

引用: 谢增业, 魏国齐, 李剑, 等. 四川盆地川中隆起带震旦系—二叠系天然气地球化学特征及成藏模式[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(6): 50-67.

Xie Zengye, Wei Guoqi, Li Jian, et al. Geochemical characteristics and accumulation pattern of gas reservoirs of the Sinian-Permian in central Sichuan uplift zone, Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(6): 50-67.

四川盆地川中隆起带震旦系—二叠系天然气 地球化学特征及成藏模式

谢增业^{1,2} 魏国齐^{1,2} 李剑^{1,2} 徐亮³ 张璐^{1,2} 李谨^{1,2} 李志生^{1,2} 武赛军¹
郭泽清¹ 郝爱胜^{1,2}

(1 中国石油勘探开发研究院; 2 中国石油天然气集团有限公司天然气成藏与开发重点实验室;

3 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院)

摘要: 四川盆地川中隆起带震旦系—寒武系探明天然气储量超过万亿立方米, 发现中二叠统栖霞组气藏, 洗象池组、茅口组、玄武岩组、长兴组等层系获工业气流, 不同层系气藏天然气地球化学特征存在明显差异。基于大量新获气井天然气组分、碳同位素、氢同位素等分析实验数据, 系统研究了川中隆起带天然气成因及成藏特征, 明确了下一个万亿立方米级重点勘探领域。研究表明: (1) 震旦系、寒武系和二叠系天然气均是以烃类气体为主且干燥系数大于 0.997 的干气, 属于原油裂解气。绝大多数二叠系天然气 C_2H_6 含量、 $\delta^{13}C_2$ 、 $\delta^2H_{CH_4}$ 与源自下寒武统筇竹寺组烃源岩的寒武系天然气相似; 上震旦统灯影组天然气 C_2H_6 含量低、 $\delta^{13}C_2$ 重、 $\delta^2H_{CH_4}$ 轻; GS19 栖霞组气藏天然气 C_2H_6 含量高、 $\delta^{13}C_2$ 轻、 $\delta^2H_{CH_4}$ 轻。 C_2H_6 与 $\delta^{13}C_2$ 差异主要与成熟度有关, $\delta^2H_{CH_4}$ 主要受原始母质沉积水介质盐度影响。(2) 安岳气区与太和气区聚集了不同演化阶段的原油裂解气, 其中, 安岳气区天然气 $\delta^{13}C$ 比太和气区重, 主要聚集原油晚期阶段的裂解气, 太和气区聚集早期—晚期裂解气。(3) 震旦系—二叠系气藏具有单源和双源聚集模式。寒武系气藏和 GS19 栖霞组气藏为单源聚集模式, 烃源岩分别为筇竹寺组和龙马溪组, 灯影组气藏和其他二叠系气藏为双源供烃成藏模式, 除均有筇竹寺组烃源岩贡献外, 分别还有震旦系烃源岩和二叠系烃源岩的贡献。研究认为, 不同时代烃源岩贡献比例大小是造成不同层系气藏天然气地球化学特征差异的主要原因, 太和气区多层叠置连片的优质储层紧邻烃源灶或处于古油藏范围, 具备万亿立方米级资源规模, 勘探潜力大。

关键词: 天然气; 地球化学特征; 成藏模式; 震旦系—二叠系; 安岳气区; 四川盆地

中图分类号: TE124.1

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1672-7703.2021.06.004

Geochemical characteristics and accumulation pattern of gas reservoirs of the Sinian-Permian in central Sichuan uplift zone, Sichuan Basin

Xie Zengye^{1,2}, Wei Guoqi^{1,2}, Li Jian^{1,2}, Xu Liang³, Zhang Lu^{1,2}, Li Jin^{1,2}, Li Zhisheng^{1,2}, Wu Saijun¹,
Guo Zeqing¹, Hao Aisheng^{1,2}

(1 PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development; 2 CNPC Key Laboratory of Gas Reservoir Formation and Development; 3 Research Institute of Exploration & Development, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company)

基金项目: 国家科技重大专项“大型气田成藏机制、富集规律与勘探新领域”(2016ZX05007-003); 中国科学院战略性先导科技专项(A类)“典型深层气藏成藏主控因素与勘探新领域”(XDA14010403); 中国石油天然气股份有限公司前瞻性、基础性重大科技项目“大气田(区)成藏规律与勘探关键技术研究”(2021DJ0604); 中国石油勘探与生产分公司科技项目“四川盆地震旦—寒武系重大勘探领域成藏条件与富集规律研究”(kt2020-01-03)。

第一作者简介: 谢增业(1965—), 男, 广东大埔人, 博士, 2003年毕业于中国地质大学(北京), 高级工程师, 主要从事油气地球化学和油气成藏综合研究工作。地址: 河北省廊坊市广阳区万庄44号信箱, 邮政编码: 065007。E-mail: xiezengye69@petrochina.com.cn

通信作者简介: 张璐(1988—), 女, 山东东营人, 硕士, 2013年毕业于山东科技大学, 工程师, 主要从事油气成藏研究工作。地址: 河北省廊坊市广阳区万庄44号信箱, 邮政编码: 065007。E-mail: zhanglu812@petrochina.com.cn

收稿日期: 2021-08-03; 修改日期: 2021-10-18

Abstract: The natural gas resources are abundant in central Sichuan uplift zone, with proven reserve of more than one trillion cubic meters of the Sinian-Cambrian, gas discovery from the Middle Permian Qixia Formation, and commercial gas flows from Xixiangchi Formation, Maokou Formation, Xuanwuyan Formation and Changxing Formation. The geochemical characteristics of various gas reservoirs vary greatly. A large number of experimental data of natural gas composition, carbon isotope and hydrogen isotope are analyzed from newly drilled gas wells to systematically study the genesis and accumulation characteristics of gas reservoirs in central Sichuan uplift zone, so as to identify the key exploration areas with gas reserve of trillion cubic meters. The study results show that: (1) The gas reservoirs of the Sinian, Cambrian and Permian are dry gas mainly composed of hydrocarbon gas with drying coefficient of greater than 0.997, which is crude oil pyrolysis gas. The geochemical characteristics of C_2H_6 content, $\delta^{13}C_2$ and $\delta^2H_{CH_4}$ of the Permian gas reservoir is similar with those of the Cambrian gas reservoir generated by source rock of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation. For example, gas reservoir of Qixia Formation in GS19 is characterized by high C_2H_6 content, light $\delta^{13}C_2$ and light $\delta^2H_{CH_4}$, while gas reservoir of the Upper Sinian Dengying Formation has low C_2H_6 content, heavy $\delta^{13}C_2$ and light $\delta^2H_{CH_4}$. The difference of C_2H_6 content and $\delta^{13}C_2$ is mainly related to maturity, and that of $\delta^2H_{CH_4}$ is mainly affected by water salinity of the parent sediments. (2) The gas reservoirs in Anyue and Taihe areas are crude oil pyrolysis gas in different evolution stages, in which the former is mainly in the late stage, while the latter is in the early-late stage. The $\delta^{13}C_2$ of gas reservoir in Anyue area is heavier than that in Taihe area; (3) There are two types of accumulation pattern of the Sinian - Permian gas reservoirs, i.e., single-source and dual-source. The Cambrian gas reservoir and Permian Qixia gas reservoir in GS19 are single-source accumulation pattern, with source rocks of Qiongzhusi Formation and Longmaxi Formation, respectively. The Sinian Dengying gas reservoir and other Permian gas reservoirs are dual-source accumulation pattern, which are supplied by source rock of Qiongzhusi Formation, and supplemented by the Sinian and Permian source rocks respectively. The study indicates that the difference of geochemical characteristics of different gas reservoirs is mainly caused by the contribution ratio of source rocks of different geological ages. The superimposed and contiguous high-quality reservoir in Taihe area is closely adjacent to source rocks or within the range of paleo oil reservoir, which has a resource scale of one trillion cubic meters, showing great exploration potential.

Key words: natural gas, geochemical characteristics, gas accumulation model, Sinian-Permian, Anyue gas region, Sichuan Basin

0 引言

四川盆地川中隆起带迄今已在安岳气田上震旦统灯影组和下寒武统龙王庙组探明天然气地质储量 $1.03 \times 10^{12} m^3$, 发现 MX42、MX31X 中二叠统栖霞组气藏, 以及 GS19 栖霞组, MX39、NC1 中二叠统茅口组, GS16、MX23 上寒武统洗象池组等含气构造。已有学者对这些天然气的成因及来源进行了研究, 认为这些天然气均主要为原油裂解气^[1-6], 龙王庙组天然气主要源于下寒武统筇竹寺组烃源岩^[1-2,5,7-9], 震旦系天然气源于筇竹寺组烃源岩和震旦系烃源岩^[2,7-12], 中二叠统天然气主要源于筇竹寺组烃源岩和中二叠统烃源岩^[6,13]。2020 年以来, 随着勘探的不断深入, 在高石梯—磨溪以北地区 (又称太和区) 的 PT1 井上震旦统灯影组二段 (灯二段)^[14]、JT1 井下寒武统沧浪铺组^[15-16] 和中二叠统茅口组分别获得日产 $121.98 \times 10^4 m^3$ 、 $51.62 \times 10^4 m^3$ 和 $112.8 \times 10^4 m^3$ 的高产工业气流, GS128 井中二叠统栖霞组、ZJ1 井茅口组、LT1 井洗象池组、ZJ1 井中—上二叠统玄武岩组、ZJ2 井上二叠统长兴组等也获得产量不等的天然气流。万亿立方米级气田的发现及多层系的勘探新突破揭示了川中隆起带天然气多层系立体富集成藏的特征。不同层系天然气地球化学特征存在较大差异, 是

烃源不同还是由其他控制因素造成这些差异, 目前尚无系统的对比研究。为此, 本文基于大量新获气井和前人研究成果, 全面、系统分析川中隆起带不同层系天然气地球化学特征差异及其控制因素, 建立天然气藏聚集模式, 预测资源潜力, 以期对四川盆地震旦系—二叠系天然气下一步勘探提供依据。

1 成藏地质背景

研究区位于四川盆地中部地区 (图 1), 盆地基底由太古宙—古元古代发育的康定群经中条运动形成的深部结晶基底^[17] 和中元古代—新元古代发育的峨边群经晋宁运动形成的褶皱基底^[18] 组成, 在其后的形成演化过程中, 经历了澄江、桐湾、加里东、东吴、印支、燕山和喜马拉雅等多幕次构造运动^[19-21]。这些构造运动对成盆、成烃、成储、成藏等有着深远的影响, 发育多源、多储、多盖的有利成藏条件。

研究区发育 6 套烃源岩, 其中最主要的是筇竹寺组烃源岩。下震旦统陡山沱组是盆地基底之上的第一套沉积盖层, 虽尚未在盆地内钻揭陡山沱组优质烃源岩, 但有学者从沉积背景出发, 探讨了烃源岩发育情况, 认为川中地区南华纪裂谷的垒—堑结构^[22] 控制上覆层系台洼内的烃源岩发育, 盆地内陡山沱组烃源岩厚度约为 5~30m^[23]; 也有学者认为陡山沱组沉积时

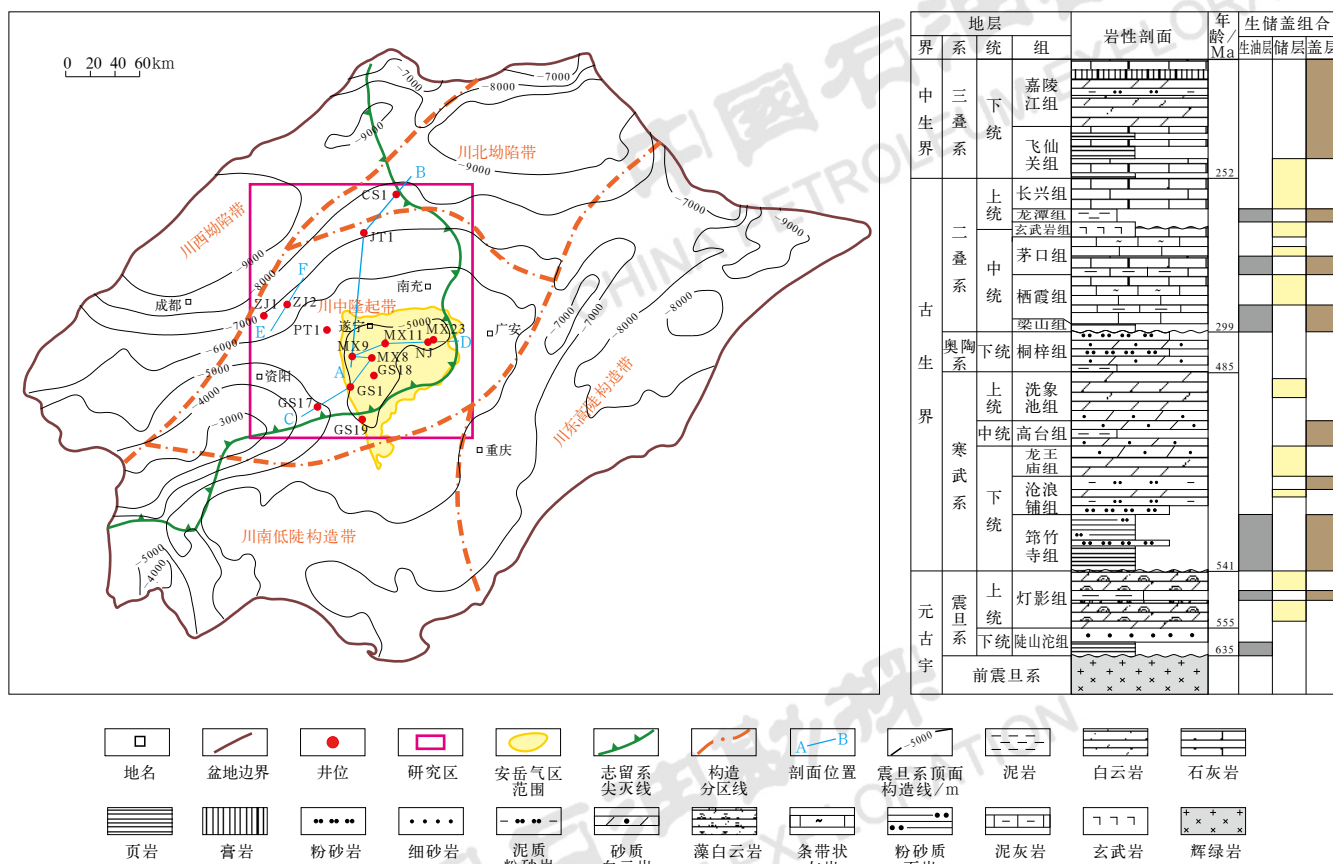


图1 研究区位置图(左)及地层综合柱状图(右)

