

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

田兴旺¹, 胡国艺^{2,3}, 李伟^{2,3}, 李贤庆¹, 苏桂萍¹, 徐宜瑞^{2,3}, 蔡笛^{2,3}, 魏海朴¹

(1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083;

2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;

3. 中国石油天然气集团公司油气地球化学重点实验室, 北京 100083)

摘要:通过对四川盆地乐山—龙女寺古隆起地区储层沥青样品进行全岩镜下测定,发现该区震旦系灯影组储层中存在大量储层沥青,并对样品进行沥青反射率测定、有机元素分析和碳同位素分析,结果表明:古隆起地区震旦系灯影组储层沥青等效镜质体反射率(R'_{O})值分布在2.06%~3.0%之间,平均值为2.62%,储层沥青H/C原子比和O/C原子比仅为0.30~0.43和0.01~0.03,表明沥青的成熟度高,基本上处于成熟—过成熟阶段,生烃潜力较低;S/C原子比为0.03~0.06,与长兴组(P_2ch)和飞仙关组(T_1f)储层沥青S/C原子比相比偏低,表明古隆起地区灯影组储层沥青受硫酸盐热化学还原反应(TSR)影响较小;此外,储层沥青碳同位素值分布在-36.8‰~-34.5‰之间,平均值为-35.7‰,在四川盆地各层位干酪根和沥青碳同位素值中其值最低,比塔里木盆地海相原油的碳同位素值还要低。结合四川盆地地质构造背景,对比各层位烃源岩干酪根碳同位素,认为古隆起地区震旦系灯影组储层沥青主要来源于下寒武统筇竹寺组烃源岩,属古油藏深埋时在高温、高压作用下裂解成气后的热演化沥青—焦沥青。

关键词:四川盆地;储层沥青;反射率;元素组成;碳同位素

中图分类号:TE122.1⁺13

文献标志码:A

文章编号:1672-1926(2013)05-0982-09

引用格式: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. [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.]

0 引言

自1964年发现威远气田以来,四川盆地乐山—龙女寺古隆起地区经历近半个世纪的勘探,一直没有新的发现。

2011年中国石油西南油气田公司在四川盆地乐山—龙女寺古隆起轴部高石梯构造震顶高部位震旦系天然气勘探取得重大突破,获得了日产百万立方米的高产工业气井——高石1井,引起了大量学者的广泛关注,这也预示了四川盆地乐山—龙女寺

古隆起区天然气勘探潜力巨大。

多年的勘探实践表明,四川盆地乐山—龙女寺古隆起地区震旦系一下古生界储集层内沥青含量丰富^[1-8],即普遍存在古油藏,这也表明古隆起地区普遍存在过油气的生排聚过程。而储层沥青的丰度和分布可能与四川盆地海相高演化碳酸盐岩地区大气田的形成与发育程度存在密切的关系。如古隆起地区威远气田的形成与分布与上震旦统灯影组储层沥青有很大的关系^[5-6,9-10],川东北长兴组—飞仙关组鲕滩气藏的分布与上二叠统一下三叠统礁滩相储层

收稿日期:2013-04-16;修回日期:2013-07-16.

基金项目:国家科技重大专项(编号:2011ZX05007-01);西南油气田课题联合资助.

作者简介:田兴旺(1988-),男,山东菏泽人,在读研究生,主要从事天然气地质及油气地球化学研究. E-mail: tianxingwang220@163.com.

沥青存在密切的联系^[11-13]。储层沥青作为岩石中 1 类特殊的有机质,为石油与天然气的伴生产物,在赋存状态、反射率、有机元素组成和碳同位素等地球化学特征方面记录了油气生成后所经历的各种地质与地球化学作用,在含油气盆地研究中蕴藏着丰富的地质信息。本文对乐山—龙女寺古隆起地区震旦系储层沥青的研究发现,该地区沥青具有独特的地球化学特征,研究这些固体沥青的性质、成因及演化机理,对于了解乐山—龙女寺古隆起地区油气的生成、运移、聚集及富集规律和揭示原油裂解气的成因与来源提供了重要依据。

1 四川盆地震旦系一下古生界地质概况

四川盆地不仅是中国典型的含油富气盆地,而且为一个多旋回构造—沉积型叠合盆地,油气资源丰富,尤其是天然气资源,震旦系—古生界(下组合)发育有多套黑色富含有机质的泥质烃源岩^[1,2,5]、多套孔洞—裂缝型储集层^[5-7]及泥页岩、膏质岩盖层^[1,5]。四川盆地地质构造条件复杂,其在构造上属扬子板块,经历了克拉通、前陆 2 个演化阶段,盆地北部发育有米仓山隆起,西北部龙门山褶皱带,西南部峨眉山—凉山褶皱带,东北部大巴山褶皱带,东

南部湖北—湖南—贵州褶皱带。从地层结构看,在海相碳酸盐岩之上覆盖着陆相碎屑岩系。地层下部为前震旦纪变质岩基底,基底之上是巨厚的震旦纪—中三叠世海相碳酸盐岩和晚三叠世—白垩纪陆相碎屑岩沉积。从震旦纪到早志留世共发育 3 套烃源岩,早古生界下部的下寒武统筇竹寺组和下志留统龙马溪组为最主要的 2 套烃源岩,为下伏震旦系和上覆石炭系—二叠系储集层提供气源。

乐山—龙女寺古隆起为一巨形鼻状古隆起,轴向为 NEE 向,横贯川西南—川中地区,核部位于川西南部,最老剥蚀至灯三段,面积约为 $6.25 \times 10^4 \text{ km}^2$,其形成奠基于桐湾运动,发展并定型于加里东运动。上震旦统灯影组时代老、埋藏深、演化时间长,经历的构造活动期次多,在四川盆地分布广泛。纵向上,自下而上分为下震旦统陡山沱组,上震旦统灯影组,下寒武统筇竹寺组、沧浪铺组及龙王庙组(图 1)。灯影组岩相发育浅水碳酸盐岩局限台地的藻丘和颗粒滩,岩性以灰色、深灰色、褐灰色白云岩,灰黑色泥质白云岩以及褐灰色含溶孔洞白云岩为主。其中震旦系灯影组灯四段和灯二段为好的储层段,储集物性较好,溶孔、孔洞、裂缝十分发育,储层以裂缝—孔隙型及裂缝—孔洞型储层为主。

