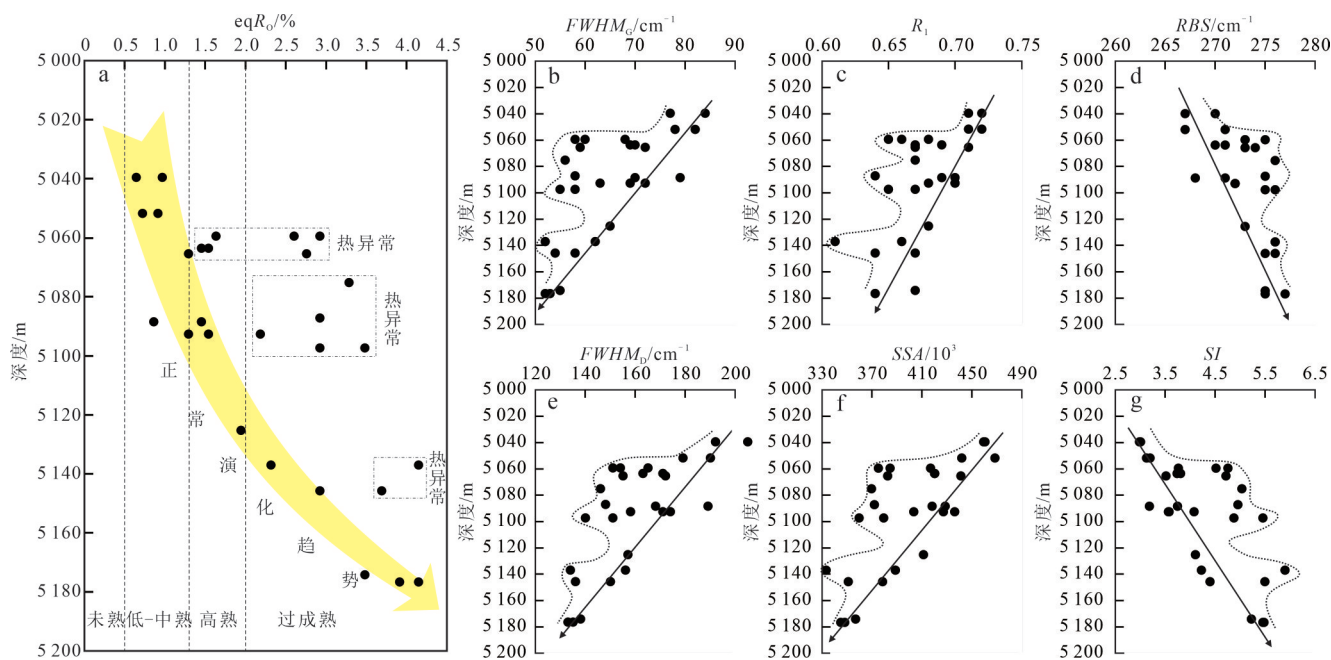


图7 高石梯-磨溪地区高石102井震旦系灯影组储层沥青等效镜质体反射率及拉曼参数随深度变化

Fig. 7 Variation of equivalent vitrinite reflectance and Raman parameters of bitumen with depth in Well Gaoshi 102 in the Sinian Dengying Formation, Gaoshiti-Moxi area

a. 沥青等效镜质体反射率随深度变化; b—g. 依次为分别为沥青拉曼光谱G峰半峰宽 $FWHM_G$ 、峰高比 R_1 、峰间距 RBS 、D峰半峰宽 $FWHM_D$ 、拉曼位移 $1100 \sim 1700 \text{ cm}^{-1}$ 所围限面积 SSA 和鞍部指数 SI 随深度变化

2) 四川盆地中部高石梯-磨溪地区震旦系灯影组储层沥青的拉曼峰位特征与等效镜质体反射率相关关系表现出明显的两段式特征,等效镜质体反射率3.0%为这一特征的转折点,拉曼光谱形态以此为界发生规律性变化。

