

四川盆地川西气田中三叠统雷口坡组气藏气源再认识

苏成鹏^{1,2}, 何莹^{1,2}, 宋晓波², 董波¹, 吴小奇³

[1. 中国石化西南油气分公司 彭州气田(海相)开发项目部, 四川 彭州 611930; 2. 中国石化西南油气分公司 勘探开发研究院, 四川 成都 610041; 3. 中国石化石油勘探开发研究院, 四川 成都 610041]

摘要:天然气探明储量超千亿立方米的川西气田是中国石化继普光 and 元坝气田之后, 在四川盆地发现的第3个大型海相气田。目前对该气田中三叠统雷口坡组气藏的气源认识尚未统一, 争议较大, 有必要对其开展再分析。对川西气田不同构造雷口坡组四段三亚段(雷四三亚段)上、下产层的天然气组分和烷烃同位素特征分析表明, 川西气田同一构造雷四三亚段下储层气藏和上储层气藏具有相同的气源, 而不同构造间气源具有差异。其中, 石羊场构造和鸭子河构造天然气中 H_2S 和 CO_2 含量高, $\delta^{13}C_2$ 偏轻(均值 -32.5%), 以及烷烃气碳同位素倒转, 表现出典型的油型气特征; 金马构造天然气中 H_2S 和 CO_2 含量相对较低, $\delta^{13}C_2$ 偏重(均值 -27.5%), 以及烷烃气碳同位素正序分布, 表现出混源气特征。此外, 基于研究区天然气运移条件分析, 结合前人研究成果认为, 川西气田石羊场构造和鸭子河构造天然气主要来自雷口坡组自身烃源岩, 而金马构造天然气则主要来自雷口坡组烃源岩和上二叠统龙潭组烃源岩, 但不排除上三叠统马鞍塘组-小塘子组烃源岩对其有少许贡献。

关键词:天然气组分; 烷烃同位素; 运移条件; 构造差异; 天然气藏; 雷口坡组; 川西坳陷; 四川盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Reinterpretation of gas sources in the Middle Triassic Leikoupo Formation in Western Sichuan gas field, Sichuan Basin

Su Chengpeng^{1,2}, He Ying^{1,2}, Song Xiaobo², Dong Bo¹, Wu Xiaoqi³

[1. Development Project Department of Pengzhou Gas Field (Marine Facies), Southwest Oil and Gas Branch of SINOPEC, Pengzhou, Sichuan 611930, China; 2. Research Institute of Exploration and Development, Southwest Branch of SINOPEC, Chengdu, Sichuan 610041, China; 3. Research Institute of Petroleum Exploration and Production, SINOPEC, Chengdu, Sichuan 610041, China]

Abstract: The Western Sichuan gas field with proven geologic reserves of over $1\,000 \times 10^8\text{ m}^3$ of natural gas ranks third in scale in the Sichuan Basin following Puguang and Yuanba gas fields. Recently, there have been some controversies regarding to the sources of gas in the Leikoupo reservoir, rendering the necessity to make further analysis. The natural gas in the upper and lower pay zones in the 3rd submember of the 4th member of Leikoupo Formation (hereinafter referred to as Lei 4³) in different structures is analyzed for natural gas components and alkane isotopic compositions, which indicate that the lower and upper gas reservoirs in the Lei 4³ shale the same gas source. While the gas sources vary with structural belts. Natural gas from Shiyang and Yazihe structural belts, is characterized by high content of H_2S and CO_2 , low $\delta^{13}C_2$ (mean: -32.5%), and carbon isotope reversal of alkane, typical of oil-derived gas. However, in the Jinma Structure, the natural gas features relatively low content of H_2S and CO_2 , high $\delta^{13}C_2$ (mean: -27.5%), and normal carbon isotope sequence pattern, showing the characteristics of mixed gas. In addition, based on the analysis of gas-migration conditions and previous studies, we consider that the natural gas in the Shiyangchang and Yazihe structural belts is mainly derived from the Leikoupo source rocks, and that in the Jinma structural belt mainly derived from the source rocks of Leikoupo and the Permian Longtan Formations, though without excluding minor contributions by the Ma'antang-Xiaotangzi source rocks.

收稿日期: 2020-12-14; 修订日期: 2022-01-22。

第一作者简介: 苏成鹏(1990—), 男, 博士、助理研究员, 碳酸盐岩天然气地质。E-mail: suchengpeng90@163.com。

通讯作者简介: 何莹(1979—), 男, 高级工程师, 碳酸盐岩地质综合研究。E-mail: heywz@126.com。

基金项目: 中国石化科技攻关项目(P20059-3); 国家自然科学基金项目(41872122)。

Key words: natural gas composition, alkane isotope, migration condition, structural difference, gas reservoir, Leikoupo Formation, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

引用格式: 苏成鹏, 何莹, 宋晓波, 等. 四川盆地川西气田中三叠统雷口坡组气藏气源再认识[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 341-352. DOI: 10.11743/ogg20220208.

Su Chengpeng, He Ying, Song Xiaobo, et al. Reinterpretation of gas sources in the Middle Triassic Leikoupo Formation in Western Sichuan gas field, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 341-352. DOI: 10.11743/ogg20220208.

2020年底, 中国石油化工股份有限公司西南油气分公司在四川盆地西缘新增天然气探明储量 $830 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。至此, 川西气田累计天然气探明储量达 $1\,140 \times 10^8 \text{ m}^3$, 相当于亿吨级当量大油田, 将为中国西南地区以及川气东送沿线提供更多的清洁能源支撑。

四川盆地中三叠统雷口坡组的油气勘探已经有40余年的历史^[1]。然而, 目前对于川西坳陷雷口坡组气藏的川西气田和其他气田的天然气来源仍未形成统一观点, 且分歧较大, 成藏模式也是多种多样, 主要包括自生自储^[2]、下生上储^[3]、旁生侧储^[4]和上生下储^[5]等。杨克明研究认为川西坳陷雷口坡组碳酸盐岩烃源岩总有机碳含量(TOC)相对较低, 但有机质类型好, 厚度大, 可作为气田主力烃源岩, 形成自生自储型气藏^[2]。吴小奇等研究认为雷口坡组烃源岩有机质丰度低, 不足以形成规模性油气聚集^[6], 气源为下伏二叠系^[3]、下寒武统^[7]或多套烃源层系的混合^[1], 形成下生上储型气藏。亦有学者认为, 川西雷口坡组气藏主要为雷口坡组自身烃源岩和下伏二叠系烃源岩的混合供气形成^[8-11]。此外, 还有学者认为断层下盘须家河组一段烃源岩可通过断层与雷口坡组储层直接对接, 形成旁生侧储型气藏^[4,12]; 或者由于地层压力系数的差异, 须家河组烃源直接倒灌到雷口坡组顶部储层, 形成上生下储型气藏^[5]。

对于川西坳陷龙门山前构造带川西气田而言, 雷口坡组埋藏深(约6 000 m), 勘探起步晚, 首口预探井PZ1井在2012年10月开始实施。在第一批开发井实施前, 前期钻井较少, 获取资料相对缺乏, 对气藏的分布特征认识不足, 导致川西气田气源认识存在较大争议^[2-3,6-10]。其原因除了雷口坡组烃源的争议外, 另一个重要原因: 前期在有限的钻井资料情况下, 认为川西气田金马-鸭子河构造为同一个气藏, 具有统一的气-水界面; 同时, 金马构造和鸭子河构造气藏天然气地球化学特征又具有一定差异。2019年以来, 中国石油化工股份有限公司西南油气分公司又陆续部署开发井11口, 已完钻的7口井均获高产气流, 对川西气田气藏分布有了更精细的认识, 且新气样的补充分析将有利于落实该气田的气源认识, 进而为下一步气藏的高效开发提供有力的理论支撑, 同时为四川盆地雷口坡

组气藏的勘探部署提供借鉴。

1 地质背景

川西气田所处区域在构造上属于四川盆地西缘龙门山前构造带, 其西侧为龙门山构造带, 向东往盆地内依次为成都凹陷、龙泉山构造带和中江斜坡带, 东北侧依次为新场构造带和梓潼凹陷^[13](图1a, b)。川西气田位于龙门山前构造带中段南部石羊场短轴背斜、中部金马和北部鸭子河断背斜3个次级构造上^[1], 圈闭形态和规模主要受气藏东侧彭县断裂控制, 气田面积约138 km², 气藏中普遍含有H₂S和CO₂等酸性气体, 属大型酸性气田(图1c)。