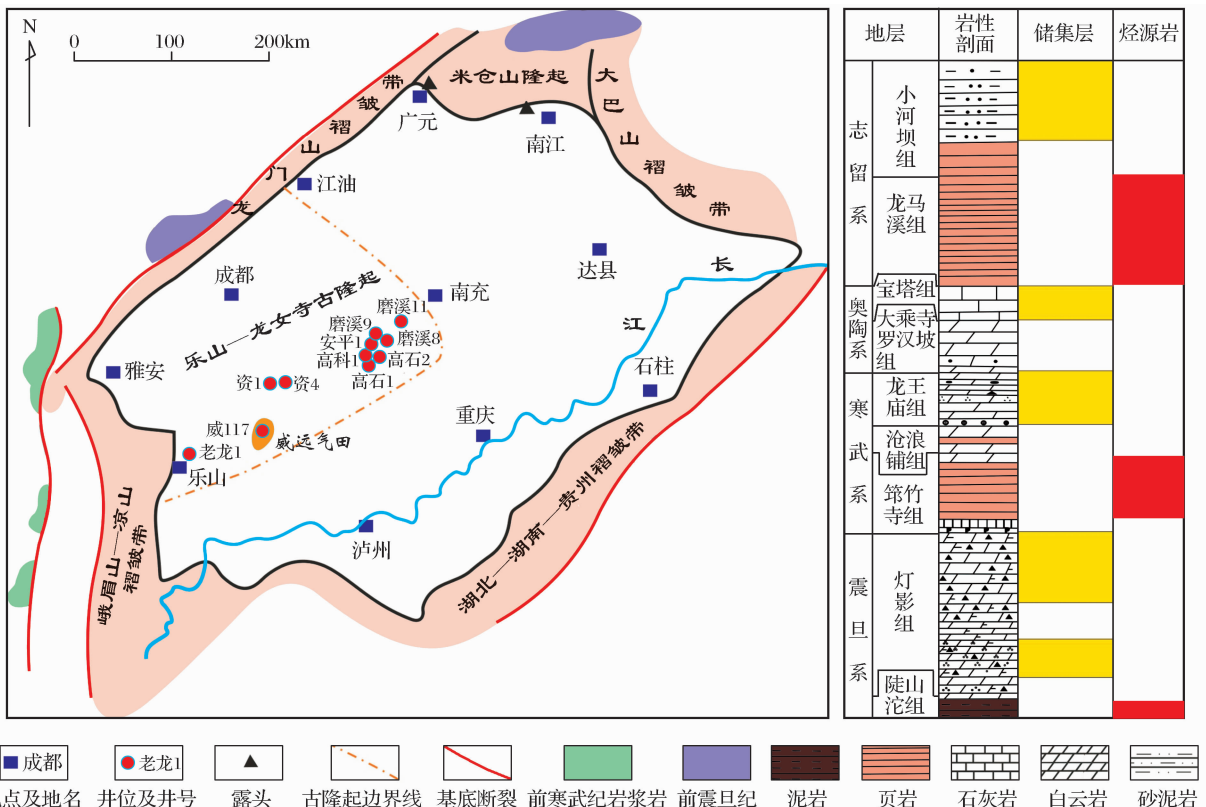


图 1 研究区地质概况及所研究井位分布特征

Figure 1 Geological conditions of study area and distribution map of study wells

2 沥青含量及分布

世界各地许多沉积盆地的含油气储集体中广泛分布储层固体沥青,20世纪90年代以来对于储层固体沥青的研究国内外已取得了重大进展^[14-16]。此次研究发现,乐山—龙女寺古隆起地区海相碳酸盐岩震旦系储层中也存在大量固体沥青,固体沥青为烃源岩生成原油运移聚集后,在地质体中通过氧化或热裂解作用残留的固体有机物。本文研究样品主要来自川中乐山—龙女寺古隆起构造部位的磨溪8井、磨溪9井、高科1井、安平1井、高石1井和高石2井,川西南威远—资阳地区的资1井、威117井和老龙1井及广元矿山梁沥青脉和南江杨坝露头等(图1)。其中少数样品经洗净润湿后用肉眼观察就可以见到沥青团粒,而绝大部分需用显微镜观察。镜下鉴定发现固体沥青广泛分布在乐山—龙女寺古隆起震旦系碳酸盐岩储层灯影组灯四段和灯二段的溶蚀孔、晶洞、裂缝和缝合线中,呈脉状、粒状、条带状或块状等它形充填,具有中间相结构和镶嵌状结构特征,边缘平直,颜色深黑,不染手,致密坚硬,贝壳状断口,反映其原油为高温热裂解成因特征,如图3所示。

震旦系灯影组灯四段地层相对较厚,主要由块状及砾状白云岩组成,储层沥青主要赋存在溶蚀孔缝中。据老龙1井、高科1井、安平1井及威117井等取心井样品统计,大部分样品沥青含量在1.2%左右,完全不含碳沥青的样品只有10件,不足10%,部分样品(约10%)碳沥青高度富集,含量达5%以上,表明碳沥青在地层剖面中广泛分布。

震旦系灯影组灯二段主要岩性为灰色及褐灰色层状白云岩及杂色砾状白云岩,储层沥青占绝对优势,少数含泥质白云岩中见微量同层沥青。碳沥青分布趋向于在剖面上段和下段相对富集,而在中段则相对较贫。上段见沥青脉,宽数厘米,大体平行层面,脉中碳沥青含量达50%以上。脉体上下相对富集,含量达到2%的样品比比皆是。

3 沥青成熟度

3.1 反射率

对于四川盆地海相高演化下古生界震旦系灯影组,由于镜质组的缺乏,本文主要根据测定沥青的反射率来研究沥青的成熟度[固体沥青反射率(R_o)与等效镜质体反射率(R_o')换算公式: $R_o' = 0.3364 + 0.6569R_o$]^[17]。

依据固体沥青的光学性质,可以将固体运移沥青分为非晶质沥青、类微晶质沥青、类结晶质沥青3种,在地层中往往2种结构共存,其结构随沥青成熟度高低而不同。随热演化程度的增高向反射率较高的结构转化,沥青的结构也就由非晶质→类微晶质→类结晶质→石墨化沥青转化^[13]。从测定结果来看,沥青反射率(R_o)值分布在2.62%~4.05%之间,平均值为3.47%,换算为等效镜质体反射率(R_o')值分布范围在2.06%~3.0%之间,平均值为2.62%。从等效镜质体反射率分布图(图2)上可以看出,等效镜质体反射率(R_o')可分为2期。岩心观察发现,磨溪8井具有2期特征:一期光泽强,氧化程度高,近半石墨阶段;二期氧化程度低,粘手,呈深棕色[图3(k)—图3(l)],且 R_o' 值主要分布在2.6%~3.0%之间,表明乐山—龙女寺古隆起地区震旦系灯影组沥青热演化程度高,普遍达到了成熟—高成熟阶段,基本上属于类晶质沥青^[13]。

