

文章编号: 1000-0747(2025)02-0374-11 DOI: 10.11698/PED.20240289

四川盆地德阳—安岳裂陷槽东西两侧震旦系灯影组天然气地球化学特征差异及其成因

宋泽章^{1,2}, 金世贵^{1,2}, 罗冰³, 罗情勇^{1,2}, 田兴旺^{1,2,3}, 杨岱林³, 张子羽^{1,2},
张文锦³, 武鲁亚³, 陶佳丽³, 何家欢³, 李文正⁴, 葛冰飞^{1,2}, 王冠³, 高嘉玮^{1,2}

(1. 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;
3. 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院, 成都 610051; 4. 中国石油杭州地质研究院, 杭州 310023)

基金项目: 国家自然科学基金面上基金项目“深层、超深层热液活动及其对古油藏改造效应定量表征”(42272161); 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“海相碳酸盐岩油气规模增储上产与勘探开发技术研究”(2023ZZ16); 中国石油天然气股份有限公司西南油气田公司勘探开发研究院“四川盆地 Xai 源岩特征及富 Xai 潜力评价实验研究”(2024D101-01-06)

摘要: 以四川盆地德阳—安岳裂陷槽两侧(裂陷东侧高石梯—磨溪地区和川中古隆起北斜坡; 裂陷西侧威远地区和大探 1 井区)震旦系灯影组天然气藏为研究对象, 在充分对比不同地区灯影组天然气地球化学参数(组分、同位素组成)的基础上, 明确裂陷槽两侧灯影组天然气地球化学特征差异及其成因。研究表明: ①裂陷槽两侧灯影组气藏以原油裂解气为主, 成熟度高, 为典型的干气; ②受较强的硫酸盐热化学还原反应(TSR)改造, 裂陷东侧灯影组气藏的 H₂S、CO₂含量高, $\delta^{13}\text{C}_2$ 偏重(平均值大于-29‰); 威远地区灯影组气藏受 TSR 影响小, 遵循水溶气析出成藏模式, $\delta^{13}\text{C}_1$ 较裂陷东侧稍重, 部分碳同位素组成发生倒转; 大探 1 井灯影组气藏基本不受 TSR 影响; ③裂陷西侧大探 1 井区及威远地区基底花岗岩广泛发育且断裂垂向输导高效, 灯影组气藏 He 含量显著高于裂陷东侧; ④受烃源岩沉积期的古水介质盐度控制, 裂陷西侧灯影组气藏的 $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$ 较东侧稍轻; ⑤大探 1 井区灯影组天然气除了来自寒武系筇竹寺组烃源岩外, 还有震旦系灯影组三段及陡山沱组烃源岩的贡献。

关键词: 硫酸盐热化学还原反应(TSR); 大探 1 井; 富氦气藏; 震旦系灯影组; 德阳—安岳裂陷槽; 四川盆地

中图分类号: TE122.1 文献标识码: A

Geochemical differences in natural gas of Sinian Dengying Formation on the east and west sides of the Deyang–Anyue rift trough and their genesis, Sichuan Basin, SW China

SONG Zezhang^{1,2}, JIN Shigui^{1,2}, LUO Bing³, LUO Qingyong^{1,2}, TIAN Xingwang^{1,2,3}, YANG Dailin³, ZHANG Ziyu^{1,2},
ZHANG Wenjin³, WU Luya³, TAO Jiali³, HE Jiahuan³, LI Wenzheng⁴, GE Bingfei^{1,2}, WANG Guan³, GAO Jiawei^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. Exploration and Development Research Institute of PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu 610051, China; 4. PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Taking the natural gas reservoirs of the Sinian Dengying Formation on the east and west sides (Gaoshiti–Moxi area and north slope of central Sichuan paleo-uplift on the east; Weiyuan and Well Datan-1 block on the west) of the Deyang–Anyue rift trough in the Sichuan Basin, China, as the research object, the geochemical parameters (component, isotopic composition) of natural gas from the Dengying Formation in different areas are compared, and then the differences in geochemical characteristics of Dengying natural gas on the east and west sides of the Deyang–Anyue rift trough and their genesis are clarified. First, the Dengying gas reservoirs on both sides of the rift trough are predominantly composed of oil-cracking gas with high maturity, which is typical dry gas. Second, severely modified by thermochemical sulfate reduction (TSR) reaction, the Dengying gas reservoirs on the east side exhibit high H₂S and CO₂ contents, with an elevated $\delta^{13}\text{C}_2$ value (average value higher than -29‰). The Dengying gas reservoirs in the Weiyuan area are less affected by TSR modification, though the $\delta^{13}\text{C}_1$ values are slightly greater than that of the reservoirs on the east side with partial reversal of carbon isotope composition, likely due to the water-soluble gas precipitation and accumulation mechanism. The Dengying gas reservoir of Well Datan-1 shows no influence from TSR. Third, the Dengying gas reservoirs reflect high helium contents (significantly higher than that on the east side) in the Weiyuan and Datan-1 areas on the west side, which is supposed to attribute to the widespread granites in basement and efficient vertical transport along faults. Fourth, controlled by the paleo-salinity of water medium in the depositional period of the source rock, the $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$ values of the Dengying gas reservoirs on the west side are slightly lighter than those on the east side. Fifth, the Dengying natural gas in

the Datan-1 area is contributed by the source rocks of the Sinian Doushantuo Formation and the third member of the Dengying Formation, in addition to the Cambrian Qiongzhuisi Formation.

Key words: thermochemical sulfate reduction (TSR); Well Datan-1; helium-rich gas reservoir; Sinian Dengying Formation; Deyang–Anyue rift trough; Sichuan Basin

引用:宋泽章,金世贵,罗冰,等.四川盆地德阳—安岳裂陷槽东西两侧震旦系灯影组天然气地球化学特征差异及其成因[J].石油勘探与开发,2025,52(2):374-384.

SONG Zezhang, JIN Shigui, LUO Bing, et al. Geochemical differences in natural gas of Sinian Dengying Formation on the east and west sides of the Deyang–Anyue rift trough and their genesis, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2025, 52(2): 374-384.

0 引言

四川盆地震旦系灯影组天然气资源量丰富。截至2023年底,灯影组天然气探明储量占四川盆地天然气总探明储量的17.55%、占海相天然气总探明储量的41.15%^[1],是深层—超深层海相天然气勘探的主力层系。

四川盆地震旦系灯影组天然气勘探发现最早可追溯至1964年,德阳—安岳裂陷槽西侧古隆起高部位部署的威基井取得工业气流,发现了威远气田,拉开了震旦系灯影组天然气勘探的序幕。此后40多年间,钻遇灯影组的天然气发现有限。近20年来,随着德阳—安岳裂陷槽的沉积和演化研究不断深入,中国石油西南油气田公司瞄准关键地质问题,强化基础地质研究,取得了一系列重大勘探突破:2011年,在德阳—安岳裂陷槽东侧(简称裂陷东侧)台缘带高石梯—磨溪(简称高—磨)地区探明了超万亿立方米整装海相碳酸盐岩特大气田—安岳气田;2020年,在裂陷槽东侧古隆起斜坡区的蓬探1井获勘探重大突破,灯影组二段(简称灯二段)测试获 $121.98 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 高产气流,发现了另一个万亿立方米级大气田—蓬莱气田,展现出裂陷东侧灯影组台缘带巨大的天然气勘探潜力^[2]。

相对于裂陷东侧,德阳—安岳裂陷槽西侧(简称裂陷西侧)震旦系天然气勘探进展缓慢。自1964年威远地区取得勘探突破以来,曾于1988年、1991年和2009年分别钻探老龙1井、周公1井及汉深1井,但测试均产水^[3]。近5年,在“突出风险勘探、寻找规模资源区带”的思想指导下,西南油气田公司持续深化裂陷西侧震旦系成藏条件研究,于2018年在大兴场地区布置大探1井并取得勘探突破。2023年10月,大探1井获高产工业气流,其中灯二段天然气产量为 $42.16 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,灯影组四段(简称灯四段)天然气产量为 $81.85 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,为裂陷西侧灯影组台缘带首口高产工业气井。

前人对震旦系灯影组天然气藏的研究多集中在裂陷东侧高—磨地区安岳气田、北斜坡蓬莱气田或西侧

威远^[4-8]等单一地区,而裂陷西侧刚获得突破的大兴场地区(大探1井)灯影组天然气地球化学研究尚处于起步阶段,亟需深化裂陷槽两侧多地区灯影组天然气地球化学特征及同位素组成的系统对比。本文以德阳—安岳裂陷槽两侧灯影组天然气藏为研究对象,在充分对比不同地区灯影组天然气地球化学特征(组分、同位素组成)的基础上,明确裂陷槽两侧灯影组天然气地球化学特征差异及其成因,旨在深化德阳—安岳裂陷槽两侧震旦系灯影组天然气藏的认识,为深层—超深层海相碳酸盐天然气勘探开发提供技术支撑。

