

川中古隆起北斜坡不同地区灯影组天然气差异及其影响因素

——以蓬探1井和中江2井为例

朱联强¹, 柳广弟^{1,2*}, 宋泽章^{1,2*}, 赵文智^{1,2}, 田兴旺^{1,3}, 戴鑫³, 王云龙³, 杨岱林³, 李强¹, 江林³, 李成海³, 胡丽³

1 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 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

* 通信作者, lgd@cup.edu.cn, songzz@cup.edu.cn

收稿日期: 2021-04-07

国家重点研发计划(2017YFC0603106)和国家自然科学基金青年基金项目(41802148)资助

摘要 川中古隆起北斜坡灯影组具有良好的勘探潜力, 是四川盆地天然气勘探重要的后备战略接替区。北斜坡地区灯影组天然气为以CH₄为主的干气, 天然气内部 $\delta^{13}\text{C}_{\text{C}_2\text{H}_6}$ 、CO₂含量及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 等存在明显差异, 天然气组分及同位素差异因素的分析对深化灯影组天然气成藏演化过程的研究具有重要意义。本文基于北斜坡两口典型探井(蓬探1井和中江2井)灯影组天然气组分及不同组分同位素的分析, 结合岩芯、岩石薄片的观察及储层固体沥青碳同位素、显微结构的分析, 深入剖析了造成北斜坡区典型探井天然气差异的原因。受硫酸盐热化学还原反应(TSR)作用的影响, 北斜坡地区灯影组天然气中存在较高含量的H₂S, 储层沥青碳同位素较烃源岩明显偏轻, C₂H₆碳同位素偏重。川中古隆起北斜坡区灯影组储层受过热液流体的影响, 储层内黄铁矿、闪锌矿、方铅矿等热液矿物组合发育, 储层沥青发育中一粗粒镶嵌、纤维状等显微结构。热液活动为TSR作用提供了丰富的硫源, 热液活动的强度是控制TSR反应强度的关键。强烈的TSR作用导致了天然气组分的变化及C₂H₆、CO₂碳同位素的增加, 是造成不同区域天然气差异的原因。

关键词 天然气; 储层沥青; 热液活动; TSR; 川中古隆起北斜坡区

The differences in natural gas from the Dengying Formation in different areas of the north slope of the central Sichuan Paleo-uplift and its controlling factors

—Taking Pengtan-1 and Zhongjiang-2 wells as examples

引用格式: 朱联强, 柳广弟, 宋泽章, 赵文智, 田兴旺, 戴鑫, 王云龙, 杨岱林, 李强, 江林, 李成海, 胡丽. 川中古隆起北斜坡不同地区灯影组天然气差异及其影响因素——以蓬探1井和中江2井为例. 石油科学通报, 2021, 03: 344-355

ZHU Lianqiang, LIU Guangdi, SONG Zezhang, ZHAO Wenzhi, TIAN Xingwang, DAI Xin, WANG Yunlong, YANG Dailin, LI Qiang, JIANG Lin, LI Chenghai, HU Li. The differences in natural gas from the Dengying Formation in different areas of the north slope of the central Sichuan Paleo-uplift and its controlling factors—Taking Pengtan-1 and Zhongjiang-2 wells as examples. Petroleum Science Bulletin, 2021, 03: 344-355. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.03.028

ZHU Lianqiang¹, LIU Guangdi^{1,2}, SONG Zezhang^{1,2}, ZHAO Wenzhi^{1,2}, TIAN Xingwang^{1,3}, DAI Xin³, WANG Yunlong³, YANG Dailin³, LI Qiang¹, JIANG Lin³, LI Chenghai³, HU Li³

1 College of Geosciences, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

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

Abstract The exploration results show that the Dengying Formation on the North Slope of the Central Sichuan paleo-uplift has a good exploration potential, and it is an essential area for a natural gas reserve replacement strategy in the Sichuan Basin. The natural gas in the north slope of the central Sichuan Paleo-uplift is dry natural gas, mainly composed of CH₄. There are obvious differences in the carbon isotopes of C₂H₆, the concentration of CO₂ and the carbon isotopes of CO₂ in the natural gas in the Dengying Formation of the north slope area. The analysis of the controlling factors leading to the differences in natural gas is of great significance to study the accumulation and evolution process of natural gas in the Dengying Formation. Based on gas component analysis and carbon isotope analysis of the different components in the Dengying Formation natural gas from two typical exploration wells in the north slope area, namely the Pengtan-1 and Zhongjiang-2 wells, we combined drill core description, microscopic observation of the thin sections, carbon isotope analysis and the microstructure of the reservoir solid bitumen in the Dengying Formation to analyze the causes for the difference in natural gas of the Dengying Formation in the north slope area of the central Sichuan Paleo-uplift. Influenced by thermochemical reduction of sulfate (TSR), there is a high content of H₂S in the natural gas of the Dengying Formation in the north slope area. The carbon isotopes of reservoir solid bitumen are lighter than that of the source rock, and the C₂H₆. The formation of the reservoir solid bitumen of the Dengying Formation was controlled by hydrothermal fluid activities. Hydrothermal mineral assemblages, such as pyrite, sphalerite, and galena, are developed in the Dengying Formation reservoir. Medium-coarse mosaic and fibrous structures are developed in the solid bitumen filling in the reservoir of the Dengying Formation, indicating hydrothermal fluid activities in the reservoir. Hydrothermal fluid provided an abundant sulfur source for TSR. The intensity of hydrothermal fluid activities controlled the intensity of the TSR reaction. A relatively strong TSR reaction leads to an increase in the concentration of CO₂, carbon isotopes of C₂H₆ and CO₂ of the natural gas. The difference of TSR intensity in the reservoir is the cause of the difference in natural gas from different regions.

Keywords natural gas; reservoir bitumen; hydrothermal activity; TSR; north slope of middle Sichuan Paleo-uplift

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.03.028

0 引言

四川盆地作为中国大型的含油富气盆地,迄今已有近 70 年的勘探历史。截至 2018 年底,四川盆地共发现大型天然气田(探明储量>300×10⁸ m³)25 个,探明储量超千亿立方米的超大型气田 9 个^[1-2]。盆地内震旦系一下古生界是油气勘探的重点层位,近年来在川中古隆起发现了安岳震旦—寒武系特大型气田,证实了盆地内震旦—寒武系具有良好的勘探潜力^[3-5]。古裂陷槽黑色页岩、古台地丘滩岩溶储集层、古原油裂解成气和古隆起运聚富集之间的时空配置关系控制了安岳震旦—寒武系特大型气田的形成与分布^[6-8]。安岳气田灯影组天然气主要为原油裂解气,CH₄ 含量通常大于 85%,C₂H₆ 含量小于 0.3%,天然气干燥系数大于 0.996,属于典型的干气,非烃气体以 H₂S、CO₂、N₂ 为主,并含有痕量的 He 等稀有气体^[9-10]。龙王庙组天然气来源的认识较为统一,均认为主要来源于筇竹寺组烃源岩^[11]。灯影组天然气的来源则存在不同

的看法,部分学者结合烃源岩、储层沥青和天然气的碳同位素及生物标志化合物的研究,认为灯影组天然气为筇竹寺组、灯影组烃源岩的混源气^[8-10]。也有学者通过储层沥青及轻烃等的研究,认为灯影组天然气主要来源于裂陷槽内筇竹寺组烃源岩,与灯影组烃源岩关系不大^[16]。无论灯影组烃源岩是否对灯影组天然气有贡献,筇竹寺组烃源岩的贡献无疑是重要的。基于对烃源岩的不同认识,灯影组天然气成藏模式也存在不同的观点,包括“自生自储、上生下储,旁生侧储”等^[8, 17-19]。造成灯影组内部天然气差异的成因存在较大的争议,部分学者认为这种差异主要是不同区域灯影组烃源岩与筇竹寺组烃源岩的混源比不同造成的^[13],还有人认为这种差异主要源于储层内的 TSR 作用^[17-18]。烃源岩认识不清、天然气差异成因不明对灯影组天然气成藏过程的研究带来较大的困难。