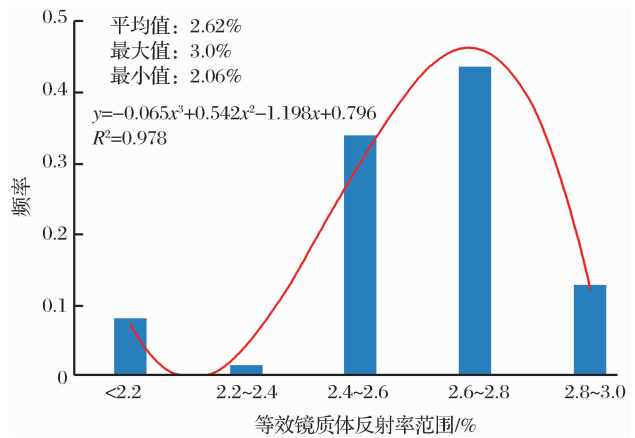


图2 等效镜质体反射率分布

Figure 2 Distribution of equivalent vitrinite reflectance

四川盆地乐山—龙女寺古隆起地区震旦系灯影组沥青的反射率表明其成熟度很高,从侧面上反映古油藏已基本完全裂解,原油裂解气潜力大。张林等^[2]认为乐山—龙女寺古隆起地区震旦系灯影组地层中沥青现已达到生气下限,并曾大量生气,其主生气期晚于干酪根,有利于聚集成藏,为晚期天然气成藏提供一定气源。这与现今灯影组储层沥青反射率普遍处于过成熟阶段相符,而且反映了沥青的热裂解成因。

3.2 单井——威117井反射率剖面

威117井是本文测定储层沥青发射率样品最多的一口井,共测定18个样点。最上部灯四段297号样品埋深为2985.9m,至最底部灯二段192号样品埋深为3579.6m,控制地层厚度将近600m;样点在

剖面中的分布基本上是均匀的、连续的,如图4所示。沥青反射率值由上部的3.20%向下到底部增至3.51%,对应的等效镜质体反射率值为2.44%~2.64%。反射率值在剖面的分布由上到下总体上是逐渐增加的,与样品埋深之间有良好的正相关关系,回归分析结果表明,二者相关系数达0.83,为显著相关性,单点离散度较小。本钻井钻遇地层主要为灯二段,厚为502m,灯四段和灯三段厚度均薄,分别

为24m和6.5m,层段之间未发现明显的“反射率断层”,可以认为反射率在本钻井剖面中的变化是连续的、渐变的。图4明确反映2个特点:一是反射率值高,按一般评价标准有机质成熟度已达到过成熟阶段;二是反射率梯度较小,计算得知碳沥青反射率梯度(R_b)为0.052%/100m,等效镜质体反射率梯度(R_o')为0.033%/100m,比正常沉积剖面中的变化梯度略低。

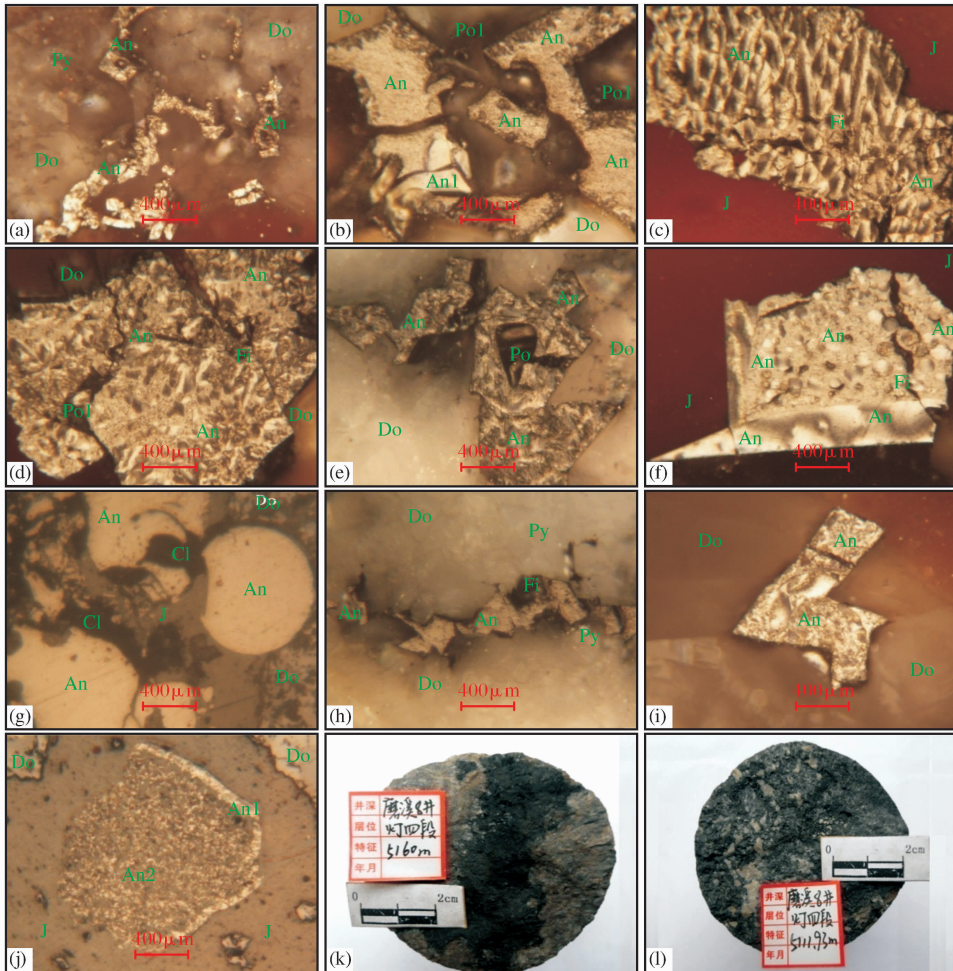


图3 震旦系灯影组储层沥青镜下特征

Figure 3 Microscopic characteristics of reservoir bitumen from Sinian Dengying Formation