1 区域地质概况

1.1 构造沉积地质背景及地层基本特征

德阳—安岳裂陷槽发育于桐湾运动Ⅱ幕末期,是四川盆地震旦纪—早寒武世最重要的构造单元,在盆地范围内面积达 $6 \times 10^4 \text{ km}^2$,具有北部宽陡,南部窄缓的形态特征^[3, 9](见图1a)。根据深度和宽度,将裂陷槽细分为北段、中段和南段。选取裂陷东侧高—磨地区安岳气田、北斜坡蓬莱气田、裂陷西侧威远气田和四川盆地西南部(简称川西南)大兴场地区大探1井区作为研究区(见图1a)。

德阳—安岳裂陷槽的形成和演化自震旦系灯影组沉积期开始,到寒武系龙王庙组沉积期结束。灯影组从下到上可进一步分为4段,即灯影组一段—四段(简称灯一段—灯四段),以灯二段和灯四段沉积为主^[2],主要岩性为白云岩;下寒武统从老至新依次可划分为麦地坪组、筇竹寺组、沧浪铺组和龙王庙组^[10](见图1b),其中,沧浪铺组与龙王庙组发育优质碳酸盐岩储层(见图1b)。高—磨地区台缘带缺失麦地坪组沉积,灯影组与上覆筇竹寺组呈假整合接触(见图1b),其下部与陡山沱组呈整合接触^[11];而川西南地区灯影组与麦地坪组呈整合接触^[3]。

1.2 烃源岩特征

德阳—安岳裂陷槽内及周缘主要发育3套烃源岩:震旦系灯三段、寒武系麦地坪组和筇竹寺组烃源岩。

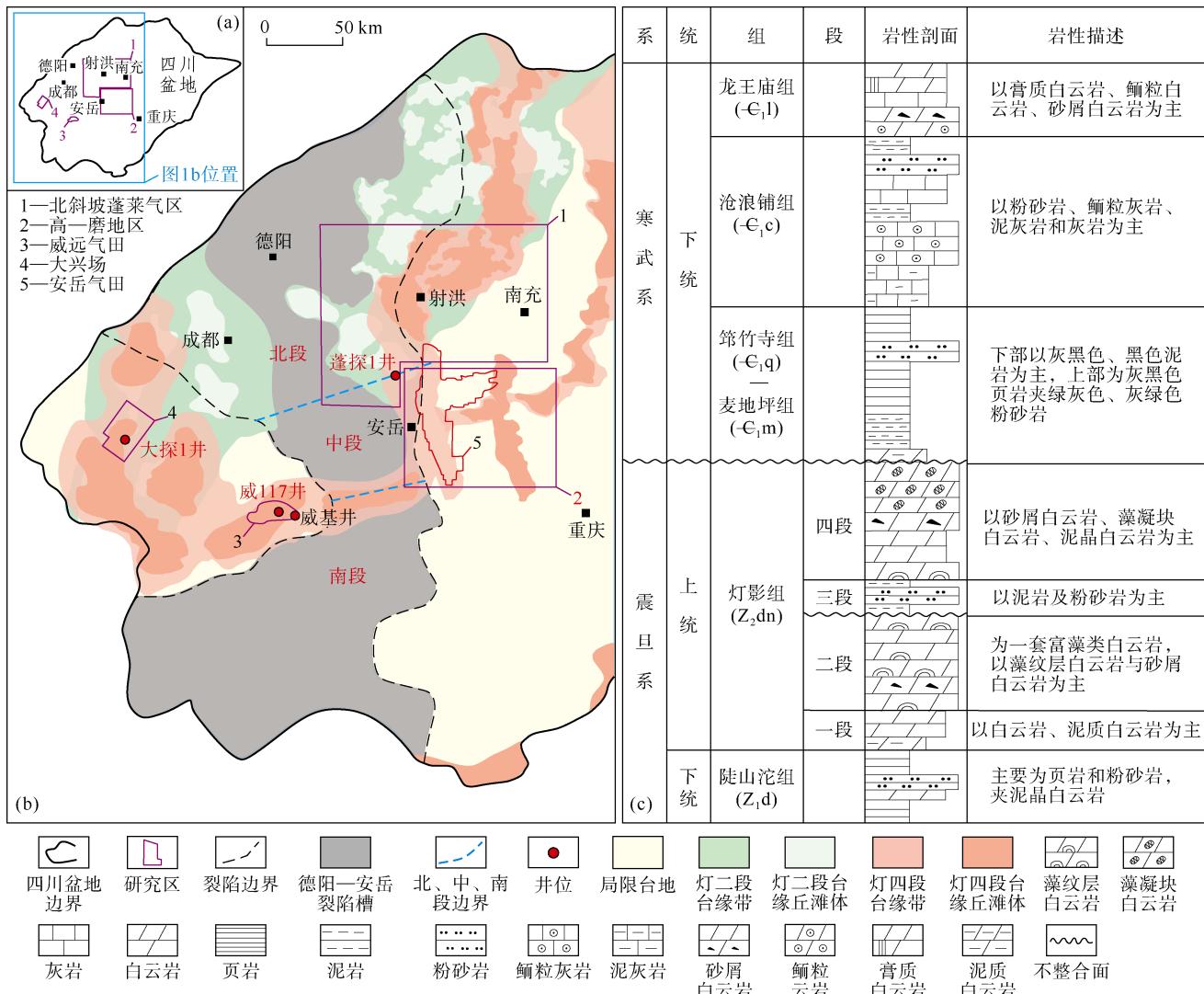


图 1 四川盆地及研究区位置 (a)、德阳—安岳裂陷槽与灯影组沉积相带叠合图 (据文献[3, 9]修改) (b)、研究区震旦系—寒武系柱状简图 (据文献[10]修改) (c)

此外，四川盆地局部还发育震旦系陡山沱组烃源岩，主要分布于盆地周缘。

筇竹寺组烃源岩主要由灰黑色泥岩和黑色页岩组成，有机质丰度高，总有机碳含量（TOC）平均值为1.95%，槽内厚度为300~350 m。大探1井钻遇筇竹寺组厚约133 m，相比槽内厚度较薄。麦地坪组为一套以硅质页岩、炭质泥岩为主的烃源岩，有机质丰度高，TOC平均值为1.68%，主要发育于槽内，厚度为50~100 m。震旦系灯三段主要为一套蓝灰色泥岩，有机质丰度相对较低，TOC平均值为0.65%，盆地内厚度为5~30 m，川西南地区灯三段仅厚约10 m。陡山沱组富有机质页岩TOC平均值约为1.51%，在盆地内部仅少量井钻遇，如威117井，已揭示厚度为10~50 m，而在盆地周缘则更为发育，厚度为120~480 m。筇竹寺组已被证实为裂陷东侧高一磨地区及北斜坡灯影组天

然气藏的主力烃源岩，供烃能力强，为油气成藏提供了优质、充足的物质基础。此外，筇竹寺组—麦地坪组还可作为区域性泥页岩盖层，对灯二段与灯四段天然气藏具有较好的封盖作用。

1.3 灯影组储层特征

裂陷槽东、西两侧高部位为灯影组台缘带，发育大面积分布的丘滩体和槽内台缘残丘等优质储集体，纵向叠置、横向连片（见图 1a）。其中，裂陷西侧灯二段丘滩体面积约为 $3\ 000\ km^2$ ，灯四段丘滩体面积约 $4\ 000\ km^2$ ；而裂陷东侧遂宁—广元地区灯二段、灯四段丘滩体面积分别约为 $10\ 000$ ， $5\ 000\ km^2$ 。

受德阳—安岳裂陷槽控制，槽内灯一段+灯二段厚度为50~150m，灯三段+灯四段厚度为50~100m，槽外灯一段+灯二段厚度为350~800m，灯三段+灯四段厚度为100~450m。灯影组岩性主要为藻白云岩、泥晶白云岩、灰岩等。

岩夹少量碎屑岩。其中,灯二段储层为典型藻白云岩(见图1b),储集空间以溶洞、藻格架孔、粒间溶孔和裂缝为主;灯四段储层岩性主要为凝块白云岩和砂屑白云岩。

2 德阳—安岳裂陷槽东、西两侧的灯影组气藏地球化学特征

结合实验及相关文献,统计了裂陷槽东、西两侧共

158口井的349组天然气测试数据^[4-6, 12-18]。德阳—安岳裂陷槽东、西两侧震旦系灯二段和灯四段的天然气均以烃类气体为主。相比于寒武系,震旦系灯影组天然气的CH₄、C₂H₆含量较低,体积分数小于95%,几乎不含C₃H₈,但非烃如CO₂、H₂S、N₂及He等含量明显较高^[6, 12-14, 17-18](见表1)。此外,裂陷槽东、西两侧灯影组天然气在气体组成及碳、氢同位素组成方面差异明显。