四川盆地中三叠统雷口坡组主要为局限蒸发台地相碳酸盐岩和膏岩沉积, 与下伏下三叠统嘉陵江组呈整合接触^[14]。中三叠世末, 四川盆地受印支运动影响发生了广泛的构造抬升, 导致雷口坡组暴露地表并发生大气淡水淋滤溶蚀作用, 之后海水退出, 四川盆地逐渐过渡到陆相沉积演化阶段^[14]。研究区雷口坡组上覆地层为海-陆过渡相马鞍塘组-小塘子组, 即陆相须家河组一段的同期异相沉积^[15-17]。川西龙门山前构造带雷口坡组由下而上可划分4段, 即雷口坡组一段、二段、三段和四段; 其中, 雷口坡组四段(雷四段)自下而上可进一步划分为3个亚段, 即一亚段、二亚段和三亚段。川西气田储层主要发育于最顶部的雷口坡组四段三亚段(雷四三亚段)。雷四三亚段储层岩石类型以藻粘结白云岩、微-粉晶白云岩为主; 储集空间以晶间(溶)孔和藻格架孔为主, 其次为微裂缝, 是典型的裂缝-孔隙型储层^[18-21]。根据岩性和电性特征还可将雷四三亚段储层细分为下(厚30~45 m)和上(厚15~20 m)两个储层段, 二者之间为厚约20~25 m的致密灰岩隔层段, 横向分布相对稳定^[22]。岩性方面, 下储层段以微-粉晶白云岩、藻粘结白云岩为主, 上储层段以泥微晶云质灰岩、微晶白云岩为主^[23]。最新钻井表明, 川西气田雷四三亚段上、下储层段气藏埋深在5 700~6 300 m, 石羊场构造、金马构造和鸭子河构造发育3个独立的气藏, 除金马构造下储层气藏为底水气藏外, 其余气藏均为受构造控制的边水气藏(图1d)。

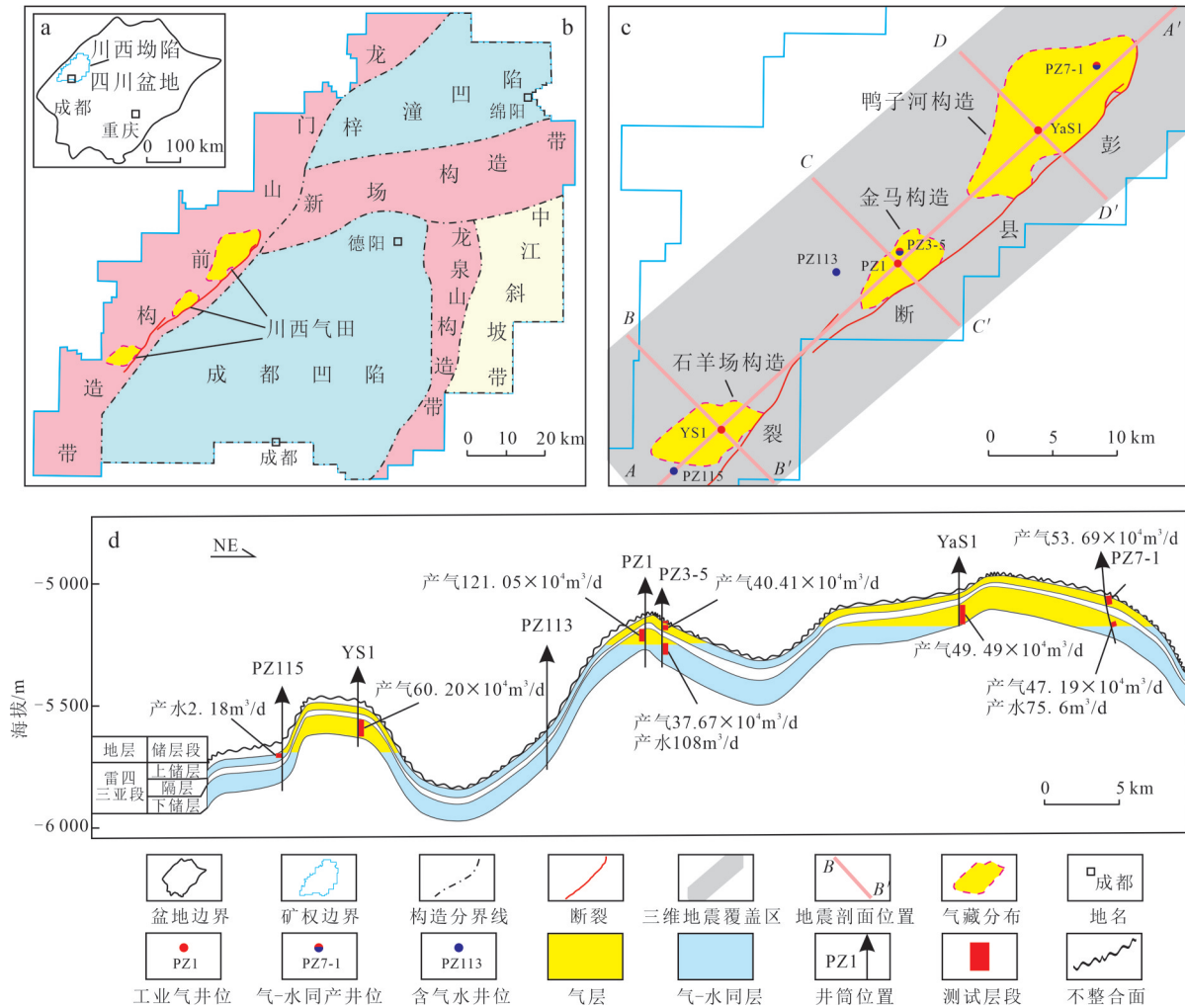


图1 四川盆地川西气田概况

Fig. 1 Overview of western Sichuan gas field, Sichuan Basin

a. 川西坳陷区域位置; b. 气田位置及川西坳陷构造展布; c. 气田气藏组成; d. 气田气藏剖面, PZ113井、PZ3-5井和PZ7-1井为投影位置

2 天然气地球化学特征

2.1 组分特征

天然气组分分析结果(表1, $n=46$)显示,川西气田烷烃气为干气, CH_4 和 C_2H_6 含量平均分别为88.99%和0.15%,基本不含丙烷和丁烷,干燥系数(C_1/C_{1-4})大于0.99;非烃气体主要为 N_2 、 CO_2 和 H_2S ,其平均含量分别为1.03%,4.71%和5.10%。气田整体为一个中含 CO_2 、高含 H_2S 的酸性气田。

不同构造对比表明,天然气组分存在一定的横向差异,平面投图分异明显,即石羊场构造和鸭子河构造天然气中烷烃气含量略低、非烃气含量略高,而金马构造烷烃气含量略高、非烃气含量略低(图2)。具体而言,石羊场构造和鸭子河构造 CH_4 含量相对较低,分布

范围分别介于88.13%~90.09%(均值89.28%)和86.69%~89.23%(均值87.95%);金马构造 CH_4 含量相对较高,分布范围介于89.82%~91.44%(均值90.53%)(图2a)。在非烃气体组成方面,石羊场构造和鸭子河构造 CO_2 和 H_2S 含量相对较高, CO_2 分布范围分别介于4.59%~5.79%(均值5.08%)和4.99%~6.66%(均值5.60%), H_2S 分布范围分别介于3.70%~4.41%(均值4.03%)和3.60%~5.86%(均值5.36%);而金马构造 CO_2 和 H_2S 含量相对较低,分布范围分别介于4.04%~4.59%(均值4.35%)和3.29%~4.53%(均值3.82%)(图2b)。相比之下,同一构造纵向上不同产层段天然气组分无明显差异(表1)。

2.2 烷烃碳同位素组成

川西气田不同构造雷四三亚段上、下储层段气藏天然气烷烃碳同位素分析结果显示,所有构造不同产

表1 川西气田不同构造雷四三亚段气藏天然气组分分析数据

Table 1 Data of natural gas compositions in the Lei 4³ at different structures, Western Sichuan gas field