安岳特大型气田已进入开发阶段,天然气后备战略接替领域的寻找已然成为勘探的重点。近年来,川中古隆起北斜坡地区灯影组勘探屡获成功,角探 1 井

灯影组获得良好的油气显示,蓬探1井更是测试获气 $121.98 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 展示出了北斜坡区灯影组良好的勘探潜力,成为川中地区天然气勘探的有力接替区。马奎等(2020)通过对川中古隆起北斜坡区构造演化过程的恢复,认为加里东期的伸展裂陷作用有利于裂陷槽北部和斜坡腹部下寒武统优质烃源岩成规模发育,整体稳定继承性的斜坡构造背景下有利于岩性圈闭的保存^[19]。赵路子等(2020)通过对蓬探1井的精细解剖,认为德阳—安岳裂陷内灯二段发育断控型台缘带,台缘带展布受多排断裂的控制,发育多个大型丘滩体,丘滩体与断块构成岩性—构造复合圈闭,储层储集物性良好,显示裂陷内灯二段成藏条件有利^[20]。北斜坡灯影组勘探结果显示,其同层天然气组分特征也存在显著的差异。资料表明,蓬探1井和中江2井均钻遇灯二段地层,且均获得了良好的试气效果,但这两口井的天然气组成及天然气的同位素特征存在明显的差异,蓬探1井 CH_4 含量94.73%,中江2井仅82.59%,非烃气体含量却高达17.13%;蓬探1井天然气 C_2H_6 碳同位素约 -29.24‰ ;中江2井 C_2H_6 碳同位素仅 -33.23‰ ,较蓬探1井轻约 4‰ 。 C_2H_6 碳同位素受成熟度影响较小,可以反映母质的类型,因而常作为气源对比的重要参数^[21-22],这种同位素差异可能指示着气源的多样性。考虑到四川盆地构造演化的多

旋回性,及灯影组气藏漫长的成藏演化过程,相同烃源岩来源的天然气地球化学特征也会呈现出很大的变化^[23],北斜坡地区灯影组天然气内部存在明显差异也可能代表着研究区天然气成藏过程的复杂性。北斜坡区是灯影组天然气勘探的重要接替区,相关研究成果的报道偏少,对造成天然气组分及同位素差异因素的研究无疑是重要的,对深化天然气成藏演化过程的研究具有重要意义。通过对蓬探1井和中江2井天然气组分及不同组分碳同位素的分析,并结合储层矿物充填特征、储层沥青的焦炭结构及碳同位素特征的研究,讨论了造成蓬探1井与中江2井天然气差异的原因,以为川中古隆起北斜坡灯影组油气成藏演化及川中地区灯影组天然气差异的研究提供借鉴。

1 地质背景

川中古隆起属于加里东期古隆起,其轴部在雅安—资阳—岳池一线,古隆起区域内二叠系之前各地层的构造面貌总体表现为一个向NEE向倾没的大型鼻状隆起^[24-26]。研究区位于川中古隆起北斜坡,从现今构造格局上看,主要指磨溪地区以北的单斜构造带,其西侧紧邻德阳—安岳裂陷槽(图1),北侧以九龙山为界^[27]。灯影组沉积末期,受桐湾运动的影响,磨溪

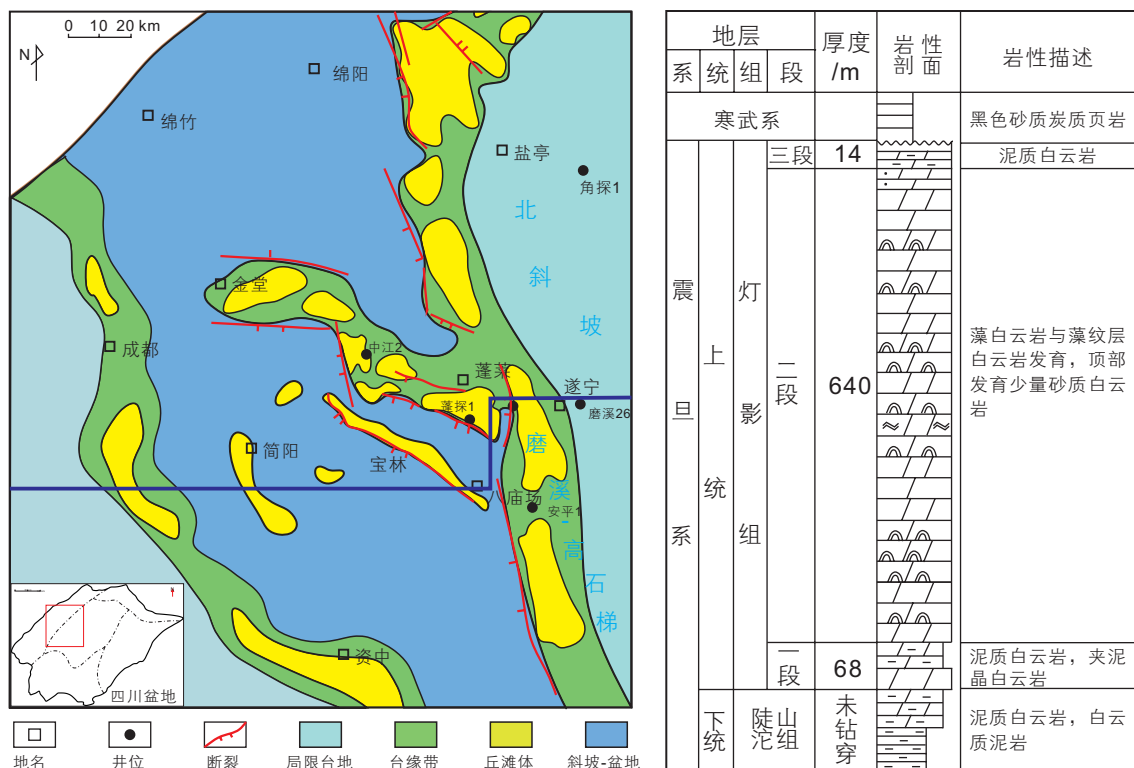


图1 研究区位置(据赵路子^[20]修改)及地层综合柱状图(蓬探1井)

Fig. 1 Location of the study area (modified based on ZHAO L Z^[20]) and comprehensive stratigraphic column (Pengtan-1 well)

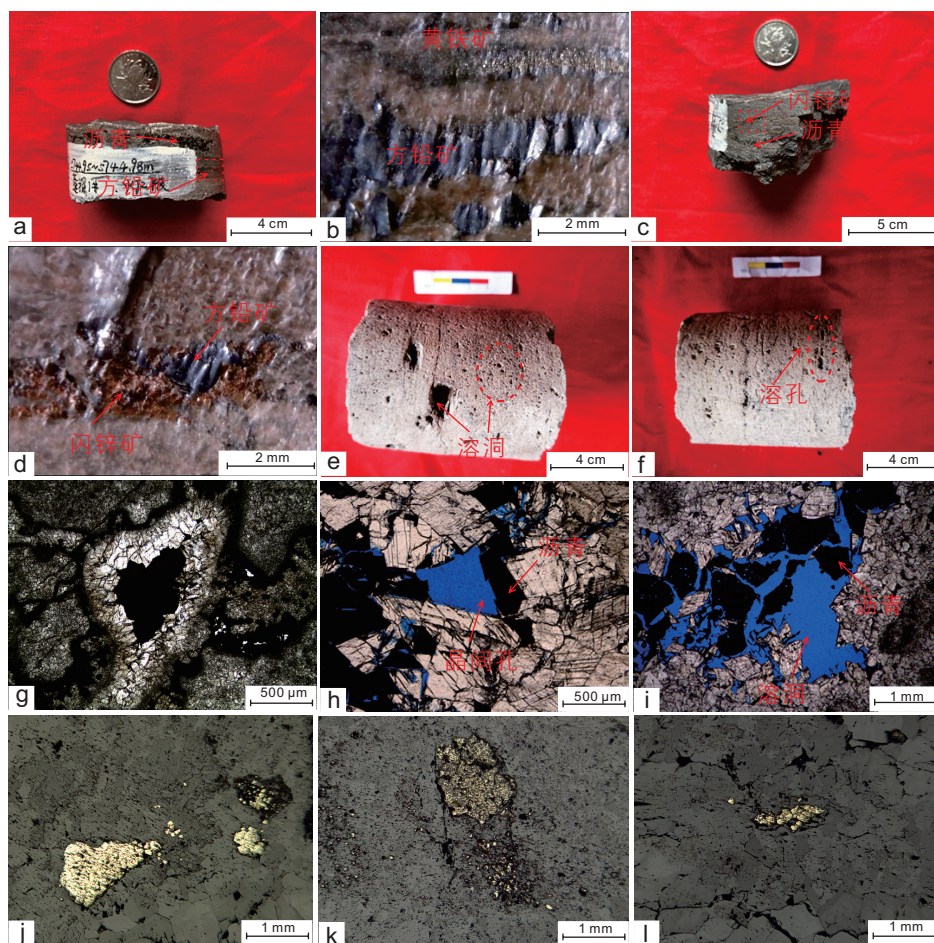
以北发生明显的隆升作用,并位于古隆起构造高部位;至海西晚期,上扬子地区发生克拉通内伸展裂陷作用,磨溪以北区域开始下沉形成单斜构造;印支晚期至现今,受川西龙门山逆冲推覆构造运动的影响,最终形成现今的低幅斜坡构造^[25-27]。