Fig.1 Location of the study area (left) and comprehensive stratigraphic column (right)

期,绵阳—遂宁一带及万县—通江地区为裂陷区^[24-25],地层厚度一般为50~200m,预测在洼陷区发育陡山沱组烃源岩。灯三段在GK1井钻揭35.5m黑色页岩,盆地内分布厚度一般为5~30m^[23]。筇竹寺组烃源岩在盆地内广覆式发育,厚度一般为50~300m,其中德阳—安岳古裂陷是烃源岩厚度中心,厚度达250~300m^[6]。受加里东运动影响,下志留统龙马溪组烃源岩在乐山—龙女寺古隆起核部已被剥蚀,剥蚀线附近以东厚度一般小于50m,厚度中心主要在盆地南部和东部,最大厚度达500m左右^[6]。中二叠统梁山组暗色泥岩在盆地内一般厚2~10m;栖霞组、茅口组灰黑色泥灰岩在盆地内广泛分布,烃源岩厚度分别为10~40m和40~180m^[6]。上二叠统龙潭组泥质岩也是一套广覆式发育的烃源岩,在盆地中部地区厚度相对较薄,为40~80m,向盆地南部、北部及东北部厚度增大^[26]。震旦系—志留系烃源岩有机质类型均以腐泥型为主,二叠系烃源岩有机质类型是以腐泥型为主的混合型,目前均处于高成熟晚期—过成熟阶段。

研究区发育多套储集体,迄今已发现9个天然

气产层(图1),其中最主要的是灯二段、灯四段和龙王庙组等。灯二段储层发育主要受丘滩相与岩溶作用共同控制,储集岩以藻砂屑白云岩、藻凝块白云岩和藻叠层白云岩为主^[5],储层厚度为28~340m,孔隙度为3.50%,平均面洞率为5.35%^[27]。灯四段储层发育主要受沉积和表生岩溶作用控制,储集岩主要发育在丘滩相中,以藻凝块白云岩、藻叠层白云岩、藻纹层白云岩为主^[5],储层厚度为48~148m,孔隙度为3.60%,平均面洞率为6.00%^[27]。龙王庙组储层发育主要受颗粒滩体和溶蚀作用控制,储集岩主要为颗粒(砂屑、鲕粒)白云岩和晶粒(细晶、粉晶)白云岩^[5],储层厚度为3.1~64.5m,平均孔隙度为4.81%,平均渗透率为2.33mD^[28]。沧浪铺组储层主要发育在沧一段,为相控叠加岩溶改造后的孔隙型储层,储集岩主要包括残余鲕粒白云岩、砂屑白云岩等,孔隙度为2%~5%,平均为4.1%,渗透率为0.050~0.124mD^[16]。洗象池组储集岩主要为经历较为强烈岩溶作用的颗粒白云岩和晶粒白云岩,储层单层厚度为0.9~15.3m,累计厚度为48.5m^[29],GT2井平均孔隙度为4.48%,平均渗透率为0.43mD^[30]。

中二叠统栖霞组沉积期,除盆地西部的剑阁—成都—雅安一带为台地边缘相外,盆地其他区域主要为开阔台地相,发育一系列近北西向展布的台内颗粒滩^[31]。茅口组沉积期,盆地内主要发育台地边缘、开阔台地和深台洼3个相带,台地边缘相沿剑阁—成都—雅安一带展布;深台洼相沿广元—旺苍—达州—开江—奉节一带展布,受其影响,在盐亭—南充—广安—石柱一带发育一系列沿北西向展布的台洼边缘滩体;盆地内其他区域广泛发育沿北西向展布的台内滩^[31]。受东吴运动的影响,四川盆地在中—晚二叠世发生过强烈的火山喷发事件,形成了巨厚“峨眉山玄武岩”,发育角砾熔岩、含凝灰角砾熔岩等优质孔隙型储层^[32]。上二叠统长兴组沉积期,碳酸盐台地内呈现出“一凹两高”的特征,即蓬溪—武胜台凹、遂宁地貌高带和广安地貌高带^[33],台凹周缘发育边缘生物礁和生屑滩^[34]。

与多个产气层相匹配,研究区发育多套直接盖层

和区域盖层(图1),其中最主要的是筇竹寺组和龙潭组两套区域性泥页岩盖层。除了这些盖层的封盖作用外,地层压力系数由灯影组的常压逐渐过渡到寒武系—二叠系的超压、超高压,超压封闭对下伏气藏的保存也起到重要作用^[19]。

2 天然气地球化学特征及成因分析

对采自四川盆地川中隆起带震旦系—二叠系的38个采样井点的天然气样品(图2)进行了组分、碳同位素、氢同位素等分析。天然气全组分常规分析及大进样量C₁—C₃组成分析均采用Agilent 7890A气相色谱仪,具体分析流程详见文献[35];天然气碳同位素检测仪器为Finnigan Delta PLUS XL GC/C/IRMS,天然气中痕量乙烷的碳同位素分析采用液氮冷冻富集的方法;氢同位素检测仪器为Finnigan Mat 253,碳同位素、氢同位素的具体分析方法详见文献[36]。

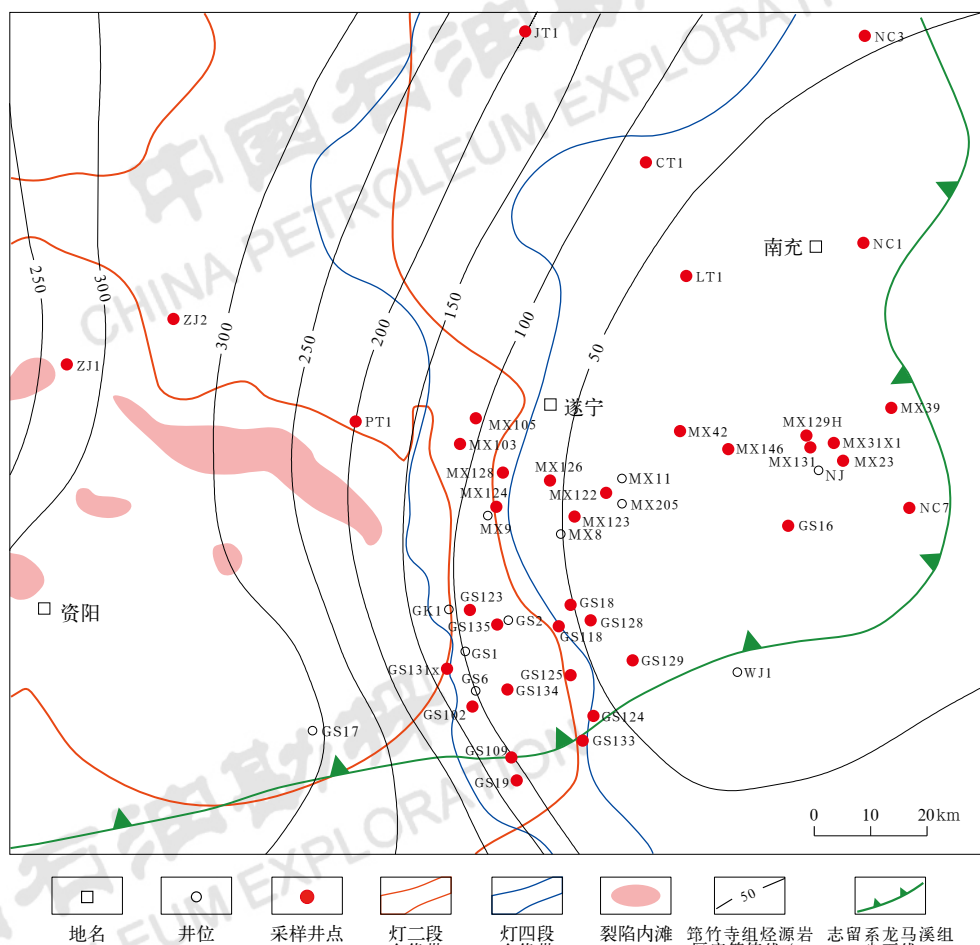


图2 川中隆起带烃源岩厚度、储集相带与天然气样品采集井点分布图

Fig.2 Source rock thickness, sedimentary facies of reservoir and gas sampling well location in central Sichuan uplift zone

2.1 天然气组成特征

2.1.1 天然气全组分特征

基于本文的天然气全组分常规分析结果(表1)

及文献[6—7, 37—38]的数据统计, 川中隆起带震旦系一二叠系天然气以烃类气体为主, 同时含有数量不等的非烃气体。

表1 川中隆起带震旦系一二叠系天然气组分、碳同位素、氢同位素数据

Table 1 Gas composition, carbon and hydrogen isotope of the Sinian-Permian in central Sichuan uplift zone

地区	井号	深度 / m	层位	主要组分 /%							$H_2S /$ ($g \cdot m^{-3}$)	$\delta^{13}C_1 / \text{‰}$	$\delta^{13}C_2 / \text{‰}$	$\delta^2H_{CH_4} / \text{‰}$	资料来源
				CH ₄	C ₂ H ₆	CO ₂	N ₂	He	H ₂	H ₂ S					
太和 气区	ZJ2	5048	P ₃ ch	94.06	0.18	4.56	0.53	0.01	0.01	0.65	13.00	-33.6	-32.7	-140	本文
	ZJ1	5434	P ₂₋₃ β	98.74	0.20	0.69	0.36	0.01	0	0	0	-34.5	-36.0	-136	本文
	NC1	5045	P ₂ m	95.57	0.13	2.18	0.24	0.02	0.15	1.71	25.94	-30.9	-31.1	-133	文献[6]
	NC3	6010	P ₂ m	93.16	0.16	4.93	0.13	0.02	0.05	1.55	23.35	-30.3	-31.3	-125	文献[6]
	ZJ1	5605	P ₂ m	97.14	0.16	2.32	0.34	0.01	0	0.03	0.56	-35.0	-34.0	-136	本文
	JT1	6165	P ₂ m	85.34	0.23	14.09	0.21	0.01	0.01	0.11	1.70	-32.4	-33.3	-134	本文
	LT1	5337	- ϵ_3 x	91.81	0.10	7.56	0.20	0.01	0.31	0.01	0.23	-34.1	-30.0	—	本文
	NC1	5447	- ϵ_3 x	96.57	0.13	2.54	0.34	0.01	0.39	0.02	0.36	-33.6	-32.5	-135	本文
	JT1	6972	- ϵ_1 c	96.82	0.18	1.27	1.70	0.01	0.01	0.01	0.14	-37.8	-37.5	-134	本文
	CT1	6264	- ϵ_1 c	94.13	0.21	5.00	0.38	0.01	0.23	0.04	0.661	-35.8	-36.6	-136	本文
	PT1	5771	Z ₂ dn ₂	92.88	0.07	4.44	0.61	0.01	0.01	1.98	33.13	-34.3	-29.0	-140	本文
	ZJ2	6693	Z ₂ dn ₂	79.20	0.04	15.43	0.67	0.05	0.11	4.50	71.56	-35.1	-28.0	-141	本文
安岳 气区	磨溪	MX103	P ₂ q	92.33	0.15	4.38	0.35	0.01	0.18	2.60	39.52	-32.9	-32.9	-131	文献[6]
		MX105	Z ₂ dn ₄	93.24	0.04	4.46	0.37	0.02	0.22	1.65	27.08	-32.0	-27.3	-138	本文
		MX122	Z ₂ dn ₄	92.46	0.04	5.14	0.79	0.03	0.04	1.50	24.06	-33.6	-27.8	-138	本文
		MX123	Z ₂ dn ₄	85.63	0.04	12.15	1.04	0.03	0.03	1.08	15.99	-33.4	-28.2	-140	本文
		MX146	Z ₂ dn ₄	89.90	0.02	7.64	1.04	0.02	0.17	1.21	18.17	-32.3	-27.4	-147	本文
		MX128	Z ₂ dn ₄	86.26	0.03	12.12	0.62	0.05	0.23	0.69	11.20	-33.5	-27.5	-142	本文
		MX131	Z ₂ dn ₄	88.18	0.02	6.36	4.81	0.10	0.05	0.48	10.81	-31.6	-26.2	-158	本文
		MX126	Z ₂ dn ₄	92.32	0.03	5.90	0.56	0.02	0.68	0.49	4.85	-33.1	-29.6	-136	本文
		MX124	Z ₂ dn ₂	88.14	0.04	9.25	0.78	0.02	0.17	1.60	25.50	-33.0	-28.8	-136	本文
	龙女寺	NC7	P ₂ m	95.11	0.14	3.29	0.53	0.02	0.02	0.89	13.53	-31.6	—	-135	文献[6]
		MX31X1	P ₂ q	95.65	0.07	2.08	0.40	0.02	0.11	1.67	25.36	-31.1	-30.5	-127	文献[6]
		MX42	P ₂ q	95.00	0.10	2.64	0.38	0.01	0.16	1.71	26.11	-32.4	-31.9	-131	文献[6]
		MX23	- ϵ_3 x	93.66	0.09	5.94	0.26	0.01	0.01	0.03	0.46	-31.1	-31.1	-130	本文
		GS16	- ϵ_3 x	94.47	0.04	3.10	0.41	0.03	0.15	1.80	29.80	-35.4	—	-137	本文
		MX129H	Z ₂ dn ₄	92.71	0.02	4.11	2.00	0.03	0.34	0.79	35.04	-32.4	-28.7	-150	本文