构造	样品编号	产层段	井深/m	组分含量/%				
				CH ₄	C ₂ H ₆	N ₂	CO ₂	H ₂ S
石羊场构造	YS1-1	下储层	6 182 ~ 6 252	90.09	0.12	1.40	4.59	3.70
	YS1-2	下储层	6 182 ~ 6 252	89.62	0.12	1.35	4.85	3.97
	YS1-3	下储层	6 182 ~ 6 252	88.13	0.12	1.44	5.79	4.41
	下储层平均值			89.28	0.12	1.40	5.08	4.03
金马构造	PZ1-1	下储层	5 814 ~ 5 866	90.29	0.12	1.25	4.59	3.72
	PZ3-5-1	下储层	6 400 ~ 6 600	90.59	0.12	1.13	4.40	3.73
	PZ3-5-2	下储层	6 400 ~ 6 600	90.72	0.12	1.12	4.39	3.62
	PZ3-5-3	下储层	6 400 ~ 6 600	90.29	0.12	1.25	4.59	3.72
	PZ3-5-4	下储层	6 400 ~ 6 600	89.82	0.17	1.14	4.29	4.53
	PZ3-5-5	下储层	6 400 ~ 6 600	89.95	0.17	1.09	4.30	4.45
	PZ3-5-6	下储层	6 400 ~ 6 600	89.94	0.17	1.08	4.29	4.49
	PZ3-5-7	下储层	6 400 ~ 6 600	90.05	0.17	1.08	4.31	4.36
	下储层平均值			90.21	0.15	1.14	4.40	4.08
	PZ3-5-8	上储层	6 170 ~ 6 257	91.25	0.17	0.96	4.09	3.48
	PZ3-5-9	上储层	6 170 ~ 6 258	91.14	0.15	1.07	4.14	3.45
	PZ3-5-10	上储层	6 170 ~ 6 259	91.24	0.15	0.97	4.14	3.47
	PZ3-5-11	上储层	6 170 ~ 6 260	91.44	0.15	1.03	4.04	3.29
	上储层平均值			91.27	0.16	1.01	4.10	3.42
	PZ3-4-1	上下合产	6 015 ~ 6 388	90.84	0.12	1.16	4.44	3.39
	PZ3-4-2	上下合产	6 015 ~ 6 389	90.33	0.17	1.17	4.46	3.83
	PZ3-4-3	上下合产	6 015 ~ 6 390	90.34	0.17	1.17	4.47	3.82
	PZ3-4-4	上下合产	6 015 ~ 6 391	90.36	0.15	1.19	4.46	3.80
	PZ3-4-5	上下合产	6 015 ~ 6 392	90.37	0.17	1.16	4.47	3.80
鸭子河构造	YaS1-1	下储层	5 757 ~ 5 837	86.69	0.13	1.19	6.22	5.67
	YaS1-2	下储层	5 757 ~ 5 837	89.23	0.13	1.13	5.83	3.60
	YaS1-3	下储层	5 757 ~ 5 837	87.20	0.11	0.94	6.09	5.60
	YaS1-4	下储层	5 757 ~ 5 837	87.90	0.12	0.94	5.51	5.51
	YaS1-5	下储层	5 757 ~ 5 837	87.80	0.12	0.91	5.35	5.78
	YaS1-6	下储层	5 757 ~ 5 837	87.90	0.12	1.05	5.33	5.57
	YaS1-7	下储层	5 757 ~ 5 837	88.10	0.12	0.92	5.34	5.48
	YaS1-8	下储层	5 757 ~ 5 837	88.00	0.11	0.92	5.34	5.60
	YaS1-9	下储层	5 757 ~ 5 837	88.20	0.11	0.92	5.30	5.46
	YaS1-10	下储层	5 757 ~ 5 837	88.70	0.14	0.99	5.16	4.95
	YaS1-11	下储层	5 757 ~ 5 837	88.40	0.11	0.96	5.16	5.38
	YaS1-12	下储层	5 757 ~ 5 837	88.50	0.11	0.93	5.35	5.60
	PZ7-1-1	下储层	6 315 ~ 6 400	87.56	0.18	0.84	5.55	5.83
	PZ7-1-2	下储层	6 315 ~ 6 400	87.61	0.18	0.80	5.56	5.82
	PZ7-1-3	下储层	6 315 ~ 6 400	87.55	0.18	0.80	5.54	5.86
	PZ7-1-4	下储层	6 315 ~ 6 400	87.57	0.18	0.81	5.56	5.84
	下储层平均值			87.93	0.13	0.94	5.51	5.47
	PZ7-1-5	上储层	5 965 ~ 6 075	87.51	0.19	0.94	6.25	5.05
	PZ7-1-6	上储层	5 965 ~ 6 075	87.57	0.18	0.98	6.25	4.96
	PZ7-1-7	上储层	5 965 ~ 6 075	87.30	0.18	0.92	6.27	5.28
	PZ7-1-8	上储层	5 965 ~ 6 075	87.39	0.18	0.90	6.26	5.23
	上储层平均值			87.44	0.18	0.94	6.26	5.13
	PZ8-5-1	上下合产	5 904 ~ 6 575	87.50	0.12	0.97	6.66	4.74
	PZ8-5-2	上下合产	5 904 ~ 6 576	88.18	0.17	0.83	4.99	5.79
	PZ8-5-3	上下合产	5 904 ~ 6 577	88.21	0.17	0.83	5.00	5.77
	PZ4-2-1	上下合产	5 878 ~ 6 240	88.72	0.16	0.96	5.49	4.63
	PZ6-2-1	上下合产	5 095 ~ 6 161	88.76	0.16	0.84	5.03	5.18
	PZ6-2-2	上下合产	5 095 ~ 6 162	88.61	0.17	0.84	5.08	5.27

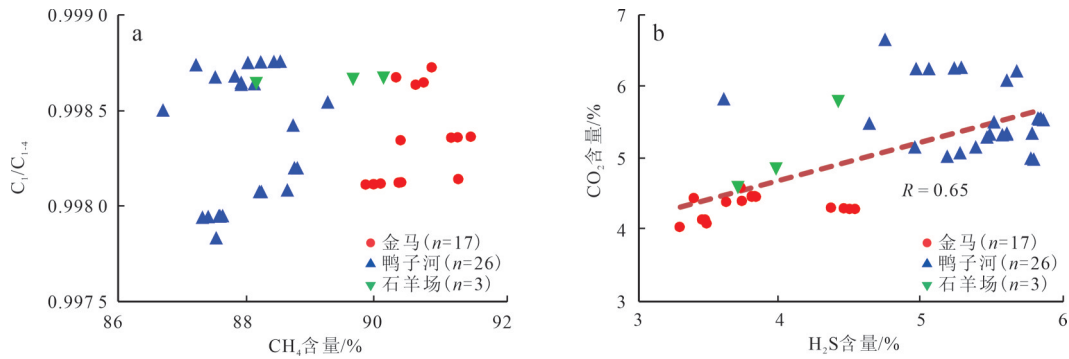


图2 川西气田不同构造雷口坡组气藏天然气组分特征

Fig. 2 Characteristics of natural gas compositions of the Leikoupo Formation at different structures, Western Sichuan gas field

a. CH_4 含量与干燥系数 ($\text{C}_1/\text{C}_{1-4}$) 相关关系; b. H_2S 含量与 CO_2 含量相关关系

层段甲烷碳同位素值 ($\delta^{13}\text{C}_1$) 无明显差异, 介于 $-31.6\text{‰} \sim -30.6\text{‰}$, 均值 -31.2‰ (表2)。然而, 不同构造间乙烷碳同位素值 ($\delta^{13}\text{C}_2$) 具有显著差异, 表现出与前述天然气组分相同的分异趋势 (图2)。具体表现为石羊场构造和鸭子河构造 $\delta^{13}\text{C}_2$ 偏轻 (均值 -32.5‰)、烷烃气碳同位素值倒转 ($\delta^{13}\text{C}_1 > \delta^{13}\text{C}_2$), 金马构造 $\delta^{13}\text{C}_2$ 偏重 (均值 -27.5‰)、烷烃气碳同位素正序分布 ($\delta^{13}\text{C}_1 < \delta^{13}\text{C}_2$)。相比之下, 同一构造不同产层段 $\delta^{13}\text{C}_2$ 无明显差异 (表2), 也表现出与前述天然气组分相同的特征 (表1)。

考虑到 $\delta^{13}\text{C}_2$ 受烃源岩热演化程度影响远小于 $\delta^{13}\text{C}_1$, 可较好的继承原始母质的碳同位素组成, 所以 $\delta^{13}\text{C}_2$ 常作为区别油型气和煤型气的有效指标, 并将 $\delta^{13}\text{C}_2 = -28\text{‰}$ 作为判别界线, 即天然气 $\delta^{13}\text{C}_2$ 小于 -28‰ 为油型气, 大于 -28‰ 为煤型气^[8,24-25]。由此可以得出, 川西气田石羊场构造和鸭子河构造雷四三亚段气藏为油型气, 金马构造为煤型气或偏煤型气。