二叠系沉积前,从古隆起边缘向核部,依次剥蚀至奥陶系、寒武系,隆起高部位已剥蚀至震旦系灯影组^[25]。北斜坡地区蓬探1井和中江2井均缺失灯四段地层,灯三段直接与上覆寒武系地层不整合接触(图1)。区内灯影组主要为一套台地相沉积的碳酸盐岩,发育大量台地边缘亚相的丘滩体^[28-29],为北斜坡地区

灯影组储层的发育奠定了重要的基础。

2 储层特征

北斜坡地区灯影组为一套台地边缘相沉积的碳酸盐岩地层。岩芯观察表明,蓬探1井和中江2井灯影组主要的储集岩为藻叠层云岩、藻格架云岩,储集空间主要包括藻格架空、溶洞及溶孔(图2e~i)。薄片观察显示,灯影组储层藻格架孔较为发育,部分被沥青全充填(图2g)。岩芯上常见溶洞、溶孔的发育,部分溶洞直径超过1 cm(图2e)。溶洞边缘发育晶粒白



(a)蓬探1井, 5744.95 m, 灯二段, 藻砂屑白云岩, 溶缝充填黑色沥青及银灰色方铅矿; (b)蓬探1井, 5744.95 m, 灯二段, 藻砂屑白云岩, a图中红色虚线框放大, 溶缝充填银灰色方铅矿及金黄色黄铁矿; (c)蓬探1井, 5744.95 m, 灯二段, 藻砂屑白云岩, 溶缝充填沥青、方铅矿及闪锌矿; (d)蓬探1, 5773.18 m, 藻砂屑白云岩, c图中红色虚线框放大, 溶缝见褐色闪锌矿及银灰色方铅矿共生; (e)蓬探1, 5773.18 m, 藻砂屑白云岩, 溶孔、洞发育; (f)中江2井, 6555.90 m, 藻白云岩, 溶孔发育; (g)蓬探1井, 5729.44 m, 灯二段, 藻白云岩, 格架孔发育, 早期充填细一中晶白云石, 后期被沥青全充填; (h)蓬探1井, 5729.44 m, 灯二段, 藻白云岩, 溶孔发育, 见粗晶白云石及沥青充填; (i)中江2井, 6553.56 m, 灯二段, 藻白云岩, 溶孔发育, 见粗晶白云石及沥青充填; (j)蓬探1井, 5790.26 m, 灯二段, 反射光, 溶孔边缘的基岩见块状黄铁矿交代, 金黄色反光; (k)蓬探1井, 5781.4 m, 灯二段, 反射光, 藻白云岩, 基岩见块状黄铁矿交代, 金黄色反光; (l)蓬探1井, 5778.57 m, 灯二段, 反射光, 溶孔见粒状黄铁矿充填, 金黄色反光

图2 蓬探1井和中江2井岩芯薄片显微照片

云石, 内部被块状沥青充填(图 2h、i), 表明溶蚀孔隙为古油藏的充注提供了有效的储集空间。蓬探 1 井储层孔隙度分布于 1.08%~14.53%, 平均值 3.6%, 渗透率约 3.6 mD, 具有低孔低渗的特征^[20]。柱塞样孔隙度测试结果显示, 中江 2 井储层孔隙度分布于 1.81%~5.38%, 平均值 2.4%, 略低于蓬探 1 井。

3 天然气特征

3.1 组分特征

安岳气田灯影组天然气主要为原油裂解气, 其 CH₄ 含量通常大于 85%, C₂H₆ 含量小于 0.3%, 天然气干燥系数大于 0.996, 属于典型的干气, 非烃气体以 H₂S、CO₂、N₂ 为主, 并含有痕量的 He 等稀有气体。

蓬探 1 井和中江 2 井天然气均以 CH₄ 为主, 干燥系数超过 0.999, 属于典型的干气, 与磨溪—高石梯地区灯影组天然气相似。其中, 蓬探 1 井 CH₄ 含量 94.60%~94.94%, 均值 94.77%, C₂H₆ 含量极低, 约 0.07%~0.08%, 非烃气体以 CO₂、H₂S 为主, 含少量 N₂, 与磨溪—高石梯地区灯影组相似; 中江 2 井 CH₄ 含量明显偏低, 仅 80.96%(分布于 79.33%~82.59%), 略低于磨溪—高石梯地区灯影组。非烃气体含量高达 18.94%(分布于 17.31%~20.57%), 以 CO₂、H₂S 为主, 并含有少量 N₂(表 1)。两口井天然气组分存在一定差异, 蓬探 1 井天然气组分与磨溪—高石梯地区灯影组相当, 中江 2 井天然气中 CH₄ 含量偏低, 而 CO₂ 等非烃气体明显偏高。

3.2 同位素特征

蓬探 1 井天然气 $\delta^{13}\text{C}_{\text{C}_2\text{H}_6}$ 为 -33.9‰~-33.95‰, 均

值 -33.93‰; $\delta^{13}\text{C}_{\text{C}_2\text{H}_6}$ 为 -29.19‰~-29.31‰, 均值 -29.24‰; $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 为 -0.14‰~-0.98‰, 均值 -0.48‰。中江 2 天然气中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ 为 -34.67‰~-35.09‰, 均值 -34.88‰; $\delta^{13}\text{C}_{\text{C}_2\text{H}_6}$ 为 -33.13‰~-33.23‰, 均值 -33.18‰; $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 为 -16.38‰~-19.38‰, 均值 -17.88‰(表 1)。川中地区灯影组天然气中 CH₄ 碳同位素分布于 -34.7‰~-32.1‰, 均值 -32.9‰; C₂H₆ 碳同位素分布于 -29.5‰~-26.8‰, 均值 -28.1‰^[10-11]。两井天然气的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ 相似, 可以与川中灯影组天然气相对比, $\delta^{13}\text{C}_{\text{C}_2\text{H}_6}$ 则存在明显差异。蓬探 1 井天然气同位素特征与磨溪高石梯地区灯影组基本一致, 中江 2 井 C₂H₆ 碳同位素则明显偏低(图 3)。

储层中 CO₂ 通常存在 3 个来源: ①有机成因; ②地幔来源; ③碳酸盐岩来源^[30-31]。有机成因的 CO₂ 碳

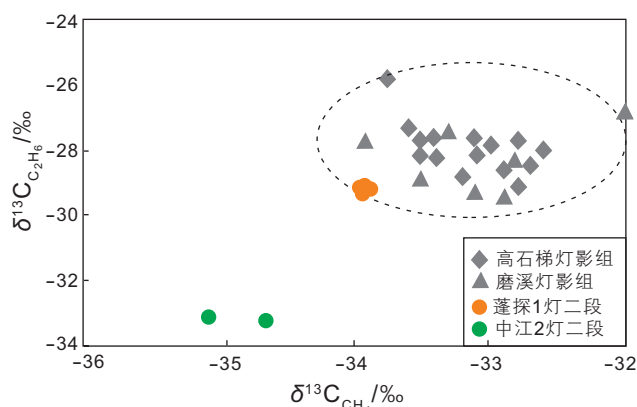


图 3 川中及北斜坡地区灯影组天然气同位素分布图

(图中高石梯—磨溪地区灯影组天然气数据引自魏国齐^[9-10])