续表

地区	井号	深度 / m	层位	主要组分 / %							$H_2S / (g \cdot m^{-3})$	$\delta^{13}C_1 / \text{‰}$	$\delta^{13}C_2 / \text{‰}$	$\delta^2H_{CH_4} / \text{‰}$	资料来源
				CH ₄	C ₂ H ₆	CO ₂	N ₂	He	H ₂	H ₂ S					
安岳气区	GS18	4278	P ₂ q	94.47	0.16	2.77	0.28	0.02	0.16	2.14	32.47	-31.7	-33.7	-128	文献[6]
	GS19	4019	P ₂ q	94.07	0.51	2.67	0.45	0.02	0.16	2.12	30.11	-33.4	-36.3	-137	文献[6]
	GS128	4268	P ₂ q	88.21	0.10	10.27	0.16	0.01	0.03	1.22	24.96	-31.8	-31.5	-128	本文
	GS129	4158	P ₂ q— P ₂ m	88.76	0.11	9.81	0.20	0.01	0.13	0.98	15.67	-32.4	-33.7	-129	本文
	GS102	4540	—C ₁ l	90.41	0.05	3.09	0.90	0.02	0.03	5.50	89.62	-32.1	-33.4	-136	本文
	GS18	4720	—C ₁ l	92.71	0.12	5.28	0.81	0.06	0.22	0.80	11.27	-32.6	-33.9	-135	本文
	GS19	5300	Z ₂ dn ₄	92.33	0.03	5.79	0.76	0.03	0.24	0.80	12.68	-32.3	-30.0	-139	本文
	GS109	5635	Z ₂ dn ₄	91.89	0.04	6.46	0.85	0.02	0.02	0.72	12.25	-32.9	-26.9	-141	本文
	GS133	5880	Z ₂ dn ₄	75.56	0.03	22.82	1.08	0.02	0.07	0.42	6.75	-32.1	-26.1	-145	本文
	GS124	5521	Z ₂ dn ₄	82.73	0.03	13.90	2.36	0.04	0.05	0.89	14.13	-31.0	-27.3	-148	本文
	GS118	5264	Z ₂ dn ₄	87.07	0.05	11.04	1.71	0.04	0.01	0.08	1.24	-32.0	-28.1	-143	本文
	GS125	5396	Z ₂ dn ₄	79.15	0.03	18.80	1.43	0.03	0.06	0.50	7.98	-31.2	-27.7	-149	本文
	GS128	5556	Z ₂ dn ₄	81.66	0.02	14.20	3.47	0.08	0.03	0.54	8.82	-32.1	-27.4	-157	本文
	GS135	5517	Z ₂ dn ₂	88.17	0.03	9.63	1.12	0.03	0.05	0.97	13.06	-33.4	-27.6	-150	本文
	GS131X	5550	Z ₂ dn ₂	92.72	0.04	5.02	1.55	0.04	0.03	0.60	9.96	-32.9	-27.6	-143	本文
	GS123	5580	Z ₂ dn ₂	82.50	0.03	11.16	4.45	0.09	0.27	1.50	23.9	-32.0	-27.5	-152	本文
	GS134	5531	Z ₂ dn ₂	90.28	0.03	8.36	0.65	0.01	0.02	0.65	12.21	-33.8	-29.7	-142	本文

注：P₃ch—长兴组；P₂₋₃β—玄武岩组；P₂m—茅口组；P₂q—栖霞组；—C₃x—洗象池组；—C₁l—龙王庙组；—C₁c—沧浪铺组；Z₂dn₄—灯四段；Z₂dn₂—灯二段。

烃类气体组成以甲烷(CH₄)为主,含量为70.36%~98.74%;含微量—少量乙烷(C₂H₆),含量为0.02%~0.51%(图3a)。数据大体可分为3类(图3a),第一类(A)以灯二段、灯四段为代表,C₂H₆含量最低,为0.02%~0.05%,与其热演化程度最高有关,干燥系数大于0.999(图3b);CH₄含量为70.36%~94.47%,含量变化大与其含有较高的非烃气体有关。第二类(B)以寒武系沧浪铺组、龙王庙组、洗象池组,二叠系栖霞组、茅口组、玄武岩组和长兴组为代表,C₂H₆含量为0.07%~0.27%,CH₄含量为85.34%~98.74%,居于图中间位置。第三类(C)以GS19井栖霞组为代表,CH₄含量为94.07%,C₂H₆含量为0.51%,干燥系数为0.9946,与川东石炭系相似。可见,3类天然气的热演化程度,A类最高,C类最低,B类居中。

非烃气体组成主要包括二氧化碳(CO₂)、硫化氢(H₂S)、氮气(N₂)、氦气(He)和氢气(H₂)等,CO₂含量为0.69%~28.17%(图3c)。沧浪铺组、龙王庙组、玄武岩组、长兴组及部分栖霞组—茅口组CO₂含量以小于5%为主;灯二段、灯四段、洗象池组及部分栖霞组—茅口组CO₂含量大于5%。值得注意的是,高CO₂含量的样品可能与测试过程中的酸化作业有关。GS1井灯四下段5130~5196m井段5个不同时间(间隔68.5h)采集的样品分析结果表明,随取样时间距离酸化作业后的时间延长,CO₂含量有明显降低趋势^[7]。本次研究的样品中,CO₂含量大于8%的样品基本都是经过酸化作业的大斜度井样品,且 $\delta^{13}C_{CO_2}$ 介于-1.3‰~1.1‰,呈现出无机成因特征。因此,对碳酸盐岩气藏高CO₂含量的成因解释需考虑酸化作业的影响。

H_2S 含量除 ZJ2 井灯二段为 4.50% 和 GS102 井龙王庙组为 5.50% 外, 其他介于 0.01%~2.75% (图 3c), 其中, 沧浪铺组、龙王庙组、玄武岩组、长兴组及大多数洗象池组以小于 1% 为主; 栖霞组—茅口组以大于 1% 为主; 灯二段、灯四段虽然变化大, 但仍以小于 1% 为主。气藏中 H_2S 是含硫物质与烃类反应 (即 TSR) 的结果。

N_2 含量除 MX23 井灯四段为 8.5% 外, 其他介于 0.13%~4.81% (图 3d), 其中, 龙王庙组、洗象池组、栖霞组—茅口组、玄武岩组、长兴组以小于 1% 为主; 灯二段、灯四段介于 0.37%~4.81%, 且 N_2 含量大于 1% 后, N_2 与 He 具有较好的正相关性 (图 3d)。前人研究认为, 天然气中有机成因的 N_2

主要是烃源岩中有机质经热氨化作用形成, 并随着演化程度增高, N_2 含量具有增高趋势。灯影组天然气中 N_2 含量普遍高于寒武系和二叠系, 表明它们的烃源岩可能不完全一致。

He 含量为 0.01%~0.10% (图 3d), 其中, 沧浪铺组、龙王庙组、洗象池组、栖霞组—茅口组、玄武岩组、长兴组以小于 0.03% 为主; 灯二段、灯四段变化较大, 主体以小于 0.03% 为主, 部分为 0.04%~0.10%。安岳气区天然气中的 He 为壳源成因, 主要来自壳源放射元素 U、Th 的衰变^[39]。由此推测, 川中隆起带震旦系天然气相对寒武系高 He 含量与相对高成熟烃源岩 U、Th 的衰变有关, 也表明它们的烃源岩可能有差异。

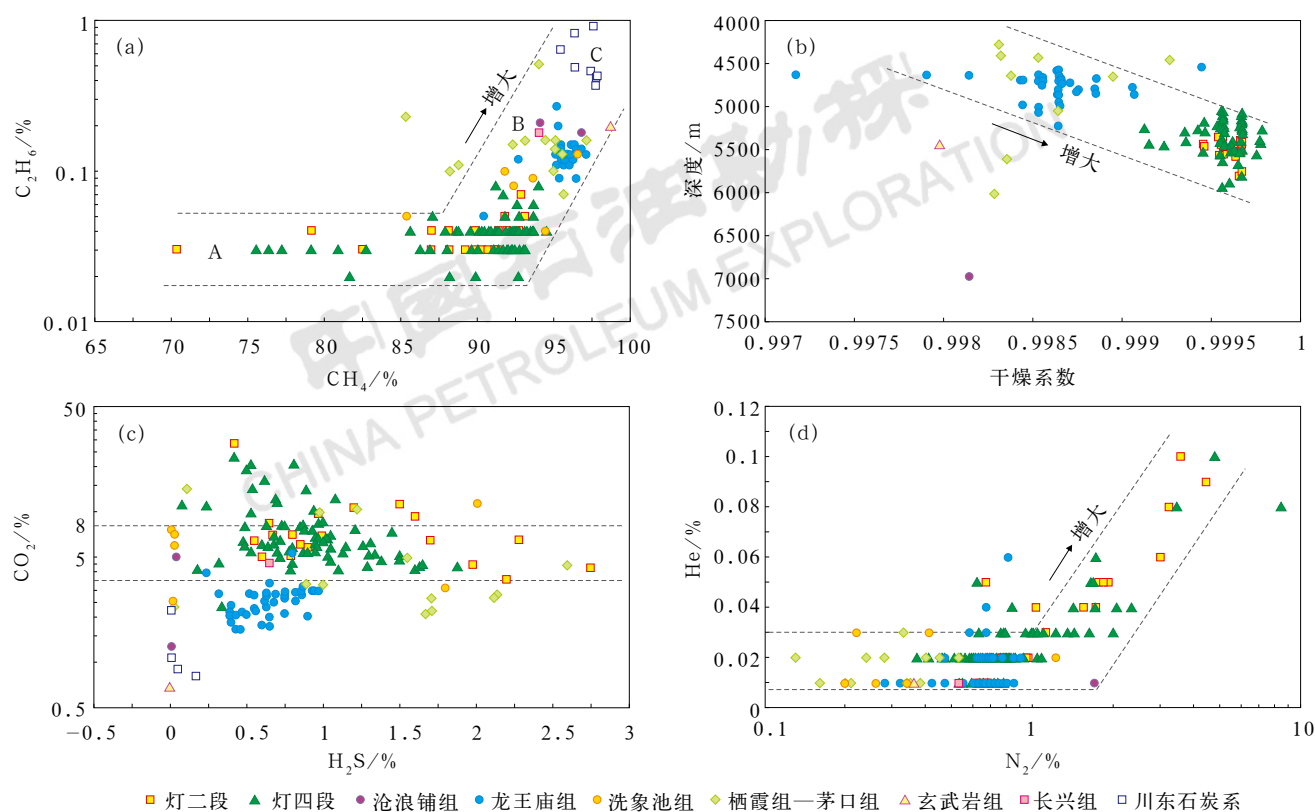


图 3 四川盆地天然气组分参数关系

Fig.3 Relationship between different gas composition parameters in Sichuan Basin

图中部分数据引自文献 [6-7, 37-38]

2.1.2 天然气 C_1 — C_3 组成特征

由于常规全组分分析方法难以检测到天然气中的丙烷, 因此, 采用大进样量 (1mL) 无分流进样方法进行痕量丙烷的检测, 进而求得天然气 $\ln(C_1/C_2)$ 与 $\ln(C_2/C_3)$ 比值, 并将其点入天然气成因类型鉴别图版^[35]中 (图 4)。川东石炭系天然气是源于下志留统龙马溪组烃源岩的原油裂解气^[40]; 龙马溪组页岩

