

塔里木盆地塔中隆起寒武系深层油气 地球化学特征及成因

史江龙^{1,2,3}, 李 剑^{2,3}, 李志生^{2,3}, 郝爱胜^{2,3}

(1. 中国科学院大学 渗流流体力学研究所, 河北 廊坊 065007;

2. 中国石油 勘探开发研究院 廊坊分院, 河北 廊坊 065007;

3. 中国石油天然气集团公司 天然气成藏与开发重点实验室, 河北 廊坊 065007)

摘要:塔中隆起寒武系碳酸盐岩储层油气资源丰富,然而由于复杂的构造地质背景,油气来源和天然气类型还存在较大争议。通过详细分析 ZS1 井、ZS1C 井和 ZS5 井寒武系不同层段中凝析油和天然气的组成、碳同位素等特征,并结合寒武系—下奥陶统与中、上奥陶统烃源岩地球化学特征,对其油气来源和天然气成因类型进行了判别。研究结果表明,该区天然气为典型的腐泥型干酪根裂解气,其中寒武系肖尔布拉克组天然气干燥系数大于 0.98, N_2 含量介于 2.5%~4.0%,为过成熟干气,且凝析油族组分与饱和烃单体烃碳同位素偏重, nC_9 — nC_{20} 碳同位素介于 -28.8‰~-26.3‰,表明油气来源为寒武系—下奥陶统烃源岩。而寒武系阿瓦塔格组和吾松格组天然气干燥系数介于 0.63~0.78, N_2 含量介于 0.2%~0.8%,为低成熟湿气,且凝析油族组分和饱和烃单体烃碳同位素相对较轻, nC_9 — nC_{23} 碳同位素介于 -37.25‰~-32.56‰,表明油气来源为中、上奥陶统烃源岩。

关键词:天然气类型;油气源;有机地球化学;寒武系;塔中隆起;塔里木盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Geochemical characteristics and origin of the deep Cambrian oil and gas in the Tazhong Uplift, Tarim Basin

Shi Jianglong^{1,2,3}, Li Jian^{2,3}, Li Zhisheng^{2,3}, Hao Aisheng^{2,3}

(1. Institute of Porous Flow Fluid Mechanics, University of Chinese Academy of Sciences, Langfang, Hebei 065007, China;

2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development - Langfang, PetroChina, Langfang, Hebei 065007, China;

3. The Key Laboratory of Gas Reservoir Formation and Development, CNPC, Langfang, Hebei 065007, China)

Abstract: The Cambrian carbonate reservoirs of Tazhong uplift is rich in oil and gas. However, there are different opinions on the origin and genetic types of oil and gas in this area due to the complex tectonic setting. In this paper, we studied the origin and genetic types of oil and gas through a detailed analysis of the composition and carbon isotope data of condensate oil and gas in different intervals of the Cambrian in ZS1, ZS1C and ZS5 wells and the geochemical characteristics of the Cambrian-Lower Ordovician and Middle-Upper Ordovician source rocks. The results indicate that the Cambrian gas in the Tazhong uplift is typical cracking gas of sapropelic kerogen. Gas in the Xiaerbulake Formation is typical over-mature dry gas with a drying coefficient of higher than 0.98 and N_2 content of 2.5%~4.0%. The carbon isotopes of group composition and individual n-alkanes of condensate in the Xiaerbulake Formation are relatively heavy. The carbon isotope of C_9 - C_{20} n-alkane are -28.8‰~-26.3‰. These geochemistry characteristics indicate that the condensate oil and gas in the Xiaerbulake Formation originated from the Cambrian-Lower Ordovician source rocks. While the natural gas in the Awatage and Wusonggeer Formations is low-mature wet gas with a drying coefficient of 0.63~0.78 and N_2 content of 0.2%~0.8%. The carbon isotope of group composition and individual n-alkanes of condensate in the Awatage and Wusonggeer Formations are relatively light. The carbon isotopes of C_9 - C_{23} n-alkane are -37.25‰~-32.56‰. These

收稿日期:2016-09-20;修订日期:2017-02-20。

第一作者简介:史江龙(1989—),男,硕士研究生,油气地质地球化学。E-mail:shijl5118@163.com。

通讯作者简介:李剑(1966—),男,教授,天然气地球化学、天然气成藏、天然气资源评价。E-mail:lijian69@petrochina.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05007)。

geochemistry characteristics indicate that the condensate oil and gas in the Awatage and Wusonggeer Formations originated from the Middle-Upper Ordovician source rocks.

Key words: gas type, source of oil and gas, organic geochemistry, Cambrian, Tazhong Uplift, Tarim Basin

塔里木盆地塔中隆起下古生界发育大范围分布的碳酸盐岩储层,油气资源十分丰富,具有良好的勘探潜力,是塔里木盆地寻找大型油气田的重点领域^[1-2]。2013年ZS1井和ZS1C井获得工业性油气流,首次在寒武系盐下白云岩中发现原生油气藏,随后在2014年,ZS5井再次突破并获得良好的油气显示,从而揭开了塔中隆起寒武系勘探的新篇章^[3]。塔中隆起经历了长期的构造演化和多期叠加改造,断裂、裂缝和不整合面异常发育,这一方面形成了油气运移成藏的输导体系,另一方面却使得该区油气呈现多期成藏、多期调整、多期改造、油气混源现象普遍等特点。至今,对该区油气来源及天然气类型的认识仍存在较大的分歧,使得塔中隆起寒武系碳酸盐岩油气勘探受到影响。本文对ZS1井、ZS1C井和ZS5井寒武系不同碳酸盐岩储层的油气地球化学特征进行综合分析,探讨了其油气母质来源,并优选出 $C_1/C_2 - C_2/C_3$, $C_1/C_3 - C_2/C_3$, $iC_4/nC_4 - iC_5/nC_5$ 海相成因天然气判别图版,对研究区的天然气成因类型进行了判识。

1 区域地质背景

塔中隆起位于塔里木盆地中央隆起带中部,北邻满加尔凹陷,南邻塘古孜巴斯凹陷,西邻巴楚低凸起,向东与塔东隆起相接,面积约 $3 \times 10^4 \text{ km}^2$,呈北西-南东走向(图1)。塔中隆起是一个长期继承性发育的大型古隆起,整个地区古生界发育较全,且存在广泛分布的腐泥型烃源岩^[4]和多套优质储层,因此具有良好的油气成藏条件。塔中地区经历了多期构造运动,断裂异常发育,在中加里东期,塔中I号断裂带开始活动,形成大型逆冲断裂带,成为塔中古隆起的雏形;加里东晚期,塔中隆起发生强烈的构造运动,使得塔中I号断裂带发生逆冲形成复杂的断裂坡折带,随后在桑塔木组沉积后期,该区发生最强烈的构造活动,形成了塔中10号构造带和中央断裂带;在晚海西期塔中隆起最终定型,之后在印支期和喜马拉雅期继承性发展,表现为局部断裂活动和小幅度调整^[5-6]。因此,该稳定的