Fig. 3 Isotopic distribution of natural gas in Dengying Formation of central Sichuan and northern slope area (The natural gas data of Dengying Formation in Gaoshiti Moxi area are sourced from Wei Guoqi^[9-10])

表 1 蓬探 1 井和中江 2 井天然气组分及同位素特征(据中石油西南油气田勘探开发研究院)

Table 1 Composition and isotopic characteristics of natural gas from Pengtan-1 well and Zhongjiang-2 well

(According to Exploration and Development Research Institute of PetroChina Southwest Oil and gas field company)

井位	层位	深度/m	取样时间	CH ₄ 含量/%	C ₂ H ₆ 含量/%	N ₂ 含量/%	CO ₂ 含量/%	H ₂ S含量/%	$\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}/\text{‰}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{C}_2\text{H}_6}/\text{‰}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}/\text{‰}$
蓬探 1	灯二	5726~5817	2020-05-13	94.94	0.08	0.13	2.32	2.46	-33.94	-29.24	-0.16
			2020-05-14	94.81	0.08	0.51	2.24	2.30	-33.95	-29.19	-0.98
			2020-05-15	94.6	0.07	0.78	2.20	2.33	-33.92	-29.31	-0.14
			2020-05-16	94.73	0.07	0.73	2.10	2.32	-33.90	-29.20	-0.63
中江 2	灯二	6804~6806,	2020-09-02	82.59	0.02	0.88	11.04	5.39	-34.67	-33.23	-19.38
		6789~6798	2020-09-04	79.33	0.01	0.53	15.05	4.99	-35.09	-33.13	-16.38
磨溪 128	灯四	5665~6710	\	89.67	0.04	0.14	9.20	1.40	-32.65	-27.42	\
高石 123	灯四	5395~6056	\	89.19	0.04	0.15	8.54	0.95	-30.13	-26.86	\

同位素通常低于 -10‰ ，地幔来源的 CO_2 碳同位素分布于 $-8\text{‰} \sim -4\text{‰}$ ，而碳酸盐岩来源的 CO_2 碳同位素则分布于 $-4\text{‰} \sim +4\text{‰}$ [30]。蓬探1井和中江2井 CO_2 碳同位素的差异暗示着天然气中 CO_2 可能存在不同的来源 [30-31]。蓬探1井 CO_2 碳同位素分布于 $-0.98\text{‰} \sim -0.14\text{‰}$ ，均值 -0.48‰ ， CO_2 可能与碳酸盐岩溶蚀有关；中江2井 CO_2 碳同位素分布于 $-16.38\text{‰} \sim -19.38\text{‰}$ ，均值 -17.88‰ ， CO_2 则可能为有机成因。

4 储层沥青特征

4.1 沥青碳同位素

蓬探1井和中江2井灯影组的储层沥青主要充填于溶蚀孔洞内，蓬探1井溶孔常见到白云石 \rightarrow 沥青 \rightarrow 块状石英的充填序列(图4a)，早期的白云石边缘常见溶蚀现象，表现出港湾状，中江2井则普遍缺少晚期的石英充填(图4b)。

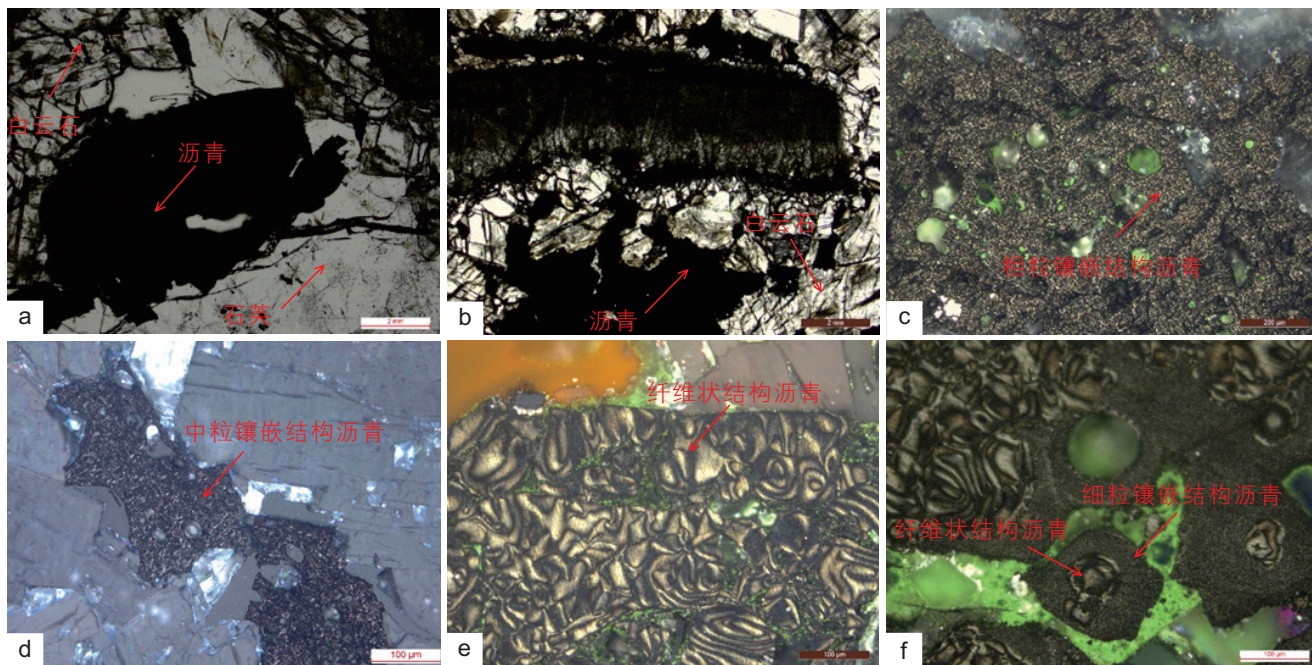
选取两口井储层沥青发育的井段，将岩芯样品敲碎，并用金属镊子挑选出储层沥青碎块，最后用玛

瑙研钵将沥青研磨至200目。储层沥青碳同位素实验由中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室完成。结果表明，蓬探1井储层沥青同位素均值 -36.6‰ ，而中江2井储层沥青碳同位素为 -35.7‰ ，二者存在一定差异(图5)。

4.2 沥青焦炭结构

随着演化程度的增加，固体沥青内的分子开始定向排列，通常表现出光学各向异性 [32-33]。在中间相沥青中也观察到了光学各向异性的规律性变化，这种变化最初是在焦煤中发现的，并被运用到石油和沥青的热解过程研究 [34-36]。中间相沥青的分子取向和化学成分是控制光学各向异性和折射率的主要因素，它们都随热解过程而增加 [36-37]。焦沥青通常存在于油藏中，是由原油裂解形成的沥青热演化而来，与中间相沥青具有相同的光学特性。焦沥青的形成可能与热异常事件有关，包括岩浆活动和热液流体的侵入 [38]。因此，焦沥青的出现表明热液侵入可能对古油藏有过明显的影响。

焦沥青通常根据其焦炭结构分为4类 [34-36,39]，在反射光显微镜下表现为：细粒镶嵌、中粒镶嵌、粗粒



(a)蓬探1井, 5778.57 m, 灯二段, 藻白云岩, 溶洞充填中晶白云石 \rightarrow 沥青 \rightarrow 块状石英; (b)中江2井, 6558.3 m, 灯二段, 藻白云岩, 溶洞充填中晶白云石, 白云石晶间溶孔沥青充填; (c)中江2井, 6558.3 m, 灯二段, 藻白云岩, 溶洞充填的沥青为粗粒镶嵌结构; (d)中江2井, 6558.3 m, 灯二段, 溶洞充填的沥青为中粒镶嵌结构; (e)蓬探1井, 5778.57 m, 灯二段, 溶洞充填的沥青表现为纤维状结构; (f)蓬探1井, 5778.57 m, 灯二段, 溶洞充填沥青发育纤维状结构和细粒镶嵌结构, 并见细粒镶嵌结构沥青包裹纤维状结构沥青