3) 四川盆地中部高石梯-磨溪地区震旦系灯影组储层沥青记录的热异常表明储层经历了高温热液改造,沥青等效镜质体反射率在纵向上的分布特征是储层多期热流体活动并产生储层蚀变改造的有效响应。

致谢:编辑部老师及审稿专家在文章最终成文过程中提出了宝贵的修改意见,在此一并表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] 刘丹,李剑,谢增业,等. 川中震旦系灯影组原生-同层沥青的成因及意义[J]. 石油实验地质, 2014, 36(2): 218-223.
Liu Dan, Li Jian, Xie Zengye, et al. Origin and significance of Sinian original and coexist bitumen of central Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(2): 218-223.
- [2] 陈哲龙,柳广弟,曹正林,等. 储层沥青成因及其石油地质意义——以准噶尔盆地玛湖凹陷百口泉组为例[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(2): 391-399.
Chen Zhelong, Liu Guangdi, Cao Zhenglin, et al. Origin of solid bitumen and its significance to petroleum geology: A case study of Baikouquan formation in Mahu sag of Junggar basin [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(2): 391-399.
- [3] 刘德汉,肖贤明,田辉,等. 应用流体包裹体和沥青特征判别天

然气的成因[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(3): 375-382.

Liu Dehan, Xiao Xianming, Tian Hui, et al. Identification of natural gas origin using the characteristics of bitumen and fluid inclusions [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(3): 375-382.

- [4] 徐国盛,徐燕丽,袁海锋,等. 川中-川东南震旦系-下古生界烃源岩及储层沥青的地球化学特征[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2007, 29(4): 45-51.
Xu Guosheng, Xu Yanli, Yuan Haifeng, et al. Geochemical characteristics of source rocks and reservoir bitumen of Sinian-lower Palaeozoic in the middle-southwest of Sichuan Basin [J]. Journal of Oil and Gas Technology (Journal of Jiangnan Petroleum Institute), 2007, 29(4): 45-51.
- [5] 谢增业,张本健,杨春龙,等. 川西北地区泥盆系天然气沥青地球化学特征及来源示踪[J]. 石油学报, 2018, 39(10): 1103-1118.
Xie Zengye, Zhang Benjian, Yang Chunlong, et al. Geochemical characteristics and source trace of the Devonian natural gas and bitumen in Northwest Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(10): 1103-1118.
- [6] 李伟,胡国艺,周进高. 四川盆地桐湾期古隆起震旦系储层沥青特征与天然气聚集机理[J]. 天然气工业, 2015, 35(6): 14-23.
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, 2015, 35(6): 14-23.
- [7] 郭旭升,胡东风,黄仁春,等. 川东北地区胡家坝震旦系灯影组古油藏特征及其油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(4): 673-683.
Guo Xusheng, Hu Dongfeng, Huang Renchun, et al. Feature of