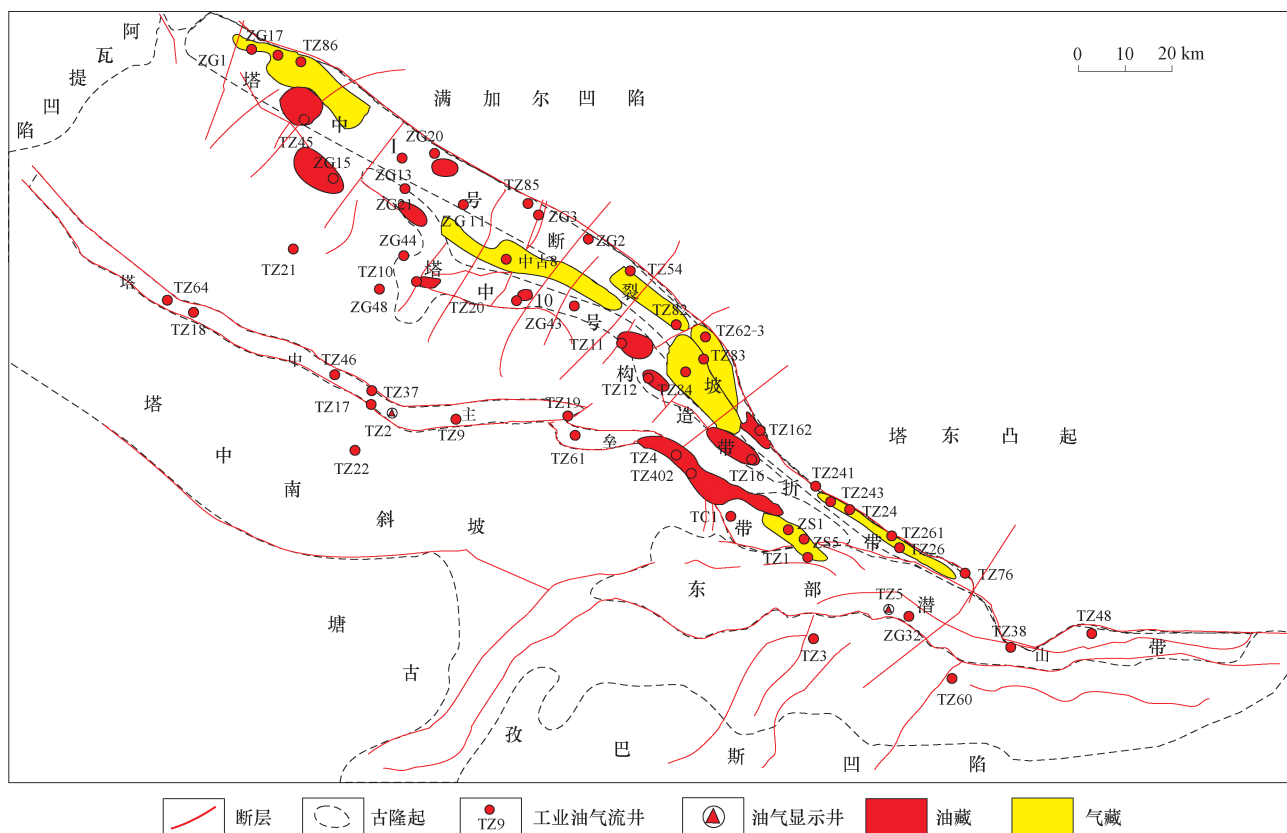


图1 塔中隆起构造单元与油气藏分布

Fig. 1 Structure units and hydrocarbon accumulation distribution in the Tazhong Uplift

继承性古隆起为塔中地区古老海相碳酸盐岩油气藏的保存奠定了良好的基础。塔中地区主要存在3期油气成藏期,分别为晚加里东期、晚海西期和喜马拉雅期,同时晚海西期和喜马拉雅期也是重要的油气调整期^[7]。

研究区寒武系累计厚度约866~2 861 m,从上而下依次为上统丘里塔格组(ϵ_{3ql})、中统阿瓦塔格组(ϵ_{2a})和沙依里克组(ϵ_{2s}),下统包括吾松格尔组(ϵ_{1w})、肖尔布拉克组(ϵ_{1x})和玉尔吐斯组(ϵ_{1y})^[8]。根据XH1井钻遇的玉尔吐斯组烃源岩物性显示,其有机碳含量(TOC)值介于1.0%~9.43%,平均为5.5%^[4]。同时在阿克苏地区野外剖面也发现了厚约10~15m的玉尔吐斯组烃源岩, TOC 介于1.6%~14.3%。因此,寒武系玉尔吐斯组为一套优质烃源岩。迄今,塔中隆起有ZS1井、ZS1C井和ZS5井3口钻井

在寒武系盐下白云岩获得工业油气流,其中ZS1井在阿瓦塔格组和肖尔布拉克组获得油气流,ZS1C井在肖尔布拉克组获得天然气流,ZS5井在吾松格尔组获得油气流。塔中地区寒武系盐下白云岩的突破为该区油气勘探揭示了一个重要的接替层系和勘探领域。

2 天然气及其凝析油地球化学特征

2.1 烃类组成特征

根据已钻遇的ZS5井、ZS1C井和ZS1井天然气地球化学特征可知,ZS1C井和ZS1井肖尔布拉克组天然气甲烷含量介于64.1%~78.3%,平均70.4%,重烃含量介于0.8%~1.08%,平均0.93%,天然气干燥系数(C_1/C_{1+})大于0.98(表1),为典型的干气,表明其

表1 塔中隆起寒武系-奥陶系天然气组分特征
Table 1 Composition characteristics of the Cambrian-Ordovician gas in the Tazhong Uplift