图4 川中古隆起北斜坡区蓬探1井和中江2井储层沥青充填特征及焦炭结构

Fig. 4 Bitumen filling characteristics and coke structure of reservoir solid bitumen in Pengtan 1 well and Zhongjiang 2 well in north slope area of the middle Sichuan Paleo-uplift

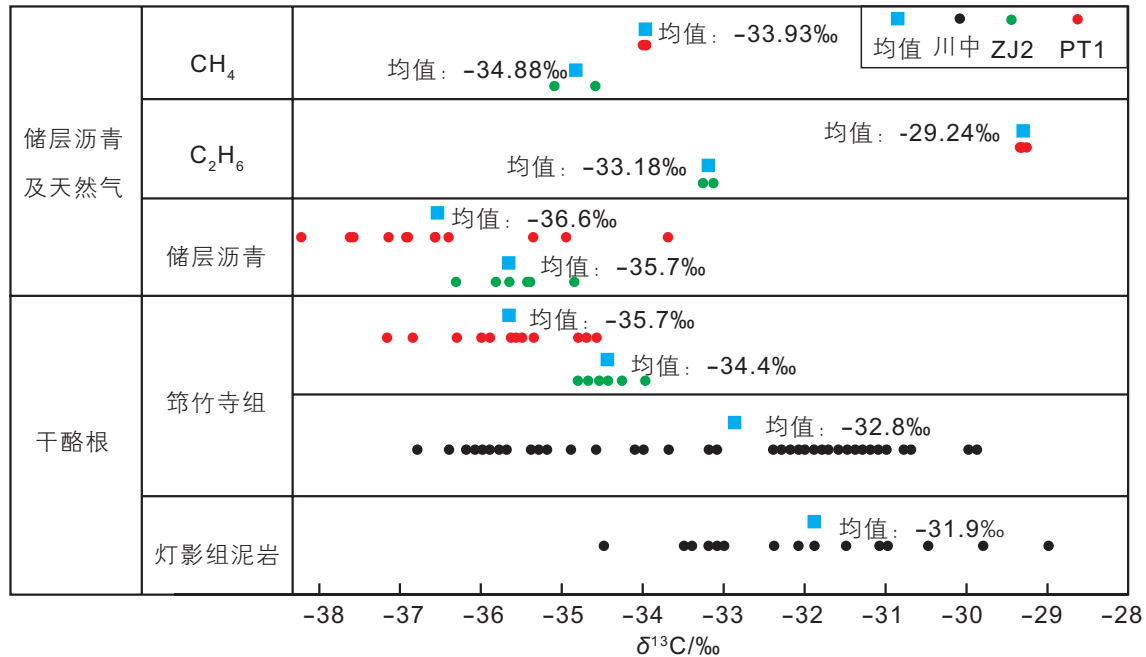


图5 蓬探1井和中江2井储层沥青及天然气碳同位素特征(川中筇竹寺组及灯三段干酪根数据引自魏国齐^[12])

Fig. 5 Carbon isotope characteristics of the bitumen and natural gas in Pengtan-1 well and Zhongjiang-2 well(The kerogen data of Qiongzhusi and Dengying Formation mudstones in central Sichuan are sourced from WEI G Q^[12])

镶嵌、片状和纤维结构。细粒镶嵌结构的各向异性颗粒小于1 μm,但在显微镜下没有明显的各向异性纹理(图4f)。中粒镶嵌结构焦沥青具有较大的镶嵌各向异性颗粒(1~5 μm)(图4d)。粗粒镶嵌焦沥青具有较大的各向异性颗粒(>5 μm)(图4c)。片状结构焦沥青由中间相融并而成,显示了中间相的特殊光学结构^[38-39]。纤维状焦沥青表现为暗带和亮带的交替纹理(图4e、f),可能是由挥发成分形成的气泡塌陷而成^[36-39]。蓬探1井和中江2井储层沥青发育明显的焦炭结构。中江2井主要发育中一粗粒焦炭结构的沥青(图4c、d),蓬探1井则发育大量的纤维状结构沥青(图4e、f),此外还见部分细一中粒镶嵌结构的沥青(图f)。蓬探1井和中江2井储层中发育的中一粗粒镶嵌结构、纤维状结构的焦沥青,表明北斜坡区灯影组储层受到过热液活动的影响^[36,38-40]。

5 讨论

5.1 热液活动

早二叠世~中三叠世,受地壳拉张作用的影响,四川盆地发育大规模的热液活动^[31,40]。Goodarzi(1993)、Wilson(2000)、Rimmer(2015)等研究表明储层沥青的焦炭结构通常预示着异常的热事件^[38,41-45]。蓬

探1井和中江2井储层沥青焦炭结构极为发育,包括中一粗粒镶嵌结构及纤维状结构,表明北斜坡灯影组储层经历过热液活动的影响。碳酸盐岩热液改造常伴随着闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、重晶石等热液矿物的出现,这些矿物通常表现为特殊的组合^[43-45]。蓬探1、中江2井灯影组岩芯上常到黄铁矿、闪锌矿等矿物组合的存在(图2a~d),进一步证明了川中古隆起北斜坡地区灯影组储层经历过明显的热液活动。

此外,两口井受到热液活动的影响程度存在一定差异。Marsh(1973)、White(1976)研究表明,储层沥青的焦炭结构随热演化程度的增加存在着细粒→中粒→粗粒→纤维状结构的变化规律^[38,42],沥青的焦炭结构代表着热液作用的强度。中江2井储层沥青的焦炭结构以中一粗粒镶嵌结构为主(图4c、d),热演化程度明显低于纤维状结构沥青发育的蓬探1井(图4e、f)。蓬探1井储层孔洞中见大量的块状石英充填(图4a),这可能是热液作用后期,由于温度的降低,大量的石英由热液中沉淀而出,由于结晶速度快,这种石英通常表现为他形特征,并无固定形态,与晚期稳定环境下沉淀的自形石英存在明显的区别,前人研究表明川中地区灯影组储层充填的他形石英中盐水包裹体的均一温度存在超过220 °C的现象,明显超过地层最大埋深的温度^[46],表明这些他形石英的形成与热液活动有关,间接证明蓬探1井热液作用强度高于中江2井。

5.2 TSR作用

现阶段的研究表明,川中及北斜坡地区灯影组天然气主要来源于筇竹寺组烃源岩。储层沥青二苯并噻吩等生物标志化合物的研究表明,灯影组台缘带古油藏主要由德阳-安岳裂陷槽内的筇竹寺组烃源岩侧向充注形成^[16]。蓬探1井、中江2井紧邻德阳-安岳裂陷槽,筇竹寺组烃源岩生成的原油侧向充注作用更加明显。通过对两口井筇竹寺组烃源岩碳同位素的分析表明,蓬探1井烃源岩碳同位素约为-35.7‰,中江2井筇竹寺组烃源岩碳同位素约为-34.4‰,这与川中地区筇竹寺组烃源岩碳同位素一致(-36.0‰~-31.0‰)(图5),表明川中及北斜坡地区筇竹寺组源岩地球化学特征基本相同。灯影组烃源岩的碳同位素分布于-33.4‰~-28.5‰之间,平均为-31.9‰;研究区蓬探1井和中江2井筇竹寺组烃源岩同位素分别为-35.7‰和-34.4‰。正常情况下,烃源岩干酪根及其衍生物的碳同位素满足 $\delta^{13}\text{C}_{\text{kerogen}} > \delta^{13}\text{C}_{\text{oil}} > \delta^{13}\text{C}_{\text{gas}}$ 的分馏规律^[9], C_2H_6 的碳同位素不可能高于干酪根。然而蓬探1井 C_2H_6 的碳同位素为-29.24‰,明显高于研究区的各套潜在烃源岩,这种现象证实了天然气 C_2H_6 碳同位素的差别不可能是烃源岩差异造成的。