- paleo-oil pools in the Sinian Dengying Formation, northeastern Sichuan Basin, and its significance to exploration[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(4): 673-683.
- [8] 马新华, 闫海军, 陈京元, 等. 四川盆地安岳气田震旦系气藏叠合岩溶发育模式与主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(6): 1281-1294.
- Ma Xinhua, Yan Haijun, Chen Jingyuan, et al. Development patterns and constraints of superimposed karst reservoirs in Sinian Dengying Formation, Anyue gas field, Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(6): 1281-1294.
- [9] 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.
- [10] 蒋有录, 刘学嘉, 赵贤正, 等. 根据储层沥青和流体包裹体综合判识油气成藏期: 以黄骅坳陷北大港古生界潜山为例[J]. *地球科学*, 2020, 45(3): 980-988.
- Jiang Youlu, Liu Xuejia, Zhao Xianzheng, et al. Comprehensive identification of oil and gas accumulation period by fluid inclusion technique and reservoir bitumen characteristics: A case study of the Paleozoic buried hill in Beidagang, Huanghua Depression[J]. *Earth Science*, 2020, 45(3): 980-988.
- [11] 匡立春, 齐雪峰, 王绪龙, 等. 新疆西准噶尔布龙果尔古油藏的发现及其石油地质意义[J]. *地质学报*, 2011, 85(2): 224-233.
- Kuang Lichun, Qi Xuefeng, Wang Xulong, et al. Discovery of Bulongguoer ancient reservoir in west Junggar, Xinjiang and its petroleum geologic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(2): 224-233.
- [12] 林煜, 李相文, 陈康, 等. 深层海相碳酸盐岩储层地震预测关键技术与效果——以四川盆地震旦系-寒武系与塔里木盆地奥陶系油气藏为例[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(3): 717-727.
- Lin Yu, Li Xiangwen, Chen Kang, et al. Key seismic techniques for predicting deep marine carbonate reservoirs and the effect analysis: A case study on the Sinian-Cambrian reservoirs in the Sichuan Basin and the Ordovician reservoirs in the Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(3): 717-727.
- [13] Parnell J, Swainbank I. Pb-Pb dating of hydrocarbon migration into a bitumen-bearing ore deposit, North Wales[J]. *Geology*, 1990, 18(10): 1028-1030.
- [14] Finlay A J, Selby D, Osborne M J. Re-Os geochronology and fingerprinting of United Kingdom Atlantic margin oil: Temporal implications for regional petroleum systems[J]. *Geology*, 2011, 39(5): 475-478.
- [15] 沈传波, Selby D, 梅廉夫, 等. 油气成藏定年的Re-Os同位素方法应用研究[J]. *矿物岩石*, 2011, 31(4): 87-93.
- Shen Chuanbo, Selby D, Mei Lianfu, et al. Advances in the study of Re-Os geochronology and tracing of hydrocarbon generation and accumulation[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2011, 31(4): 87-93.
- [16] 丰国秀, 陈盛吉. 岩石中沥青反射率与镜质体反射率之间的关系[J]. *天然气工业*, 1988, 8(3): 20-25.
- Feng Guoxiu, Chen Shengji. Relationship between the reflectance of bitumen and vitrinite in rock[J]. *Natural Gas Industry*, 1988, 8(3): 20-25.
- [17] 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.
- [18] Landis C R, and Castaño J R. Maturation and bulk chemical properties of a suite of solid hydrocarbons[J]. *Organic Geochemistry*, 1995, 22(1): 137-149.