表1 德阳—安岳裂陷槽东、西两侧灯影组天然气组分含量、碳氢同位素组成数据表

区域位置	研究区	井号	层位	深度/m	天然气组分含量/%								碳、氢同位素组成/‰				数据来源
					CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	He	N ₂	CO ₂	H ₂ S	H ₂	δ ¹³ C _{CH₄}	δ ¹³ C _{C₂H₆}	δ ¹³ C _{CO₂}	δ ² H _{CH₄}	
北斜坡	PT	ZJ2	灯二段	6 547	76.90	0.04	0	0.05	0.67	15.43	6.80	0	-35.1	-27.4	-1.5	-141	文献[12]
		PT1	灯二段	5 726~5 817	94.94	0.08	0	0.06	0.13	2.32	2.46	0.01	-33.9	-29.2	-0.2	-125	
	PT	PT108	灯二段	5 871~5 913	93.13	0.01	0	0.01	0.50	4.20	2.10	0.05	-33.0	-24.7		-141	
		PT103	灯二段	5 835	89.47	0.04	0	0.01	0.62	6.54	3.15	0	-33.7	-28.4	-2.8	-144	文献[13]
		PT102	灯二段	5 937	89.88	0.06	0	0.02	0.80	5.25	3.71	0	-34.4	-29.1	-0.3	-137	文献[13]
		PT101	灯二段	5 990	83.34	0.06	0	0.01	10.24	3.23	3.09	0.03	-34.7	-29.0	-3.5	-143	文献[13]
		PS5	灯四段	5 503~5 588	79.28	0.03	0	0.01	0.37	18.20	2.08	0.03	-33.0	-28.0		-151	
		PS1	灯四段	7 467~7 680	79.64	0.05	0	0.03	0.62	10.44	8.92	0.30	-32.8	-27.8	-0.9	-148	
		DB1	灯四段	6 312~6 484	86.93	0.06	0	0.02	0.54	10.29	2.15	0.01	-32.8	-27.6	1.9		
裂陷东侧	MX	MX8	灯二段	5 422~5 459	91.43	0.04	0	0.04	2.45	6.02	0.01	0	-32.2	-27.4		-146	文献[18]
		MX8	灯四段	5 102~5 172	91.41	0.03	0	0.06	1.64	5.88	0.95	0	-32.9	-28.4		-148	文献[18]
	MX	MX19	灯四段	5 145	92.24	0.03	0	0.03	1.22	5.15	1.30	0.03	-33.5	-28.3		-146	
		MX18	灯四段	5 095	92.36	0.04	0	0.04	1.42	4.74	1.38	0.02	-33.7	-27.4		-146	
	MX	MX9	灯二段	5 423~5 459	91.82	0.05	0	0.02	0.96	4.24	2.75	0	-34.4		-2.0		文献[14]
		MX11	灯二段	5 455~5 486	90.02	0.03	0	0.05	1.29	7.65	0.94	0	-31.8	-26.7		-147	文献[15]
	GS	GS9	灯二段	5 504~5 871	91.40	0.04	0	0.05	2.00	5.65	0.85	0.01	-32.0	-27.5		-152	
		GS9	灯四段	5 090~5 188	90.41	0.04	0	0.03	0.85	7.77	0.88	0	-33.1	-28.5		-134	文献[15]
	GS	GS6	灯四段	4 958~5 210	90.93	0.04	0.01	0.03	0.09	7.91	1.00	0	-32.6	-28.8		-137	文献[15]
		GS3	灯二段	5 799~5 810	86.62	0.03	0	0.11	4.56	7.05	0	0	-32.6	-28.0		-149	文献[17]
	GS	GS18	灯四段	5 150	92.15	0.04	0	0.03	1.10	6.04	0.60	0.04	-32.8	-29.6		-144	
		GS122	灯四段	5 556~6 579	90.59	0.04	0	0.02	0.30	8.45	0.59	0.01	-32.5	-26.7	0.4	-134	
	GS	GS1	灯四段	4 956~5 130	82.65	0.04	0	0.04	2.12	14.19	0.85	0	-32.3	-28.7			文献[14]
裂陷西侧	W	W70	灯四段	3 064~3 170	85.95	0.09	0	0.36	8.53	4.03	1.00	0	-32.4		-2.5		文献[14]
		W30	灯四段	2 844~2 950	86.16	0.26	0	0.30	8.15	4.13	0.91	0.09	-32.7	-32.0			文献[14]
	W	W100	灯四段	2 959~3 041	86.80	0.13	0	0.30	6.47	5.07	1.18	0.01	-32.5	-31.7	-11.6	-139	文献[6]
		W46	灯四段	2 880~2 963	86.26	0.14	0	0.27	7.44	4.55	1.30	0	-32.8	-34.8			文献[14]
	W	W39	灯四段	2 986	86.74	0.12	0	0.27	7.08	4.53	1.22	0	-32.4	-33.9	-14.6	-142	文献[6]
		W28	灯四段	2 905	88.30	0.08	0	0.27	7.12	3.30	0.90	0	-32.5	-31.6	-12.5		文献[14]
	W	W2	灯四段	2 836	85.07	0.11	0	0.25	8.33	4.66	1.31	0	-32.5	-31.0	-11.2	-147	文献[6]
		W12	灯四段	3 005	85.07	0.11	0	0.25	8.33	4.66	1.31	0	-32.5	-31.0	-11.2		文献[14]
	W	W27	灯四段	2 851~2 995	86.23	0.12	0	0.23	7.12	4.94	1.30	0.01	-32.0	-31.2			文献[14]
		大探1井	灯二段	6 265~6 309	92.40	0.04	0	0.04	2.34	5.12	0.05	0.01	-31.2	-29.4		-154	
大探1井区	大探1井	大探1井	灯二段	6 265~6 309	91.98	0.06	0	0.11	2.17	5.62	0.05	0.01	-31.2	-29.4	-0.6	-154	
		大探1井	灯四段	6 040~6 110	91.92	0.06	0	0.11	2.13	5.73	0.04	0.01	-31.1	-28.7	-0.9	-143	
	大探1井	大探1井	灯四段	6 040~6 110	92.57	0.04	0	0.11	2.16	5.07	0.05	0	-31.3	-29.2	-0.5	-142	
		大探1井	灯四段	6 040~6 110	92.77	0.04	0	0.11	2.15	4.88	0.05	0	-31.3	-28.9	-0.6	-148	
	大探1井	大探1井	灯四段	6 040~6 110	92.92	0.03	0	0.11	2.14	4.75	0.05	0	-31.5	-29.1	-0.7	-143	
		大探1井	灯四段	6 040~6 110	92.15	0.05	0	0.11	2.11	5.52	0.06	0	-31.5	-29.1	-1.1	-146	
	大探1井	大探1井	灯四段	6 040~6 110	92.02	0.04	0	0.11	2.18	5.59	0.05	0.01	-31.6	-29.3	-0.5	-141	

2.1 天然气气体组成

2.1.1 烃类气体组成

裂陷西侧大探1井灯影组天然气CH₄含量最高,威远地区和北斜坡灯影组天然气CH₄含量相对较低;威远地区天然气C₂H₆含量最高。整体上,裂陷槽两侧

灯影组天然气均为典型干气(见表2)。

CH₄含量:裂陷东侧天然气CH₄含量变化较大,64.16%~96.21%。北斜坡天然气CH₄含量为64.16%~94.94%,平均值为84.09%;高—磨地区CH₄含量平均值比北斜坡略高,为90.38%。裂陷西侧威远地区CH₄

表 2 德阳—安岳裂陷槽东、西两侧灯影组天然气组分含量表

区域位置	研究区	样本数	CH ₄ 含量/%	C ₂ H ₆ 含量/%	N ₂ 含量/%	He 含量/%	CO ₂ 含量/%	H ₂ S 含量/%	H ₂ 含量/%	干燥系数
裂陷东侧	北斜坡	41	64.16~94.94 84.09	0~0.27 0.05	0.08~31.85 2.48	0.00~0.38 0.04	0.07~34.05 9.78	0~20.47 3.56	0~0.58 0.08	平均值 大于 0.99
	高—磨地区	157	66.42~96.21 90.38	0.01~0.12 0.04	0.02~24.95 1.43	0.01~0.18 0.04	0.09~26.27 7.07	0~3.19 1.07	0~0.68 0.06	
裂陷西侧	威远地区	77	83.23~89.82 86.35	0.02~0.26 0.12	4.27~10.30 7.51	0.14~0.38 0.27	3.30~6.46 4.62	0.40~1.53 1.08	0~0.16 0.01	大于 0.99 小于 0.01
	大探 1 井区	9	91.92~92.92 92.32	0.03~0.08 0.05	2.04~2.34 2.16	0.04~0.11 0.10	4.75~5.73 5.32	0.04~0.06 0.05	平均值 小于 0.01	

注：分子为数值范围，分母为平均值

含量为 83.23%~89.82%，平均值为 86.35%；大探 1 井 CH₄ 含量平均值为 92.32%（见表 2）。

C₂H₆ 含量：裂陷东侧北斜坡天然气 C₂H₆ 含量平均值为 0.05%，与高—磨地区相当。裂陷西侧威远地区灯影组天然气 C₂H₆ 含量最高，平均值为 0.12%，大探 1 井 C₂H₆ 含量平均值为 0.05%（见表 2）。

2.1.2 非烃气体组成

裂陷槽东、西两侧灯影组 CO₂ 含量平均值均超过 4%；而 H₂ 含量普遍较低，平均不足 0.1%（见表 2）。裂陷东侧 CO₂ 和 H₂S 的含量比裂陷西侧高；裂陷西侧表现为高 He 的特征，He 的平均含量大于 0.1%；威远地区 N₂ 含量明显较高。