气为干酪根热裂解与液态烃二次裂解的混合气^[41-45], 且以液态烃二次裂解气为主。尽管石炭系天然气和龙马溪组页岩气具有相同的烃源岩, 但它们在图 4 中处于不同的区域, 前者位于原油裂解气演化轨迹线下方相对较远距离, 后者靠近原油裂解气轨迹线且大多位于轨迹线上方, 相对更靠近干酪根热裂解气轨迹线, 呈现出混合气特征。由图 4 可见, 川中隆起带震旦系—

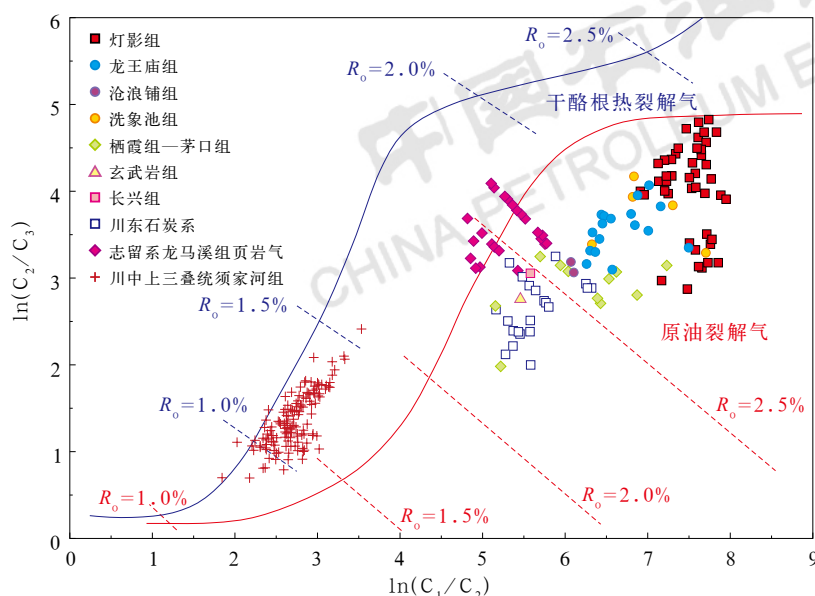


图4 四川盆地震旦系—二叠系天然气成因类型判识图

Fig.4 Genesis identification chart of natural gas of the Sinian-Permian in Sichuan Basin

图版及川中须家河组、川东石炭系数据引自文献[35]; 部分灯影组、龙王庙组、栖霞组—茅口组数据引自文献[6-7, 37-38]; 志留系页岩气数据引自文献[41-45]

二叠系天然气除灯影组少量样品靠近原油裂解气轨迹线外, 其他均远离于轨迹线下方, 表明研究区天然气以原油裂解气为主。

2.2 天然气甲烷、乙烷碳同位素特征

2.2.1 天然气甲烷碳同位素

川中隆起带震旦系—二叠系天然气甲烷碳同位素值 ($\delta^{13}C_1$) 为 $-37.8\text{‰} \sim -30.3\text{‰}$, 主峰区间为 $-34.5\text{‰} \sim -31.5\text{‰}$ (图5a), 其中, $\delta^{13}C_1 < -34.0\text{‰}$ 的样品均来自北斜坡, 包括PT1井、ZJ2井的灯二段, JT1井、CT1井的沧浪铺组, LT1井的洗象池组, ZJ1井的玄武岩组, ZJ1井的茅口组等; $\delta^{13}C_1 > -34.0\text{‰}$ 的样品均来自安岳气区。 $\delta^{13}C_1$ 分布格局与正常运聚形成的“埋藏深处 $\delta^{13}C$ 重、浅处 $\delta^{13}C$ 轻”呈相反特征, 这主要与捕获不同阶段的原油裂解气有关。从储层沥青 $\delta^{13}C$ 分析结果看, 北斜坡灯影组 $\delta^{13}C_{\text{沥青}}$ 为 $-35.4\text{‰} \sim -33.5\text{‰}$, 安岳气区灯影组和龙王庙组 $\delta^{13}C_{\text{沥青}}$ 分别为 $-35.5\text{‰} \sim -33.9\text{‰}$ 和 $-35.2\text{‰} \sim -33.1\text{‰}$, 可见, 不同区域、不同层系原油裂解气母源的 $\delta^{13}C$ 特征相似, 因此, 母源不是控制 $\delta^{13}C_1$ 差异的主要因素。

四川盆地海相地层天然气含有数量不等的 H_2S , 从盆地整体看, $\delta^{13}C_1$ 有随 H_2S 含量增高而变重趋势 (图5b), 尤其是 H_2S 含量较高的川东嘉陵江组、

飞仙关组, $\delta^{13}C_1$ 随 H_2S 含量增高而变重特征更加明显, 但就安岳气区而言, H_2S 含量与 $\delta^{13}C_1$ 的相关性差。因此, 形成 H_2S 的过程 (如 TSR 反应等) 也不是控制川中隆起带 $\delta^{13}C_1$ 差异的主要原因。

原油、沥青分步裂解的热模拟生气实验结果则表明, 模拟实验全过程累积气 $\delta^{13}C$ 比母源的原始 $\delta^{13}C$ 轻, 而阶段裂解气 $\delta^{13}C$ 则比母源的 $\delta^{13}C$ 重, 演化程度越高的阶段裂解气 $\delta^{13}C$ 越重。因此认为, 太和气区天然气 $\delta^{13}C_1$ 轻, 主要是捕获了早期—晚期的原油裂解气; 安岳气区天然气 $\delta^{13}C_1$ 重, 主要聚集晚期原油裂解气。

2.2.2 天然气乙烷碳同位素

川中隆起带震旦系—二叠系天然气乙烷碳同位素值 ($\delta^{13}C_2$) 为 $-37.5\text{‰} \sim -26.0\text{‰}$, 主峰区间为 $-34.0\text{‰} \sim -27.0\text{‰}$ (图5a), 其中, $\delta^{13}C_2 < -34.0\text{‰}$ 的样品主要包括太和气区的 JT1 井和 CT1 井的沧浪铺组、ZJ1 井的玄武岩组、安岳气区的 GS19 井栖霞组。总体而言, $\delta^{13}C_2$ 也有随 H_2S 含量增高而变重趋势 (图5c), 但安岳气区 $\delta^{13}C_2$ 与 H_2S 含量的相关性差, 因此, 形成 H_2S 的过程也不是控制 $\delta^{13}C_2$ 差异的主要原因。

从 $\delta^{13}C_2$ 角度也可将震旦系—二叠系天然气分为3类, 第一类 (A) 以灯二段、灯四段为代表, $\delta^{13}C_2 > -30\text{‰}$ 为主; 第二类 (B) 以龙王庙组、洗象池组、

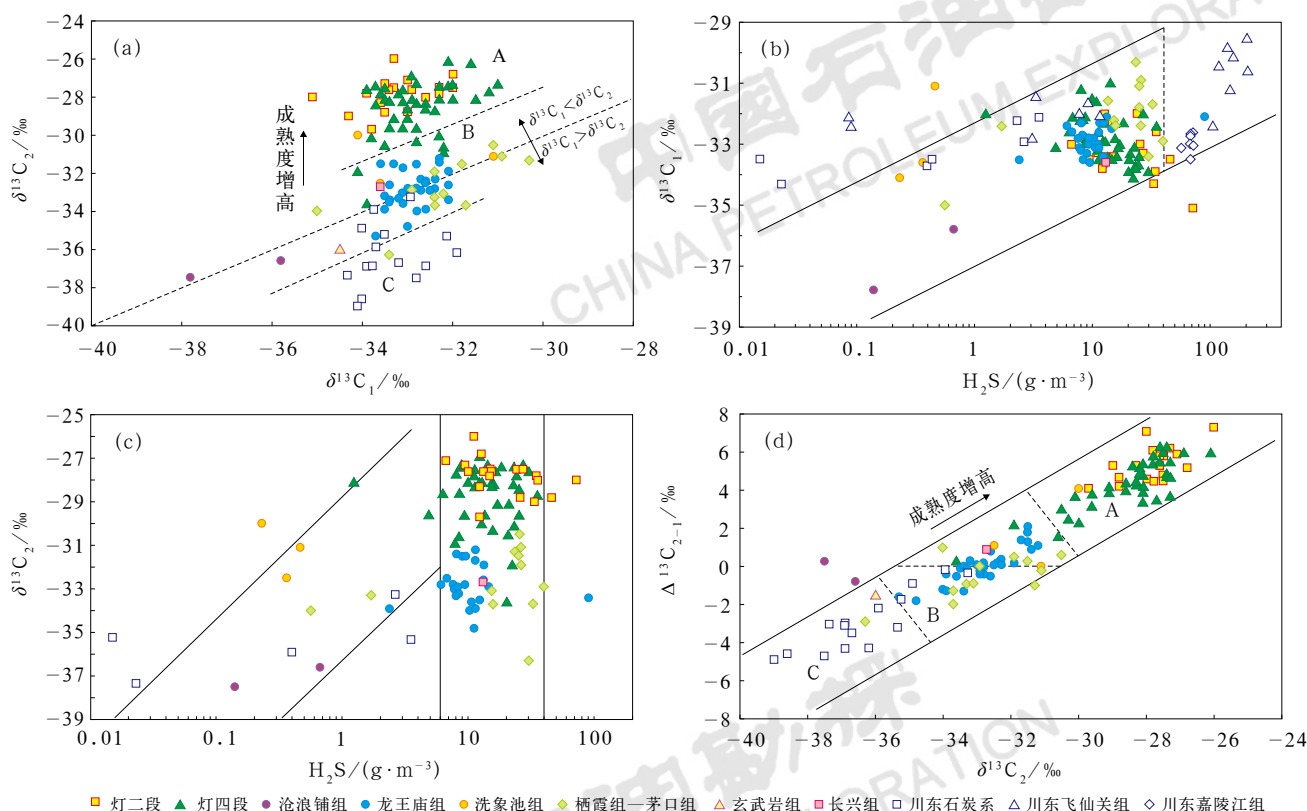


图5 四川盆地震旦系—二叠系天然气碳同位素与硫化氢关系

Fig.5 Relationship between gas carbon isotope and H_2S of the Sinian-Permian in Sichuan Basin

图中部分数据引自文献 [6-7, 37-38]

大多数栖霞组—茅口组为代表, $\delta^{13}C_2$ 介于 $-34\text{‰} \sim -30\text{‰}$; 第三类 (C) 以石炭系、沧浪铺组及 GS19 井栖霞组为代表, $\delta^{13}C_2 < -34\text{‰}$ (图 5a、d)。A 类天然气 $\delta^{13}C_1$ 、 $\delta^{13}C_2$ 呈正序分布 ($\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2$) ; C 类天然气 $\delta^{13}C_1$ 、 $\delta^{13}C_2$ 呈反序分布 ($\delta^{13}C_1 > \delta^{13}C_2$) ; B 类天然气则居于 A 类、C 类之间, $\delta^{13}C_1$ 、 $\delta^{13}C_2$ 部分正序、部分反序。川东石炭系天然气 $\delta^{13}C_1 > \delta^{13}C_2$ 是由于志留系烃源岩先期形成的伴生气 ($\delta^{13}C_2$ 轻) 和后期形成的裂解气 ($\delta^{13}C_2$ 重) 混合造成的^[40]。

由图 5d 可见, 每类天然气各自的 $\delta^{13}C_1$ 、 $\delta^{13}C_2$ 之间的演化存在内在联系, 随演化程度增高, $\delta^{13}C_2$ 变重, $\delta^{13}C_2$ 与 $\delta^{13}C_1$ 差值 ($\Delta^{13}C_{2-1}$) 由 -4.9‰ 逐渐变为零, 再由零逐渐增大为 7.3‰ 。这与在过成熟甚至极高演化阶段, $\delta^{13}C_2$ 变重幅度明显大于 $\delta^{13}C_1$ 有关, 如腐泥型烃源岩热模拟气 R_o 由 2.1% 演化至 3.6% 时, $\delta^{13}C_1$ 、 $\delta^{13}C_2$ 变重的幅度分别为 5‰ 和 10‰ ^[46]; 塔里木盆地海相原油及其沥青质的热模拟气, 模拟温度由 500℃ 增加到 600℃ , 原油裂解气 $\delta^{13}C_1$ 、 $\delta^{13}C_2$ 变重的幅度分别为 7‰ 和 16.5‰ , 沥青质裂解气 $\delta^{13}C_1$ 、 $\delta^{13}C_2$ 变重的幅度分别为 5‰ 和 15.5‰ ^[47]; 通过动力

学模拟建立的 $\delta^{13}C_2$ 与成熟度关系也表明, R_o 由 2.0% 演化至 3.5% 时, $\delta^{13}C_2$ 变重的幅度达 10‰ ^[48]。过成熟阶段 $\delta^{13}C_2$ 变重的原因可能与 $\delta^{13}C$ 瑞利分馏有关, 因为当热演化程度极高时, C_2H_6 开始裂解, 受活化能的影响, $\delta^{12}C$ 优先裂解, 剩下的 C_2H_6 含量越少, $\delta^{13}C_2$ 越重^[48-49]。这种规律性变化在研究区得以充分体现, 即随天然气 C_2H_6 含量降低, $\delta^{13}C_2$ 变重 (图 6a), 如灯二段、灯四段 C_2H_6 含量以小于 0.06% 为主, $\delta^{13}C_2 > -31.9\text{‰}$ 为主; GS19 井栖霞组 C_2H_6 含量大于 0.30% , $\delta^{13}C_2 < -34.0\text{‰}$; 寒武系及其他二叠系 C_2H_6 含量主要介于 $0.06\% \sim 0.30\%$, $\delta^{13}C_2$ 介于 $-37.5\text{‰} \sim -30.0\text{‰}$ 。