(a) 安平1井,5050.0m,杂色砾状白云岩,溶蚀孔缝中充填脉状碳沥青(An),充填度高,多数破裂成段;(b) 安平1井,5062.5m,杂色微层状白云岩,溶蚀孔(Po1)中充填粗脉状碳沥青(An),见更晚期碳沥青脉(An1);(c) 威117井,3484.7m,暗灰色层状白云岩碎屑样中的碳沥青脉(An),微断裂缝(Fi)使各股“麻花”错位;(d) 威117井,3000.2m,灰色薄层白云岩,白云石(Do)晶体可见,晶间溶蚀孔(Po1)较大,其中充满碳沥青(An),整体成块状,内部粒状及多孔状,裂缝(Fi)发育;(e) 高石1井,4968.5m,灰色层状白云岩,裂缝交叉处充填碳沥青(An)的粗大脉体,其中孔洞(Po)易见;白云岩(Do)重结晶粒度也粗大;(f) 资1井,4008.6m,Zd24,杂色砾状白云岩碎屑样中的块状碳沥青(An),显示球粒结构,浅色和深色的均为碳沥青;(g) 老龙1井,2864.0m,含沥青—闪锌矿白云岩,局部破碎并形成较大溶蚀孔(Po1),集中充填碳沥青(An),呈块状及圆球状;(h) 南江,场坝-7(2),灰黑色薄层白云岩,白云石(Do)半自形晶粒,晶间缝隐约可见;溶蚀缝(Fi)中断续充填碳沥青脉(An),形状不规则;(i) 高科1井,5175.6m,杂色砾状白云岩,晶间缝中充填短脉状碳沥青(An),似粒状结构,边缘整齐规则;强非均性,反射率高;(j) 磨溪8井,5113.5m,暗色斑孔状白云岩,碎屑样中见碳沥青集合体,近孔壁处为壳状碳沥青(An1),较纯;孔中为蜂窝状碳沥青(An2),微孔发育;(k) 泥质云岩,裂缝溶洞发育,充填有石英脉、沥青;层间缝也见有沥青;沥青分2期,肉眼氧化程度不同:一期光泽强,氧化程度高,近半石墨阶段;二期氧化程度低,粘手,呈深棕色;(l) 泥质云岩,裂缝溶洞发育,充填有石英脉、沥青;层间缝也见有沥青;沥青分2期,肉眼氧化程度不同:一期光泽强,氧化程度高,近半石墨阶段;二期氧化程度低,粘手,呈深棕色

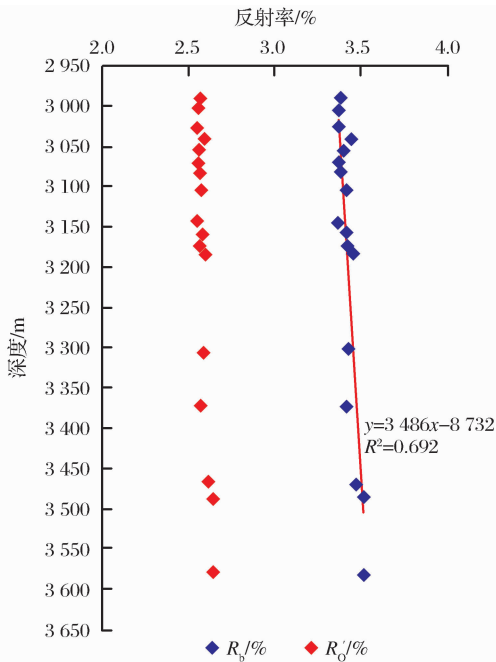


图4 威117井反射率剖面

Figure 4 Reflectance profile of well Wei 117

4 沥青有机元素和碳同位素特征

本文有机元素和碳同位素分析的样品主要来源于乐山—龙女寺古隆起地区震旦系灯影组灯四段和灯二段高石1井、安平1井、磨溪8井、高科1井及威117井等储层固体沥青(富集后)样品和相应的烃源岩干酪根以及野外剖面的南江杨坝和广元矿山梁沥青脉的2个露头沥青样品。

4.1 有机元素组成

为研究固体沥青的化学结构及组成,林峰等^[13]对沥青进行了有机元素组成分析,红外光谱分析,X-射线粉晶衍射分析。分析结果表明沥青在由非晶质向类结晶质转化的过程中,氢、氧、氮的含量逐渐降低,碳原子含量逐渐升高,这属于一个富碳去氢和杂原子的过程。

本文沥青元素分析结果表明,除威117井的1个样品因可能混有部分储集岩碎屑外,其他沥青均较纯,含碳量都在80%左右,分布在51.57%~85.05%。另外,不同层位沥青在氢、氧、氮、硫4种元素的相对含量上有明显变化。乐山—龙女寺古隆起震旦系灯影组储层沥青以贫氢、富氧、贫硫为特征,其中H/C原子比整体上相对较低,仅为0.30~0.43,平均值为0.33,O/C原子比为0.01~0.03,平均值为0.02,可见储层沥青的脱氢化严重,炭化程度已经很高,基本上处于成熟—过成熟阶段,表明残

余沥青生烃能力很低;S/C原子比为0.03~0.06,平均值0.05。与下部地层相比较而言,须家河组(T_3x)沥青中氢含量相对较多,氧含量和硫含量较少,H/C原子比整体上相对集中,集中在0.42~0.62之间,O/C原子比为0.02~0.07,热演化程度相对较高;S/C原子比为0.003~0.03。而长兴组(P_2ch)和飞仙关组(T_1f)储层沥青总体上贫氢、富氧、富硫,H/C原子比为0.15~0.50,主要分布在0.40左右,O/C原子比为0.05~0.18,热演化程度与本文研究样品相当;S/C原子比为0.025~0.085(图5),明显高于须家河组和灯影组储层沥青的S/C原子比,可能与长兴组、飞仙关组储层沥青受到了硫酸盐热化学还原反应(TSR)^[9,11,18]影响,导致其热演化程度和S/C原子比偏高有关。此外来自广元矿山梁沥青脉的这个样品和抚顺油页岩干酪根,由于演化程度相对较低,其H/C原子比分别达到了1.12和0.96,O/C原子比分别为0.03和0.07,成熟度偏低,生烃潜力较大。