- [19] Schoenherr J, Littke R, Urai J L, et al. Polyphase thermal evolution in the Infra-Cambrian Ara Group (South Oman Salt Basin) as deduced by maturity of solid reservoir bitumen[J]. *Organic Geochemistry*, 2007, 38(8): 1293-1318.
- [20] Misch D, Gross D, Hawranek G, et al. Solid bitumen in shales: Petrographic characteristics and implications for reservoir characterization[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2019, 205: 14-31.
- [21] 刘德汉, 肖贤明, 田辉, 等. 固体有机质拉曼光谱参数计算样品热演化程度的方法与地质应用[J]. *科学通报*, 2013, 58(13): 1228-1241.
- Liu Dehan, Xiao Xianming, Tian Hui, et al. Sample maturation calculated using Raman spectroscopic parameters for solid organics: Methodology and geological applications[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(13): 1228-1241.
- [22] 王茂林, 肖贤明, 魏强, 等. 页岩中固体沥青拉曼光谱参数作为成熟度指标的意义[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(9): 1712-1718.
- Wang Maolin, Xiao Xianming, Wei Qiang, et al. Thermal maturation of solid bitumen in shale as revealed by Raman spectroscopy[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(9): 1712-1718.
- [23] 何登发, 李德生, 张国伟, 等. 四川多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. *地质科学*, 2011, 46(3): 589-606.
- He Dengfa, Li Desheng, Zhang Guowei, et al. Formation and evolution of multi-cycle superposed Sichuan Basin, China[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2011, 43(6): 589-606.
- [24] 段金宝, 梅庆华, 李毕松, 等. 四川盆地震旦纪-早寒武世构造-沉积演化过程[J]. *地球科学*, 2019, 44(3): 738-755.
- Duan Jinbao, Mei Qinghua, Li Bisong, et al. Sinian-Early Cambrian tectonic-sedimentary evolution in Sichuan Basin[J]. *Earth Science*, 2019, 44(3): 738-755.
- [25] 姜华, 汪泽成, 杜宏宇, 等. 乐山-龙女寺古隆起构造演化与新元古界震旦系天然气成藏[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(2): 192-200.
- Jiang Hua, Wang Zecheng, Du Hongyu, et al. Tectonic evolution of the Leshan-Longnvsi paleo-uplift and reservoir formation of Neoproterozoic Sinian Gas[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(2): 192-200.
- [26] 李宗银, 姜华, 汪泽成, 等. 构造运动对四川盆地震旦系油气成藏的控制作用[J]. *天然气工业*, 2014, 34(3): 23-30.
- Li Zongyin, Jiang Hua, Wang Zecheng, et al. Control of tectonic movement on hydrocarbon accumulation in the Sinian strata, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(3): 23-30.
- [27] 汪泽成, 姜华, 王铜山, 等. 四川盆地桐湾期古地貌特征及成藏意义[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(3): 305-312.
- Wang Zecheng, Jiang Hua, Wang Tongshan, et al. Paleogeomorphology formed during Tongwan tectonization in Sichuan Basin and its significance for hydrocarbon accumulation[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(3): 305-312.
- [28] 汪泽成, 王铜山, 文龙, 等. 四川盆地安岳特大型气田基本地质特征与形成条件[J]. *中国海上油气*, 2016, 28(2): 45-52.
- Wang Zecheng, Wang Tongshan, Wen Long, et al. Basic geologi-