He、N₂ 含量：裂陷西侧 He 平均含量均超过 0.1%，皆为富氦天然气藏^[19]，且威远地区 He 含量最高，平均含量为 0.27%。威远地区还具有高 N₂ 含量的特征，平均值为 7.51%，而大探 1 井 N₂ 含量较低。相比裂陷西侧，东侧 He 含量明显偏低，平均含量小于 0.05%；北斜坡 N₂ 含量稍高于高—磨地区（见表 2）。

CO₂、H₂S 含量：裂陷东侧北斜坡天然气 H₂S 含量和 CO₂ 含量均最高。裂陷西侧威远地区 CO₂ 最低，其 H₂S 含量与高—磨地区相当；大探 1 井 CO₂ 含量略高于威远地区，但 H₂S 含量较低。整体上裂陷东侧灯影组天然气的 CO₂ 和 H₂S 含量高于裂陷西侧（见表 2）。

2.2 天然气同位素组成

裂陷西侧 δ¹³C₁ 较裂陷东侧稍重，大探 1 井 δ¹³C₁ 最重，而裂陷东侧 δ¹³C₂（平均值大于 -29‰）较裂陷西侧明显偏重。裂陷西侧 δ²H_{CH4} 较东侧稍轻。

裂陷东侧灯影组天然气 δ¹³C₁ 分布相似，平均值为 -32.9‰；裂陷西侧大探 1 井天然气 δ¹³C₁ 最重，平均值为 -31.3‰，威远地区的 δ¹³C₁ 组成明显重于裂陷东侧超半数的样本，平均值为 -32.5‰。裂陷东侧高—磨地区及北斜坡灯影组天然气 δ¹³C₂ 平均值分别为 -28.2‰、-28.1‰；而裂陷西侧大探 1 井 δ¹³C₂ 平均值为 -29.1‰，威远地区 δ¹³C₂ 平均值为 -32.1‰，较裂陷东侧偏轻。裂陷东侧及大探 1 井具有明显的正碳同位素组成序列

（δ¹³C₁ 小于 δ¹³C₂，未倒转），而威远部分气样的碳同位素组成发生倒转（δ¹³C₁ 大于 δ¹³C₂）（见表 1）。

裂陷东侧北斜坡天然气 δ²H_{CH4} 值为 -162‰~-121‰，平均值为 -141‰，高—磨地区 δ²H_{CH4} 平均值为 -142‰；相较裂陷东侧，裂陷西侧大探 1 井 δ²H_{CH4} 偏轻，平均值为 -146‰，威远地区天然气 δ²H_{CH4} 平均值为 -143‰。

2.3 天然气成熟度

天然气 δ¹³C₁ 值可用于计算等效镜质体反射率（R_{oe}）来反映其成熟度，但不同计算方法得到的结果差异很大^[20]。前人多采用 δ¹³C₁-R_{oe} 法^[20] 来评价四川盆地寒武系龙王庙组天然气的成熟度，效果较好。采用该方法计算得到的结果（见表 3）显示：裂陷槽东、西两侧灯影组天然气均为高—过成熟天然气（R_{oe} 平均值大于 2.0%），且大探 1 井的天然气成熟度最高。

表 3 裂陷槽东、西两侧灯影组天然气成熟度统计表

区域位置	研究区	R _{oe} /%	R _{oe} 平均值/%	样本数
裂陷东侧	北斜坡	1.84~3.48	2.45	76
	高—磨地区	1.98~2.44	2.44	143
裂陷西侧	威远地区	2.42~2.64	2.51	17
	大探 1 井区	2.73~2.91	2.81	12

2.4 天然气成因类型

天然气组分及同位素组成特征能较好地指示其成因类型。δ¹³C₁ 值可区分有机成因和无机成因的天然气，一般认为，δ¹³C₁ 值小于 -30‰ 为有机成因；而 δ¹³C₂ 值可区分油型气和煤型气，且常用 δ¹³C₂ 值为 -28‰ 作为二者的界限^[21]。然而，在高—过成熟阶段，深埋环境的多种异常热蚀变作用会差异改造天然气，导致其碳同位素值偏重^[7]。裂陷西侧灯影组天然气 δ¹³C₂ 均符合油型气特征，而高—磨地区和北斜坡多出现 δ¹³C₂ 值大于 -28‰ 的现象（见表 1），反映出煤型气特征，需进一步结合成因判识图版进行分析^[21~22]（见图 2）。裂陷槽东、西两侧灯影组天然气均为油型裂解气（见图 2a）且为原油裂解气（见图 2b），即原油的二次裂解，现今处于高—过成熟阶段（R_{oe} 值大于 2.0%）。

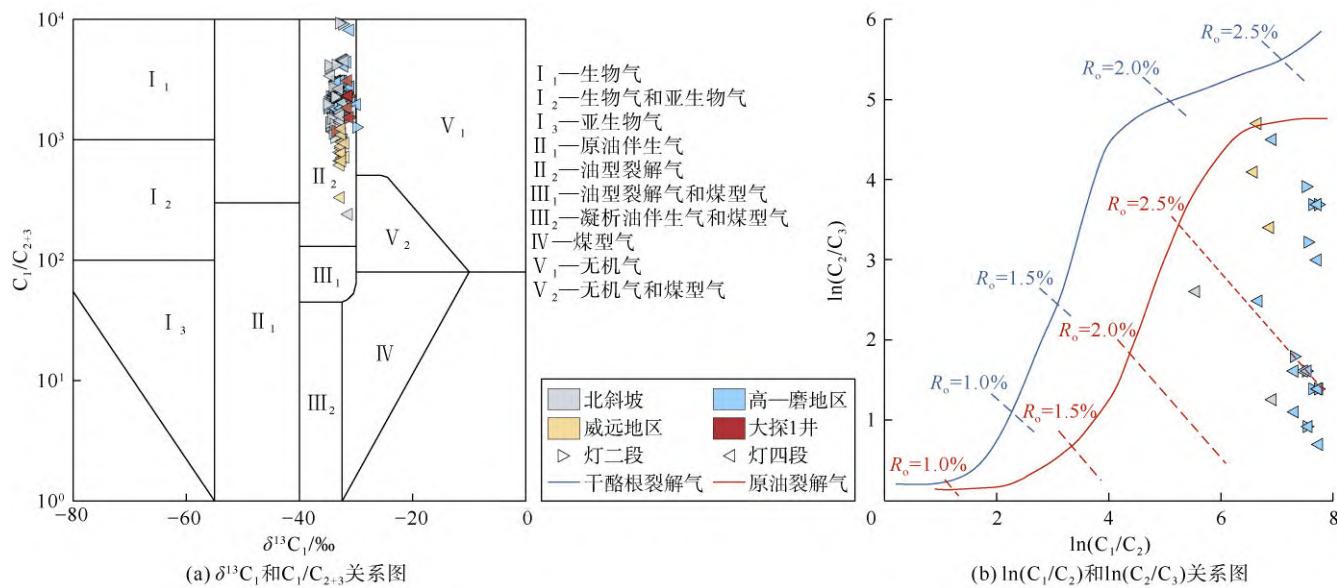


图2 灯影组天然气成因判别图(图版据文献[21-22])

3 德阳—安岳裂陷槽东、西两侧灯影组天然气特征差异成因

3.1 灯影组天然气组分含量差异成因

3.1.1 He 和 N₂ 含量差异成因

天然气的 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 值与空气的 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 值显示, 裂陷槽东、西两侧灯影组天然气 He 均为壳源成因^[13, 19], 即由地壳中高放射性岩石(如花岗岩、泥质岩和致密砂岩等)的 U、Th 衰变产生。天然气中 N₂ 可由有机质的热氨化作用和花岗岩热变质产生^[23]。由于 N₂ 和 He 均可来源于富含 U、Th 的泥质烃源岩及花岗岩, 二者常同源伴生、呈现出明显的正相关关系(见图 3)。

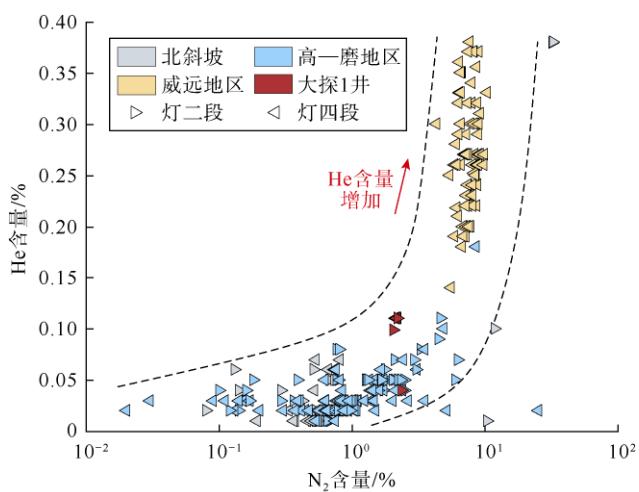


图3 灯影组天然气 He 含量与 N₂ 含量的关系

裂陷东侧高一磨地区及北斜坡灯影组天然气 He 主要来源于烃源岩^[5, 12], 含量低(见图 3), 平均值为

0.04%。由于裂陷东侧靠近生烃中心, 烃源岩生气强度为 $(40 \sim 200) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ^[2], 生成的大量 CH₄ 对 He 富集会起到一定的稀释作用。裂陷东侧灯影组天然气中的 N₂ 主要是烃源岩中的有机质经热氨化作用形成^[5, 12], 含量较威远灯影组气藏低(见图 3)。