不同层位储层沥青有机元素组成之间的差异主要与硫酸盐热化学还原反应(TSR)作用的影响有关。碳酸盐岩鲕滩储层长兴组、飞仙关组沥青含硫量大,S/C原子比偏高,受硫酸盐热化学还原反应作用的影响较大,导致其热演化程度与震旦系灯影组储层沥青相当;陆相须家河组沥青含硫量少,S/C原子比最低,表明须家河组储层沥青未受硫酸盐热化学还原反应(TSR)影响;乐山—龙女寺古隆起地区震旦系灯影组储层沥青含硫量少,S/C原子比介于长兴组—飞仙关组和须家河组之间,揭示了储层沥青受硫酸盐热化学还原反应(TSR)影响较小。天然气中 H_2S 含量的高低可以有效地证明S/C原子比的高低即受硫酸盐热化学还原反应(TSR)影响的大小,长兴组、飞仙关组天然气藏中 H_2S 含量高,达到了0.02%~16.21%;须家河组气藏中则基本未见 H_2S ;据统计,灯影组天然气中 H_2S 的含量为0.74%~3.75%,含量低。此外,这些层位的N/C原子比基本上都介于0.004~0.02之间,表明氮元素的含量主要与原始原油的组成有关,受次生作用的影响较小。

4.2 碳同位素组成

不同时代烃源岩干酪根和抽提物同位素组成之间有明显的差异,是油源和气源对比的一种现实方法。稳定碳同位素值同时具明确的生源意义,受热演化程度较小,反映母质来源,可以成为表征烃类母质来源的一个有效参数。

四川盆地海相烃源岩干酪根碳同位素变化非常

有规律,从下中生界到古生界,干酪根的碳同位素值基本上由低变高:上震旦统烃源岩干酪根碳同位素 $\delta^{13}C$ 值为 $-33.4\text{‰} \sim -29.2\text{‰}$,稍微偏高;下寒武统烃源岩干酪根碳同位素 $\delta^{13}C$ 值分布范围在 $-36.6\text{‰} \sim -31.7\text{‰}$ 之间;上奥陶统一志留统烃源岩干酪根碳同位素 $\delta^{13}C$ 值主要为 $-31\text{‰} \sim -28\text{‰}$,明显比下寒武统要高一些;上二叠统龙潭组、长兴组烃源岩干酪根碳同位素值为 $-28.79\text{‰} \sim -23\text{‰}$,其中龙潭组煤的碳同位素值大于

-24‰ ^[20];下三叠统飞仙关组和上三叠统须家河组干酪根 $\delta^{13}C$ 值分别为 $-27.51\text{‰} \sim -26.28\text{‰}$ ^[21] 和 $-27.6\text{‰} \sim -24.7\text{‰}$ ^[22]。而此次分析的四川盆地乐山—龙女寺古隆起地区震旦系灯影组和广元矿山梁地区寒武系沥青样品的碳同位素值在 $-36.8\text{‰} \sim -34.5\text{‰}$ 之间变化,平均值为 -35.7‰ (图 6),与下寒武统烃源岩干酪根碳同位素具有很好的可比性,揭示下寒武统烃源岩即筇竹寺组对震旦系储层沥青具有相对较大的贡献。

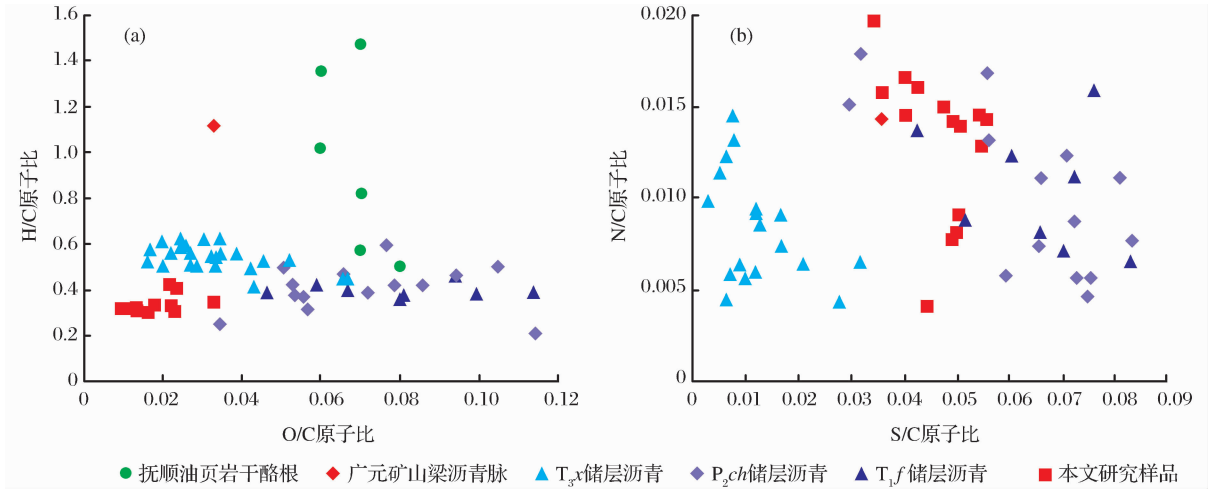


图 5 震旦系灯影组储层沥青有机元素组成

(T_{3x} 、 P_{2ch} 和 T_{1f} 储层沥青有机元素数据来源于文献[18]和文献[19])

Figure 5 The elemental compositions of reservoir bitumen from Sinian Dengying Formation

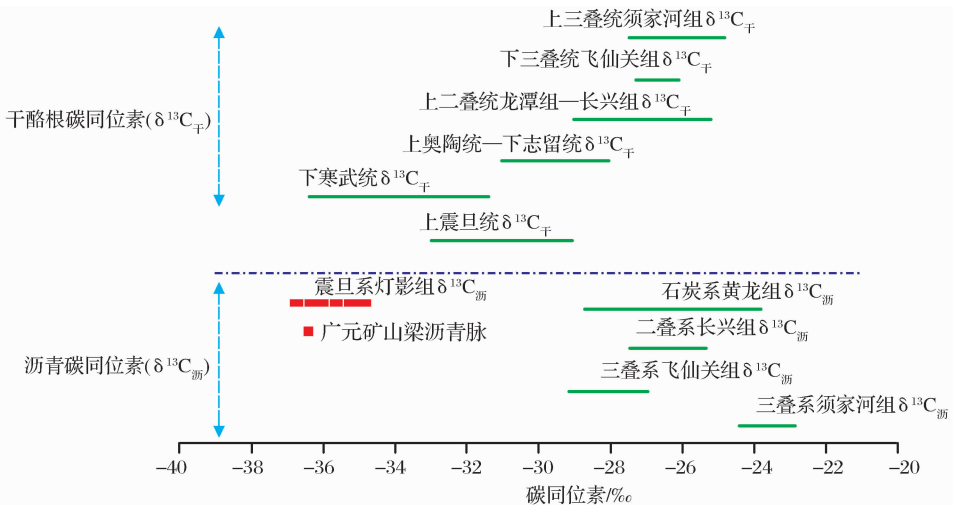


图 6 四川盆地地下古生界烃源岩干酪根和沥青碳同位素分布

Figure 6 Distribution of Kerogen and bitumen carbon isotope of Lower Paleozoic, Sichuan Basin