相同来源的原油裂解后形成的固体沥青应当具有相似的碳同位素组成,并且碳同位素组成不受沥青成熟度的影响,而且沥青的碳同位素应该重于天然气^[47]。但蓬探1井、中江2井储层沥青的碳同位素较筇竹寺组烃源岩明显偏轻,甚至明显低于 C_2H_6 的碳同位素,可见这两口井的储层沥青可能不是单一的热裂解来源(图3)。通常情况下,天然气中来自烃源岩或原油的 H_2S 含量低于3%^[48],两口井天然气中 H_2S 含量相对偏高,酸度系数明显高于川中地区龙王庙组,可能存在着TSR作用来源^[33, 49](图6)。在TSR作用过程中,贫 ^{13}C 的 C_2H_6 优先与 SO_4^{2-} 反应生成 H_2S ,生产的 H_2S 反过来与贫 ^{13}C 的 C_2H_6 结合形成贫 ^{13}C 的乙硫醇,新生成的乙硫醇通过芳构化和聚合作用进一步并入沥青之中。在反应过程中,固体沥青的碳同位素逐渐变轻,而残余的 C_2H_6 碳同位素则逐渐变重,最终导致 C_2H_6 碳同位素高于储层沥青^[50]。

蓬探1井储层沥青的焦炭结构特征也进一步证实了这一观点。通常情况下,沥青的焦炭结构主要受沥青前体的地球化学组成及热裂解时的物理条件影响,在相同前体的情况下,随着热裂解温度的增加,沥青的焦炭结构呈现规律性变化^[35-40]。Stasiuk(1997)研究表明,TSR作用也会影响储层沥青的焦炭结构,经历

过TSR的焦炭沥青一般表现为各向同性-细粒镶嵌结构,并不会随着演化程度的增加而变化^[38]。蓬探1井的储层沥青中常见到有细粒镶嵌结构包裹着纤维状结构,这种现象暗示着储层沥青受到过TSR作用。热蚀变成因沥青的外缘由于TSR的影响,表现为细粒镶嵌结构,而TSR作用对固体沥青的反应强度有限,沥青内部基本不受影响,最终仅形成细粒结构的沥青环带,这种现象在磨溪-高石梯地区也有报道^[40]。

蓬探1井沥青碳同位素轻于中江2井, C_2H_6 碳同位素明显高于中江2井,表明蓬探1井TSR作用明显强于中江2井。理论上,与TSR相关的 CO_2 碳同位素组成相对较轻,因为 CO_2 中的碳原子来自碳氢化合物^[51]。但实验结果表明, CO_2 碳同位素随着TSR程度的增加,其碳同位素表现为先降低再显著增加的特征^[52]。这是因为TSR初期的 CO_2 碳原子来源于烃类,而随着TSR强度增加,储层中 CO_2 、 H_2S 含量逐渐升高,并造成碳酸盐岩的溶解,碳酸盐岩中的碳原子进入 CO_2 ,其同位素显著增加^[52]。中江2井 CO_2 碳同位素均值-17.88‰,属于烃类来源。蓬探1井 CO_2 碳同位素-0.48‰,很可能来源于储层的碳酸盐岩。

5.3 天然气特征差异分析

总体看来,蓬探1井和中江2井除了天然气 C_2H_6 、二氧化碳碳同位素的差异外,热液作用强度及TSR强度均存在明显的差别(表2),两口井天然气的差异可能与热液作用及TSR存在密切关系。

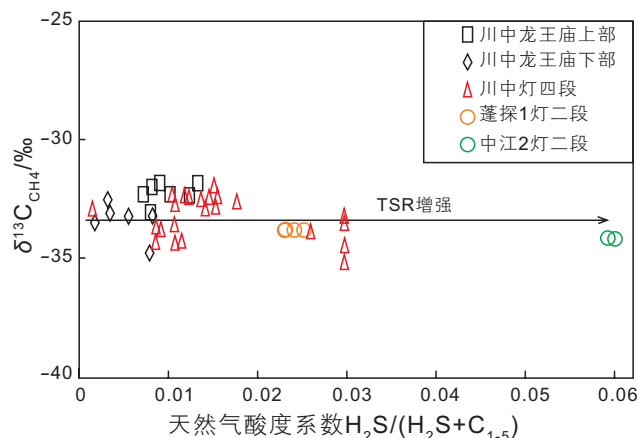


图6 川中及北斜坡地区灯影组天然气酸度系数与关系图(图中龙王庙组及灯影组四段天然气数据源自Liu^[31])

Fig. 6 Relationship between gas acidity coefficient and in the natural gas of Dengying Formation in Central Sichuan and northern slope area(The natural gas data of Longwangmiao formation and Dengsi section in the figure are sourced from Liu^[31])

表2 蓬探1井和中江2井天然气、储层沥青及热液矿物组合特征

井位	$\delta^{13}\text{C}_{\text{C}_2\text{H}_6}/\text{‰}$	$\text{CO}_2/\text{‰}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}/\text{‰}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{沥青}}/\text{‰}$	沥青焦炭结构	热液矿物组合
PT1	-29.24	2.22	-0.48	-36.6	中一粗粒	闪锌矿、方铅矿、黄铁矿
ZJ2	-33.18	13.05	-17.88	-35.7	纤维状	偶见黄铁矿

证据表明,蓬探1井受热液作用的强度高于中江2井,并且蓬探1井TSR作用强度显著高于中江2井。TSR作用研究中 SO_4^{2-} 的来源是重点,常见的TSR作用的 SO_4^{2-} 来源于储层就近发育的膏岩层,二叠系储层就属于这一类。而川中古隆起北斜坡灯影组及邻近地层并未见大量的膏岩发育,TSR作用可能存在其他的 SO_4^{2-} 来源。研究表明,磨溪—高石梯地区天然气 H_2S 含量 $8.83\sim 35.13\text{ g/m}^3$,存在明显的TSR作用^[6-7]。磨溪—高石梯地区TSR作用与热液活动有关,热液流体中的 SO_4^{2-} 是TSR反应的主要硫源^[50-51]。蓬探1井和中江2井TSR反应程度不同,很有可能是因为热液作用的强度不同造成。储层固体沥青的焦炭结构及岩芯上发育的大量的黄铁矿、闪锌矿、方铅矿等热液矿物组合表明蓬探1井灯影组储层经历过大量的热液流体的侵入,为后续的TSR作用提供了充足的 SO_4^{2-} ,所以蓬探1井TSR作用比中江2井更强。据此分析,蓬探1井灯影组天然气中 H_2S 含量理应更高,酸度系数更大,实际上却明显低于中江2井(图6),这种差异可能是后期 H_2S 的消耗造成的。蓬探1井经历了更强的热液改造,灯影组地层流体中残余的热液来源的Fe等元素被TSR作用形成的 H_2S 还原成黄铁矿,使得蓬探1井天然气中 H_2S 含量变低,其储层中交代及充填的黄铁矿就是证据(图2j~l)。此外,在TSR作用过程中反应生成成的 H_2S 会反过来与 C_2H_6 结合形成乙硫醇,新生成的乙硫醇通过芳构化和聚合作用进一步并入沥青之中。 C_2H_6 与 H_2S 的反应过程中会优先消耗贫 ^{13}C 的 C_2H_6 ,随着反应的程度增加,天然气中残余的 C_2H_6 碳同位素逐渐变重,而储层沥青的碳同位素则随之变轻,最终导致 C_2H_6 碳同位素高于储层沥青^[50]。蓬探1井天然气中 C_2H_6 碳同位素比中江2井明显偏重,储层沥青

碳同位素偏轻,表明蓬探1井TSR作用更强。

灯影组储层的构造位置可能是影响热液作用的强度的因素之一^[50]。热液侵入的通道主要是一些断穿较深的断层^[50,53-54],靠近断层的储层受热液活动的影响更大。蓬探1井紧邻断裂(图1),可能是其热液作用强度大于中江2井较大的原因。当然,控制热液作用强度的主要因素还有待进一步研究。综合看来,川中古隆起北斜坡区灯影组天然气的内部差异可能是古油藏充注后受到热液、TSR等一系列因素共同作用的结果。