将川西气田不同构造气藏烷烃碳同位素进行投图

(图3)可以看出, 金马构造天然气投点位于特拉华/范弗德盆地Ⅱ型干酪根趋势线附近^[26], 并靠近萨克拉门托盆地Ⅲ型干酪根趋势线^[27], 而石羊场构造和鸭子河构造天然气烷烃碳同位素投点位于倒转区, 与金马构造天然气差异明显 (图3a); 进一步将 $\delta^{13}\text{C}_1$ 与 ($\delta^{13}\text{C}_2 - \delta^{13}\text{C}_1$) 进行投图可以看出, 石羊场构造和鸭子河构造天然气为油型气, 金马构造天然气为混源气 (图3b)。

表2 川西气田不同构造雷四三亚段气藏天然气烷烃同位素分析数据

Table 2 Isotopic analysis data of alkanes in the Lei 4³ at different structures, Western Sichuan gas field

构造	井号	产层段	井深/m	烷烃同位素值/‰		
				$\delta^{13}\text{C}_1$	$\delta^{13}\text{C}_2$	δD_1
石羊场构造	YS1*	下储层	6 182 ~ 6 252	-31.1	-32.9	-147
	YaS1*	下储层	5 757 ~ 5 837	-30.6	-32.9	-147
鸭子河构造	PZ7-1	上储层	5 965 ~ 6 075	-31.4	-31.7	-143
	PZ1#	下储层	5 814 ~ 5 866	-31.6	-26.4	-140
金马构造	PZ3-5	上储层	6 170 ~ 6 258	-31.4	-28.6	-147

注: *数据来自文献[3]; #数据来自文献[8]; 井深数据为斜深。

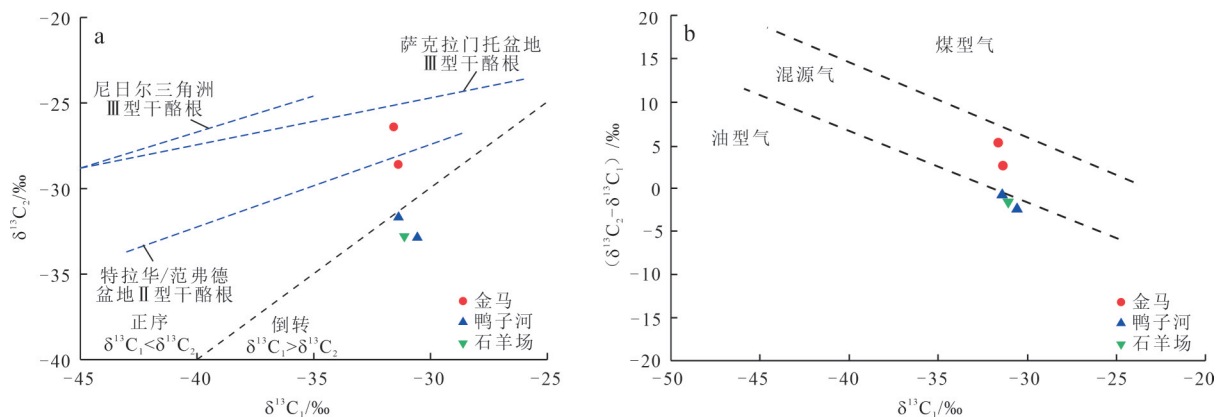


图3 川西气田不同构造雷口坡组气藏烷烃碳同位素特征

Fig. 3 Carbon isotopic characteristics of alkanes in the Leikoupo Formation 4³ at different structures, Western Sichuan gas field

a. 甲烷碳同位素与乙烷碳同位素交会图; b. 甲烷碳同位素与乙烷-甲烷碳同位素差值交会图, 判识图版根据参考文献[8]

2.3 甲烷氢同位素组成

虽然目前对于川西坳陷雷口坡组天然气来源未形成统一认识,但基于前期研究,气藏为有机热成因气是共识^[2-3,6-9],而有机热成因天然气甲烷氢同位素值(δD_1)主要受烃源岩成熟度和沉积环境所控制。一般而言,烃源岩热演化程度越高,所形成的天然气 δD_1 越重;烃源岩沉积环境介质盐度越高,所形成的天然气 δD_1 越重^[28-29]。廖凤蓉等对四川盆地海相和陆相天然气氢同位素组成的对比研究表明,煤型气往往具有较低的 δD_1 ($< -150\text{‰}$),而油型气 δD_1 普遍高于 -150‰ ^[30]。

将川西气田不同构造烷烃气的 δD_1 与 $\delta^{13}C_2$ 进行投图(图4),结果显示石羊场构造和鸭子河构造的 δD_1 与 $\delta^{13}C_2$ 正相关性明显,金马构造的 δD_1 与 $\delta^{13}C_2$ 正相关性也明显。这表明川西气田天然气受成熟度控制显著,与前人认识相符^[12]。同时,值得注意的是,烷烃碳同位素分析表明石羊场构造和鸭子河构造气藏为油型气,金马构造气藏为混源气,然而二者的 δD_1 却无明显的差异性,均表现为油型气的特征。对出现该现象的具体原因将在下文进行详细解释。

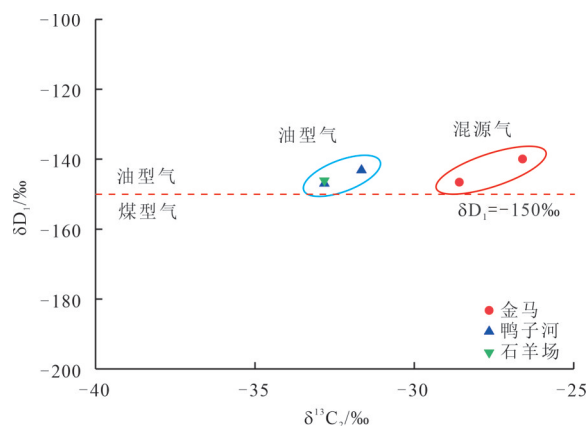


图4 川西气田不同构造雷口坡组气藏 $\delta^{13}C_2$ 与 δD_1 相关关系
(判识图版根据参考文献[12]和[30])

Fig. 4 $\delta^{13}C_2$ vs. δD_1 of Leikoupo gas reservoir at different structures, western Sichuan gas field

(identification plot as modified from references [11] and [28])

3 天然气成因和来源

近期,随着钻井数量的逐渐增加,对川西气田的气藏分布有了更为精细的认识。其中,最重要的一点认识为金马构造和鸭子河构造是两个独立的气藏,具有不同的气-水界面(图1c);同时,新气样的补充分析进

一步落实了川西气田不同构造间天然气具有明显差异(图2,图3)。具体的天然气成因和来源分析如下。

3.1 雷口坡组碳酸盐岩烃源岩认识

关于雷口坡组自身碳酸盐岩烃源岩,已有研究表明川西坳陷孝泉地区以及大邑—温江—彭州—广汉一带,雷口坡组烃源岩TOC介于0.4%~0.6%,厚度达250~350 m^[2],其能否作为有效烃源岩争议较大^[5-6,17,31-32],而争议的关键点在于碳酸盐岩烃源岩的评价标准。近十多年来,随着普光、元坝和龙岗等二叠系—三叠系大中型气田的发现及探井的增多,很多学者对碳酸盐岩烃源岩又进行了更深入的研究^[33-37],并认为碳酸盐岩的TOC达到0.2%或者0.3%就是烃源岩^[33,38],这与Gehman统计的全球范围内的346块碳酸盐岩烃源岩均值(0.24%)相当^[39]。该TOC下限值明显比目前国内外普遍认为的0.5%的标准偏低^[40-42]。

参照黄籍中和吕宗刚对碳酸盐岩烃源岩TOC的四级分级标准,即I级(>0.50%)、II级(0.35%~0.50%)、III级(0.20%~0.35%)和IV级(<0.20%)^[43]。川西坳陷雷口坡组碳酸盐岩烃源岩属于I—II级烃源岩。值得注意的是,TOC值是测试岩石中的残留有机碳量,其与原始有机质丰度存在较大差异,尤其是高热演化的烃源岩^[44]。Jarvie研究表明不同干酪根类型热演化过程中生烃潜力差异巨大,其中I型干酪根油气转化率可达80%,II型干酪根油气转化率50%,III型干酪根油气转化率仅20%^[45]。研究区中三叠统烃源岩处于有机质热演化的过成熟阶段(R_o 均大于2%)^[5],且有机质类型为I—II₁型,主要来自浮游生物,生烃潜力好^[2],据此推测烃源层原始沉积物的有机碳含量会更高,因此本次研究认为雷口坡组碳酸盐岩可以作为有效烃源岩。