井号	层位	深度/m	烃类组分体积含量/%								干燥系数	CO ₂ /%	N ₂ /%	H ₂ S/ (g·cm ⁻³)
			C ₁	C ₂	C ₃	iC ₄	nC ₄	iC ₅	nC ₅	C ₆₊				
ZS1C	ϵ_{1x}	6 861~6 944	62.70	0.51	0.16	0.05	0.08	0.04	0.04	0.07	0.98	24.10	4.00	0.18
			69.00	0.55	0.18	0.06	0.09	0.05	0.05	0.10	0.98	25.70	3.90	4.60
			62.70	0.50	0.16	0.05	0.08	0.04	0.04	0.07	0.98	24.20	4.00	1.20
			64.10	0.50	0.16	0.05	0.08	0.04	0.03	0.05	0.99	20.80	3.60	1.50
ZS1	ϵ_{2a}	6 439~6 458	62.90	10.50	6.54	1.08	2.32	0.45	0.47	0.18	0.74	14.90	0.70	3.80
			68.60	10.90	5.80	0.80	1.58	0.26	0.25	0.08	0.78	10.80	0.80	3.80
	ϵ_{1x}	6 597~6 835	71.50	0.49	0.16	0.06	0.09	0.04	0.04	0.07	0.99	23.60	3.90	—
			77.70	0.51	0.16	0.06	0.08	0.04	0.03	0.04	0.99	15.60	2.50	4.70
			77.10	0.50	0.15	0.05	0.08	0.03	0.03	0.04	0.99	15.40	2.60	5.80
			78.30	0.47	0.14	0.05	0.07	0.03	0.02	0.02	0.99	14.40	2.60	5.60
ZS5	ϵ_{1w}	6 562~6 671	59.30	13.90	9.66	1.53	3.32	0.78	0.79	0.53	0.66	9.7	0.30	2.60
			42.40	9.57	7.00	1.28	2.88	0.87	0.90	0.83	0.64	13.30	0.20	3.00
			41.50	9.52	7.05	1.29	2.99	0.89	0.97	0.91	0.63	13.20	0.40	3.10
TZ26	O	4 374~4 402	83.00	2.50	1.10	0.20	0.30	0.10	0.10	0.20	0.95	5.40	2.70	—
TZ83	O	5 666~5 681	93.10	0.64	0.10	0.04	0.06	0.15	0.02	—	0.99	4.90	0.97	1.00
ZG11	O	6 165~6 631	87.00	3.90	1.45	0.42	0.66	0.27	0.24	0.38	0.92	2.87	2.19	2.87
ZG8	O	5 893~6 146	86.10	3.50	1.53	0.45	0.74	0.29	0.21	0.18	0.93	2.60	2.80	5.30
ZG22	O	5 605~5 737	81.70	4.60	2.15	0.64	1.22	0.53	0.49	0.57	0.89	4.25	2.27	4.37
ZG16	O	6 230~6 269	91.40	1.40	0.47	0.24	0.31	0.19	0.15	0.27	0.97	1.82	2.95	1.42
TZ12	O	4 652~4 800	86.50	5.37	3.30	0.70	1.8	0.70	0.40	0.60	0.87	1.40	2.70	—
TZ15	O	4 656~4 673	83.40	4.80	2.90	0.41	0.50	0.10	0.10	—	0.91	4.32	2.73	1.38
TZ16	O	4 248~4 268	82.30	3.69	3.60	0.6	1.60	0.70	0.30	0.10	0.88	2.80	3.60	—
ZG43	O	4 363~4 375	78.30	6.58	3.82	0.98	1.58	0.45	0.34	0.23	0.85	2.52	2.24	7.70
ZG44	O	4 429~4 485	84.87	2.45	1.05	0.21	0.47	0.19	0.19	0.40	0.94	5.10	3.54	2.48
ZG45	O	4 953~4 982	76.92	7.66	4.12	1.01	1.97	0.70	0.66	0.7	0.82	1.50	3.93	3.62

热演化程度较高。ZS1井阿瓦塔格组和ZS5井吾松格尔组天然气中甲烷含量介于41.5%~68.6%,平均54.9%,重烃含量介于19.67%~30.51%,平均23.7%,干燥系数介于0.63~0.78,天然气明显偏湿。塔中隆起奥陶系天然气甲烷含量主要介于76.9%~93.1%,平均84.5%,重烃含量介于3.03%~16.2%,平均8.4%,干燥系数介于0.82~0.99。因此,塔中隆起寒武系天然气的烃类气体含量相对较低,但重烃含量变化较大,既存在干气,也有湿气,且干气与湿气在烃类组成特征上差异显著。

2.2 非烃组成特征

塔中隆起天然气非烃组分主要以 CO_2 和 N_2 为主, H_2S 含量均小于 8 g/cm^3 ,属于低含 H_2S 天然气^[9]。其中ZS1C井和ZS1井肖尔布拉克组天然气中 CO_2 含量介于14.4%~25.7%,平均20.5%, N_2 含量介于2.5%~4%,平均3.4%;ZS1井阿瓦塔格组和ZS5井吾松格尔组天然气中 CO_2 含量介于9.7%~14.9%,平均12.4%, N_2 含量介于0.2%~0.8%,平均0.48%。相比,塔中隆起奥陶系天然气中 CO_2 含量介于1.4%~5.4%,平均为3.3%, N_2 含量介于0.97%~3.93%,平均2.7%。可见,塔中隆起寒武系天然气中 CO_2 含量明显偏高,且寒武系肖尔布拉克组天然气中 N_2 含量相对较高(图2)。

Littke等(1995)^[10]通过模拟实验对不同热演化阶段下有机质生成氮气的速率进行统计,结果表明,随着烃源岩热演化程度增高,氮气的生成速率逐渐增大。到目前为止,国内也有许多学者对塔中隆起天然气中 N_2 成因做了大量研究,主体认为 N_2 含量偏高主要与泥质烃源岩在高-过成熟阶段生成的天然气有关^[11-13]。

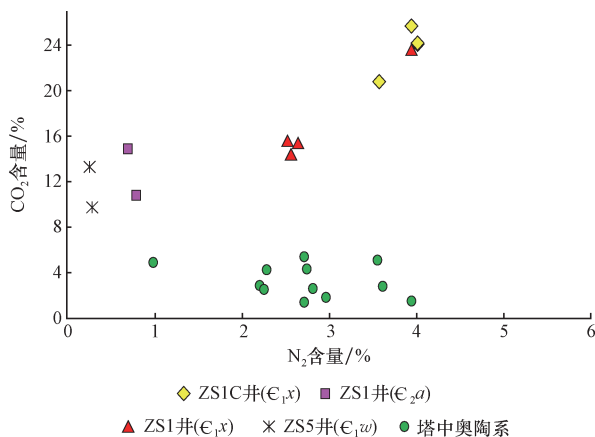


图2 塔中隆起天然气中 N_2 与 CO_2 含量关系

Fig. 2 Relationship between N_2 and CO_2 contents of the Cambrian gas in the Tazhong Uplift

通常,烃源岩热演化程度越高,其生成天然气中甲烷含量增高,同时天然气干燥系数也逐渐增大^[14-15]。因此,根据天然气的干燥系数与 N_2 含量,将寒武系天然气划分为两种不同热演化程度的类型:第①类天然气干燥系数大于0.98,其成熟度相对较高, N_2 含量高于2.5%;第②类天然气干燥系数小于0.8,其成熟度相对较低, N_2 含量低于0.8%(图3)。这两种不同热演化程度的天然气也预示着具有不同的母质来源。