6 结论

(1)川中古隆起北斜坡地区灯影组天然气均为以 CH_4 为主的干气,天然气中非烃气体含量及 C_2H_6 、 CO_2 碳同位素存在明显差异。

(2)川中古隆起北斜坡灯影组受到过明显的热液活动的影响。蓬探1井和中江2井灯影组储层中闪锌矿、方铅矿等热液矿物组合发育,储层焦沥青发育中一粗粒焦炭结构及纤维状结构。

(3)川中古隆起北斜坡灯影组天然气受过明显的TSR作用的影响,天然气中存在较高含量的 H_2S 。受TSR作用的影响,蓬探1井和中江2井储层沥青同位素较烃源岩明显偏轻, C_2H_6 碳同位素偏重。

(4)川中古隆起北斜坡灯影组储层受到过明显的热液活动的影响,热液流体中 SO_4^{2-} 是TSR作用的主要硫源,热液活动的强度控制着TSR反应的强度,储层TSR作用的强度差异是造成不同区域灯影组天然气差异的原因。

参考文献

- [1] 戴金星,秦胜飞,胡国艺,等.新中国天然气勘探开发70年来的重大进展[J].石油勘探与开发,2019,46(06):1037-1046. [DAI J X, QIN S F, HU G Y, et al. Major progress in the exploration and development of natural gas in China in 70 years[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(06): 1037-1046.]
- [2] 郑志红,李登华,白森舒,等.四川盆地天然气资源潜力[J].中国石油勘探,2017,22(03):12-20. [ZHENG Z H, LI D H, BAI S S, et al. Natural gas resource potential in Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(03): 12-20.]
- [3] LIU S G, ZHANG Z J, HUANG W M, et al. Formation and destruction processes of upper Sinian oil-gas pools in the Dingshan-Lintan-chang structural belt, southeast Sichuan Basin, China[J]. Petroleum Science, 2010, 7: 289-301.

- [4] 贾承造, 庞雄奇, 姜福杰. 中国油气资源研究现状与发展方向[J]. 石油科学通报, 2016, 1(01): 2–23. [JIA C Z, PANG X Q, JIANG F J. Research status and development direction of oil and gas resources in China[J]. Petroleum Science, 2016, 1(01): 2–23.]
- [5] LIU X P, JIN Z J, BAI G P, et al. Formation and distribution characteristics of Proterozoic-Lower Paleozoic marine giant oil and gas fields worldwide[J]. Petroleum Science, 2017, 14: 237–260.
- [6] 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 C N, DU J H, XU C C, et al. Formation, distribution, resource potential and exploration discovery of Sinian-Cambrian gas field in Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 278–293.]
- [7] 杜金虎. 古老碳酸盐岩大气田地质理论与勘探实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 2015. [DU J H. Geological theory and exploration practice of the old carbonate gas field[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2015.]
- [8] ZOU C N, YANG Z, DAI J X, et al. The characteristics and significance of conventional and unconventional Sinian-Silurian gas systems in the Sichuan Basin, central China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 64: 86–402.
- [9] 魏国齐, 王东良, 王晓波, 等. 四川盆地高石梯—磨溪大气田稀有气体特征[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(05): 533–538. [WEI G Q, WANG D L, WANG X B, et al. The characteristics of rare gases in Gaoshiti-Moxi Gas Field in Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41 (05): 533–538.]
- [10] 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(01): 1–12. [WEI G Q, DU J H, XU C C, et al. Characteristics and accumulation patterns of large reservoirs of Sinian-Cambrian in Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36 (01): 1–12.]
- [11] 郑平, 施雨华, 邹春艳, 等. 高石梯—磨溪地区灯影组、龙王庙组天然气气源分析[J]. 天然气工业, 2014, 34(03): 50–54. [ZHENG P, SHI Y H, ZOU C N, et al. Natural gas source analysis of Dengying Formation and Longwangmiao Formation in Gaoshiti-Moxi area[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34 (03): 50–54.]
- [12] 魏国齐, 谢增业, 宋家荣, 等. 四川盆地川中古隆起震旦系—寒武系天然气特征及成因[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(06): 702–711. [WEI G Q, XIE Z Y, SONG J R, et al. Characteristics and genesis of Sinian-Cambrian natural gas in Middle Sichuan Paleo-uplift[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42 (06): 702–711.]
- [13] 罗冰, 罗文军, 王文之, 等. 四川盆地乐山—龙女寺古隆起震旦系气藏形成机制[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(03): 444–455. [LUO B, LUO W J, WANG W Z, et al. Formation mechanism of Sinian gas reservoir in Leshan-Longnusi Paleo-uplift, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(03): 444–455.]
- [14] 刘雯, 邱楠生, 徐秋晨, 等. 四川盆地高石梯—磨溪地区下寒武统筇竹寺组生烃增压定量评价[J]. 石油科学通报, 2018, 3(03): 262–271. [LIU W, QIU N S, XU Q C, et al. Quantitative evaluation of hydrocarbon generation and pressurization of lower Cambrian Qiongzhusi formation in Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin[J]. Petroleum Science, 2018, 3(03): 262–271.]
- [15] YUAN H F, LIANG J J, GONG D Y, et al. Formation and evolution of Sinian oil and gas pools in typical structures, Sichuan Basin, China[J]. Petroleum Science, 2012, 9: 129–140.
- [16] 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(08): 1447–1453. [WU W, LUO B, LUO W J, et al. On the genesis of Sinian natural gas from the middle Sichuan Paleo-uplift, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27 (08): 1447–1453.]
- [17] 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 四川盆地高含 H_2S 天然气的分布与TSR成因证据[J]. 地质学报, 2006, (08): 1208–1218. [ZHU G Y, ZHANG S C, LIANG Y B, et al. Distribution of high H_2S bearing natural gas in Sichuan Basin and evidence of TSR genesis[J]. Acta geologica Sinica, 2006, (08): 1208–1218.]
- [18] 帅燕华, 张水昌, 胡国艺, 等. 四川盆地高石梯—磨溪地区震旦系—寒武系天然气TSR效应及气源启示[J]. 地质学报, 2019, 93(07): 1754–1766. [SHUAI Y H, ZHANG S C, HU G Y, et al. Sinian Cambrian gas TSR effect and gas source enlightenment in Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin[J]. Acta geologica Sinica, 2019, 93 (07): 1754–1766.]
- [19] 马奎, 张玺华, 彭瀚霖, 等. 四川盆地磨溪北斜坡构造演化对震旦系油气成藏控制作用[J]. 天然气勘探与开发, 2020, 43(01): 8–15. [MA K, ZHANG X H, PENG H L, et al. The control of structural evolution of the north slope of Moxi in Sichuan Basin on the formation of Sinian oil and gas reservoirs[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2020, 43 (01): 8–15.]
- [20] 赵路子, 汪泽成, 杨雨, 等. 四川盆地蓬探1井灯影组灯二段油气勘探重大发现及意义[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(03): 1–12. [ZHAO L Z, WANG Z C, YANG Y, et al. Important discovery in the second member of Dengying Formation in well Pengtan-1 and its significance, Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25 (03): 1–12.]
- [21] STAHL W J. Carbon isotope fractionations in natural gases[J]. Nature, 1974, 251: 134–135.
- [22] 戴金星, 宋岩, 程坤芳, 等. 中国含油气盆地有机烷烃气碳同位素特征[J]. 石油学报, 1993, 14: 23–31. [DAI J X, SONG Y, CHENG K F, et al. Carbon isotopic characteristics of organic alkanes in China oil and gas basins[J]. Acta Petrolei Sinica, 1993, 14: 23–31.]
- [23] 陈建平, 王绪龙, 陈践发, 等. 甲烷碳同位素判识天然气及其源岩成熟度新公式[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(04): 560–581. [CHEN J P, WANG X L, CHEN J F, et al. A new formula for the determination of maturity of natural gas and its source rocks by methane carbon isotopes[J]. Science China: Geoscience, 2021, 51(04): 560–581.]