裂陷西侧大探 1 井和威远地区灯影组天然气 He 含量高, 平均值大于 0.10%。大探 1 井区筇竹寺组烃源岩厚度相对较薄, 但基底发育富 U、Th 花岗岩, 广泛发育的走滑断裂沟通了氦源岩与灯影组气藏^[19], 促进了 He 富集。威远地区除了发育筇竹寺组烃源岩外, 深部还发育前震旦系古老花岗岩, 二者不仅是重要的氦源岩, 也是 N₂ 的重要来源^[23]。喜马拉雅晚期, 威远地区发生了强烈的构造隆升作用, He 与 N₂ 加速从地层水中脱溶, 并沿深大断裂向上运移、富集于灯影组气藏^[23]。这种成藏模式使得威远地区灯影组气藏 He 和 N₂ 含量较其他地区灯影组气藏明显偏高(见图 3)。

3.1.2 CO₂ 和 H₂S 含量差异成因

震旦系灯影组天然气藏中可见 CO₂ 和 H₂S(见表 1)。硫酸盐热化学还原反应(TSR)是唯一能够导致天然气藏中 H₂S 浓度大于 10% 的因素, 常用天然气酸性指数($I, \text{H}_2\text{S}/(\text{H}_2\text{S}+\text{C}_n\text{H}_{2n+2})$)来表征 TSR 的反应程度^[24]。当 I 值大于 0.01 时, 表明 TSR 反应已经发生, 而当 I 值大于 0.10 时, 则说明气藏受到了强烈的 TSR 改造。裂陷西侧大探 1 井灯影组 I 值远低于 0.01, 基本未发生 TSR 反应, 少量的 H₂S 可能来源于干酪根或储层含硫矿物的热裂解。威远地区灯影组气藏的酸性指数约在 0.01 左右(见图 4a), 虽发生了 TSR 反应, 但强度不大。相比西侧, 裂陷东侧灯影组气藏普遍受到了较

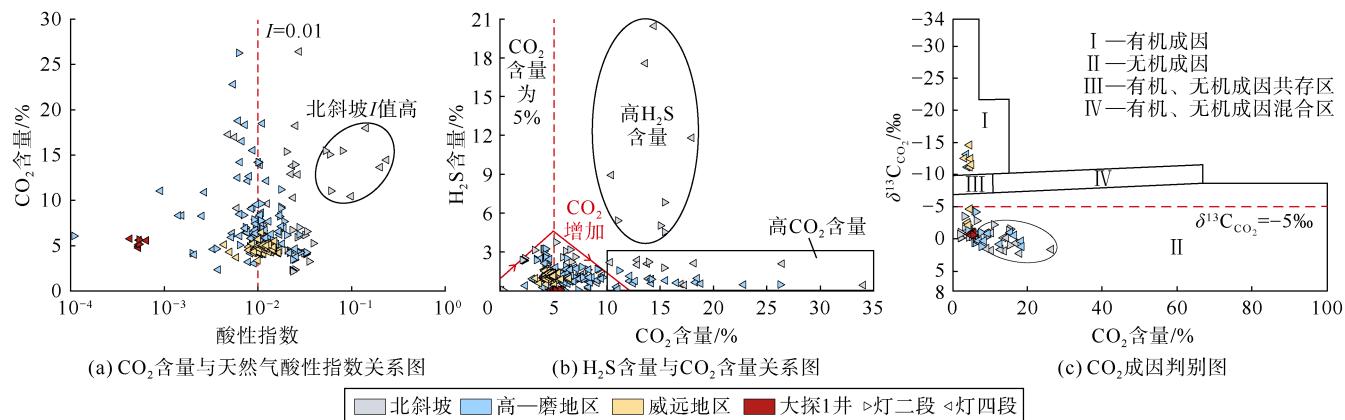


图 4 裂陷槽东、西两侧灯影组天然气非烃组分分析图 (图 c 图版据文献[21])

强的 TSR 改造：高—磨地区近一半气样的酸性指数大于 0.01，而北斜坡部分样品酸性指数甚至超过 0.1，且气藏中 H_2S 含量超过 10%（见图 4a、图 4b）。

裂陷东侧灯影组天然气 CO_2 含量普遍偏高，平均值大于 5%，部分甚至大于 10%（见图 4b）。该现象可能源于以下两方面因素：① TSR-H₂S 累积效应。TSR 反应会同时产生 CO_2 和 H_2S 。在反应初期， CO_2 含量随着 H_2S 含量的增加而增加，但在 TSR 反应后期，积累的 H_2S 逐渐溶解到地层水中，增加了地层水酸性，进而溶蚀碳酸盐岩储层、释放 CO_2 ，导致 CO_2 含量增加、而 H_2S 含量减少并在储层形成含硫矿物^[15, 25]（见图 4b）。② 碳酸盐岩储层酸化作业会导致 CO_2 含量增高。一般认为，气藏中 CO_2 含量大于 8% 多是酸化作业导致的^[12]，如 GS1 井灯四段的 CO_2 含量达到了 14.19%（见表 1）。

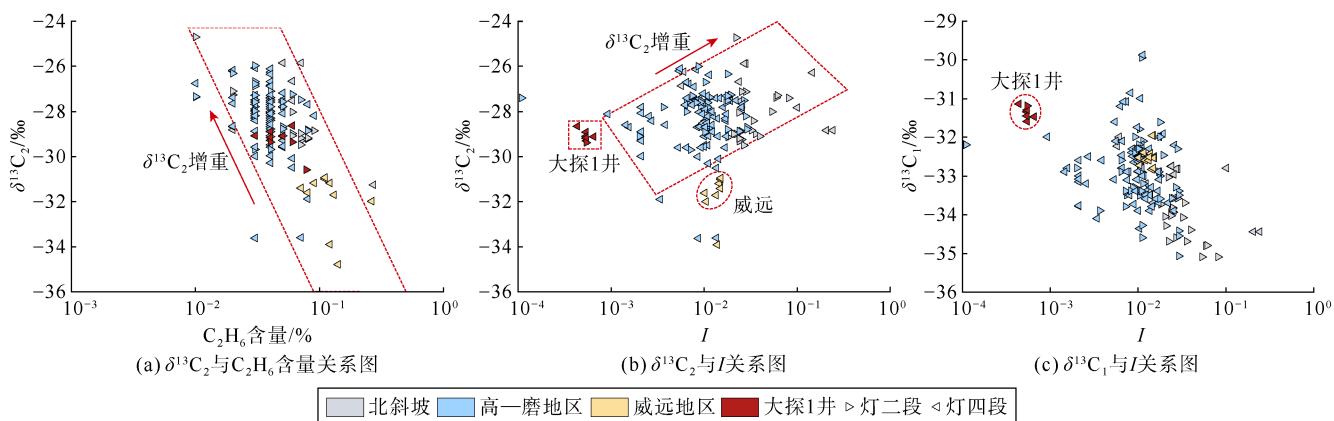
此外，碳同位素组成也能指示 CO_2 成因^[21]（见图 4c）。一般认为，当 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值小于 -10‰ 时， CO_2 为有机成因^[21]；而当 $-4\text{‰} < \delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} < 4\text{‰}$ 时，则为无机成因，源自于碳酸盐岩溶蚀或热变质^[26]。威远地区灯影组气藏发生了 TSR 反应。在 TSR 反应中， SO_4^{2-} 优先与贫

^{13}C 的烃类发生反应产生贫 ^{13}C 的 CO_2 ，导致 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 相对轻，故威远地区天然气 CO_2 表现为有机成因（见图 4c）。

裂陷东侧高—磨地区及北斜坡灯影组天然气的 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值分别为 -1.3‰ 和 -0.9‰ ，整体表现为无机成因（见图 4c）。与裂陷西侧不一样，裂陷东侧灯影组气藏受 TSR 改造强烈，在 TSR-H₂S 的累积效应及酸化作业的双重影响下，碳酸盐岩储层发生溶蚀，导致天然气中 CO_2 含量明显增高且 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 偏重，表现为无机成因。裂陷西侧大探 1 井灯影组气藏基本未发生 TSR 反应， CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 -1.11‰ ，为无机成因（见图 4c）。

3.2 天然气碳同位素组成差异成因

TSR 反应会优先消耗富 ^{12}C 的烃类，造成天然气碳同位素组成偏重^[24]；同时，还会优先消耗高碳数（ C_{2+} ）烃类。在裂陷东侧高—磨地区及北斜坡、裂陷西侧威远地区，随着 TSR 反应程度的增加， C_2H_6 优先被消耗、含量逐渐降低（见图 5a），且 C_2H_6 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值逐渐增大（见图 5b）。由于裂陷东侧灯影组天然气受 TSR 影响更为显著，其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{C}_2}$ 较裂陷西侧偏重。