JT1 井沧浪铺组直接覆于筇竹寺组烃源岩之上, 其天然气 C_2H_6 含量和 $\delta^{13}C_2$ 值代表了源于筇竹寺组烃源岩液态烃二次裂解气特征。已有研究表明安岳气区龙王庙组天然气源于筇竹寺组烃源岩^[1-2, 5, 7-9]。关于灯影组天然气气源存在两种观点, 一种认为源于筇竹寺组烃源岩^[3, 5], 另一种认为源于筇竹寺组与震旦系双源烃源岩贡献^[2, 7-12, 38]。沧浪铺组和龙王庙组具有相同的来源, 尽管两者的埋深高差达 $1700 \sim 2200\text{m}$,

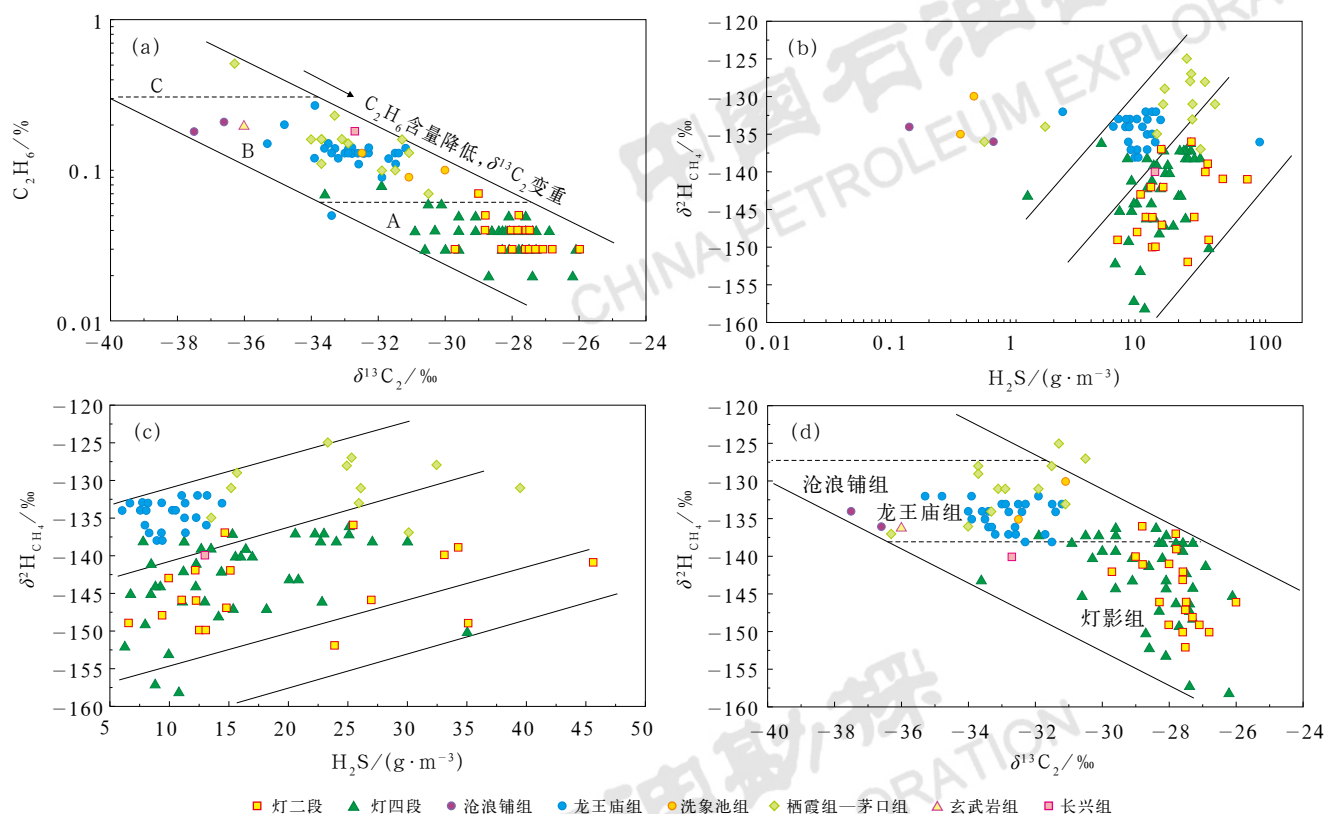


图6 四川盆地震旦系—二叠系天然气组分、碳同位素、氢同位素关系

Fig.6 Relationship between gas composition and carbon/hydrogen isotope of the Sinian-Permian in Sichuan Basin
部分数据引自文献 [6-7, 37-38]

但 C_2H_6 含量和 $\delta^{13}C_2$ 值变化小；龙王庙组和灯影组气藏埋深高差仅 500~1000m，但 C_2H_6 含量和 $\delta^{13}C_2$ 值有较大变化。因此，本文认为灯影组气藏为双源供气藏，震旦系烃源岩贡献占比越大， C_2H_6 含量越低， $\delta^{13}C_2$ 越重。

相对龙王庙组气藏，GS19 栖霞组气藏天然气 C_2H_6 含量高， $\delta^{13}C_2$ 轻，与川东石炭系天然气相似，认为其主要源于龙马溪组烃源岩。其他大部分二叠系天然气主要与寒武系天然气相似，主要源于筇竹寺组烃源岩，同时有少量二叠系自身烃源岩的贡献。

2.3 天然气甲烷氢同位素特征

震旦系—二叠系天然气甲烷氢同位素 ($\delta^2H_{CH_4}$) 为 $-158‰ \sim -125‰$ ，主峰区间为 $-153‰ \sim -130‰$ (图 6b)，其中， $\delta^2H_{CH_4} > -138‰$ 的样品主要包括沧浪铺组、龙王庙组、洗象池组、栖霞组—茅口组、玄武岩组及少部分灯影组；灯影组 $\delta^2H_{CH_4}$ 以轻于 $-138‰$ 为主，长兴组为 $-140‰$ 。

天然气 $\delta^2H_{CH_4}$ 既受控于母源特征 (包括热演化程度、有机质类型、沉积期古水体介质盐度等) [50-52]，

同时也受一些次生作用 (如 TSR 反应等) 的影响。如图 6b 所示，总体上， H_2S 含量与 $\delta^2H_{CH_4}$ 的相关性差，而对 H_2S 含量大于 $5g/m^3$ 的样品做进一步分析可见，同一类型的天然气中， $\delta^2H_{CH_4}$ 有随 H_2S 含量增高而变重的趋势 (图 6c)，从而造成栖霞组—茅口组天然气 $\delta^2H_{CH_4}$ 普遍重于龙王庙组等，灯影组内部也存在 $\delta^2H_{CH_4}$ 随 H_2S 含量增高而变重的特征。但究竟是什么因素造成灯影组与寒武系、二叠系 $\delta^2H_{CH_4}$ 如此明显的差异？曾有学者认为安岳气区灯影组天然气 $\delta^2H_{CH_4}$ 轻于龙王庙组是因为高演化阶段水参与生烃反应导致的 [53]。2020 年，太和区 JT1 井沧浪铺组获得突破，气藏中部埋深为 6972m，天然气 $\delta^2H_{CH_4}$ 为 $-134‰$ ，可视为源于筇竹寺组烃源岩的代表值，具有与沧浪铺组相同烃源岩的龙王庙组天然气 (埋深 4500~5000m) $\delta^2H_{CH_4}$ 为 $-138‰ \sim -132‰$ ，均值为 $-134‰$ ，尽管两者最小埋深高差近 2000m，但其 $\delta^2H_{CH_4}$ 基本一致。安岳气区龙王庙组和灯影组气藏埋深高差仅 500~1000m，但 $\delta^2H_{CH_4}$ 差别大，最轻的为 $-158‰$ ；太和区 ZJ2 井、PT1 井灯二段气藏中部埋深分别为 6693m 和 5771m， $\delta^2H_{CH_4}$ 分别

为 -141% 和 -140% , 安岳气区灯二段气藏中部埋深为 $5350\sim 5800\text{m}$, $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$ 为 -152% ~ -136% , 均值为 -145% 。可见, 灯影组与沧浪铺组、龙王庙组等气藏热演化程度的差异不是控制 $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$ 差异的主要因素, 也就是水的参与不是造成灯影组天然气 $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$ 轻的主要原因。

从灯影组天然气 $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$ 纵、横向变化规律, 并通过黏土矿物中硼、钾元素含量确定古盐度大小的方法, 得到南华纪、震旦纪、寒武纪、志留纪时期古水体介质盐度的相对高低, 其中筇竹寺组烃源岩的古水体介质盐度相对最高^[38], 因此认为古水体介质盐度是控制天然气 $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$ 轻重的关键因素。本文研究新分析的 $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$ 数据同样遵循文献[38]提出的纵、横向变化规律。对灯影组混源气藏而言, 筇竹寺组烃源岩贡献大, 则 $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$ 重; 反之, 则 $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$ 轻。

3 油气充注与成藏模式

3.1 油气充注史

流体包裹体是研究油气充注史的一种常用方法^[54-55]。基于流体包裹体的检测结果, 结合研究区构造演化、沉积埋藏史及烃源岩生烃演化史等分析油气充注史。所测包裹体为溶蚀孔洞缝或裂缝中充填的以白云石、自生石英和方解石为宿主矿物的原生包裹体, 所测包裹体主要为群体包裹体, 也有零星包裹体。主要层系中, 与烃类伴生的盐水包裹体均一温度分布范围宽, 最低的为PT1井灯二段(63°C), 少量大于 220°C 的主要分布在安岳气区的灯影组和龙王庙组中, 主峰值区间为 $100\sim 200^\circ\text{C}$, 不同层系、不同区域存在差异(图7)。如灯二段太和区大多介于 $100\sim 200^\circ\text{C}$,

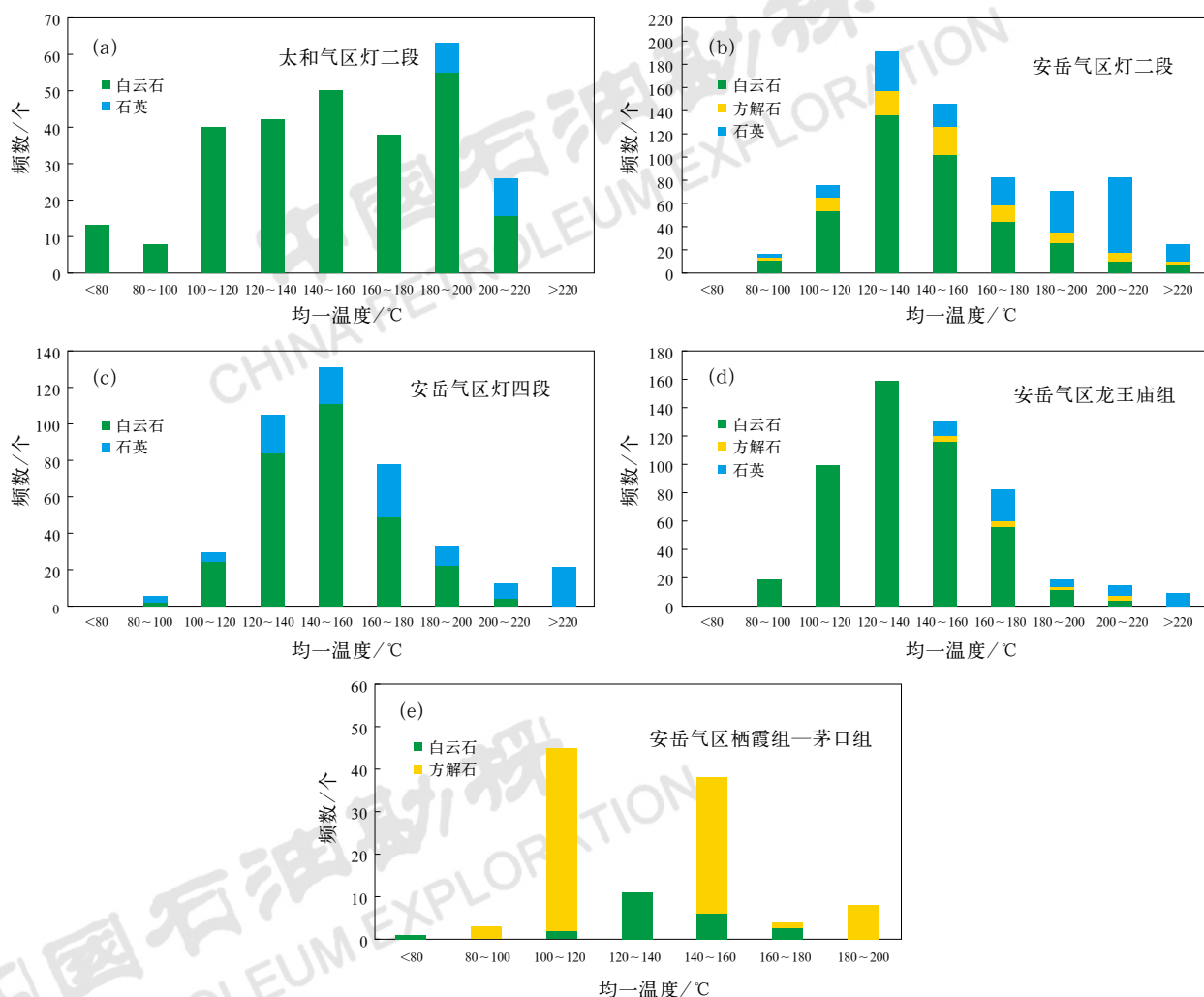


图7 川中隆起带包裹体均一温度分布直方图

Fig.7 Histogram of inclusion homogenization temperature in central Sichuan uplift zone