- [24] 许海龙, 魏国齐, 贾承造, 等. 乐山—龙女寺古隆起构造演化及对震旦系成藏的控制[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(04): 406–416. [XU H L, WEI G Q, JIA C Z, et al. Structural evolution of Leshan-Longnusi Paleo-uplift and its control of Sinian reservoir formation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(04): 406–416.]
- [25] 李伟, 易海永, 胡望水, 等. 四川盆地加里东古隆起构造演化与油气聚集的关系[J]. 天然气工业, 2014, 34(03): 8–15. [LI W, YI H Y, HU W S, et al. The relationship between structural evolution of Caledonian uplift and oil and gas accumulation in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(03): 8–15.]
- [26] 梅庆华, 何登发, 文竹, 等. 四川盆地乐山—龙女寺古隆起地质结构及构造演化[J]. 石油学报, 2014, 35(01): 11–25. [MEI Q H, HE D F, WEN Z, et al. Geological structure and structural evolution of Leshan-Longnusi Paleo-uplift, Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(01): 11–25.]
- [27] 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 K, SHEN P, WANG Z C, et al. On the potential of natural gas exploration in Longwangmiao Formation, north slope of Middle Sichuan Paleo-uplift, Sichuan Basin, from the characteristics of "Four Paleo"[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(10): 1451–1464.]
- [28] 田兴旺, 彭瀚霖, 王云龙, 等. 川中安岳气田震旦系灯影组四段台缘—台内区储层差异及控制因素[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(09): 1225–1238. [TIAN X W, PENG H L, WANG Y L, et al. Reservoir difference and control factors between the four member of Dengying Formation, Sinian system, Anyue gas field, central Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(09): 1225–1238.]
- [29] 田兴旺, 杨岱林, 钟佳倚, 等. 基于CT成像技术的白云岩储层微观表征—以川中磨溪—龙女寺台内地区震旦系灯影组四段为例[J]. 沉积学报, 2021, 39(5): 1264–1274. [TIAN X W, YANG D L, ZHONG J Y, et al. The microscopic characterization of dolomite reservoir based on CT imaging technology – Taking the fourth segment of Sinian Dengying Formation in Moxi-Longnusi area of central Sichuan as an example[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(5): 1264–1274.]
- [30] 李谨, 李志生, 王东良, 等. 天然气中CO₂氧同位素在线检测技术与应用[J]. 石油学报, 2014, 35(01): 68–75. [LI J, LI Z S, WANG D L, et al. On line detection technology and application of CO₂ oxygen isotope in natural gas[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(01): 68–75.]
- [31] LIU Q Y, ZHU D Y, JIN Z J, et al. Coupled alteration of hydrothermal fluids and thermal sulfate reduction (TSR) in ancient dolomite reservoirs—An example from Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin, southern China[J]. Precambrian Research, 2016, 285: 39–57.
- [32] JACOB H. Classification, structure, genesis and practical importance of natural solid oil bitumen (“migrabitumen”) [J]. International Journal of Coal Geology, 1989, 11: 65–79.
- [33] SCHOENHERR J, LITKE 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: 1293–1318.
- [34] BROOKS J D, TAYLOR G H. Formation of graphitizing carbons from the liquid phase[J]. Nature, 1965, 3: 697–699.
- [35] MARSH H. Carbonization and liquid-crystal (mesophase) development: part 1. The significance of the mesophase during carbonization of coking coals[J]. Fuel, 1973, 52: 205–212.
- [36] WHITE J L. Mesophase mechanisms in the formation of the microstructure of petroleum coke[J]. Petroleum Derived Carbons, 1976, 21: 282–314.
- [37] MOCHIDA I, KORAI Y, FUJITSU H, et al. Aspects of gasification and structure in cokes from coals[J]. Fuel, 1984, 63: 136–139.
- [38] RIMMER S M, CRELLING J C, YOKSOULIAN L E. An occurrence of coked bitumen, Raton formation, Purgatoire River valley, Colorado, U.S.A.[J]. International Journal of Coal Geology, 2015, 141–142: 63–73.
- [39] 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: 915–929.
- [40] YANG C Y, NI Z Y, LI M J, et al. Pyrobitumen in South China: Organic petrology, chemical composition and geological significance[J]. International Journal of Coal Geology, 2018, 188: 56–63.
- [41] GOODARZI F, GENTZIS T, JACKSON G, et al. Optical characteristics of heat-affected bitumens from the Nanisivik Mine, N.W. Baffin Island, Arctic Canada[J]. Energy Sources, 1993, 15(2): 359–376.
- [42] WILSON, N S F. Organic petrology, chemical composition, and reflectance of pyrobitumen from the El Soldado Cu deposit, Chile[J]. International Journal of Coal Geology, 2000, 43(1): 53–82.
- [43] INOUE A. Formation of clay minerals in hydrothermal environments[M]//Velde B. Origin and mineralogy of clays. Berlin: Springer, 1995.
- [44] 蒋裕强, 谷一凡, 朱一凡, 等. 碳酸盐岩热液改造活动[M]. 北京: 科学出版社, 2019. [JIANG Y Q, GU Y F, ZHU Y F, et al. Carbonate hydrothermal transformation activities [M]. Beijing: Science Press, 2019.]
- [45] 杨飞, 鲍志东, 潘文庆, 等. 塔里木盆地柯坪上震旦统奇格布拉克组优质储层形成机理[J]. 石油科学通报, 2017, 2(01): 12–23. [YANG F, BAO Z D, PAN W Q, et al. Formation mechanism of high-quality reservoir of Upper Sinian Qigebulake Formation in Keping, Tarim Basin[J]. Petroleum Science, 2017, 2(01): 12–23.]

- [46] 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(06): 684-693. [WANG G Z, LIU S G, LIU W, et al. The process of oil and gas accumulation in Dengying Formation of Gaoshiti structure in Sichuan Province[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science), 2014, 41 (06): 684-693.]
- [47] 雷锐. 热成因固体沥青的形成过程及主控因素[D]. 广州: 中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所), 2019. [LEI R. Formation process and main control factors of thermal solid asphalt[D]. Guangzhou: University of Chinese Academy of Sciences (Guangzhou Institute of geochemistry, Chinese Academy of Sciences), 2019.]
- [48] 刘全有, 金之钧, 刘文汇, 等. 四川盆地东部天然气地球化学特征与TSR强度对异常碳、氢同位素影响[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(03): 471-480. [LIU Q Y, JIN Z J, LIU W H, et al. The geochemical characteristics of natural gas and TSR intensity in the eastern Sichuan Basin influence on abnormal carbon and hydrogen isotopes[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015, 34(03): 471-480.]
- [49] SU J, WANG Y X, WANG X M, et al. Impact of Formation Water on the Generation of H₂S in Condensate Reservoirs: A Case Study from the deep Ordovician in the Tazhong uplift of the Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Science, 2017, 14: 507-519.
- [50] 张鹏伟. 川中地区震旦—寒武系气藏硫化氢成因机制研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019. [ZHANG P Y. Study on the genesis mechanism of hydrogen sulfide in Sinian Cambrian gas reservoir in Central Sichuan region[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2019.]
- [51] MOUGIN P, Lamoureux-Var V, Bariteau A, et al. Thermodynamic of thermochemical sulphate reduction[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007, 58: 413-427.
- [52] WORDEN R H, SMALLEY P C, OXTOBY N H. Gas souring by thermochemical sulfate reduction at 140 °C[J]. AAPG Bulletin, 1995, 79: 854-863.
- [53] 陈轩, 赵文智, 张利萍, 等. 川中地区中二叠统构造热液白云岩的发现及其勘探意义[J]. 石油学报, 2012, 33(04): 562-569. [CHEN X, ZHAO W Z, ZHANG L P, et al. Discovery and exploration significance of hydrothermal dolomite in middle Permian structure in central Sichuan region[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(04): 562-569.]
- [54] 闫伟, 金振奎, 姚梦竹, 等. 冀中坳陷下古生界热液白云岩的识别和形成机制[J]. 石油科学通报, 2018, 3(04): 376-389. [YAN W, JIN Z K, YAO M Z, et al. Identification and formation mechanism of lower Paleozoic hydrothermal dolomite in Jizhong Depression[J]. Petroleum Science, 2018, 3(04): 376-389.]

(责任编辑 刘冬冬 编辑 付娟娟)