2.3 天然气碳同位素特征

烷烃气碳同位素是探讨天然气成因类型、成熟度和气源对比中应用较广、使用较为成熟的指标参数。有机成因天然气的碳同位素特征呈 $\delta^{13}\text{C}_1 < \delta^{13}\text{C}_2 < \delta^{13}\text{C}_3 < \delta^{13}\text{C}_4$,即正碳同位素序列;无机成因天然气的碳同位素特征呈 $\delta^{13}\text{C}_1 > \delta^{13}\text{C}_2 > \delta^{13}\text{C}_3 > \delta^{13}\text{C}_4$,即负序列^[16]。有机成因天然气中,甲烷碳同位素主要与成熟度有关,且随热演化程度升高逐渐变重;乙烷碳同位素具有良好的母质继承性,受成熟度影响较小,主要与烃源岩母质类型有关,通常 $\delta^{13}\text{C}_2 < -28\text{‰}$ 为油型气, $\delta^{13}\text{C}_2 > -28\text{‰}$ 为煤成气^[17-18]。研究区天然气氦同位素 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 介于 $2 \times 10^{-8} \sim 4 \times 10^{-8}$ ^[19],且乙烷碳同位素介于 $-37.4\text{‰} \sim -34.4\text{‰}$,均小于 -28‰ ,因此不存在无机成因天然气的混入,为典型的油型气。塔中隆起寒武系天然气甲烷碳同位素变化范围较大,介于 $-51.4\text{‰} \sim -40.6\text{‰}$,其中ZS1C井和ZS1井肖尔布拉克组天然气甲烷碳同位素偏重,均大于 -42.1‰ ,而ZS1井阿瓦塔格组和ZS5井吾松格尔组天然气甲烷碳同位素偏轻,均小于 -44.7‰ 。塔中隆起奥陶系天然气甲烷碳同位素介于 $-52.7\text{‰} \sim -37.3\text{‰}$ (表2)。

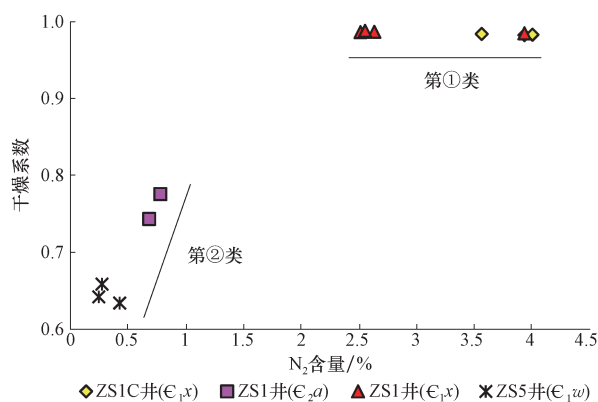


图3 塔中隆起寒武系天然气干燥系数(C_1/C_{1+})与 N_2 含量关系

Fig. 3 Relationship between N_2 content and drying coefficient (C_1/C_{1+}) of the Cambrian gas in the Tazhong Uplift

表 2 塔中隆起寒武系-奥陶系天然气碳同位素组成特征
Table 2 Carbon isotope composition characteristics of the Cambrian-Ordovician gas in the Tazhong Uplift

井号	层位	深度/m	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$			
			CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}
ZS1C	C_{1x}	6 861 ~ 6 944	-41.4	-34.8	—	—
			-41.6	-34.9	—	—
ZS1	C_{2a}	6 439 ~ 6 458	-44.7	-35.5	-33.9	-26.0
			-46.1	-35.5	-33.9	-
	C_{1x}	6 597 ~ 6 835	-42.1	-35.0	-31.9	-30.0
			-40.6	—	—	—
ZS5	C_{1w}	6562 ~ 6671	-51.4	-37.4	-35.4	-35.1
TZ26	O	4374 ~ 4402	-37.3	-36.8	-32.6	-29.8
TZ83	O	5666 ~ 5681	-39.4	-35.1	-29.1	—
ZG11	O	6165 ~ 6631	-48.7	-34.1	-29	—
ZG8	O	5893 ~ 6146	-48.7	-36.4	-29.8	-28.6
ZG22	O	5605 ~ 5737	-50.9	-37.2	-31.3	—
ZG16	O	6230 ~ 6269	-52.7	-35.7	-29.7	—
TZ12	O	4652 ~ 4800	-40.3	-37.7	-32.1	-29.4
TZ15	O	4656 ~ 4673	-48.8	-38.9	-37.9	-36.1
TZ16	O	4248 ~ 4268	-45.3	-39.9	-35	-32.5
ZG43	O	4363 ~ 4375	-48.7	-37.2	-30.9	—
ZG45	O	4953 ~ 4982	-50	-38.2	-31.5	—

注:ZS1 井和 ZS1C 井天然气数据源自文献[8]。

王铁冠等(2014)^[20]通过总结分析塔里木盆地海相天然气碳同位素分布特征指出,源于奥陶系烃源岩的成熟-高成熟湿气的甲烷碳同位素小于-42.5‰,烷烃气碳同位素值分布曲线($\delta^{13}\text{C}_1-\delta^{13}\text{C}_4$)斜率较陡;而源于寒武系烃源岩过成熟干气的甲烷碳同位素大于-42.5‰,烷烃气碳同位素值分布曲线的斜率较为平缓。塔中隆起寒武系-奥陶系天然气主要为正碳同位素序列(图4),其中ZS1井(C_{1x}),ZS1C井(C_{1x}),TZ26井(O),TZ83井(O)和TZ12井(O)甲烷碳同位素值介于-42.1‰~-37.3‰,均大于-42.5‰,且天然气碳同位素分布曲线斜率较缓,为来源于寒武系烃源岩的天然气。根据戴金星^[16]提出的油型气成熟度回归方程 $\delta^{13}\text{C}_1=15.80\lg R_o-42.20$,结果表明天然气成熟度 R_o (镜质体反射率)介于1.01%~2.04%。可见,部分天然气成熟度偏低,应该为寒武系烃源岩早期生成的天然气或原油伴生气;而ZS1C井(C_{2a}),ZS5井(C_{1w}),ZG8井(O),ZG11井(O),ZG16井(O),ZG22井(O),ZG45井(O)和ZG44井(O)等天然气甲烷碳同位素介于-52.7‰~-44.7‰,均小于-42.5‰,且天然气碳同位素分布曲线较陡,为来源于中、上奥陶统烃源岩的天然气,其成熟度 R_o 介于0.22%~0.7%。