3.2 天然气特征及来源分析

川西气田钻井揭示二叠系下伏地层为下寒武统^[46],奥陶系五峰组和志留系龙马溪组烃源岩缺失,因此,研究区雷口坡组气藏潜在的烃源岩主要包括海相下寒武统筇竹寺组和中三叠统雷口坡组,以及海—陆过渡相上二叠统龙潭组和上三叠统马鞍塘—小塘子组共4套烃源岩^[6]。

石羊场构造和鸭子河构造天然气 H_2S 和 CO_2 含量高、 $\delta^{13}C_2$ 偏轻(均值 -32.5‰),且烷烃气碳同位素倒转,表现出典型的海相油型气特征,所以气藏烃源岩可能为筇竹寺组和雷口坡组。而油型气可进一步分

为干酪根裂解气和原油裂解气^[47]。考虑到川西气田前期探井(石羊场构造YS1井、金马构造PZ1井和鸭子河构造YaS1井)取心段储层裂隙中均发育沥青,其中YaS1井沥青分布段厚度达66 m;在川西坳陷中段的金河剖面,沥青广泛存在于砂屑和鲕粒白云岩中,厚度可达50 m以上,且邻区LS1井的局部层段亦发现了沥青充填^[48],这说明川西龙门山前构造带雷口坡组早期可能发育古油藏,晚期裂解为气藏。对川西坳陷龙门山前构造带雷四段沥青反射率进行分析测试,结果表明(表3),储层段沥青反射率(R_b)高,介于2.79%~4.76%,均值3.61%。通过计算^[49]其等效镜质体反射率(eqR_o),结果均大于2%,均值2.77%,处于有机质过成熟演化阶段,进一步说明了原油裂解气的发育。此外,乙烷和丙烷的质量分数比值(C_2/C_3)与碳同位素差值($\delta^{13}C_2-\delta^{13}C_3$)交会图^[3]和流体包裹体研究成果^[50]也表现出二次裂解气以及川西气田两期成藏(先期液态烃充注和后期气态烃充注)的特征。所以,川西气田油型气主体为原油裂解气。而原油裂解气会发生碳同位素二次分馏,其 $\delta^{13}C_2$ 通常比干酪根碳同位素值($\delta^{13}C$)低3‰~5‰^[47,51]。已有研究报道研究区筇竹寺组干酪根 $\delta^{13}C$ 介于-39.1‰~-29.3‰,雷口坡组干酪根 $\delta^{13}C$ 介于-31.0‰~-25.0‰^[6],因此石羊场构造和鸭子河构造天然气更有可能来自于雷口坡组自身。

就运移条件而言,雷口坡组虽然发育多套膏盐隔层,但是内部小断层同样十分发育,可作为其自身烃源岩的有效运移疏导体系。主要证据如下:川西坳陷龙门山前构造带,除关口断裂和彭县断裂两条主要断层

表3 川西坳陷龙门山前构造带雷口坡组四段沥青反射率(R_b)和等效镜质体反射率(eqR_o)

Table 3 Bitumen reflectance (R_b) and equivalent vitrinite reflectance (eqR_o) of the Lei 4 Member in the Longmenshan piedmont structural belt, Wwestern Sichuan Depression

样品编号	井深/m	岩性	R_b /%	eqR_o /% (据参考文献[49])
LS1-1	6 280	深灰色含泥质白云岩	4.06	3.08
LS1-2	6 390	灰黑色灰岩	4.76	3.55
LS1-3	6 630	灰黑色泥质白云岩	3.84	2.93
LS1-4	6 640	灰黑色泥质白云岩	3.89	2.96
LS1-5	6 810	灰色含泥质白云岩	3.93	2.99
PZ1-1*	5 839	灰色灰质云岩	3.35	2.59
PZ115-1	6 329	灰色灰质云岩	2.79	2.21
PZ115-2	6 332	灰色灰质云岩	2.89	2.28
YS1-1*	6 170	沥青	3.33	2.58
YaS1-1*	5 724	沥青	3.22	2.51

注:*数据来自文献[6]。

外,基于构造主体部位25 m×25 m地震解释,仅金马构造-鸭子河构造圈闭内发育断层就高达144条,这与雷口坡组岩心破碎和裂缝发育的现象(图5)相吻合;此外,在钻井过程中由于雷口坡组井壁失稳而导致的憋泵和卡钻等工程故障频发,也可以从侧面佐证雷口坡组内部小断层极为发育。

金马构造天然气中 H_2S 和 CO_2 含量相对较低、 $\delta^{13}C_2$ 偏重(均值-27.5‰),且烷烃气碳同位素正序分布,表现出混源气特征。基于上述分析,气藏天然气可能来源于雷口坡组和龙潭组的混合,或者雷口坡组与马鞍塘组-小塘子组的混合。前人通过计算发现金马构造天然气的母质演化程度明显高于马鞍塘组-小塘



图5 川西气田PZ8-5井雷四段岩心特征

Fig. 5 Core characteristics of the Lei 4 Member in Well PZ8-5, Western Sichuan gas field

- a. 第二回次岩心出筒整体照片,岩心较为破碎,埋深6 400~6 404 m; b. 粉晶白云岩,溶孔及裂缝发育,埋深6 401.66~6 401.69 m;
c. 粉晶砂屑白云岩,裂缝发育,埋深6 402.60~6 402.66 m

子组烃源岩成熟度,而与龙潭组和雷口坡组烃源岩成熟度较为吻合,且雷口坡组储层沥青生物标志化合物与马鞍塘组-小塘子组烃源岩生物标志化合物不具有亲缘关系^[8],因此金马构造天然气主要来源于雷口坡组和龙潭组烃源岩。

就运移条件而言,川西气田不同构造断裂发育程度具有明显差异,整体表现为南部石羊场构造和北部鸭子河构造断裂欠发育,而中部金马构造断裂较发育。不同方向地震剖面(图6)可明显看出,不管是彭县断裂,还是下伏二叠系烃源断裂,中部金马构造的断裂破碎带和断距规模均大于石羊场构造和鸭子河构造。因此,金马构造更容易沟通下伏龙潭组气源,进而充注到雷口坡组形成混源气。

值得注意的是,虽然金马构造天然气地球化学特征没有表现出与马鞍塘组-小塘子组烃源岩的亲缘关系,但是其满足旁生侧储的供烃条件(图7),且彭县断裂既然可作为下伏龙潭组烃源的有效运移通道,那么

同样可以作为断下盘马鞍塘组-小塘子组烃源的有效运移通道。所以,不排除马鞍塘组-小塘子组烃源对金马构造气藏有少许贡献。

此外,川西气田雷口坡组气藏高含量的 H_2S (均值5.10%)为硫酸盐热化学还原反应(TSR)成因^[5],这是因为含硫有机物热裂解(TDS)和硫酸盐细菌还原作用(BSR)形成的 H_2S 浓度一般不会超过3%^[52-54]。天然气中 H_2S 含量与 CO_2 含量具有较好的正相关关系(相关系数 $R = 0.65$)(图2b),同样表明气藏经历了TSR改造。TSR作用优先消耗乙烷及以上的重烃,同时生成 H_2S 和 CO_2 ^[55-56],使得川西气田干燥系数均大于0.99,并具有较高含量的 H_2S 和 CO_2 。对于金马构造天然气 H_2S 和 CO_2 含量整体低于石羊场构造和鸭子河构造,推测主要是因为龙潭组运移而来的天然气由于地质色层效应而导致烷烃气以轻烃甲烷为主,从而稀释了雷口坡组气藏中 H_2S 和 CO_2 的浓度。