图 5 灯影组天然气碳同位素组成与 C_2H_6 含量、I 的相关关系图

一般认为,当 I 值大于0.10时,TSR反应开始消耗 CH_4 ^[24];而裂陷槽东、西两侧灯影组气藏 I 值普遍小于0.10,且 I 值增大时, $\delta^{13}\text{C}_1$ 并没有增重,二者呈现一定的负相关关系,表明灯影组天然气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 基本未受TSR改造(见图5c)。

威远地区灯影组天然气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 分布集中,比裂陷东侧大半数的灯影组气样 $\delta^{13}\text{C}_1$ 重2‰~3‰(见图5c)。威远气田灯影组天然气脱气成藏^[27]模式形成的天然气 CH_4 的 $\delta^{13}\text{C}$ 偏重:相较于 $^{12}\text{CH}_4$, $^{13}\text{CH}_4$ 更容易溶解于地层水中^[28],产生分馏效应;在晚期大规模构造抬升过程中, $^{13}\text{CH}_4$ 脱溶^[27],导致灯影组天然气 CH_4 的 $\delta^{13}\text{C}$ 偏重,部分气样天然气碳同位素组成发生倒转。

裂陷东侧灯影组埋深大,储层孔隙内可见含硫矿物^[4,7]。盆地深部热液活动强烈^[29],带来了丰富的 SO_4^{2-} ,提供了TSR反应所需的硫源;埋深环境(埋深大于5 000 m)所带来的高温进一步促进了TSR反应。因此,天然气的 $\delta^{13}\text{C}_2$ 值及 H_2S 含量随埋深增加而升高,尤以北斜坡地区最为显著(见图6)。威远地区灯影组现今埋深仅在3 000 m左右,地温未达到TSR反应条件;但在喜马拉雅运动前,其最大埋深曾大于6 000 m、地温高于200 °C^[30]。前人^[30]基于威远灯影组天然气中 H_2S 的硫同位素明确了其为TSR成因,但由于深埋时间相对较短,TSR改造受限, $\delta^{13}\text{C}_2$ 相对裂陷东侧灯影组天然气偏轻。

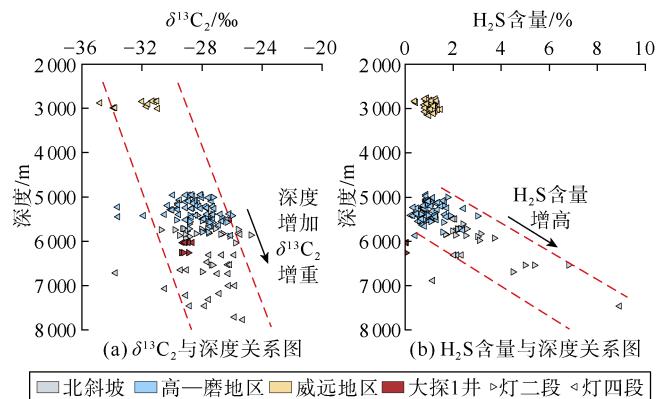


图6 裂陷槽东、西两侧灯影组 $\delta^{13}\text{C}_2$ 值与 H_2S 含量随深度变化图

3.3 天然气氢同位素组成差异成因

天然气 CH_4 的 $\delta^2\text{H}$ 受烃源岩的成熟度及其沉积期的古水介质盐度等控制^[5,17]。一般来说,随着成熟度增高和古水介质盐度增大, $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$ 逐渐变重^[5]。由于灯影组天然气为高—过成熟天然气,干燥系数极高且源岩成熟度差异小, $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$ 受成熟度控制的影响较弱。

相较于成熟度,烃源岩沉积期的古水介质盐度是控制灯影组天然气 $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$ 更为关键的因素。前人基于

黏土矿物中硼、钾元素含量确定了四川盆地震旦系灯三段、陡山沱组和寒武系筇竹寺组沉积期古水介质的盐度:筇竹寺组古水介质盐度最高,灯三段及陡山沱组盐度相对较低^[31]。因此,筇竹寺组烃源岩贡献越大,天然气 $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$ 越重。例如,JT1井寒武系沧浪铺组天然气基本由下部筇竹寺组烃源岩供烃,其天然气 $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$ 相对较重,达到-134‰;前人常把该值作为源于筇竹寺组烃源岩的天然气 CH_4 的 $\delta^2\text{H}$ 代表值^[5]。

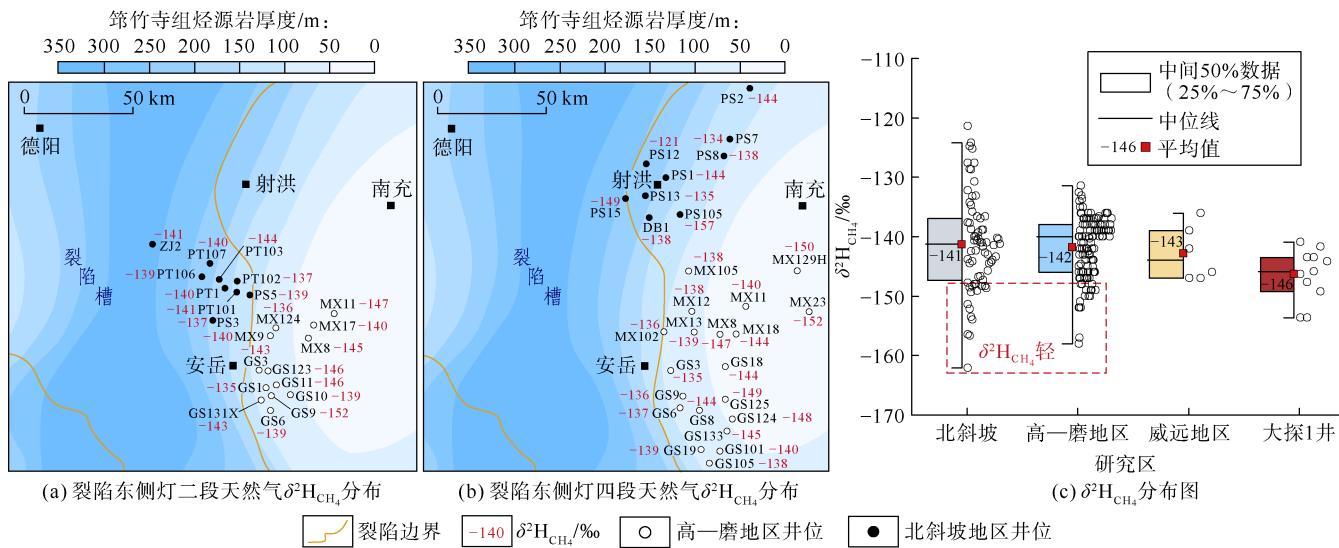
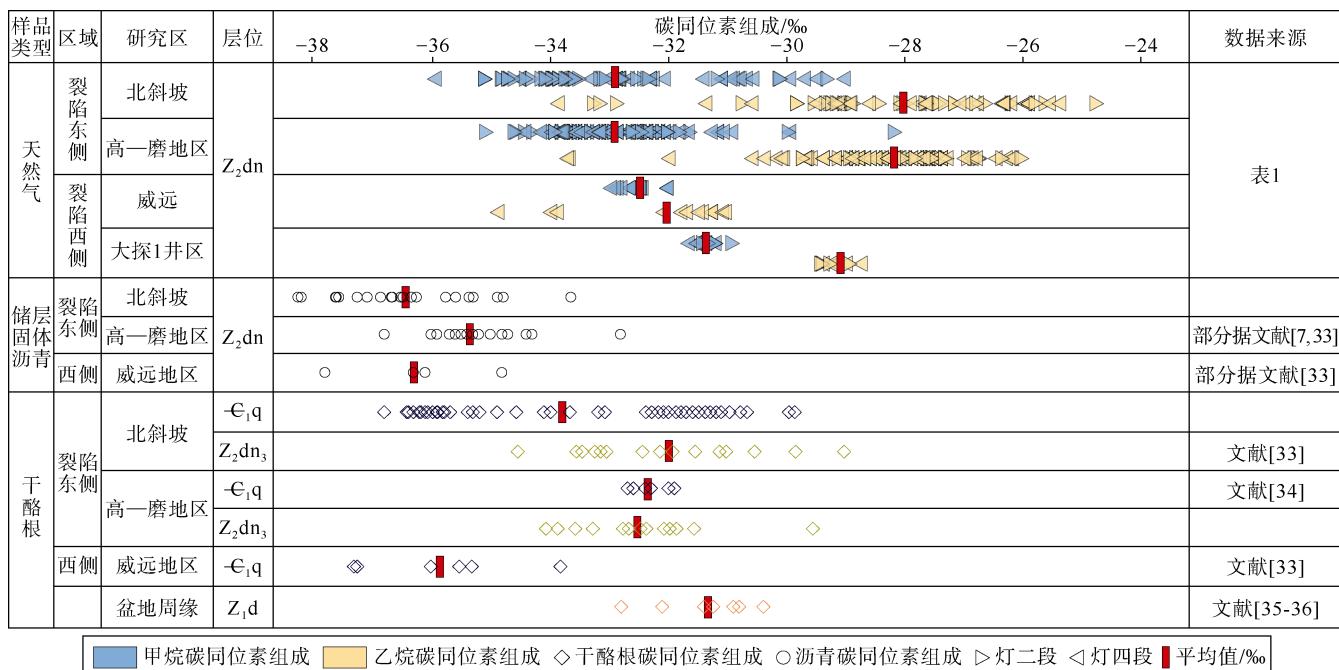
纵向上,天然气 $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$ 的差异可以反映不同源岩的贡献度。如GS3、GS6、GS9和MX11等井(见图7a、图7b)灯四段天然气 $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$ 比灯二段重,这可能是由于灯四段天然气中筇竹寺组的贡献大于灯三段造成的。横向,越靠近裂陷槽,筇竹寺组烃源岩厚度越大,生烃强度越大,筇竹寺组烃源岩相对贡献度越大, $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$ 越重。以裂陷东侧高—磨地区灯四段为例,靠近裂陷槽、筇竹寺组烃源岩贡献大的区域,灯影组天然气 $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$ 普遍大于-140‰,如GS6、GS9、MX102和GS3等井(见图7b);而远离裂陷槽的区域天然气 $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$ 整体偏轻、普遍小于-140‰,如GS125、GS18、MX8和MX18等井(见图7b)。总体上,向台内方向 $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$ 逐渐变轻;如MX23井,灯四段的 $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$ 值仅为-152‰。值得注意的是,台缘带的部分井天然气 $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$ 偏低,可能指示灯三段烃源岩贡献强于筇竹寺组;如PS15井虽然在台缘带,但其灯四段天然气 $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$ 偏轻,仅为-149‰(见图7b)。