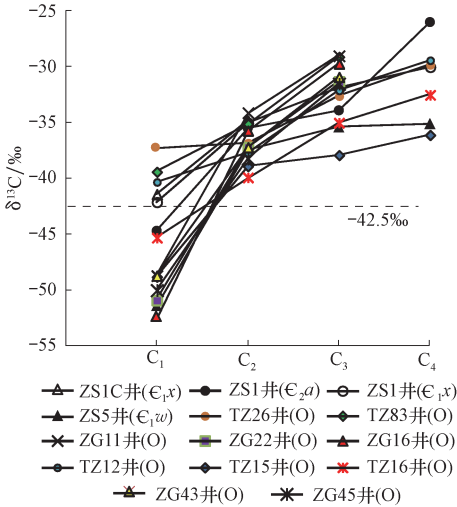


图 4 塔中隆起寒武系-奥陶系天然气碳同位素组成特征
Fig. 4 Carbon isotope composition characteristics of the Cambrian-Ordovician gas in the Tazhong Uplift

2.4 天然气中凝析油碳同位素特征

原油的碳同位素取决于其烃源岩的有机质组成和沉积环境,不同母质来源的原油碳同位素具有一定的差异,而相同来源的原油因成熟度产生的稳定碳同位素组成 $\delta^{13}\text{C}$ 差值不超过2‰~3‰^[21-22]。从图5中可以看出,ZS1井阿瓦塔格组和ZS5井吾松格尔组凝析油和凝析油族组分碳同位素相对较轻,与TZ201井中、上奥陶统烃源岩碳同位素相似,表明其母质来源为中、上奥陶统烃源岩;而ZS1C井肖尔布拉克组凝析油和凝析油族组分碳同位素相对较重,与TD2井和库南1井寒武系烃源岩具有相似的碳同位素分布特征,表明其母质来源为寒武系烃源岩。

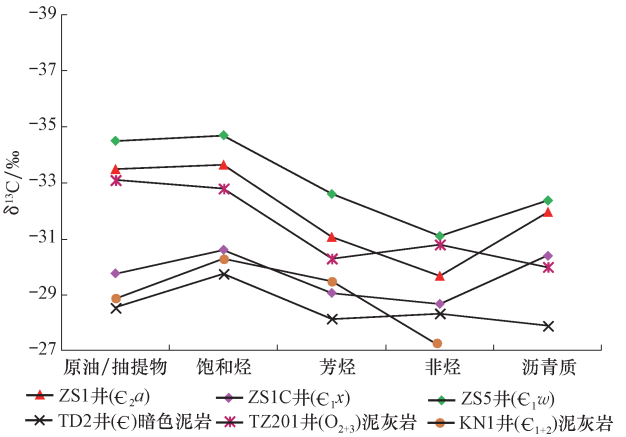


图 5 塔中隆起寒武系凝析油及族组成碳同位素值分布
Fig. 5 Carbon isotopes of the Cambrian condensate and group composition in the Tazhong Uplift

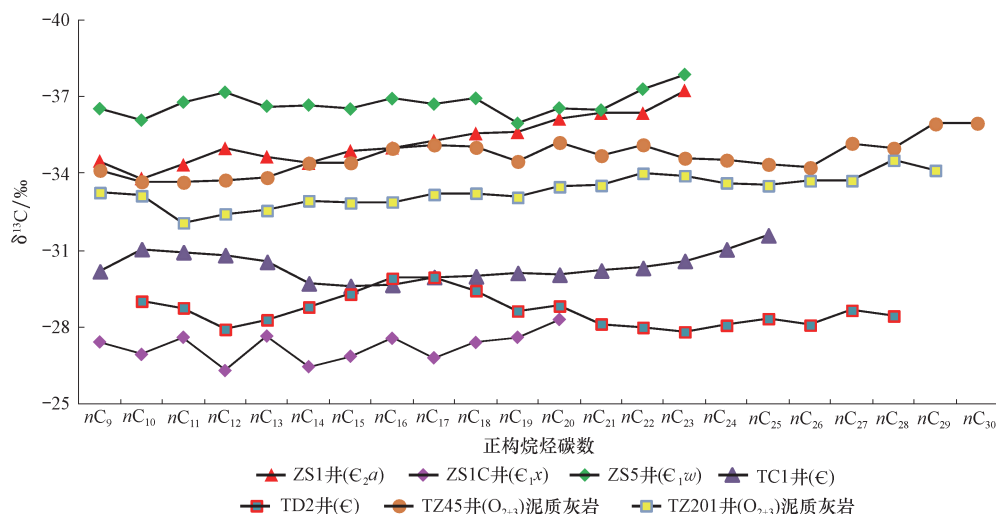


图6 塔中隆起寒武系凝析油饱和烃单体烃碳同位素分布特征

Fig. 6 Carbon isotope characteristics of individual n -alkanes of the Cambrian condensate in the Tazhong Uplift

图6可以看出,ZS1C井肖尔布拉克组凝析油饱和烃单体烃碳同位素较重, nC_9 — nC_{20} 间碳同位素介于 -28.8‰ ~ -26.3‰ ,与TC1井和TD2井寒武系烃源岩相似。而ZS1井阿瓦塔格组和ZS5井吾松格尔组凝析油单体烃碳同位素偏轻, nC_9 — nC_{23} 间碳同位素介于 -37.25‰ ~ -32.56‰ ,且随着碳数增大,正构烷烃的碳同位素逐渐变轻,与TZ45井原油和TZ201井中、上奥陶统泥质灰岩饱和烃单体烃碳同位素相似。因此,ZS1C井肖尔布拉克组凝析油为寒武系烃源岩的产物,而ZS1井阿瓦塔格组和ZS5井吾松格尔组凝析油为中、上奥陶统烃源岩的产物。

3 油气成因判别

通过综合判别塔中隆起寒武系天然气组分、碳同位素,凝析油及饱和烃碳同位素可知,塔中隆起寒武系肖尔布拉克组天然气为热演化程度较高的干气,甲烷碳同位素重于 -42.5‰ ,且天然气中凝析油族组分及饱和烃碳同位素与寒武系烃源岩特征相匹配,因此油气母质来源为寒武系烃源岩;塔中隆起寒武系吾松格尔组和阿瓦塔格组天然气为热演化程度较低的湿气,甲烷碳同位素轻于 -42.5‰ ,天然气中凝析油族组分及饱和烃碳同位素与中、上奥陶统烃源岩特征相似,因此该凝析油为中、上奥陶统烃源岩的产物。由于塔中隆起发育一系列深切的北东向走滑断裂和北西向I号断裂带,这些断裂形成了油气的运移的主要通道,尤其是走滑断裂与I号断裂带的交汇部位油气能够发生垂向运移。据此,中、上奥陶统烃源岩生成的油气沿着I号断裂带向底部发生运移,使得寒武系上部阿瓦塔格