(图 7a); 安岳气区主峰为 120~160℃ (图 7b); 安岳气区灯四段和龙王庙组分别以 120~180℃ (图 7c) 和 100~180℃ (图 7d) 为主; 栖霞组—茅口组则以 100~120℃ 和 140~160℃ 为主 (图 7e)。结合研究区沉积埋藏史及烃源岩生烃演化史, 认为研究区三叠纪—白垩纪是油气充注的主要时期, 且具有多期次“准连续”充注的特点。以安岳气区 GS6 井 (图 8a) 和太和气区 PT1 井 (图 8b) 灯影组为例, 志留纪, 震旦

系烃源岩已进入生油期, 筇竹寺组烃源岩处于未成熟阶段, 此阶段主要在白云石中捕获均一温度小于 80℃ 的包裹体; 二叠纪前, 由于构造抬升作用, 生烃过程停止; 二叠纪—三叠纪, 震旦系、寒武系烃源岩处于生油高峰阶段, 此阶段也主要在白云石中捕获均一温度介于 80~120℃ 的包裹体; 早—中侏罗世, 烃源岩处于成熟—高成熟的湿气生成阶段, 此阶段主要在白云石中捕获均一温度介于 120~180℃

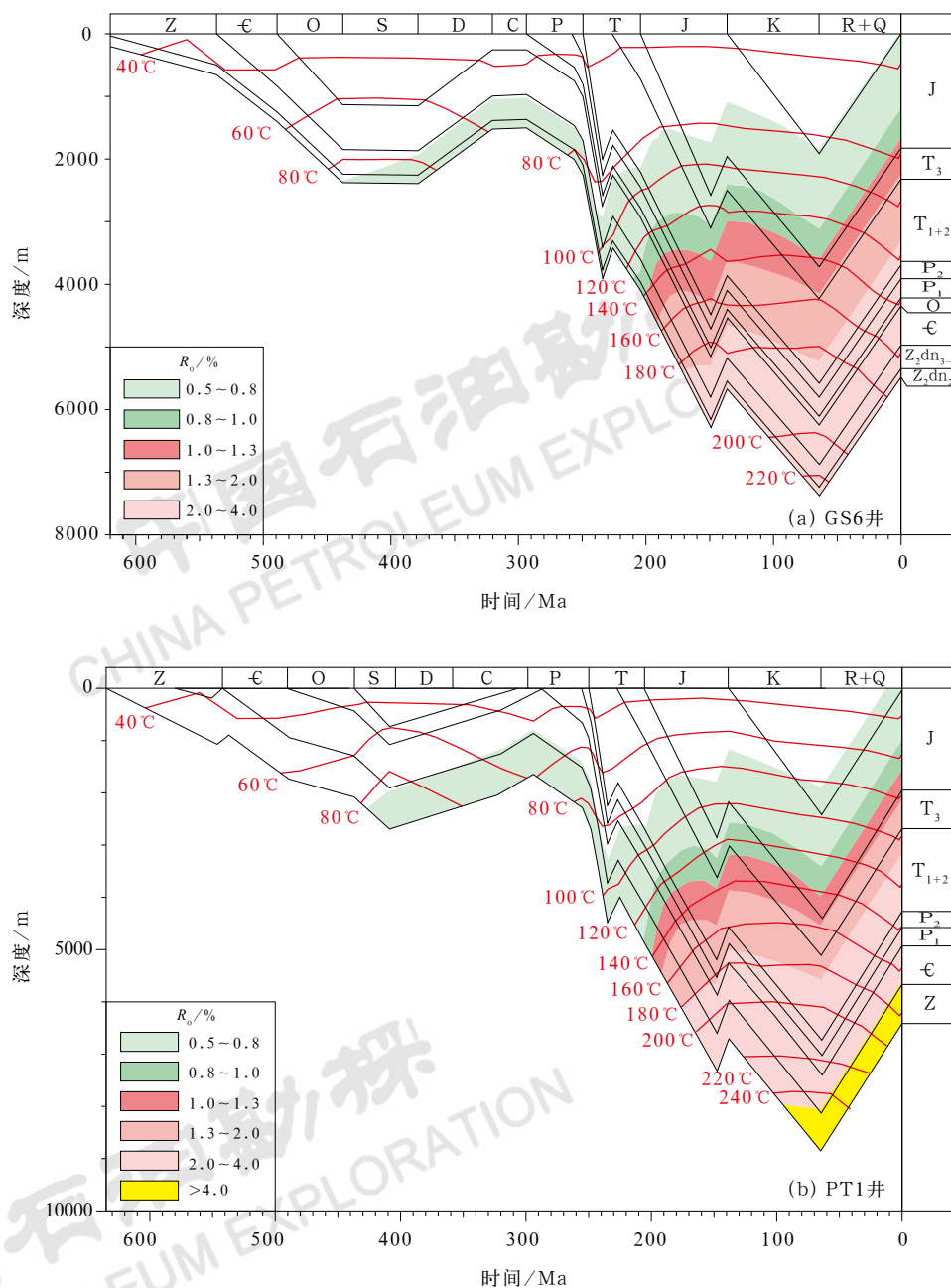


图 8 川中隆起带 GS6 井和 PT1 井沉积埋藏史及烃源岩生烃史

Fig.8 Depositional and burial history and hydrocarbon generation history of source rocks in Well GS6 and Well PT1 in central Sichuan uplift zone

的包裹体;晚侏罗世—白垩纪,烃源岩进入干气生成阶段,此阶段主要在白云石和石英中捕获均一温度大于180℃的包裹体;白垩纪末以来,构造抬升,处于古气藏调整定型阶段。

寒武系龙王庙组、二叠系包裹体均一温度主峰区间分别为100~180℃和100~160℃,其充注期主要为晚三叠世—中侏罗世和早—中侏罗世。

3.2 油气成藏模式

川中隆起带震旦系—二叠系天然气地球化学特征差异和具体地质条件揭示各层系气藏具有不同的聚集特征。

寒武系沧浪铺组直接覆于筇竹寺组烃源岩之上,具有下生上储的近源聚集条件,沧浪铺组天然气可视为源于筇竹寺组烃源岩的代表(图9a);龙王庙组、洗象池组天然气在 $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$ 、 C_2H_6 含量及 $\delta^{13}\text{C}_2$ 等气源示踪的关键参数与沧浪铺组相似,同属下生上储式成藏类型,断裂/裂缝是重要的输导通道。震旦系灯影组天然气 $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$ 、 C_2H_6 含量及 $\delta^{13}\text{C}_2$ 等特征与寒武系天然气具有明显差别,由筇竹寺组烃源岩侧向和震旦系烃源岩垂向的双源供烃成藏(图9b)。

川中隆起带大部分区域缺失龙马溪组烃源岩,但发育高陡直立、花状构造、“Y”形与反“Y”形等多种形式的走滑断裂,这些断裂主要形成于加里东早期和海西晚期,向上消失于梁山组底和龙潭组底^[56],是沟通下伏筇竹寺组烃源岩的重要通道。该区域栖霞组—茅口组部分天然气特征与龙王庙组天然气相似,主要源于筇竹寺组烃源岩;也有部分天然气 $\delta^{13}\text{C}$ 略重,与栖霞组—茅口组自身烃源岩的贡献有关,因此,栖霞组—茅口组气藏主要属于下生上储与自生自储的混源成藏类型。靠近龙马溪组尖灭线附近内测的GS19井(图2)栖霞组天然气,表现出明显不同于该区其他天然气的特征,碳同位素值偏轻、天然气组分偏湿,与川东石炭系天然气类似,认为其主要源于龙马溪组烃源岩,属于下生侧储模式^[13]。太和区ZJ2井长兴组、ZJ1井玄武岩组天然气 $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$ 、 C_2H_6 含量及 $\delta^{13}\text{C}_2$ 等特征均与寒武系天然气较为相似,主要是源于筇竹寺组烃源岩的下生上储成藏模式(图9c)。

4 有利勘探领域及资源潜力

川中隆起带多源、多储、多盖的有利成藏组合奠定了天然气多层系富集成藏的基础,近年来,震旦系、寒武系、二叠系天然气勘探的相继突破揭示了立体勘

探的良好前景,尤其在安岳气区探明震旦系—寒武系万亿立方米规模储量后,又证实在太和区发育多层叠置、横向连片,且储集体规模和质量均优于安岳气区的规模台缘丘滩体及台内颗粒滩。已有研究表明,太和区灯二段、灯四段的台缘带宽度、厚度及储层储集性能均优于安岳气区^[14,27,57]。就台缘带丘滩体而言,安岳气区灯二段、灯四段分布位置基本叠合;太和区灯二段已识别出的大型独立滩体有10余个,滩体总面积为10144km²,灯四段滩体发育部位向东迁移,滩体面积为4781km²,与灯二段叠加连片分布。此外,沧浪铺组、龙王庙组、洗象池组有利滩相分布面积分别为3800km²、3400km²和2900km²^[27]。由于震旦系—寒武系是以古油藏裂解为主的“原位”聚集型气藏,因此,在古油藏范围内储—盖匹配好的区域是下一步勘探的有利区。根据安岳气区已探明灯影组、龙王庙组气藏储量丰度[灯影组为(2~4)×10⁸m³/km²、龙王庙组为(1.6~5.6)×10⁸m³/km²]估算,太和区震旦系—寒武系天然气资源规模已超过安岳气区,成为继安岳气区之后又一个万亿立方米级大气区。

川中隆起带二叠系天然气主力烃源岩为筇竹寺组烃源岩,因此,输导通道至关重要,靠近通源断裂的高能滩体发育区是下一步有利勘探领域。栖霞组—茅口组发育大面积呈北西向展布的台内滩,尤其茅口组在盐亭—遂宁—广安—南充区域发育台洼边缘滩,滩体分布面积达15000km²^[31],发育溶洞—裂缝型、裂缝型和裂缝—溶洞型3类断溶体^[58],具备有利储集条件。根据栖霞组已发现气藏储量丰度[(0.85~0.91)×10⁸m³/km²]估算,川中隆起带栖霞组—茅口组也是千亿立方米级的有利勘探领域。

川中地区长兴组沉积期发育呈北西走向展布的“两高一凹”(遂宁高带、蓬溪—武胜台凹和广安高带)的古地貌单元^[33],在台凹周缘发育台凹边缘生物礁和生屑滩^[34]。近期ZJ1井长兴组获日产气5.2×10⁴m³的勘探突破,早期已有多井在长兴组获工业气流,表明台凹边缘长兴组生物礁、生屑滩是近期有利的勘探领域。

川中隆起带玄武岩组主要为喷溢相火山岩^[32],优质储层主要发育在火山喷溢相火山碎屑熔岩中,其次为溢流相玄武岩^[59],中江—三台地区火山岩分布面积约4000km²,与YT1井所在的简阳地区具有相似的成藏条件^[60],该区ZJ1井玄武岩组获日产气0.34×10⁴m³,有望获得更大的突破。