相较裂陷东侧,裂陷西侧大探1井灯影组天然气 $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$ 较轻(见图7c),为-154‰~-141‰,这是由于大探1井远离裂陷槽、筇竹寺组烃源岩厚度相对薄^[3],下伏灯三段和陡山沱组的贡献相对较大导致的。

3.4 天然气、储层固体沥青和干酪根的碳同位素组成差异成因

灯影组天然气为原油裂解气,储层中除了天然气外,还有古油藏裂解的重要产物——储层固体沥青^[32]。裂陷西侧威远地区灯影组气藏受TSR影响相对较小,其储层固体沥青 $\delta^{13}\text{C}$ 值(平均值为-36.3‰)与筇竹寺组干酪根 $\delta^{13}\text{C}$ 值(平均值为-36.1‰)十分接近(见图8),指示筇竹寺组烃源岩的主要贡献^[4]。

大探1井灯影组气藏基本未受TSR作用改造,其 $\delta^{13}\text{C}_2$ 可较好地反映母源信息。然而,大探1井灯影组天然气 $\delta^{13}\text{C}_2$ (-29.1‰)比裂陷槽西侧筇竹寺组烃源岩干酪根 $\delta^{13}\text{C}$ (-36.1‰)重的多,指示除筇竹寺组外,还有其他烃源岩的重要贡献。大探1井钻遇的筇竹寺组、灯三段烃源岩厚度均相对较薄。前人在裂陷西侧

图 7 灯影组天然气中 CH_4 的 $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$ 分布图 8 四川盆地灯影组天然气-储层固体沥青-源岩干酪根碳同位素组成分布特征 (括号内为样品数, 部分储层固体沥青及烃源岩干酪根碳同位素组成据文献[7, 33-36]; Z₂dn₃—灯三段)

先锋剖面发现了陡山沱组烃源岩^[3], 其干酪根 $\delta^{13}\text{C}$ ($-31.3\text{\textperthousand}$) 与大探 1 井灯影组天然气 $\delta^{13}\text{C}_2$ 十分接近 (见图 8)。此外, 天然气 $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$ 分析同样验证了下伏灯三段和陡山沱组的重要贡献。因此, 大探 1 井灯影组天然气除有筇竹寺组烃源岩的贡献外, 还有灯三段及陡山沱组烃源岩的贡献。

一般情况下, 烃类热成熟演化过程中, 烃源岩干酪根及其衍生物的碳同位素组成会遵循储层固体沥青、干酪根、原油、烷烃气依次变轻的规律。因此, 在同源的情况下, 原油裂解产生的固体沥青的碳同位素值比干酪根碳同位素重 $1\text{\textperthousand} \sim 2\text{\textperthousand}$ ^[37]。然而, 裂陷东

侧高一磨地区及北斜坡灯影组储层固体沥青 $\delta^{13}\text{C}$ 明显小于筇竹寺组烃源岩干酪根及灯影组天然气 C_2H_6 的 $\delta^{13}\text{C}$ (见图 8), 与上述分馏规律矛盾。

首先, 裂陷东侧高一磨地区及北斜坡灯影组天然气 $\delta^{13}\text{C}_2$ 受 TSR 作用影响而偏重; 同时, TSR 反应生成的 H_2S 会继续消耗富 ^{12}C 的 C_2H_6 形成富 ^{12}C 的乙硫醇。乙硫醇通过芳构化和聚合作用进一步融入储层固体沥青之中^[8], 导致储层固体沥青 $\delta^{13}\text{C}$ 逐渐变轻, 轻于烃源岩干酪根及天然气 C_2H_6 (见图 8)。

基于上述认识, 在深埋环境进行气源对比需考虑 TSR 等因素带来的影响。储层固体沥青和天然气碳同

位素组成不再是可靠的参数,需借助更多的手段,如微量元素和稀土元素,来建立储层固体沥青与源之间的对应关系来完成气源对比——裂陷东侧高—磨地区及北斜坡灯影组气藏具有双源(筇竹寺组+灯三段)供烃特征,但二者贡献比还有待更深入的研究。

4 结论

德阳—安岳裂陷槽东西两侧灯影组天然气均以原油裂解气为主,为高—过成熟天然气(干气),裂陷槽两侧天然气的地球化学特征(组分、同位素)差异显著。地球化学特征差异主要受混源、深部无机气源改造、TSR改造程度及烃源岩沉积期的古水介质盐度等因素控制。

裂陷东侧高—磨地区及北斜坡灯影组天然气中的He主要来源于烃源岩,由于筇竹寺组烃源岩生烃强度大导致He富集受到限制,含量低。此外,裂陷东侧灯影组气藏普遍受TSR改造,导致天然气中H₂S、CO₂含量高且δ¹³C₂偏重。西侧威远地区灯影组气藏受TSR改造不及裂陷东侧强烈,大探1井灯影组气藏基本未发生TSR改造。

受控于裂陷西侧富U、Th基底花岗岩广泛发育且断裂垂向输导高效,大探1井区灯影组天然气中的He含量高(平均值大于0.10%),威远地区的He(平均值为0.27%)、N₂(平均值为7.51%)富集。威远地区灯影组天然气δ¹³C₁偏重与其水溶气析出成藏模式有关,造成部分天然气碳同位素组成发生倒转。

裂陷槽两侧灯影组天然气δ²H_{CH₄}差异主要受烃源岩古水介质盐度的控制。此外,大探1井灯影组天然气除有筇竹寺组烃源岩贡献外,还有灯三段及陡山沱组烃源岩的贡献;威远地区灯影组天然气则主要来源于筇竹寺组。裂陷东侧高—磨地区及北斜坡灯影组气藏具有双源(筇竹寺组+灯三段)供烃特征。

参考文献:

- [1] 邓宾, 刘树根, 姚根顺, 等. 四川超级含气盆地古生界大中型气田分布规律及其主控因素[J]. 天然气工业, 2024, 44(7): 54-76.
DENG Bin, LIU Shugen, YAO Genshun, et al. Distribution pattern and main controlling factors of Paleozoic giant- and medium-sized gas fields of the Sichuan super gas basin in Southwest China[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(7): 54-76.
- [2] 杨雨, 文龙, 宋泽章, 等. 川中古隆起北部蓬莱气区多层系天然气勘探突破与潜力[J]. 石油学报, 2022, 43(10): 1351-1368.
YANG Yu, WEN Long, SONG Zehang, et al. Breakthrough and potential of natural gas exploration in multi-layer system of Penglai gas area in the north of central Sichuan paleo-uplift[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(10): 1351-1368.
- [3] 文龙, 谢继容, 张本健, 等. 四川盆地德阳—安岳裂陷西侧大探1井震旦系灯影组天然气勘探重大突破及意义[J]. 天然气工业, 2023, 43(11): 7-18.
WEN Long, XIE Jirong, ZHANG Benjian, et al. Well Datan 1 in west side of Deyang-Anyue rift, Sichuan Basin: Great breakthrough in natural gas exploration in Sinian Dengying Formation and its significance[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(11): 7-18.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 李志生, 李谨, 王东良, 等. 四川盆地含硫化氢气田天然气地球化学特征[J]. 石油学报, 2013, 34(增刊1): 84-91.
LI Zhisheng, LI Jin, WANG Dongliang, et al. Geochemical characteristics of natural gas in H₂S-bearing gas fields in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(S1): 84-91.
- [7] 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(7): 1754-1766.
SHUAI Yanhua, ZHANG Shuichang, HU Guoyi, et al. Thermochemical sulphate reduction of Sinian and Cambrian natural gases in the Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin, and its enlightenment for gas sources[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(7): 1754-1766.
- [8] 朱联强, 柳广弟, 宋泽章, 等. 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[J]. 石油科学通报, 2021, 6(3): 344-355.
ZHU Lianqiang, LIU Guangdi, SONG Zehang, et al. 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[J]. Petroleum Science Bulletin, 2021, 6(3): 344-355.
- [9] 周进高, 沈安江, 张建勇, 等. 四川盆地德阳—安岳台内裂陷与震旦系勘探方向[J]. 海相油气地质, 2018, 23(2): 1-9.
ZHOU Jingao, SHEN Anjiang, ZHANG Jianyong, et al. Deyang-Anyue interplatform rift in Sichuan Basin and its direction of exploration in Sinian[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2018, 23(2): 1-9.
- [10] 黎荣, 王永骁, 汪泽成, 等. 四川盆地晚震旦世—早寒武世德阳—安岳裂陷槽南段地质特征[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(2): 285-296.
LI Rong, WANG Yongxiao, WANG Zecheng, et al. Geological characteristics of the southern segment of the Late Sinian-Early Cambrian Deyang-Anyue rift trough in Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(2): 285-296.
- [11] 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.
- [12] 赵文智, 谢增业, 王晓梅, 等. 四川盆地震旦系气源特征与原生气系统有效性[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(6): 1089-1099.
ZHAO Wenzhi, XIE Zengye, WANG Xiaomei, et al. Sinian gas sources and effectiveness of primary gas-bearing system in Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(6): 1089-1099.
- [13] 魏国齐, 谢增业, 杨雨, 等. 四川盆地中部北斜坡震旦系—寒武系大型岩性气藏形成条件[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(5): 835-846.
WEI Guoqi, XIE Zengye, YANG Yu, et al. Formation conditions of Sinian-Cambrian large lithologic gas reservoirs in the north slope area of central Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(5): 835-846.
- [14] ZHU G Y, WANG T S, XIE Z Y, et al. Giant gas discovery in the Precambrian deeply buried reservoirs in the Sichuan Basin, China: Implications for gas exploration in old cratonic basins[J].