据刘仲宣^①研究认为,通常情况下,干酪根热裂解可以生成油和天然气,石油再次裂解形成沥青质和天然气,其碳同位素的级次关系一般为 $\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_{油} < \delta^{13}C_{沥青} < \delta^{13}C_{干}$,级差分布在 $2\text{‰} \sim 3\text{‰}$ 之间。寒武系

筇竹寺组烃源岩 $\delta^{13}C_{干}$ 值为 $-36.6\text{‰} \sim -31.7\text{‰}$,乐

① 刘仲宣,四川盆地资阳地区天然气地质综合研究及勘探总结. 内部报告,1997.

山—龙女寺古隆起地区震旦系储层沥青的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{沥青}}$ 值则为 $-36.8\% \sim -34.5\%$ ，高石梯—磨溪地区 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值为 $-32.4\% [23]$ ，威远震旦系气藏和资阳气藏 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值分别为 $-34\% \sim -32\%$ 和 $-37.51\% [24]$ 。其级次为 $\delta^{13}\text{C}_{\text{资}} < \delta^{13}\text{C}_{\text{油}} < \delta^{13}\text{C}_{\text{油}} < \delta^{13}\text{C}_{\text{威}} \leq \delta^{13}\text{C}_{\text{高}} < \delta^{13}\text{C}_{\text{干}}$ 。可以认为，资阳气藏主要为油型气，威远气藏和乐山—龙女寺古隆起地区不是油型气，天然气主要来自烃源岩干酪根晚期热裂解气，而资阳古圈闭中的天然气主要来自液态烃热裂解气。此外，威远构造、资阳构造和高石梯—磨溪潜伏构造形成时间存在差异，资阳为印支期形成，燕山期消失，而威远为燕山期形成的构造，高石梯—磨溪潜伏构造一直存在，因此捕获天然气的时期不同，导致威远地区和高石梯—磨溪地区天然气主要为干酪根裂解气，次为油裂解气；而资阳地区主要是油裂解气。

此外，纵向上从不同层位来看，石炭系黄龙组固体沥青碳同位素值主要分布在 $-28.83\% \sim -23.99\%$ 之间^[3]，二叠系长兴组沥青碳同位素值在 $-27.78\% \sim -25.60\%$ 之间变化^[18]，三叠系飞仙关组储层沥青的碳同位素值分布范围为 $-29.28\% \sim -27.04\% [22]$ ，须家河组的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{沥青}}$ 值分布在 $-24.38\% \sim -22.97\%$ 之间^[18]，川中乐山—龙女寺古隆起地区和矿山梁地区沥青脉的沥青 $\delta^{13}\text{C}_{\text{沥青}}$ 值为 $-36.8\% \sim -34.5\%$ ，比上覆地层沥青碳同位素值都明显偏低，不同层位沥青碳同位素存在差别，应该是反映原始烃源岩性质不同。沥青如此低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值，意味着其源于震旦系—下寒武统的原油，特别是寒武系原油的特征。

5 乐山—龙女寺古隆起地区储层沥青与油气藏关系

众多学者认为四川盆地震旦系天然气主要为原油裂解气^[1-2,6,10]，而沥青与原油裂解气在成因上存在密切联系^[25-26]，研究沥青的分布及地球化学特征，为了解油气的生成、运移、聚集及富集规律，揭示原油裂解气的成因与来源提供了重要途径。本文研究发现，储层沥青广泛分布在乐山—龙女寺古隆起震旦系碳酸盐岩储层灯影组灯四段和灯二段的溶蚀孔、晶洞、裂缝和缝合线中，呈脉状、粒状、条带状或块状等它形充填，在地区上主要分布在威远、资阳和乐山—龙女寺古隆起。其中，威远地区和资阳地区沥青平均含量分别达到了 0.8% 和 1.1% ，高石梯—磨溪地区沥青平均含量达到了 1.2% ，川西南边界上的老龙 1 井沥青平均含量也达到了 0.6% ，而川

南地区的长宁 3 井基本未见沥青分布，而现今发现的气田或含气构造（如威远气田、高石 1 井、资阳含气构造）基本上都分布在高含沥青的地区，进一步证明沥青含量和油气藏分布存在一定的关系。储层沥青作为有机质成烃演化的产物，揭示了在这些地区存在过油气的生排聚过程。

资阳含气构造、威远气田（印支期位于资阳古圈闭的南斜坡）及高石梯—磨溪潜伏构造带现今都有大量储层沥青的分布^[1-2,5,7,10]，说明资阳古圈闭的巨大及印支期聚油面积广阔。威远—资阳地区以抗张能力强的花岗岩为基底，破裂程度低，为相对抬升区，四周则为相对坳陷区。三叠纪印支期，乐山—龙女寺古隆起带轴线南移，在轴部出现了资阳古圈闭，侏罗纪—白垩纪燕山期古构造轴线迁移至威远北斜北翼，资阳等古圈闭早期存在，晚期消失，威远北部的燕山期形成的古圈闭也随之消失；喜马拉雅期，造山运动剧烈，四川盆地整体抬升，此阶段烃源岩基本停止生烃，挤压应力进一步增强，使威远背斜最终形成。高石梯—磨溪构造带为乐山—龙女寺古隆起轴部东端的潜伏构造，在二叠纪前就形成了遂宁古圈闭，在印支期、燕山期、喜马拉雅期一直存在，仅构造轴线逐渐向南部资阳地区偏移，晚喜马拉雅运动才最终定型，有利于油气聚集成藏。