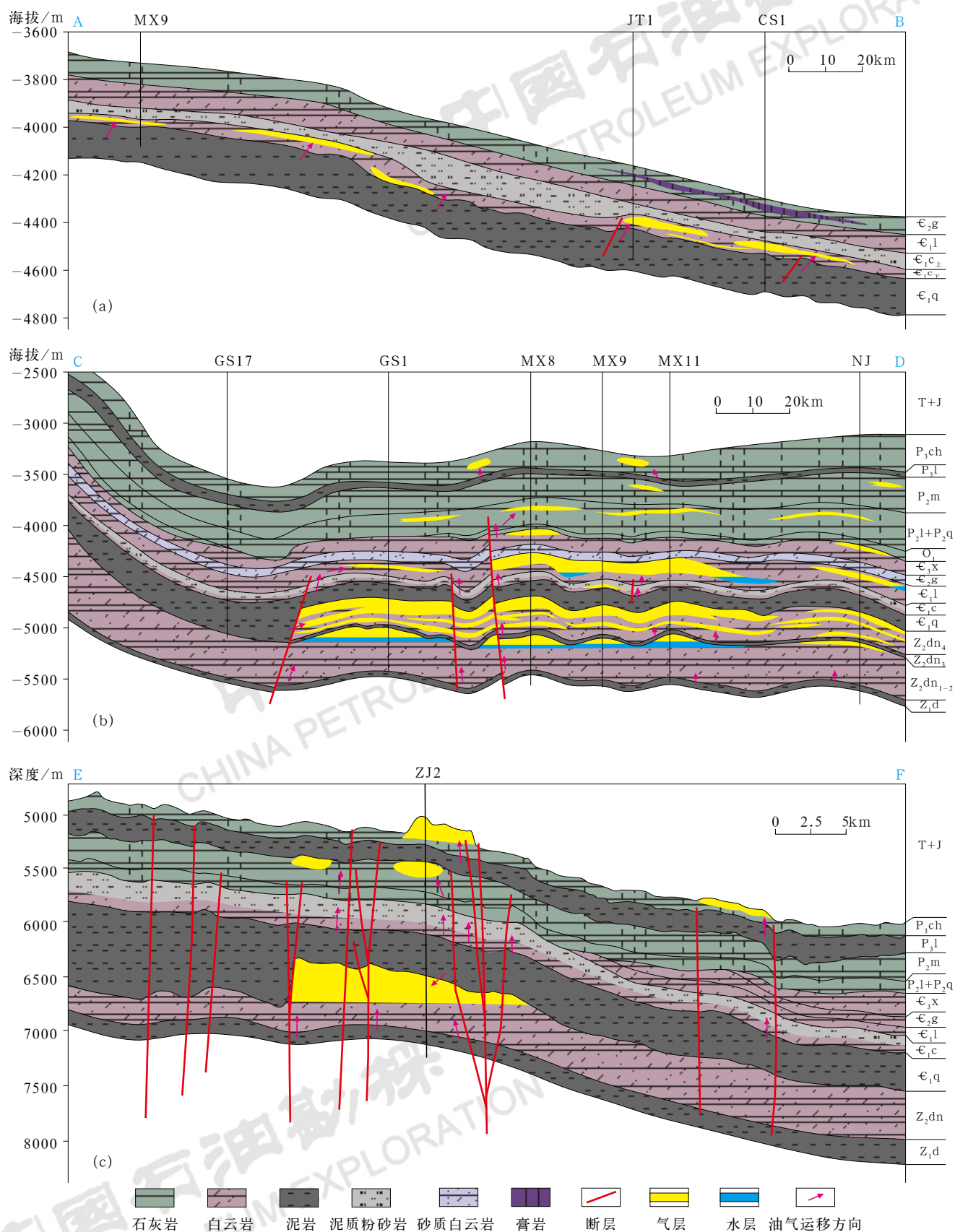


图9 川中隆起带震旦系一二叠系油气成藏模式(剖面位置见图1)

Fig.9 Hydrocarbon accumulation pattern of the Sinian-Permian in central Sichuan uplift zone (section location is in Fig.1)

Z₁d—下震旦统陡山沱组; Z₂dn—上震旦统灯影组; ϵ_1 q—下寒武统筇竹寺组; ϵ_2 g—中寒武统高台组; P₂l—中二叠统梁山组; P₃l—上二叠统龙潭组

5 结论

(1) 四川盆地川中隆起带震旦系—二叠系天然气是以烃类气体为主的干气,干燥系数大于 0.997,主要为原油裂解气。两大因素控制天然气地球化学特征的差异,一是烃源岩贡献比例,相对源于筇竹寺组烃源岩的单源气藏,上震旦统灯影组气藏有成熟度相对较高、古水体盐度相对较低的震旦系烃源岩贡献时,天然气 C_2H_6 含量降低、 $\delta^{13}C_2$ 变重、 $\delta^2H_{CH_4}$ 变轻;二叠系气藏有成熟度相对较低、古水体盐度相对较低的志留系烃源岩贡献时,天然气 C_2H_6 含量增高、 $\delta^{13}C_2$ 变轻、 $\delta^2H_{CH_4}$ 变轻。二是捕获不同阶段的裂解气,安岳气区捕获的主要是原油晚期裂解气,其 $\delta^{13}C$ 重;太和区捕获的是原油早期—晚期的裂解气, $\delta^{13}C$ 轻。

(2) 川中隆起带震旦系—二叠系气藏的充注时期主要是三叠纪—白垩纪,具有多期次“准连续”充注的特点。存在多种成藏模式,包括寒武系气藏的单源供烃下生上储模式;灯影组气藏的寒武系烃源岩侧向和震旦系烃源岩垂向双源供烃成藏模式;GS19 栖霞组气藏的志留系烃源岩单源供烃的下生上储模式;二叠系栖霞组—茅口组、玄武岩组、长兴组气藏的寒武系主要烃源岩和二叠系次要烃源岩的混源垂向成藏模式。

(3) 川中隆起带震旦系—二叠系发育多套烃源岩,多层叠置连片的优质储层紧邻烃源灶或处于古油藏裂解气源灶范围,具备万亿立方米级资源规模,勘探潜力大。在众层系中,灯影组优质储层最为发育,且有研究表明陡山沱组沉积期也存在隆坳相间构造格局,下一步可加大以震旦系尤其是陡山沱组烃源岩为气源的成藏组合研究、勘探力度,有望实现勘探新突破。

参考文献

- [1] 杜金虎, 邹才能, 徐春春, 等. 川中古隆起龙王庙组特大型气田战略发现与理论技术创新 [J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 268–277.
Du Jinhu, Zou Caineng, Xu Chunchun, *et al.* Theoretical and technical innovations in strategic discovery of a giant gas field in Cambrian Longwangmiao Formation of central Sichuan paleo-uplift, Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 268–277.
- [2] 邹才能, 杜金虎, 徐春春, 等. 四川盆地震旦系—寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现 [J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 278–293.
Zou Caineng, Du Jinhu, Xu Chunchun, *et al.* Formation, distribution, resource potential and discovery of the Sinian–Cambrian giant gas field, Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 278–293.
- [3] 徐春春, 沈平, 杨跃明, 等. 乐山—龙女寺古隆起震旦系—下寒武统龙王庙组天然气成藏条件与富集规律 [J]. 天然气工业, 2014, 34(3): 1–7.
Xu Chunchun, Shen Ping, Yang Yueming, *et al.* Accumulation conditions and enrichment patterns of natural gas in the Lower Cambrian Longwangmiao Fm reservoirs of the Leshan–Longnusi Paleohigh, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(3): 1–7.
- [4] 魏国齐, 杜金虎, 徐春春, 等. 四川盆地高石梯—磨溪地区震旦系—寒武系大型气藏特征与聚集模式 [J]. 石油学报, 2015, 36(1): 1–12.
Wei Guoqi, Du Jinhu, Xu Chunchun, *et al.* Characteristics and accumulation modes of large gas reservoirs in Sinian–Cambrian of Gaoshiti–Moxi region, Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(1): 1–12.
- [5] 杨跃明, 杨雨, 杨光, 等. 安岳气田震旦系、寒武系气藏成藏条件及勘探开发关键技术 [J]. 石油学报, 2019, 40(4): 493–508.
Yang Yueming, Yang Yu, Yang Guang, *et al.* Gas accumulation conditions and key exploration & development technologies of Sinian and Cambrian gas reservoirs in Anyue gas field [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(4): 493–508.
- [6] 谢增业, 杨春龙, 董才源, 等. 四川盆地中泥盆统和中二叠统天然气地球化学特征及成因 [J]. 天然气地球科学, 2020, 31(4): 447–461.
Xie Zengye, Yang Chunlong, Dong Caiyuan, *et al.* Geochemical characteristics and genesis of Middle Devonian and Middle Permian natural gas in Sichuan Basin, China [J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(4): 447–461.
- [7] 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(6): 702–711.
Wei Guoqi, Xie Zengye, Song Jiarong, *et al.* Features and origin of natural gas in the Sinian–Cambrian of central Sichuan paleo-uplift, Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(6): 702–711.
- [8] 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(3): 50–54.
Zheng Ping, Shi Yuhua, Zou Chunyan, *et al.* Natural gas sources in the Dengying and Longwangmiao Fms in the Gaoshiti–Maoxi area, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(3): 50–54.
- [9] 马新华, 杨雨, 文龙, 等. 四川盆地海相碳酸盐岩大中型气田分布规律及勘探方向 [J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(1): 1–13.
Ma Xinhua, Yang Yu, Wen Long, *et al.* Distribution and exploration direction of medium- and large-sized marine carbonate gas fields in Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(1): 1–13.
- [10] Zou Caineng, Wei Guoqi, Xu Chunchun, *et al.* Geochemistry of the Sinian Cambrian gas system in the Sichuan Basin, China [J]. Organic Geochemistry, 2014, 74(9): 13–21.
- [11] 夏茂龙, 文龙, 陈文, 等. 高石梯—磨溪地区震旦系灯影组、寒武系龙王庙组烃源与成藏演化特征 [J]. 天然气工业, 2015, 35(增刊 1): 1–6.

- Xia Maolong, Wen Long, Chen Wen, *et al.* Sinian system Dengying Formation and Cambrian Longwangmiao Formation hydrocarbon source and accumulation evolution characteristics in Gaoshiti-Moxi area[J]. *Natural Gas Industry*, 2015,35(S1):1-6.
- [12] 魏国齐, 沈平, 杨威, 等. 四川盆地震旦系大气田形成条件与勘探远景区[J]. *石油勘探与开发*, 2013,40(2):129-138.
- Wei Guoqi, Shen Ping, Yang Wei, *et al.* Formation conditions and exploration prospects of Sinian large gas fields, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(2):129-138.
- [13] 董才源, 谢增业, 朱华, 等. 川中地区中二叠统气源新认识及成藏模式[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2017,32(4):18-23,31.
- Dong Caiyuan, Xie Zengye, Zhu Hua, *et al.* New insight for gas source and gas accumulation modes of middle Permian in central Sichuan Basin[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2017,32(4):18-23,31.
- [14] 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(3):1-12.
- Zhao Luzi, Wang Zecheng, Yang Yu, *et al.* Important discovery in the second member of Dengying Formation in Well Pengtan1 and its significance, Sichuan Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020,25(3):1-12.
- [15] 杨雨, 文龙, 谢继容, 等. 四川盆地海相碳酸盐岩天然气勘探进展与方向[J]. *中国石油勘探*, 2020,25(3):44-55.
- Yang Yu, Wen Long, Xie Jirong, *et al.* Progress and direction of marine carbonate gas exploration in Sichuan Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020,25(3):44-55.
- [16] 乐宏, 赵路子, 杨雨, 等. 四川盆地寒武系沧浪铺组油气勘探重大发现及其启示[J]. *天然气工业*, 2020,40(11):11-19.
- Yue Hong, Zhao Luzi, Yang Yu, *et al.* Great discovery of oil and gas exploration in Cambrian Canglangpu Formation of the Sichuan Basin and its implications[J]. *Natural Gas Industry*, 2020,40(11):11-19.
- [17] 邢凤存, 侯明才, 林良彪, 等. 四川盆地晚震旦世—早寒武世构造运动记录及动力学成因讨论[J]. *地学前缘*, 2015,22(1):115-125.
- Xing Fengcun, Hou Mingcai, Lin Liangbiao, *et al.* The records and its dynamic genesis discussion of tectonic movement during the Late Sinian and the Early Cambrian of Sichuan Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015,22(1):115-125.
- [18] 张健, 沈平, 杨威, 等. 四川盆地前震旦纪沉积岩新认识与油气勘探的意义[J]. *天然气工业*, 2012,32(7):1-5.
- Zhang Jian, Shen Ping, Yang Wei, *et al.* New understandings of Pre-Sinian sedimentary rocks in the Sichuan Basin and the significance of oil and gas exploration there[J]. *Natural Gas Industry*, 2012,32(7):1-5.
- [19] 张璐, 谢增业, 王志宏, 等. 四川盆地高石梯—磨溪地区震旦系—寒武系气藏盖层特征及封闭能力评价[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(5):798-804.
- Zhang Lu, Xie Zengye, Wang Zhihong, *et al.* Caprock characteristics and sealing ability evaluation of Sinian-Cambrian gas reservoirs in Gaoshiti Moxi area, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015,26(5):798-804.
- [20] 杨光, 李国辉, 李楠, 等. 四川盆地多层系油气成藏特征与富集规律[J]. *天然气工业*, 2016,36(11):1-11.
- Yang Guang, Li Guohui, Li Nan, *et al.* Hydrocarbon accumulation characteristics and enrichment laws of multi-layered reservoirs in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2016,36(11):1-11.
- [21] 魏国齐, 杨威, 等. 四川盆地构造特征与油气[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- Wei Guoqi, Yang Wei, *et al.* Structural characteristics and oil and gas in Sichuan Basin[M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [22] 魏国齐, 杨威, 张健, 等. 四川盆地中部前震旦系裂谷及对上覆地层成藏的控制[J]. *石油勘探与开发*, 2018,45(2):179-189.
- Wei Guoqi, Yang Wei, Zhang Jian, *et al.* The pre-Sinian rift in central Sichuan Basin and its control on hydrocarbon accumulation in the overlying strata[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018,45(2):179-189.
- [23] 魏国齐, 王志宏, 李剑, 等. 四川盆地震旦系、寒武系烃源岩特征、资源潜力与勘探方向[J]. *天然气地球科学*, 2017,28(1):1-13.
- Wei Guoqi, Wang Zhihong, Li Jian, *et al.* Characteristics of source rocks, resource potential and exploration direction of Sinian and Cambrian in Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017,28(1):1-13.
- [24] 杨跃明, 文龙, 罗冰, 等. 四川盆地达州—开江古隆起沉积构造演化及油气成藏条件分析[J]. *天然气工业*, 2016,36(8):1-10.
- Yang Yueming, Wen Long, Luo Bing, *et al.* Sedimentary tectonic evolution and reservoir-forming conditions of the Dazhou-Kaijiang paleo-uplift, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2016,36(8):1-10.
- [25] Xiao Di, Cao Jian, Luo Bing, *et al.* Neoproterozoic postglacial paleoenvironment and hydrocarbon potential: a review and new insights from the Doushantuo Formation Sichuan Basin, China[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021,212:1-30.
- [26] 陈建平, 李伟, 倪云燕, 等. 四川盆地二叠系烃源岩及其天然气勘探潜力(一): 烃源岩空间分布特征[J]. *天然气工业*, 2018,38(5):1-16.
- Chen Jianping, Li Wei, Ni Yunyan, *et al.* The Permian source rocks in the Sichuan Basin and its natural gas exploration potential (Part 1): spatial distribution of source rocks[J]. *Natural Gas Industry*, 2018,38(5):1-16.
- [27] 徐春春, 沈平, 杨跃明, 等. 四川盆地川中古隆起震旦系—下古生界天然气勘探新认识及勘探潜力[J]. *天然气工业*, 2020,40(7):1-9.
- Xu Chun Chun, Shen Ping, Yang Yueming, *et al.* New understandings and potential of Sinian-Lower Paleozoic natural gas exploration in the central Sichuan paleo-uplift of the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2020,40(7):1-9.
- [28] 罗冰, 周刚, 罗文军, 等. 川中古隆起下古生界—震旦系勘探发现与天然气富集规律[J]. *中国石油勘探*, 2015,20(2):18-29.
- Luo Bing, Zhou Gang, Luo Wenjun, *et al.* Discovery from exploration of Lower Paleozoic-Sinian system in central Sichuan palaeo-uplift and its natural gas abundance law[J]. *China*