- Precambrian Research, 2015, 262: 45-66.
- [15] ZHENG D Y, PANG X Q, LUO B, et al. Geochemical characteristics, genetic types, and source of natural gas in the Sinian Dengying Formation, Sichuan Basin, China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 199: 108341.
- [16] 王顺玉, 李兴甫. 威远和资阳震旦系天然气地球化学特征与含气系统研究[J]. 天然气地球科学, 1999, 10(3/4): 63-69.
- WANG Shunyu, LI Xingfu. Geochemical characteristics and gas-bearing system of Sinian natural gas in Weiyuan and Ziyang areas[J]. Natural Gas Geoscience, 1999, 10(3/4): 63-69.
- [17] 魏国齐, 谢增业, 白桂林, 等. 四川盆地震旦系一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 Guolin, 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.
- [18] ZOU C N, WEI G Q, XU C C, et al. Geochemistry of the Sinian-Cambrian gas system in the Sichuan Basin, China[J]. Organic Geochemistry, 2014, 74: 13-21.
- [19] 刘祥柏, 陶士振, 杨岱林, 等. 四川盆地大探1井富氦天然气勘探突破及成藏主控因素[J/OL]. 地学前缘: 1-22[2025-01-02]. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2024.10.17>.
- LIU Xiangbai, TAO Shizhen, YANG Dailin, et al. Breakthrough in exploration of helium rich natural gas in Well Datan 1 of Sichuan Basin and main control factors for reservoir formation[J/OL]. Earth Science Frontiers: 1-22[2025-01-02]. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2024.10.17>.
- [20] 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(4): 560-581.
- CHEN Jianping, WANG Xulong, CHEN Jianfa, et al. New equation to decipher the relationship between carbon isotopic composition of methane and maturity of gas source rocks[J]. SCIENCE CHINA Earth Sciences, 2021, 64(3): 470-493.
- [21] 戴金星. 天然气碳氢同位素特征和各类天然气鉴别[J]. 天然气地球科学, 1993, 4(2/3): 1-40.
- DAI Jinxing. Carbon and hydrogen isotopic characteristics and identification of various natural gases[J]. Natural Gas Geoscience, 1993, 4(2/3): 1-40.
- [22] 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.
- [23] 秦胜飞, 周国晓, 李济远, 等. 氦气与氮气富集耦合作用及其重要意义[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(11): 1981-1992.
- QIN Shengfei, ZHOU Guoxiao, LI Jiyuan, et al. The coupling effect of helium and nitrogen enrichment and its significance[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(11): 1981-1992.
- [24] LIU Q Y, WORDEN R H, JIN Z J, et al. TSR versus non-TSR processes and their impact on gas geochemistry and carbon stable isotopes in Carboniferous, Permian and Lower Triassic marine carbonate gas reservoirs in the Eastern Sichuan Basin, China[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2013, 100: 96-115.
- [25] SUN Y H, JIAO Y Q, WU L Q, et al. Relations of uranium enrichment and metal sulfides within the Shuanglong uranium deposit, southern Ordos Basin[J]. Journal of Earth Science, 2022, 33(2): 395-408.
- [26] 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(1): 68-75.
- LI Jin, LI Zhisheng, WANG Dongliang, et al. On-line detection of oxygen isotope of CO₂ in natural gases and its application[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(1): 68-75.
- [27] 秦胜飞, 周国晓, 李伟, 等. 四川盆地威远气田水溶气脱气成藏地球化学证据[J]. 天然气工业, 2016, 36(1): 43-51.
- QIN Shengfei, ZHOU Guoxiao, LI Wei, et al. Geochemical evidence of water-soluble gas accumulation in the Weiyuan Gas Field, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(1): 43-51.
- [28] 秦胜飞, 唐修义, 宋岩, 等. 煤层甲烷碳同位素分布特征及分馏机理[J]. 中国科学: 地球科学, 2006, 36(12): 1092-1097.
- QIN Shengfei, TANG Xiuyi, SONG Yan, et al. Distribution and fractionation mechanism of stable carbon isotope of coalbed methane[J]. SCIENCE CHINA Earth Sciences, 2006, 49(12): 1252-1258.
- [29] JIANG L, HU A P, OU Y L, et al. Diagenetic evolution and effects on reservoir development of the Dengying and Longwangmiao formations, central Sichuan Basin, southwestern China[J]. Petroleum Science, 2023, 20(6): 3379-3393.
- [30] 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 四川盆地威远气田硫化氢的成因及其证据[J]. 科学通报, 2006, 51(23): 2780-2788.
- ZHU Guangyou, ZHANG Shuichang, LIANG Yingbo, et al. The genesis of H₂S in the Weiyuan Gas Field, Sichuan Basin and its evidence[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(10): 1394-1404.
- [31] 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区的勘探潜力[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.
- [32] 宋泽章, 柳广弟, 罗冰, 等. 深层、超深层致密碳酸盐岩储层固态沥青测井评价: 以川中地区上震旦统灯四段为例[J]. 沉积学报, 2021, 39(1): 197-211.
- SONG Zechang, LIU Guangdi, LUO Bing, et al. Logging evaluation of solid bitumen in tight carbonate in deep-buried and ultra-deep-buried strata of the central Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(1): 197-211.
- [33] 高平. 川中地区震旦系沥青的成因及来源[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016: 72-86.
- GAO Ping. Genesis and origin of Sinian bitumen in central Sichuan Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2016: 72-86.
- [34] 王思航. 威远地区寒武系页岩储层特征及选区评价方法研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015: 15-21.
- WANG Sihang. Vying in Cambrian shale reservoir characteristics and selection evaluation method research[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015: 15-21.
- [35] JIN X D, PAN C C, YU S, et al. Organic geochemistry of marine source rocks and pyrobitumen-containing reservoir rocks of the Sichuan Basin and neighbouring areas, SW China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 56: 147-165.
- [36] 汪泽成, 刘静江, 姜华, 等. 中—上扬子地区震旦纪陡山沱组沉积岩相古地理及勘探意义[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(1): 39-51.
- WANG Zecheng, LIU Jingjiang, JIANG Hua, et al. Lithofacies paleogeography and exploration significance of Sinian Doushantuo depositional stage in the middle-upper Yangtze region, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(1): 39-51.
- [37] 刘文汇, 王杰, 腾格尔, 等. 中国南方海相层系天然气烃源新认识及其示踪体系[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 819-825.
- LIU Wenhui, WANG Jie, TENG Geer, et al. New knowledge of gas source rocks in the marine sequences of South China and relevant index system for tracing[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 819-825.

第一作者简介: 宋泽章 (1988-), 男, 福建宁德人, 博士, 中国石油大学(北京)教授, 博士生导师, 主要从事(超)深层油气成藏及非常规储层研究。地址: 北京市昌平区府学路18号, 中国石油大学(北京)地球科学学院, 邮政编码: 102249。E-mail: songzz@cup.edu.cn

通讯作者简介: 罗冰 (1982-), 男, 河南漯河人, 中国石油西南油气田公司高级工程师, 主要从事石油天然气地质研究及部署工作。地址: 四川省成都市武侯区天府大道北段12号, 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院, 邮政编码: 610051。E-mail: 1b2001@petrochina.com

收稿日期: 2024-05-04 修回日期: 2025-03-15

(编辑 谷江锐)