组和吾松格尔组白云岩储层中充注了中、上奥陶统烃源岩生成的油气,为“上生下储型”。

4 干酪根裂解气与原油裂解气判别

有机成因天然气有两种生成途径:一种是直接从干酪根上形成烷烃小分子的初次热解气,另一种为在热力作用下,干酪根先形成的液态烃或原油发生二次裂解生成的原油裂解气。多年来,国内外许多学者依据天然气生成动力学模拟实验,分别对干酪根裂解气和原油裂解气特征进行了大量研究,并对不同成因类型的有机天然气进行了判别。Hill等(2003)^[23]通过模拟实验指出, C_2/C_3 与 C_2/iC_4 与成熟度有关,当 C_2/C_3 值约为2, C_2/iC_4 约为10时,天然气成熟度 R_o 介于 1.5% ~ 1.6% 。黄光辉等(2008)^[24],王云鹏等(2007)^[25],张敏等(2008)^[15]通过模拟实验提出 C_1/C_2 , C_2/C_3 , C_1/C_3 , iC_4/nC_4 与 iC_5/nC_5 等图版,并对塔里木盆地和四川盆地海相成因天然气的成因类型进行了判别。塔里木盆地台盆区有两套腐泥型烃源岩,分别为寒武系—下奥陶统黑色泥岩、泥质灰岩和中、上奥陶统泥质灰岩、灰质泥岩^[26-30]。因此,针对腐泥型天然气类型判别,优选出 C_1/C_2 — C_2/C_3 , C_1/C_3 — C_2/C_3 和 iC_4/nC_4 — iC_5/nC_5 图版作为原油裂解气和干酪根裂解气判别的指标参数,并对塔中隆起寒武系天然气的成因类型进行综合判别。

ZS1C井肖尔布拉克组天然气 C_1/C_2 介于 123.2 ~ 128.5 , C_1/C_3 介于 391.9 ~ 398.2 , C_2/C_3 介于 3.1 ~ 3.2 ;ZS1井肖尔布拉克组天然气 C_1/C_2 介于 147.5 ~ 166.3 , C_1/C_3 介于 447.1 ~ 559.3 , C_2/C_3 介于 3.1 ~

3.4. 根据黄光辉等(2008)^[24]对轮南地区来源于中、上奥陶统烃源岩的YW2井原油和TZ12井奥陶系烃源岩进行生烃模拟实验结果,即在成熟度相似条件下,干酪根裂解气的 C_1/C_2 和 C_1/C_3 比值明显大于原油裂解气,且天然气干燥系数也明显较高,可知ZS1井和ZS1C井肖尔布拉克组天然气具有明显干酪根裂解气的特征(图7)。ZS1井阿瓦塔格组天然气和ZS5井吾松格尔组天然气 C_1/C_2 介于4.3~6.1, C_1/C_3 介于5.9~11.8, C_2/C_3 介于1.4~1.9,其比值与肖尔布拉克组天然气差异较大,这主要是天然气成熟度不同造成的。

研究表明^[31-33],在高-过成熟度阶段,地层中广泛分布的分散液态烃是原油裂解气的重要来源,具有很好的天然气成藏潜力。王云鹏等(2007)^[25]通过模拟实验,指出 $iC_5/nC_5 < 0.6$ 时为分散液态烃裂解气, $0.6 < iC_5/nC_5 < 0.85$ 时为原油裂解气,而 $iC_5/nC_5 > 0.85$ 时,为干酪根裂解气,同时结合Prinzhofer等(2000)^[33]提出

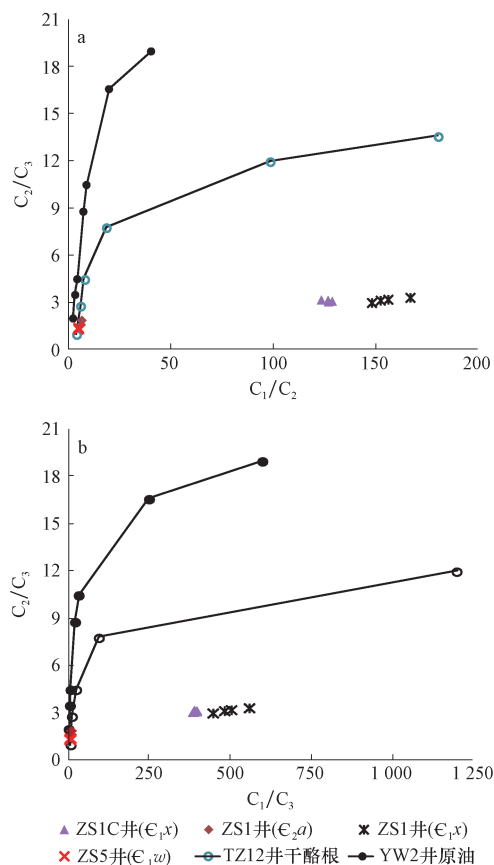


图7 塔中隆起寒武系天然气 $C_1/C_2 - C_2/C_3$ (a)与 $C_1/C_3 - C_2/C_3$ (b)关系(TZ12井和YW2井原油数据源自文献[24])

Fig. 7 Relationship between $C_1/C_2 - C_2/C_3$ (a) and $C_1/C_3 - C_2/C_3$ (b) of the Cambrian gas in the Tazhong Uplift (The data of Well Tazhong12 kerogen and Well YW2 oil from reference[24])

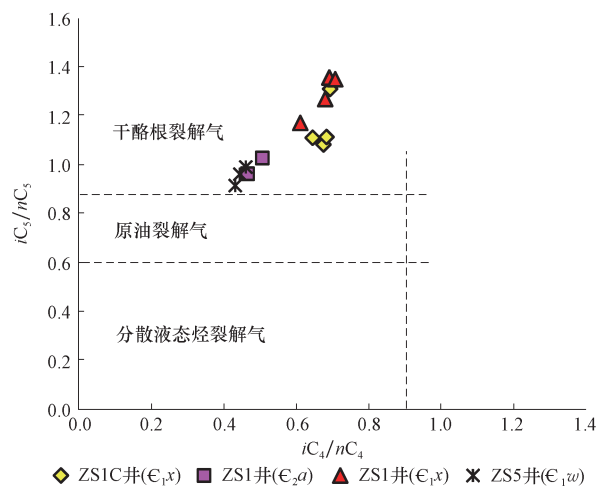


图8 塔中隆起寒武系天然气中

$iC_4/nC_4 - iC_5/nC_5$ 关系(底图据文献[25])

Fig. 8 Relationship between iC_4/nC_4 and iC_5/nC_5 of the Cambrian gas in the Tazhong Uplift (base map from reference[25])