- cal characteristics and accumulation conditions of Anyue giant gas field, Sichuan basin [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2016, 28 (2): 45-52.
- [29] 武赛军,魏国齐,杨威,等. 四川盆地桐湾运动及其油气地质意义[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(1): 60-70.
Wu Saijun, Wei Guoqi, Yang Wei, et al. Tongwan Movement and its geologic significances in Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(1): 60-70.
- [30] 殷积峰,谷志东,李秋芬. 四川盆地大川中地区深层断裂发育特征及其地质意义[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(3): 376-382.
Yin Jifeng, Gu Zhidong, Li Qiufen. Characteristics of deep-rooted faults and their geological significances in Dachuanzhong area, Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(3): 376-382.
- [31] 魏国齐,杨威,杜金虎,等. 四川盆地高石梯-磨溪古隆起构造特征及对特大型气田形成的控制作用[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(3): 257-265.
Wei Guoqi, Yang Wei, Du Jinhu, et al. Tectonic features of Gao-shiti-Moxi paleo-uplift and its controls on the formation of a giant gas field, Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(3): 257-265.
- [32] 马德波,汪泽成,段书府,等. 四川盆地高石梯-磨溪地区走滑断层构造特征与天然气成藏意义[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(5): 795-805.
Ma Debo, Wang Zecheng, Duan Shufu, et al. Strike-slip faults and their significance for hydrocarbon accumulation in Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(5): 795-805.
- [33] 蒋裕强,陶艳忠,谷一凡,等. 四川盆地高石梯-磨溪地区灯影组热液白云石化作用[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(1): 51-60.
Jiang Yuqiang, Tao Yanzhong, Gu Yifan, et al. Hydrothermal dolomitization in Sinian Dengying Formation, Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(1): 51-60.
- [34] 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*, 30(3): 727-736.
- [35] 刘树根,孙玮,赵异华,等. 四川盆地震旦系灯影组天然气的差异聚集分布及其主控因素[J]. *天然气工业*, 2015, 35(1): 10-23.
Liu Shugen, Sun Wei, Zhao Yihua, et al. Differential accumulation and distribution of natural gas and their main controlling factors in the Upper Sinian Dengying Fm, Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(1): 10-23.
- [36] 李吉君,曹群,卢双舫,等. 四川盆地乐山-龙女寺古隆起震旦系天然气成藏史[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(1): 30-36.
Li Jijun, Cao Qun, Lu Shuangfang, et al. History of natural gas accumulation in Leshan-Longnysy Sinian paleo-uplift, Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(1): 30-36.
- [37] 杨程宇,文龙,王铁冠,等. 川中隆起安岳气田古油藏成藏时间厘定[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(3): 492-502.
Yang Chengyu, Wen Long, Wang Tieguan, et al. Timing of hydrocarbon accumulation for paleo-oil reservoirs in Anyue gas field in Chuanzhong Uplift [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(3): 492-502.
- [38] Gao P, Liu G, Lash G G, et al. Occurrences and origin of reservoir solid bitumen in Sinian Dengying Formation dolomites of the Sichuan Basin, SW China [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2018, 200: 135-152.
- [39] Henry D G, Jarvis I, Gillmore G, et al. Assessing low-maturity organic matter in shales using Raman spectroscopy: Effects of sample preparation and operating procedure [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2018, 191: 135-151.
- [40] Henry D G, Jarvis I, Gillmore G, et al. A rapid method for determining organic matter maturity using Raman spectroscopy—Application to Carboniferous organic-rich mudstones and coals [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2019, 203: 87-98.
- [41] Mastalerz M, Drobnicka 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.
- [42] 王晔,邱楠生,马中良,等. 固体沥青反射率与镜质体反射率的等效关系评价[J]. *中国矿业大学学报*, 2020, 49(3): 563-575.
Wang Ye, Qiu Nansheng, Ma Zhongliang, et al. Evaluation of equivalent relationship between vitrinite reflectance and solid bitumen reflectance [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2020, 49(3): 563-575.
- [43] Schmidt J S, Menezes T R, Souza I V A F, et al. Comments on empirical conversion of solid bitumen reflectance for thermal maturity evaluation [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2019, 201: 44-50.
- [44] Wilkins R W T, Boudou R, Sherwood N, et al. Thermal maturity evaluation from inertinites by Raman spectroscopy—The ‘RaMM’ technique [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2014, 128-129: 143-152.
- [45] Schito A, Romano C, Corrado S, et al. Diagenetic thermal evolution of organic matter by Raman spectroscopy [J]. *Organic Geochemistry*, 2017, 106: 57-67.
- [46] 房忱琛,熊永强,李芸,等. 原油裂解过程中固体沥青的拉曼光谱演化特征[J]. *地球化学*, 2015, 44(2): 196-204.
Fang Chenchen, Xiong Yongqiang, Li Yun, et al. Raman spectra characteristics of solid bitumens generated during oil cracking [J]. *Geochimica*, 2015, 44(2): 196-204.
- [47] Spötl C, Houseknecht D W, Jaques R C. Kerogen maturation and incipient graphitization of hydrocarbon source rocks in the Arkoma Basin, Oklahoma and Arkansas: a combined petrographic and Raman spectrometric study [J]. *Organic Geochemistry*, 1998, 28(9-10): 535-542.
- [48] 鲍芳,俞凌杰,芮晓庆,等. 页岩中有机质孔隙非均质性的微观结构及电镜—拉曼联用研究[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(5): 871-879.
Bao Fang, Yu Lingjie, Rui Xiaoqing, et al. Microstructure and SEM- Raman study of organic matter pore heterogeneity in shale [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(5): 871-879.
- [49] Kelemen S R, Fang H L. Maturity trends in Raman spectra from kerogen and coal [J]. *Energy & Fuels*, 2001, 15: 653-658.