6 结论

(1) 乐山—龙女寺古隆起地区震旦系灯影组储层沥青等效镜质体反射率 (R_o') 值分布范围在 $2.06\% \sim 3.0\%$ 之间，平均值为 2.62% ；储层沥青 H/C 原子比和 O/C 原子比分别为 $0.30 \sim 0.43$ 和 $0.01 \sim 0.03$ ，表明沥青的成熟度高，脱氢化严重，炭化程度很高，基本上处于成熟—过成熟阶段。

(2) 储层沥青 S/C 原子比为 $0.03 \sim 0.06$ ，与长兴组和飞仙关组储层沥青 S/C 原子比相比偏低，表明乐山—龙女寺古隆起地区震旦系灯影组储层沥青受硫酸盐热化学还原反应 (TSR) 影响较小。

(3) 乐山—龙女寺地区震旦系灯影组和广元矿山梁沥青脉样品的碳同位素值在 $-36.8\% \sim -34.5\%$ 之间变化，平均值为 -35.7% ，在各层位干酪根和沥青碳同位素中最低，与下寒武统筇竹寺组烃源岩干酪根碳同位素具有很好的可比性，揭示筇竹寺组烃源岩对震旦系灯影组储层沥青具有相对较大的贡献。

(4) 乐山—龙女寺古隆起震旦系灯影组储层沥青分布广泛，威远地区和资阳地区沥青平均含量分

别达到了 0.8% 及 1.1%, 高石梯—磨溪地区沥青平均含量高达 1.2%, 表明乐山—龙女寺古隆起地区普遍存在古油藏, 原油裂解气勘探潜力巨大。

致谢:感谢伍大茂教授和于聪博士对本论文的指导, 并感谢中国石油勘探开发研究院石油地质实验研究中心和西南油气田对本论文实验分析和样品采集提供的帮助。

参考文献 (References):

- [1] Xu Guosheng, Yuan Haifeng, Ma Yongsheng. The source of Sinian and Lower-Palaeozoic bitumen hydrocarbon evolution in the middle and southeast of Sichuan Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(8): 1143-1151. [徐国盛, 袁海峰, 马永生. 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): 1143-1151.]
- [2] Zhang Lin, Wei Guoqi, Wu Shixiang, *et al.* Distribution characters and hydrocarbon-generating potential of bitumen of Sinian-Lower Paleozoic in Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2005, 27(3): 276-280. [张林, 魏国齐, 吴世祥, 等. 四川盆地震旦系一下古生界沥青产烃潜力及分布特征[J]. *石油实验地质*, 2005, 27(3): 276-280.]
- [3] Li Yanxia, Zhong Ningning. Approach to solid migrabitumen mechanism of Carboniferous gas reservoir in the east of Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2007, 29(4): 402-404. [李艳霞, 钟宁宁. 川东石炭系气藏中固体沥青形成机理探讨[J]. *石油实验地质*, 2007, 29(4): 402-404.]
- [4] Wang Zecheng, Zhao Wenzhi, Zhang Lin, *et al.* The Exploration of Natural Gas and Structural Sequence of the Sichuan Basin[M]. Beijing: Geology Press, 2002. [汪泽成, 赵文智, 张林, 等. 四川盆地构造层序与天然气勘探[M]. 北京: 地质出版社, 2002.]
- [5] Liu Shugen, Qin Chuan, Sun Wei, *et al.* The coupling formation process of four centers of hydrocarbon in Sinian Dengying Formation of Sichuan Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(3): 879-888. [刘树根, 秦川, 孙玮, 等. 四川盆地震旦系灯影组油气四中心耦合成藏过程[J]. *岩石学报*, 2012, 28(3): 879-888.]
- [6] Cui Huiying, Zhang Li, Wei Guoqi, *et al.* Characteristics of the Sinian reservoir bitumen in Weiyuan-Ziyang areas of the Sichuan Basin and its significance [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2008, 30(5): 490-493. [崔会英, 张莉, 魏国齐, 等. 四川盆地威远—资阳地区震旦系储层沥青特征及意义[J]. *石油实验地质*, 2008, 30(5): 490-493.]
- [7] Zhang Lin, Wei Guoqi, Wang Zecheng, *et al.* Analysis of formation mechanism of Sinian Dengying Formation in GaoShiti-Moxi structure belt in Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2004, 15(6): 584-589. [张林, 魏国齐, 汪泽成, 等. 四川盆地高石梯—磨溪构造带震旦系灯影组的成藏模式[J]. *天然气地球科学*, 2004, 15(6): 584-589.]
- [8] Zhao Wenzhi, Wang Zecheng, Zhang Shuichang, *et al.* Analysis on forming conditions of deep marine reservoirs and their concentration belts in superimposed basins in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(supplement D): 9-18. [赵文智, 汪泽成, 张水昌, 等. 中国叠合盆地深层海相油气成藏条件与富集区带[J]. *科学通报*, 2007, 52(增刊 D): 9-18.]
- [9] Dai Jinxing. Pool-forming periods and gas sources of Weiyuan Gas Field[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2003, 25(5): 473-480. [戴金星. 威远气田成藏期及气源[J]. *石油实验地质*, 2003, 25(5): 473-480.]
- [10] Sun Wei, Liu Shugen, Ma Yongsheng, *et al.* Determination and quantitative simulation of gas pool formation process of sinian cracked gas in Weiyuan-Ziyang area, Sichuan Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(8): 1153-115. [孙玮, 刘树根, 马永生, 等. 四川盆地威远—资阳地区震旦系油裂解气判定及成藏过程定量模拟[J]. *地质学报*, 2007, 81(8): 1153-115.]
- [11] Xie Zengye, Wei Guoqi, Li Jian, *et al.* Feixianguan Formation oolitic beach reservoir bitumens and gas reservoiring process in northeast Sichuan[J]. *Natural Gas Industry*, 2004, 24(12): 17-19. [谢增业, 魏国齐, 李剑, 等. 川东北飞仙关组鲕滩储层沥青与天然气成藏过程[J]. *天然气工业*, 2004, 24(12): 17-19.]
- [12] Xie Zengye, Tian Shicheng, Wei Guoqi, *et al.* The study on bitumen and foregone pool of Feixianguan oolitic in northeast Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2005, 16(3): 283-288. [谢增业, 田世澄, 魏国齐, 等. 川东北飞仙关组储层沥青与古油藏研究[J]. *天然气地球科学*, 2005, 16(3): 283-287.]
- [13] Lin Feng, Wang Tingdong, Dai Hongming, *et al.* The properties and genesis of solid migrabitumen of carbonate reservoirs in Sichuan Basin[J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 1998, 17(3): 174-178. [林峰, 王廷栋, 代鸿鸣, 等. 四川盆地碳酸盐岩储层中固体运移沥青的性质和成因[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 1998, 17(3): 174-178.]
- [14] 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.
- [15] Jacob H. Disperse solid bitumens as an indicator for migration and maturity in prospecting for oil and gas[J]. *Erdol und Kohle*, 1985, 38: 364-366.
- [16] Hwang *et al.* Geochemical comparison of reservoir solid bitumens with diverse origins[J]. *Organic Geochemistry*, 1998, 29(1): 505-518.
- [17] Feng Guoxiu, Chen Shengji. The relationship between the reflectance of bitumen and vitrinite[J]. *Natural Gas Industry*, 1988, 8(3): 20-25. [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.]
- [18] Cai Xunyu, Zhu Yangming, Huang Renchun. Geochemical behaviors and origin of reservoir bitumen in Puguang gas pool[J]. *Oil & Gas Geology*, 2006, 27(3): 340-347. [蔡勋育, 朱扬明, 黄仁春. 普光气田沥青地球化学特征及成因[J]. *石油与天然气地质*, 2006, 27(3): 340-347.]
- [19] Zhu Yangming, Li Yin, Hao Fang, *et al.* Compositional characteristics and origin of marine and terrestrial solid reservoir