的研究成果($iC_4/nC_4 < 0.9$ 是二次裂解气),提出了海相不同母质来源的天然气成因类型判别图版($iC_4/nC_4 - iC_5/nC_5$),并对四川盆地和塔里木盆地海相天然气类型进行了判别。图8可以看出,塔中隆起ZS1井、ZS1C井和ZS5井的天然气 iC_4/nC_4 均小于0.9,而 iC_5/nC_5 均大于0.85,表现为干酪根裂解气的特点。

根据 C_1/C_2 、 C_1/C_3 、 C_2/C_3 、 iC_4/nC_4 和 iC_5/nC_5 参数综合判别结果可知,塔中隆起寒武系天然气为典型的干酪根裂解气,原油裂解气不显著。且ZS1C井和ZS1井肖尔布拉克组天然气烃类组分比值(C_1/C_2 、 C_1/C_3 、 C_2/C_3)与ZS1井阿瓦塔格组和ZS5井吾松格尔组天然气差异较大,表明两者的母质来源不同。

5 结论

1) 塔中隆起寒武系白云岩储层中天然气以烃类为主,重烃含量变化较大,既存在干气,也有湿气;天然气中非烃气体主要为 N_2 、 CO_2 和 H_2S ,其中 N_2 、 CO_2 含量相对较高, H_2S 含量相对较低,属于低含 H_2S 天然气。

2) 根据天然气干燥系数、 N_2 含量和热演化程度可将研究区天然气划分为两类,一类为ZS1C井、ZS1井肖尔布拉克组过成熟干气,天然气甲烷碳同位素重于-42.5‰,且该层位凝析油碳同位素偏重,为寒武系-下奥陶统烃源岩晚期干酪根裂解气;另一类为ZS1井阿瓦塔格组和ZS5井吾松格尔组低成熟湿气,天然气甲烷碳同位素小于-44.7‰,其凝析油碳同位素偏轻,属于中、上奥陶系烃源岩在低成熟阶段生成的干酪根裂解气。

3) 塔中隆起经历了多期构造运动,异常发育的断裂对油气聚集成藏具有控制作用,深切断裂及断裂的交汇部位是油气发生垂向运移优势通道。气源综合对比认为研究区寒武系阿瓦塔格组 and 吾松格尔组油气成藏组合为上生下储型。

参 考 文 献

- [1] 漆立新. 塔里木盆地地下古生界碳酸盐岩大油气田勘探实践与展望[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 771-779.
Qi Lixin. Exploration practice and prospects of giant carbonate field in the Lower Paleozoic of Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 771-779.
- [2] 翟光明, 何文渊. 塔里木盆地石油勘探实现突破的重要方向[J]. 石油学报, 2004, 25(1): 1-7.
Zhai Guangming, He Wenyuan. An important petroleum exploration region in Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(1): 1-7.
- [3] 王招明, 谢会文, 陈永权, 等. 塔里木盆地中深1井寒武系盐下白云岩原生油气藏的发现与勘探意义[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(2): 1-13.
Wang Zhaoming, Xie Huiwen, Chen Yongquan, et al. Discovery and exploration of Cambrian subsalt dolomite original hydrocarbon reservoir at Zhongshen-1 Well in Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(2): 1-13.
- [4] 顾忆, 赵永强, 贾存善, 等. 塔里木盆地阿瓦提坳陷油气资源潜力分析[J]. 石油实验地质, 2012, 34(3): 257-266.
Gu Yi, Zhao Yongqiang, Jia Cunshan, et al. Analysis of hydrocarbon resource potential in Awati Depression of Tarim basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(3): 257-266.
- [5] 赵靖舟, 王清华, 时宝宏, 等. 塔里木古生界克拉通盆地海相油气富集规律与古隆起控油气论[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(6): 703-712.
Zhao Jingzhou, Wang Qinghua, Shi Baohong, et al. Marine hydrocarbon enrichment rules and palaeouplift-controlling hydrocarbon theory for the Paleozoic Tarim craton basin[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(6): 703-712.
- [6] 庞雄奇, 周新源, 李卓, 等. 塔里木盆地塔中古隆起控油气模式与有利区预测[J]. 石油学报, 2011, 32(2): 189-198.
Pang Xiongqi, Zhou Xinyuan, Li Zhuo, et al. A model for controlling hydrocarbon and predicting favorable exploration zones of the Tazhong palaeo-uplift in Tarim Basin, NW China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(2): 189-198.
- [7] 韩剑发, 梅廉夫, 杨海军, 等. 塔中I号坡折带礁滩复合体大型凝析气田成藏机制[J]. 新疆石油地质, 2008, 29(3): 323-326.
Han Jianfa, Mei Lianfu, Yang Haijun, et al. Hydrocarbon accumulation mechanism of large-sized reef-shoal complex condensate gas field in Tazhong No. 1 Slope-Break zone, Tarim Basin[J]. Xin Jiang Petroleum Geology, 2008, 29(3): 323-326.
- [8] 宋到福, 王铁冠, 李美俊. 塔中地区中深1和中深1C井盐下寒武系油气地球化学特征及其油气源判识[J]. 中国科学: 地球科学, 2016, 46(1): 107-117.
Song Daofu, Wang Tieguan, Li Meijun. Geochemistry and possible origin of the hydrocarbons from Wells Zhongshen1 and Zhongshen1C, Tazhong Uplift[J]. Science in China: Earth Sciences, 2016, 46(1): 107-117.
- [9] 戴金星. 中国含硫化氢的天然气分布特征、分类及其成因探讨[J]. 沉积学报, 1985, 3(4): 109-120.
Dai Jinxing. Distribution, classification and origin of natural gas with hydrogen sulphide in China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1985, 3(4): 109-120.
- [10] Litke R, Krooss B, Idiz E, et al. Molecular nitrogen in natural gas accumulations: generation from sedimentary organic matter at high temperatures[J]. AAPG Bulletin, 1995, 79(3): 410-430.
- [11] 刘全有, 戴金星, 刘文汇, 等. 塔里木盆地天然气中氮地球化学特征与成因[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(1): 13-16.
Liu Quanyou, Dai Jinxing, Liu Wenhui, et al. Geochemical characteristics and genesis of nitrogen in natural gas from Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(1): 13-16.
- [12] 赵孟军. 塔里木盆地和田河气田天然气的特殊来源及非烃组分的成因[J]. 地质论评, 2002, 48(5): 480-486.
Zhao Mengjun. Special source of the natural gases of the Hotan river gas field and the origin of its non-hydrocarbon gases[J]. Geological Review, 2002, 48(5): 480-486.
- [13] 李谨, 李志生, 王东良. 塔里木盆地含氮天然气地球化学特征及氮气来源[J]. 石油学报, 2013, 34(增刊1): 102-111.
Li Jin, Li Zhisheng, Wang Dongliang. Geochemical characteristics and N₂ source of nitrogen riched natural gas in Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(S1): 102-111.
- [14] 王鹏, 沈忠明, 刘四兵, 等. 四川盆地陆相天然气地球化学特征及对比[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(6): 1186-1195.
Wang Peng, Shen Zhongmin, Liu Sibing, et al. The geochemical characteristics and comparison of the terrestrial natural gas in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(6): 1186-1195.
- [15] 张敏, 黄光辉, 胡国艺, 等. 原油裂解气和干酪根裂解气的地球化学研究(I)-模拟实验和产物分析[J]. 中国科学D辑: 地球科学, 2008, 38(增刊II): 1-8.
Zhang Min, Huang Guanghui, Hu Guoyi, et al. Study on the geochemical characteristics of oil-cracking gas and kergen-cracking gas(I): Simulation and product analysis[J]. Science in China: Series D, 2008, 38(SII): 1-8.
- [16] 戴金星. 各类烷烃气的鉴别[J]. 中国科学: B辑, 1992, (2): 185-193.
Dai Jinxing. Discrimination of all kinds of alkane gas[J]. Science in China: Series B, 1992, (2): 185-193.
- [17] 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): 1-40.
Dai Jinxing. The characteristics of natural gas hydrocarbon isotopic and identification of all kinds of natural gas[J]. Natural Gas Geoscience, 1993, 4(2): 1-40.
- [18] 戴金星, 于聪, 黄土鹏, 等. 中国大气田的地质和地球化学若干特征[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(1): 1-13.
Dai Jinxing, Yu Cong, Huang Shipeng, et al. Geological and geochemical characteristics of large gas fields in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(1): 1-13.
- [19] 张殿伟, 刘文汇, 郑建京, 等. 塔中地区天然气氮、氩同位素地球