- Petroleum Exploration, 2015,20(2):18–29.
- [29] 林怡, 钟波, 陈聪, 等. 川中地区古隆起寒武系洗象池组气藏成藏控制因素[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2020,47(2):150–158.
Lin Yi, Zhong Bo, Chen Cong, *et al.* Geological characteristics and controlling factors of gas accumulation of Xixiangchi Formation in central Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2020,47(2):150–158.
- [30] 石书缘, 王铜山, 刘伟, 等. 四川盆地寒武系洗象池组储层特征及天然气勘探潜力[J]. 天然气地球科学, 2020,31(6):773–785.
Shi Shuyuan, Wang Tongshan, Liu Wei, *et al.* Reservoir characteristic and gas exploration potential in Cambrian Xixiangchi Formation of Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2020,31(6):773–785.
- [31] 周进高, 姚根顺, 杨光, 等. 四川盆地栖霞组—茅口组岩相古地理与天然气有利勘探区带[J]. 天然气工业, 2016,36(4):8–15.
Zhou Jingao, Yao Genshun, Yang Guang, *et al.* Lithofacies palaeogeography and favorable gas exploration zones of Qixia and Maokou Fms in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2016,36(4):8–15.
- [32] 马新华, 杨雨, 张健, 等. 四川盆地二叠系火山碎屑岩气藏勘探重大发现及其启示[J]. 天然气工业, 2019,39(2):1–8.
Ma Xinhua, Yang Yu, Zhang Jian, *et al.* A major discovery in Permian volcanic rock gas reservoir exploration in the Sichuan Basin and its implications[J]. Natural Gas Industry, 2019,39(2):1–8.
- [33] 文龙, 张奇, 杨雨, 等. 四川盆地长兴组—飞仙关组礁、滩分布的控制因素及有利勘探区带[J]. 天然气工业, 2012,32(1):39–44.
Wen Long, Zhang Qi, Yang Yu, *et al.* Factors controlling reef–bank reservoirs in the Changxing–Feixianguan Formations in the Sichuan Basin and their play fairways[J]. Natural Gas Industry, 2012,32(1):39–44.
- [34] 罗开平, 曹清古, 彭金宁, 等. 四川盆地德阳—武胜拉张槽西段构造—沉积特征及勘探领域[J]. 石油实验地质, 2020,42(2):163–171.
Luo Kaiping, Cao Qinggu, Peng Jinning, *et al.* Tectonic–sedimentary characteristics and exploration plays in the western section of Deyang–Wusheng intracratonic sag, Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020,42(2):163–171.
- [35] 谢增业, 李志生, 魏国齐, 等. 腐泥型干酪根热降解成气潜力及裂解气判识的实验研究[J]. 天然气地球科学, 2016,27(6):1057–1066.
Xie Zengye, Li Zhisheng, Wei Guoqi, *et al.* Experimental research on the potential of sapropelic kerogen cracking gas and discrimination of oil cracking gas[J]. Natural Gas Geoscience, 2016,27(6):1057–1066.
- [36] Li Jian, Li Jin, Li Zhisheng, *et al.* The hydrogen isotopic characteristics of the Upper Paleozoic natural gas in Ordos Basin[J]. Organic Geochemistry, 2014,74(9):66–75.
- [37] 魏国齐, 谢增业, 白贵林, 等. 四川盆地震旦系—下古生界天然气地球化学特征及成因判识[J]. 天然气工业, 2014,34(3):44–49.
Wei Guoqi, Xie Zengye, Bai Guilin, *et al.* Organic geochemical characteristics and origin of natural gas in the Sinian Lower Paleozoic reservoirs, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014,34(3):44–49.
- [38] 谢增业, 李剑, 杨春龙, 等. 川中古隆起震旦系—寒武系天然气地球化学特征与太和气的勘探潜力[J]. 天然气工业, 2021,41(7):1–14.
Xie Zengye, Li Jian, Yang Chunlong, *et al.* Geochemical characteristics of Sinian–Cambrian natural gas in central Sichuan paleo–uplift and exploration potential of Taihe gas area[J]. Natural Gas Industry, 2021,41(7):1–14.
- [39] 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(5):533–538.
Wei Guoqi, Wang Dongliang, Wang Xiaobo, *et al.* Characteristics of noble gases in the large Gaoshiti–Moxi gas field in Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014,41(5):533–538.
- [40] 戴金星, 倪云燕, 黄士鹏, 等. 四川盆地黄龙组烷烃气碳同位素倒转成因的探讨[J]. 石油学报, 2010,31(5):710–718.
Dai Jinxing, Ni Yunyan, Huang Shipeng. Discussion on the carbon isotopic reversal of alkane gases from the Huanglong Formation in the Sichuan Basin, China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010,31(5):710–718.
- [41] Dai Jinxing, Zou Caineng, Liao Shimeng, *et al.* Geochemistry of the extremely high thermal maturity Longmaxi shale gas, southern Sichuan Basin[J]. Organic Geochemistry, 2014,74(9):3–12.
- [42] 曹春辉, 张铭杰, 汤庆艳, 等. 四川盆地志留系龙马溪组页岩气地球化学特征及意义[J]. 天然气地球科学, 2015,26(8):1604–1612.
Cao Chunhui, Zhang Mingjie, Tang Qingyan, *et al.* Geochemical characteristics and implications of shale gas in Longmaxi Formation, Sichuan Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2015,26(8):1604–1612.
- [43] 魏祥峰, 郭彤楼, 刘若冰. 涪陵页岩气田焦石坝地区页岩气地球化学特征及成因[J]. 天然气地球科学, 2016,27(3):539–548.
Wei Xiangfeng, Guo Tonglou, Liu Ruobing. Geochemical features of shale gas and their genesis in Jiaoshiba block of Fuling shale gasfield, Chongqing[J]. Natural Gas Geoscience, 2016,27(3):539–548.
- [44] 高波. 四川盆地龙马溪组页岩气地球化学特征及其地质意义[J]. 天然气地球科学, 2015,26(6):1173–1182.
Gao Bo. Geochemical characteristics of shale gas from Lower Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin and its geological significance[J]. Natural Gas Geoscience, 2015,26(6):1173–1182.
- [45] 冯子齐, 刘丹, 黄士鹏, 等. 四川盆地长宁地区志留系页岩气碳同位素组成[J]. 石油勘探与开发, 2016,43(5):705–713.
Feng Ziqi, Liu Dan, Huang Shipeng, *et al.* Carbon isotopic composition of shale gas in the Silurian Longmaxi Formation of the Changning area, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016,43(5):705–713.
- [46] 李友川, 孙玉梅, 兰蕾. 用乙烷碳同位素判别天然气成因类型存在问题探讨[J]. 天然气地球科学, 2016,27(4):654–664.
Li Youchuan, Sun Yumei, Lan Lei. Discussion on the

- recognition of gas origin by using ethane carbon isotope[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016,27(4):654–664.
- [47] 王铜山, 耿安松, 熊永强, 等. 塔里木盆地海相原油及其沥青质裂解生气动力学模拟研究[J]. *石油学报*, 2008,29(2):167–172.
- Wang Tongshan, Geng Ansong, Xiong Yongqiang, *et al.* Kinetic simulation study on generation of gaseous hydrocarbons from the pyrolysis of marine crude oil and its asphaltene in Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008,29(2):167–172.
- [48] 帅燕华, 邹艳荣, 彭平安, 等. 乙烷稳定碳同位素动力学模拟及地质应用[J]. *地球化学*, 2006,35(2):151–156.
- Shuai Yanhua, Zou Yanrong, Peng Ping'an, *et al.* Kinetic modeling of stable carbon isotope ratios of ethane from coal in confined system and its significance in geological application[J]. *Geochimica*, 2006,35(2):151–156.
- [49] 吴伟, 罗超, 张鉴, 等. 油型气乙烷碳同位素演化规律与成因[J]. *石油学报*, 2016,37(12):1463–1471.
- Wu Wei, Luo Chao, Zhang Jian, *et al.* Evolution law and genesis of ethane carbon isotope of oil type gas[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016,37(12):1463–1471.
- [50] Xie Zengye, Li Jian, Li Zhisheng, *et al.* Geochemical characteristics of the Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin, China and its significance for hydrocarbon accumulation[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 2017, 91(5):1836–1854.
- [51] Ni Yunyan, Liao Fengrong, Gao Jinliang, *et al.* Hydrogen isotopes of hydrocarbon gases from different organic facies of the Zhongba gas field, Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019,179(8):776–786.
- [52] 黄士鹏, 段书府, 汪泽成, 等. 烷烃气稳定氢同位素组成影响因素及应用[J]. *石油勘探与开发*, 2019,46(3):496–508.
- Huang Shipeng, Duan Shufu, Wang Zecheng, *et al.* Affecting factors and application of the stable hydrogen isotopes of alkane gases[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(3):496–508.
- [53] He Kun, Zhang Shuichang, Mi Jingkui, *et al.* Carbon and hydrogen isotope fractionation for methane from non-isothermal pyrolysis of oil in anhydrous and hydrothermal conditions[J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 2019,37(5):1558–1576.
- [54] 袁海锋, 刘勇, 徐昉昊, 等. 川中安平店高石梯构造震旦系灯影组流体充注特征及油气成藏过程[J]. *岩石学报*, 2014,30(3):727–736.
- Yuan HaiFeng, Liu Yong, Xu Fanghao, *et al.* The fluid charge and hydrocarbon accumulation, Sinian reservoir Anpingdian–Gaoshiti Structure, Central Sichuan Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014,30(3):727–736.
- [55] 徐昉昊, 袁海锋, 徐国盛, 等. 四川盆地磨溪构造寒武系龙王庙组流体充注和油气成藏[J]. *石油勘探与开发*, 2018,45(3):426–435.
- Xu Fanghao, Yuan Haifeng, Xu Guosheng, *et al.* Fluid charging and hydrocarbon accumulation in the Cambrian Longwangmiao Formation of Moxi Structure, Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(3):426–435.
- [56] 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.
- [57] 朱正平, 罗文军, 潘仁芳, 等. 川中高石梯—磨溪地区灯四段古地貌恢复及其对储层的控制作用[J]. *中国石油勘探*, 2019,24(6):730–738.
- Zhu Zhengping, Luo Wenjun, Pan Renfang, *et al.* The paleogeomorphology restoration of Sinian Deng 4 Member and its control on reservoir formation in the Gaoshiti–Moxi area in central Sichuan Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(6):730–738.
- [58] 黎荣, 胡明毅, 潘仁芳, 等. 川中地区中二叠统断溶体发育特征及形成机制[J]. *中国石油勘探*, 2019,24(1):105–114.
- Li Rong, Hu Mingyi, Pan Renfang, *et al.* Development characteristics and forming mechanism of Middle Permian fault–karst carbonate reservoirs in the central Sichuan Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019,24(1):105–114.
- [59] 文龙, 李亚, 易海永, 等. 四川盆地二叠系火山岩岩相与储层特征[J]. *天然气工业*, 2019,39(2):17–27.
- Wen Long, Li Ya, Yi Haiyong, *et al.* Lithofacies and reservoir characteristics of Permian volcanic rocks in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2019,39(2):17–27.
- [60] 罗冰, 夏茂龙, 汪华, 等. 四川盆地西部二叠系火山岩气藏成藏条件分析[J]. *天然气工业*, 2019,39(2):9–16.
- Luo Bing, Xia Maolong, Wang Hua, *et al.* Hydrocarbon accumulation conditions of Permian volcanic gas reservoirs in the western Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(2):9–16.