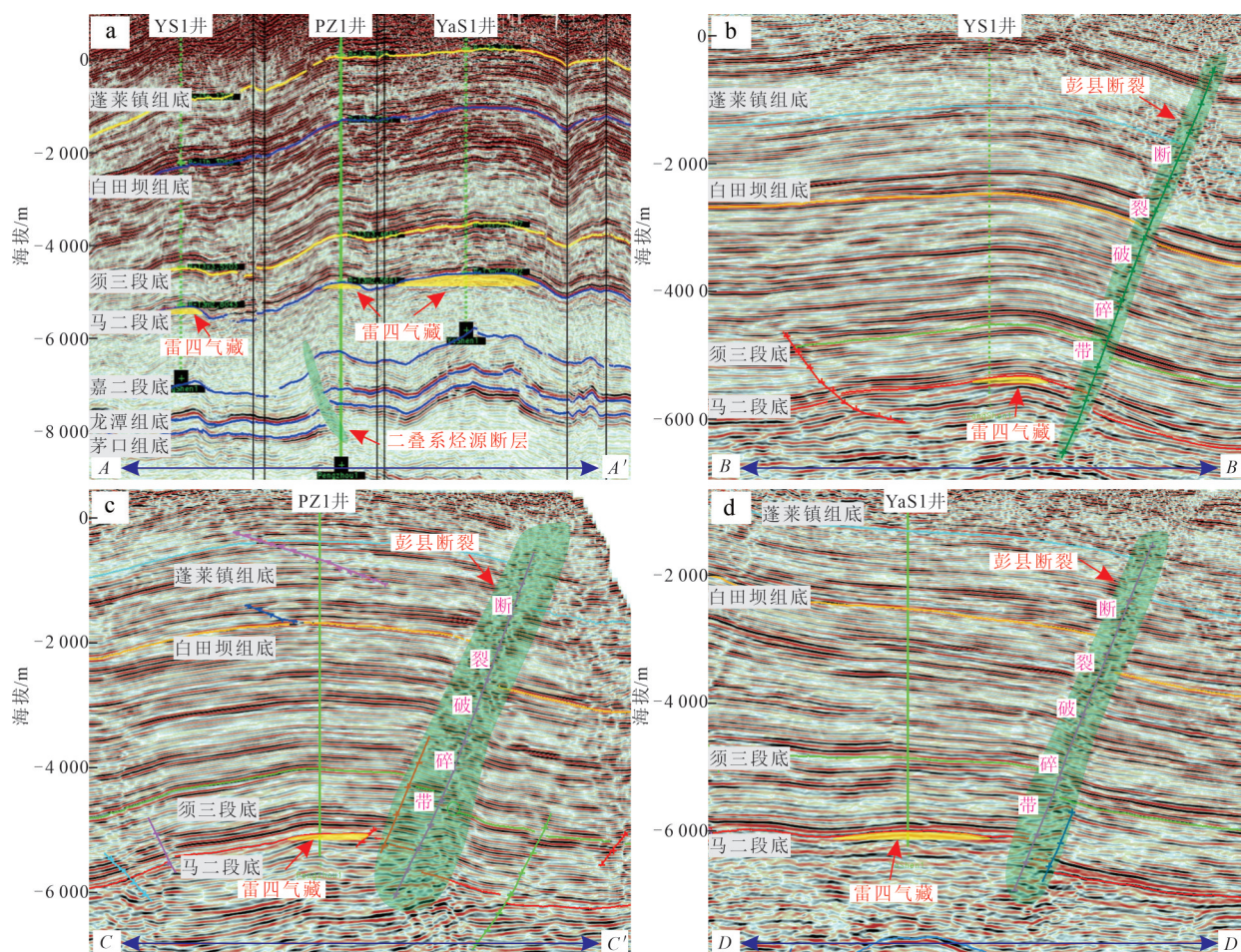


图6 川西气田地震骨架剖面解释(剖面位置见图1c)

Fig. 6 Interpretation results on seismic skeleton section of Western Sichuan gas field (see Fig. 1c for the section location)

- a. 过YS1井、PZ1井和YaS1井北东-南西向; b. 过YS1井北西-南东向;
c. 过PZ1井北西-南东向; d. 过YaS1井北西-南东向

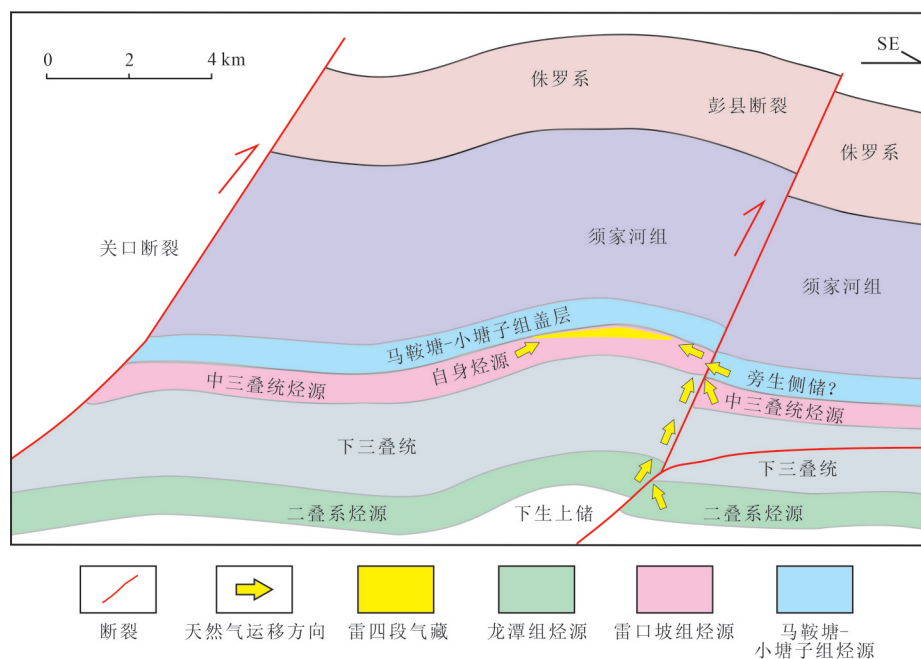


图7 川西气田金马构造雷口坡组气藏成藏模式

Fig. 7 Gas accumulation pattern of the Leikoupo Formation at Jinma structural belt, Western Sichuan gas field

最后,关于石羊场构造和鸭子河构造气藏为油型气,金马构造气藏为混源气,而二者的 δD_1 却无明显差异性的现象(图4)可作如下解释:在相同成熟度的情况下,金马构造海陆过渡相龙潭组气源 δD_1 应轻于石羊场构造和鸭子河构造局限蒸发台地相雷口坡组气源 δD_1 ;同时,龙潭组烃源岩热演化程度高于雷口坡组烃源岩热演化程度,又将导致龙潭组气源 δD_1 偏重。二者相互作用共同导致了金马构造的混源气,与石羊场构造和鸭子河构造的油型气具有大致相当的 δD_1 。

4 结论

1) 川西气田同一构造雷四三亚段上、下产层的天然气烷烃同位素和天然气组分特征相似,而不同构造间天然气地球化学特征具有一定的差异,说明川西气田同一构造雷四三亚段下储层气藏和上储层气藏具有相同的气源,而不同构造间气源具有差异。

2) 石羊场构造和鸭子河构造天然气表现出典型的油型气特征,气源主要为雷口坡组自身;金马构造天然气表现出混源气特征,气源主要为雷口坡组和龙潭组的混合,马鞍塘组-小塘子组烃源可能有少许贡献。

3) 川西气田中部金马构造断裂较南部石羊场构造和北部鸭子河构造更为发育,可有效沟通下伏龙潭组气源充注到雷口坡组储层,即不同气藏构造断裂系

统发育程度的差异导致了气源的差异。

参 考 文 献

- [1] 李书兵, 许国明, 宋晓波. 川西龙门山前构造带彭州雷口坡组大型气田的形成条件[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(3): 74-82.
Li Shubing, Xu Guoming, Song Xiaobo. Forming conditions of Pengzhou large gas field of Leikoupo Formation in Longmenshan piedmont tectonic belt, western Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(3): 74-82.
- [2] 杨克明. 四川盆地西部中三叠统雷口坡组烃源岩生烃潜力分析[J]. 石油实验地质, 2016, 38(3): 366-374.
Yang Keming. Hydrocarbon potential of source rocks in the Middle Triassic Leikoupo Formation in the Western Sichuan Depression[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(3): 366-374.
- [3] Wu X Q, Chen Y B, Liu G X, et al. Geochemical characteristics and origin of natural gas reservoir in the 4th Member of the Middle Triassic Leikoupo Formation in the Western Sichuan Depression, Sichuan Basin, China[J]. Journal of Natural Gas Geoscience, 2017, 2(2): 99-108.
- [4] 刘树根, 孙玮, 宋金民, 等. 四川盆地中三叠统雷口坡组天然气勘探的关键地质问题[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(2): 151-167.
Liu Shugen, Sun Wei, Song Jinmin, et al. The key geological problems of natural gas exploration in the Middle Triassic Leikoupo Formation in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(2): 151-167.
- [5] 王鹏, 朱童, 徐邱康, 等. 川西坳陷中段雷口坡组烃源岩评价