- 化学特征[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(6): 38–41.
- Zhang Dianwei, Liu Wenhui, Zheng Jianjing, et al. Helium and argon isotopic compositions of natural gases in the Tazhong area, Tarim Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(6): 38–41.
- [20] 王铁冠, 宋到福, 李美俊, 等. 塔里木盆地海顺南—古城地区奥陶系鹰山组天然气气源与深层天然气勘探前景[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 753–762.
- Wang Tieguan, Song Daofu, Li Meijun, et al. Natural gas source and deep gas exploration potential of the Ordovician Yingshan Formation in the Shunnan-Gucheng region, Tarim Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2014, 35(6): 753–762.
- [21] Sofer Z. Stable carbon isotope composition of crude oils: Application to source depositional environments and petroleum alteration[J]. AAPG Bulletin, 1984, 68(1): 31–49.
- [22] Chung H M, Roonney M A, Toon M B, et al. Carbon isotope composition of marine crude oils[J]. AAPG Bulletin, 1992, 76(2): 1000–1007.
- [23] Hill R J, Tang Y C, Kaplan I R. Insights into oil cracking based on laboratory experiments[J]. Organic Geochemistry, 2003, 34: 1651–1672.
- [24] 黄光辉, 张敏, 胡国艺, 等. 原油裂解气和干酪根裂解气的地球化学研究(II)—原油裂解气和干酪根裂解气的区分方法[J]. 中国科学D辑: 地球科学, 2008, 38(增刊II): 9–16.
- Huang Guanghui, Zhang Min, Hu Guoyi, et al. Geochemical study on oil-cracked gases(II): Discrimination methods between oil-cracked gases and kerogen-cracked gases[J]. Science in China: Series D, Earth Sciences, 2008, 38(S II): 9–16.
- [25] 王云鹏, 赵长毅, 王兆云, 等. 海相不同母质来源天然气的鉴别[J]. 中国科学D辑: 地球科学, 2007, 37(增刊II): 125–140.
- Wang Yunpeng, Zhao Changyi, Wang Zhaoyun, et al. Identification of natural gas from different marine sources[J]. Science in China: Series D, Earth Sciences, 2007, 37(S II): 125–140.
- [26] 张水昌, 高志勇, 李建军, 等. 塔里木盆地寒武系—奥陶系海相烃源岩识别与分布预测[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(3): 285–294.
- Zhang Shuichang, Gao Zhiyong, Li Jianjun, et al. Identification and distribution of marine hydrocarbon source rocks in the Ordovician and Cambrian of the Tarim Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 285–294.
- [27] 高志勇, 张水昌, 张兴阳, 等. 塔里木盆地寒武系—奥陶系海相烃源岩空间展布与层序类型的关系[J]. 科学通报, 2007, 52(增刊I): 70–77.
- Gao Zhiyong, Zhang Shuichang, Zhang Xingyang, et al. Relations between spatial distribution and sequence types of the Cambrian-Ordovician marine source rocks in Tarim Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(S I): 70–77.
- [28] 刘全有, 金之钧, 王毅, 等. 塔里木盆地天然气成因类型与分布规律[J]. 石油学报, 2009, 30(1): 46–50.
- Liu Quanyou, Jin Zhijun, Wang Yi, et al. Genetic type and distribution of natural gas in Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(1): 46–50.
- [29] 李剑, 谢增业, 罗霞, 等. 塔里木盆地主要天然气藏的气源认识[J]. 天然气工业, 1999, 19(2): 38–43.
- Li Jian, Xie Zengye, Luo Xia, et al. Gas-source identification of the major gas reservoirs in Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 1999, 19(2): 38–43.
- [30] 云金表, 金之钧, 解国军. 塔里木盆地地下古生界主力烃源岩分布[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 827–838.
- Yun Jinbiao, Jin Zhijun, Xie Guojun. Distribution of major hydrocarbon source rocks in the Lower Palaeozoic, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 827–838.
- [31] 赵文智, 王兆云, 王东良, 等. 分散液态烃的成藏地位与意义[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(4): 401–413.
- Zhao Wenzhi, Wang Zhaoyun, Wang Dongliang, et al. Contribution and significance of dispersed liquid hydrocarbons to reservoir formation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(4): 401–413.
- [32] 李剑, 王义凤, 马卫, 等. 深层—超深层古老烃源岩滞留烃及其裂解气资源评价[J]. 天然气工业, 2015, 35(11): 9–15.
- Li Jian, Wang Yifeng, Ma Wei, et al. Evaluation on occluded hydrocarbon in deep-ultra deep ancient source rocks and its cracked gas resources[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(11): 9–15.
- [33] Prinzhofer A A, Mello M R, Takaki T. Geochemical characterization of natural gas: a physical multivariable approach and its applications in maturity and migration estimates. AAPG Bulletin, 2000, (84): 1152–1172.

(编辑 张亚雄)