- bitumen in the northeast Sichuan Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(3): 870-878. [朱扬明, 李颖, 郝芳, 等. 四川盆地东北部海、陆相储层沥青组成特征及来源[J]. *岩石学报*, 2012, 28(3): 870-878.]
- [20] Ma Yongsheng. Geochemical characteristics and origin of natural gases from Puguang Gas Field on eastern Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2008, 19(1): 1-7. [马永生. 普光气田天然气地球化学特征及气源探讨[J]. *天然气地球科学*, 2008, 19(1): 1-7.]
- [21] Wang Tongshan, Geng Ansong, Sun Yongge, *et al.* Geochemical characteristics of solid bitumen in reservoir and their implication for the origin of natural gas of Feixianguan Formation in northeastern Sichuan Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(2): 340-348. [王铜山, 耿安松, 孙永革, 等. 川东北飞仙关组储层固体沥青地球化学特征及其气源指示意义[J]. *沉积学报*, 2008, 26(2): 340-348.]
- [22] Huang Shiwei, Zhang Tingshan, Wang Shunyu, *et al.* Research on source characteristics and Origin of Xujiache Formation, Upper Triassic in Chishui area, Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2004, 15(6): 590-592. [黄世伟, 张廷山, 王顺玉, 等. 四川盆地赤水地区上三叠统须家河组烃源岩特征及天然气成因探讨[J]. *天然气地球科学*, 2004, 15(6): 590-592.]
- [23] Yao Jianjun, Zheng Dumao, Ning Ning, *et al.* The study on petroleum system of Gaoshiti and Moxi structure belt in Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 13(5/6): 74-79. [姚建军, 郑渡茂, 宁宁, 等. 四川盆地高石梯—磨溪构造带震旦系含油气系统研究[J]. *天然气地球科学*, 13(5/6): 74-79.]
- [24] Dai Jinxing, Hu Anping, Yang Chun, *et al.* Newest achievements on gas exploration and its geoscientific theories in China [J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(12): 1-5. [戴金星, 胡安平, 杨春, 等. 中国天然气勘探及其地学理论的主要新进展[J]. *天然气工业*, 2006, 26(12): 1-5.]
- [25] Zhu Dongya, Jin Zhijun, Peng Yongmin, *et al.* Geochemical characteristics and differences of highly matured bitumen in the Sinian Dengying Formation [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(2): 382-387. [朱东亚, 金之钧, 彭勇民, 等. 黔中隆起震旦系灯影组高热演化沥青地球化学特征及差异分析[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(2): 382-387.]
- [26] Wang Yun Peng, Tian Jing. Review of oil cracked gas formation, identification and migration [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007, 18(2): 235-244. [王云鹏, 田静. 原油裂解气的形成、鉴别与运移研究综述[J]. *天然气地球科学*, 2007, 18(2): 235-244.]

Geochemical Characteristics and Significance of Sinian Reservoir bitumen in Leshan-Longnsvi Paleo-uplift Area, Sichuan Basin

TIAN Xing-wang¹, HU Guo-yi^{2,3}, LI Wei^{2,3}, Li Xian-qing¹,
SU Gui-ping¹, XU Yi-rui^{2,3}, CAI Di^{2,3}, WEI Hai-pu¹

(1. *China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;*

2. *Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China;*

3. *Key Laboratory of Petroleum Geochemistry, CNPC, Beijing 100083, China)*

Abstract: Through whole rock microscopic determination of reservoir bitumen samples from new drilling data of Leshan-Longnsvi Paleo-uplift area, a large number of reservoir bitumens are found in the Sinian Dengying Formation in the Leshan-Longnsvi paleo-uplift area of Sichuan Basin. Combined with determination of bitumen reflectance, organic elemental analysis and carbon isotope analysis of these samples, the results show that: the equivalent vitrinite reflectance (R_o') of Dengying reservoir bitumen ranges from 2.06% to 3.0%, with an average of 2.62%, H/C and O/C atomic ratios are only 0.30-0.43 and 0.01-0.03, respectively, which reflect that the bitumen maturity is high, basically in the mature-overmature stage; S/C atomic ratio is only 0.03-0.06, and is somewhat low in comparison to reservoir bitumen from Changxing (P_2ch) and Feixianguan (T_1f) Formations, which indicate that Dengying Formation reservoir bitumens in ancient uplift area were slightly affected by thermochemical sulfate reduction (TSR); the value of stable carbon isotope is from -36.8‰ to -34.5‰, with an average of -35.7‰, which is the lowest compared with carbon isotope of kerogen and bitumen in each layer of Sichuan Basin, even lower than the carbon isotope of marine oil in Tarim Basin. Combined with the geological and tectonic background and carbon isotope of source rock kerogen in Sichuan Basin, the reservoir bitumen in this area is epigenetic - reservoir bitumen, sourced from Lower Cambrian Qiongzhusi Formation, which belongs to thermal evolution bitumen-pyrobitumen of the ancient reservoir when it cracked into gas during deep burial under high temperature and pressure.

Key words: Sichuan Basin; Reservoir bitumen; Reflectance; Elemental composition; Carbon isotope