- 及气源分析[J]. 地质科技情报, 2019, 38(3): 180-187.
- Wang Peng, Zhu Tong, Xu Qiukang, et al. Source rock and natural gas source of Leikoupo Formation in the middle part of west Sichuan Depression [J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(3): 180-187.
- [6] 吴小奇, 陈迎宾, 翟常博, 等. 川西坳陷中三叠统雷口坡组天然气气源对比[J]. 石油学报, 2020, 41(8): 918-927, 1018.
- Wu Xiaoqi, Chen Yingbin, Zhai Changbo, et al. Gas-source correlation of natural gas in the Middle Triassic Leikoupo Formation in the western Sichuan Depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(8): 918-927, 1018.
- [7] 孙玮, 刘树根, 曹俊兴, 等. 四川叠合盆地西部中北段深层-超深层海相大型气田形成条件分析[J]. 岩石学报, 2017, 33(4): 1171-1188.
- Sun Wei, Liu Shugen, Cao Junxing, et al. Analysis on the formation conditions of large-scale marine deep and super-deep strata gas fields in the middle-northern segments of western Sichuan Superimposed Basin, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(4): 1171-1188.
- [8] 谢刚平. 川西坳陷中三叠统雷口坡组四段气藏气源分析[J]. 石油实验地质, 2015, 37(4): 418-422, 429.
- Xie Gangping. Source of gas reservoirs in the fourth member of the Middle Triassic Leikoupo Formation in Western Sichuan Depression [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(4): 418-422, 429.
- [9] 孟宪武, 刘勇, 石国山, 等. 四川盆地川西坳陷中段构造演化对中三叠统雷口坡组油气成藏的控制作用[J]. 石油实验地质, 2021, 43(6): 986-995.
- Meng Xianwu, Liu Yong, Shi Guoshan, et al. The structural evolution of the middle section of the West Sichuan Depression in the Sichuan Basin controlled the hydrocarbon accumulation in the Middle Triassic Leikoupo Formation [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(6): 986-995.
- [10] 宋晓波, 袁洪, 隆轲, 等. 川西地区雷口坡组潮坪白云岩气藏成藏地质特征及富集规律[J]. 天然气工业, 2019, 39(S1): 54-59.
- Song Xiaobo, Yuan Hong, Long Ke, et al. Geological characteristics and enrichment regularity of tidal flat dolomite gas reservoir in Leikoupo Formation, western Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(S1): 54-59.
- [11] 隆轲, 陈智远, 宋晓波, 等. 川西地区中三叠统雷口坡组气藏气源分析[J]. 天然气工业, 2019, 39(S1): 48-53.
- Long Ke, Chen Zhiyuan, Song Xiaobo, et al. Gas source analysis of middle Triassic Leikoupo Formation in western Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(S1): 48-53.
- [12] 吴小奇, 陈迎宾, 翟常博, 等. 四川盆地中三叠统雷口坡组天然气来源及勘探方向[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(9): 1204-1215.
- Wu Xiaoqi, Chen Yingbin, Zhai Changbo, et al. Gas source and exploration direction of the Middle Triassic Leikoupo Formation in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(9): 1204-1215.
- [13] 叶素娟, 朱宏权, 李嵘, 等. 天然气运移有机-无机地球化学示踪指标——以四川盆地川西坳陷侏罗系气藏为例[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(4): 549-560.
- Ye Sujuan, Zhu Hongquan, Li Rong, et al. Tracing natural gas migration by integrating organic and inorganic geochemical data: A case study of the Jurassic gas fields in western Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration & Development, 2017, 44(4): 549-560.
- [14] He D F, Ma Y S, Li Y Q, et al. New directions in an established gas play: Promising dolomite reservoirs in the Middle Triassic Leikoupo Formation of the Sichuan Basin, China [J]. AAPG Bulletin, 2019, 103(1): 1-29.
- [15] 汪华, 刘树根, 秦川, 等. 四川盆地中西部雷口坡组油气地质条件及勘探方向探讨[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2009, 36(6): 669-674.
- Wang Hua, Liu Shugen, Qing Chuan, et al. Study on petroleum geological conditions and hydrocarbon exploration direction of Leikoupo Formation in the centre and west of Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2009, 36(6): 669-674.
- [16] 许国明, 宋晓波, 王琼仙. 川西坳陷中段三叠系雷口坡组——马鞍塘组油气地质条件及有利勘探目标分析[J]. 海相油气地质, 2012, 17(2): 14-19.
- Xu Guoming, Song Xiaobo, Wang Qiongxi. Analysis of petroleum geologic conditions and favorable prospecting targets of Triassic Leikoupo-Ma'antang Formations in the middle segment of Chuanxi Depression, Western Sichuan Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2012, 17(2): 14-19.
- [17] 许国明, 宋晓波, 冯霞, 等. 川西地区中三叠统雷口坡组天然气勘探潜力[J]. 天然气工业, 2013, 33(8): 8-14.
- Xu Guoming, Song Xiaobo, Feng Xia, et al. Gas potential of the Middle Triassic Leikoupo Fm in the western Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(8): 8-14.
- [18] 孔强夫, 杨才, 李浩, 等. 基于图论聚类和最小临近算法的岩性识别方法——以四川盆地西部雷口坡组碳酸盐岩储层为例[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(4): 884-890.
- Kong Qiangfu, Yang Cai, Li Hao, et al. A lithology recognition method based on multi-resolution graph-based clustering and K-Nearest Neighbor: A case study from the Leikoupo Formation carbonate reservoirs in western Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4): 884-890.
- [19] 周凌方, 钱一雄, 宋晓波, 等. 四川盆地西部彭州气田中三叠统雷口坡组四段上亚段白云岩孔隙表征、分布及成因[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(1): 177-188.
- Zhou Lingfang, Qian Yixiong, Song Xiaobo, et al. Characteristics, distribution and origin of dolomite reservoir in the upper Lei 4 member of the Middle Triassic, Pengzhou gas field, western Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(1): 177-188.
- [20] 宋晓波, 隆轲, 王琼仙, 等. 川西地区中三叠统雷口坡组四段上亚段沉积特征[J]. 石油实验地质, 2021, 43(6): 976-985.
- Song Xiaobo, Long Ke, Wang Qiongxi, et al. Sedimentary characteristics of the upper part of the fourth member of Leikoupo For-

- mation of Middle Triassic in western Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(6): 976-985.
- [21] 郝哲敏, 许国明, 陈洪德, 等. 川西坳陷马井地区中三叠统雷四³亚段储层孔隙类型与面孔率定量研究[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(2): 380-392, 422.
- Hao Zheming, Xu Guoming, Chen Hongde, et al. Pore classification and thin section porosity quantification of reservoir in the T₂⁴⁽³⁾ in Majing area, Western Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(2): 380-392, 422.
- [22] 叶泰然, 马灵伟, 张虹, 等. 川西彭州地区雷口坡组潮坪相薄储层辨识机理研究[J]. *石油物探*, 2020, 59(3): 409-421.
- Ye Tairan, Ma Lingwei, Zhang Hong, et al. Strategy for identifying thin reservoirs in tide-flat facies in the Leikoupo Formation, Pengzhou, Western Sichuan[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2020, 59(3): 409-421.
- [23] 肖开华, 李宏涛, 段永明, 等. 四川盆地川西气田雷口坡组气藏储层特征及其主控因素[J]. *天然气工业*, 2019, 39(6): 34-44.
- Xiao Kaihua, Li Hongtao, Duan Yongming, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of the Leikoupo gas pools in the western Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(6): 34-44.
- [24] 王世谦. 四川盆地侏罗系—震旦系天然气的地球化学特征[J]. *天然气工业*, 1994, 14(6): 1-5, 93.
- Wang Shiqian. Geochemical characteristics of Jurassic-Sinian gas in Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 1994, 14(6): 1-5, 93.
- [25] 肖芝华, 谢增业, 李志生, 等. 川中—川南地区须家河组天然气同位素组成特征[J]. *地球化学*, 2008, 37(3): 245-250.
- Xiao Zhihua, Xie Zengye, Li Zhisheng, et al. Isotopic characteristics of natural gas of Xujiahe Formation in southern and middle of Sichuan Basin[J]. *Geochimica*, 2008, 37(3): 245-250.
- [26] Rooney M A, Claypool G E, Chung H M. Modeling thermogenic gas generation using carbon isotope ratios of natural gas hydrocarbons[J]. *Chemical Geology*, 1995, 126(3): 219-232.
- [27] Jenden P D, Kaplan I R. Origin of natural gas in Sacramento Basin, California[J]. *AAPG Bulletin*, 1989, 73(4): 431-453.
- [28] 戴金星. 我国有机烷烃气的氢同位素的若干特征[J]. *石油勘探与开发*, 1990, 17(5): 27-32.
- Dai Jinxing. Characteristics of hydrogen isotopes of paraffinic gas in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1990, 17(5): 27-32.
- [29] 王晓锋, 刘文汇, 徐永昌, 等. 不同成因天然气的氢同位素组成特征研究进展[J]. *天然气地球科学*, 2006, 17(2): 163-169.
- Wang Xiaofeng, Liu Wenhui, Xu Yongchang. The hydrogen isotopic composition of natural gases generated from different pathway[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2006, 17(2): 163-169.
- [30] 廖凤蓉, 吴小奇, 黄士鹏, 等. 川西北地区中坝气田雷口坡组天然气地球化学特征及气源探讨[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(1): 108-115.
- Liao Fengrong, Wu Xiaoqi, Huang Shipeng, et al. Geochemical characteristics and gas-source correlation of Leikoupo Formation in Zhongba Field, Northwest Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(1): 108-115.
- [31] 宋晓波, 刘诗荣, 王琼仙, 等. 川西坳陷西缘中下三叠统油气成藏主控因素[J]. *岩性油气藏*, 2011, 23(1): 67-73.
- Song Xiaobo, Liu Shirong, Wang Qiongxiang, et al. Seismic response characteristics and identification method of fracture-cavity reservoir[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2011, 23(1): 67-73.
- [32] 孟昱璋, 徐国盛, 刘勇, 等. 川西雷口坡组古风化壳喀斯特气藏成藏条件[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2015, 42(1): 70-79.
- Meng Yuzhang, Xu Guosheng, Liu Yong, et al. Hydrocarbon accumulation conditions of the weathering crust paleokarst gas reservoir of Leikoupo Formation, West Sichuan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2015, 42(1): 70-79.
- [33] 王兰生, 李子荣, 谢姚祥, 等. 川西南地区二叠系碳酸盐岩生烃下限研究[J]. *天然气地球科学*, 2003, 14(1): 39-46.
- Wang Lansheng, Li zirong, Xie Yaoxiang, et al. Research on minimum TOC of source rock of permian carbonate in southwest Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2003, 14(1): 39-46.
- [34] 腾格尔, 秦建中, 付小东, 等. 川西北地区海相油气成藏物质基础——优质烃源岩[J]. *石油实验地质*, 2008, 30(5): 478-483.
- Teng Geer, Qin Jianzhong, Fu Xiaodong, et al. Basic conditions of marine hydrocarbon accumulation in northwest Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2008, 30(5): 478-483.
- [35] 腾格尔, 秦建中, 付小东, 等. 川东北地区上二叠统吴家坪组烃源岩评价[J]. *古地理学报*, 2010, 12(3): 334-345.
- Teng Geer, Qin Jianzhong, Fu Xiaodong, et al. Hydrocarbon source rocks evaluation of the Upper Permian Wujiaping Formation in northeastern Sichuan area[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2010, 12(3): 334-345.
- [36] 陈建平, 梁狄刚, 张水昌, 等. 泥岩/页岩: 中国元古宙—古生代海相沉积盆地主要烃源岩[J]. *地质学报*, 2013, 87(7): 905-921.
- Chen Jianping, Liang Digang, Zhang Shuichang, et al. Shale and Mudstone: Essential Source Rocks in the Proterozoic to Paleozoic Marine Basins in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(7): 905-921.
- [37] 刘全有, 金之钧, 高波, 等. 四川盆地二叠系烃源岩类型与生烃潜力[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(1): 10-18.
- Liu Quanyou, Jin Zhijun, Gao Bo, et al. Types and hydrocarbon generation potential of the Permian source rocks in the Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(1): 10-18.
- [38] 黄籍中. 四川盆地阳新灰岩生油问题探讨[J]. *石油学报*, 1984, 5(1): 9-18.
- Huang Jizhong. On the occurrence of oil and gas in the Yangxin Limestone series in Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1984, 5(1): 9-18.
- [39] Gehman H M. Organic matter in limestones[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1962, 26(8): 885-897.
- [40] Chilingarian G V, Gurevich A E. The Petroleum System: From

- source to trap[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1996, 14(3-4): 258-260.
- [41] 梁狄刚, 张水昌, 张宝民, 等. 从塔里木盆地看中国海相生油问题[J]. 地学前缘, 2000, 7(4): 534-547.
- Di Lianggang, Zhang Shuichang, Zhang Baomin, et al. Understanding on marine oil generation in China based on Tarim Basin [J]. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing), 2000, 7(4): 534-547.
- [42] 陈建平, 梁狄刚, 张水昌, 等. 中国古生界海相烃源岩生烃潜力评价标准与方法[J]. 地质学报, 2012, 86(7): 1132-1142.
- Chen Jianping, Di Lianggang, Zhang Shuichang, et al. Evaluation criterion and methods of the hydrocarbon generation potential for China's paleozoic marine source rocks[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(7): 1132-1142.
- [43] 黄籍中, 吕宗刚. 碳酸盐岩烃源岩判识与实践——以四川盆地为例[J]. 海相油气地质, 2011, 16(3): 8-14.
- Huang Jizhong, Lv Zonggang. How to judge carbonate rock as source rock: A case of Sichuan Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2011, 16(3): 8-14.
- [44] 刘文汇, 腾格尔, 王晓锋, 等. 中国海相碳酸盐岩层系有机质生烃理论新解[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(1): 155-164.
- Liu Wenhui, Teng Borjigin, Wang Xiaofeng, et al. New knowledge of hydrocarbon generating theory of organic matter in Chinese marine carbonates [J]. Petroleum Exploration & Development, 2017, 44(1): 159-169.
- [45] Breyer J A. Shale reservoirs: Giant resources for the 21st century, AAPG Memoir 97[M]. Tulsa: AAPG, 2012.
- [46] 陆建林, 左宗鑫, 师政, 等. 四川盆地西部二叠系火山作用特征与天然气勘探潜力[J]. 天然气工业, 2019, 39(2): 46-53.
- Lu Jianlin, Zuo Zongxin, Shi Zheng, et al. Characteristics of permian volcanism in the western Sichuan Basin and its natural gas exploration potential—science direct[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(2): 46-53.
- [47] 刘文汇, 陈孟晋, 关平, 等. 天然气成藏过程的三元地球化学示踪体系[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2007, 37(7): 908-915.
- Liu Wenhui, Chen Mengjin, Guanping, et al. Ternary geochemical tracer system for natural gas reservoir formation[J]. Science in China(Series D: Earth Science), 2007, 37(7): 908-915.
- [48] 吴世祥, 李宏涛, 龙胜祥, 等. 川西雷口坡组碳酸盐岩储层特征及成岩作用[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(4): 542-550, 559.
- Wu Shixiang, Li Hongtao, Long Shengxiang, et al. A study on characteristics and diagenesis of carbonate reservoirs in the Middle Triassic Leikoupo Formation in western Sichuan Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(4): 542-550, 559.
- [49] 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.
- [50] 刘成川, 王园园, 赵爽, 等. 彭州气田雷口坡组流体包裹体特征及成藏期次[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2020, 35(6): 17-21.
- Liu Chengchuan, Wang Yuanyuan, Zhao Shuang, et al. Study on fluid inclusion characteristics and hydrocarbon accumulation periods of Leikoupo Formation in Pengzhou Gasfield[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2020, 35(6): 17-21.
- [51] 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.
- 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, 2012, 28(3): 870-878.
- [52] 樊广锋, 戴金星, 戚厚发. 中国硫化氢天然气研究[J]. 天然气地球科学, 1992, 3(3): 1-10.
- Fan Guangfeng, Dai Jinxing, Qi Houfa. Research on hydrogen sulfide natural gas in China[J]. Natural Gas Geoscience, 1992, 3(3): 1-10.
- [53] 戴金星. 中国含油气盆地的无机成因气及其气藏[J]. 天然气工业, 1995, 15(3): 22-27, 106.
- Dai Jinxing. Abiogenic gas in oil-gas bearing basin in China and its reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 1995, 15(3): 22-27, 106.
- [54] 朱光有, 戴金星, 张水昌, 等. 含硫化氢天然气的形成机制及分布规律研究[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(2): 166-170.
- Zhu Guangyou, Dai Jinxing, Zhang Shuichang, et al. Generation mechanism and distribution characteristics of hydrogen sulfide bearing gas in china[J]. Natural Gas Geoscience, 2004, 15(2), 166-170.
- [55] 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 川东北飞仙关组高含H₂S气藏特征与TSR对烃类的消耗作用[J]. 沉积学报, 2006, 24(2): 300-308.
- Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, et al. Characteristics of gas reservoirs with high content of H₂S in the northeastern Sichuan Basin and the consumption of hydrocarbons due to TSR [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(2): 300-308.
- [56] 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 硫酸盐热化学还原反应对烃类的蚀变作用[J]. 石油学报, 2005, 26(5): 52-56.
- Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, et al. Alteration of thermochemical sulfate reduction to hydrocarbons[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 26(5): 52-56.

(编辑 梁 慧)