

引用本文: 黄礼, 赵颖, 吕惠贤, 等. 塔里木盆地西南山前拗陷恰探 1 井二叠系天然气成因和来源[J]. 石油实验地质, 2024, 46(6): 1286-1297. DOI: 10.11781/sysydz2024061286.

HUANG Li, ZHAO Ying, LÜ Huixian, et al. Genesis and source of Permian natural gas in well Qiatan-1 of piedmont depression, southwestern Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(6): 1286-1297. DOI: 10.11781/sysydz2024061286.

塔里木盆地西南山前拗陷恰探 1 井二叠系 天然气成因和来源

黄礼¹, 赵颖², 吕惠贤¹, 谢小敏², 黎立¹, 肖七林², 王张虎², 陈果², 孟强²

1. 中国石油塔里木油田公司, 新疆库尔勒 841000;

2. 长江大学资源与环境学院油气地球化学与环境湖北省重点实验室, 武汉 430100

摘要: 近期, 塔里木盆地西南山前拗陷恰探 1 井在西天山冲断带二叠系碳酸盐岩地层取得了天然气勘探的重大突破, 标志着塔里木盆地西南山前地区一个全新勘探层系的发现。然而, 该区存在多套烃源岩, 且具有异常复杂的沉积和构造特征, 对于恰探 1 井天然气成因及来源的研究十分薄弱, 制约了其下一步天然气的勘探部署。为此, 基于区域地质背景、天然气地球化学特征、潜在烃源岩特征等系统开展了恰探 1 井天然气成因及其来源研究。实测结果表明, 恰探 1 井天然气以甲烷为主 (83.53%), 气体干燥系数 (C_1/C_{1-5}) 为 0.992, 具有较高含量的 N_2 (8.36%)、 CO_2 (7.28%) 和 He (0.110%)。天然气中甲烷、乙烷、丙烷和 CO_2 的碳同位素值分别为 $-27.8‰$ 、 $-20.2‰$ 、 $-18.4‰$ 、 $1.7‰$ 。基于天然气组分、烷烃碳/氢同位素组成等综合判识认为, 恰探 1 井天然气为高一过成熟阶段的煤型气。结合潜在烃源岩的分布、有机质丰度、类型、热成熟度特征认为, 该井天然气主要来源于二叠系棋盘组烃源岩, 可能还混入了少量碳同位素组成更重的无机烃类气体。另外, N_2 、 CO_2 等非烃气体及 He 同位素证据均表明恰探 1 井天然气有一定比例的无机气体混入, 幔源氦比例约占 14.6%, 其氦含量已达到富氦天然气 ($He \geq 0.100\%$) 标准。

关键词: 天然气; 碳同位素; 氢同位素; 无机成因气; 煤型气; 二叠系; 塔西南

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

DOI: 10.11781/sysydz2024061286

Genesis and source of Permian natural gas in well Qiatan-1 of piedmont depression, southwestern Tarim Basin

HUANG Li¹, ZHAO Ying², LÜ Huixian¹, XIE Xiaomin², LI Li¹,

XIAO Qilin², WANG Zhanghu², CHEN Guo², MENG Qiang²

1. Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China;

2. Hubei Key Laboratory of Petroleum Geochemistry and Environment,

College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China

Abstract: Recently, a significant breakthrough in natural gas exploration was achieved in well Qiatan-1 in the Permian carbonate strata of the Western Tianshan thrust belt in the piedmont depression of southwestern Tarim Basin, marking the discovery of a new exploration layer in the area. However, this region is characterized by multiple sets of source rocks and extremely complex sedimentary and structural features. Research on the genesis and source of the natural gas in well Qiatan-1 is insufficient, restricting its further natural gas exploration. Therefore, the study systematically investigated the genesis and source of the natural gas in well Qiatan-1 based on regional geological background, geochemical characteristics of the gas, and potential source rock features. The measured results showed that the natural gas in well Qiatan-1 was mainly composed of methane (83.53%), with a gas dryness coefficient (C_1/C_{1-5}) of 0.992, and contained relatively high levels of N_2 (8.36%), CO_2 (7.28%), and He (0.110%).

收稿日期 (Received): 2023-10-20; 修订日期 (Revised): 2024-09-26; 出版日期 (Published): 2024-11-28.

作者简介: 黄礼 (1996—), 男, 硕士, 工程师, 从事油气地质综合研究。E-mail: huangli-tlm@petrochina.com.cn.

通信作者: 孟强 (1989—), 男, 博士, 副教授, 从事天然气地球化学研究。E-mail: mengqiang@yangtzeu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41903013), 校企合作项目 (041021090118) 和油气地球化学与环境湖北省重点实验室开放基金 (HKLPG-202308) 联合资助。

The carbon isotope values of methane, ethane, propane, and CO₂ in the gas were -27.8‰, -20.2‰, -18.4‰, and 1.7‰, respectively. Based on the natural gas composition and alkane carbon/hydrogen isotope composition, the natural gas in well Qiatan-1 was determined to be coal-type gas in the high to over-mature stage. Considering the distribution, organic matter abundance, type, thermal maturity of its potential source rocks, the gas in this well was mainly sourced from Permian source rocks in the Permian Qipan Formation, and may also be mixed with a small amount of carbon isotopes, forming heavier inorganic hydrocarbon gases. In addition, the components and isotopic evidence of non-hydrocarbon gases such as N₂, CO₂, and He showed that a certain proportion of inorganic gas had mixed into the natural gas in well Qiatan-1. The helium isotopic composition suggested that the proportion of mantle-derived helium was about 14.6%, and the He content had reached the standard for helium-rich natural gas (He ≥ 0.100%).

Key words: natural gas; carbon isotope; hydrogen isotope; inorganic genetic gas; coal-type gas; Permian; southwestern Tarim Basin

塔里木盆地西南山前拗陷油气资源丰富、勘探潜力大^[1-4]。第四次资源评价显示,拗陷内石油资源量为 4.5×10⁸ t,天然气资源量为 1.9×10¹² m³,但目前油气探明率仅为 6.6%和 4.4%。截至目前,塔西南地区发现了 5 个油气藏(田)。1977 年,在柯克亚褶皱带新近系西河甫组(N_{1x})发现柯克亚凝析油气藏,至今仍在生产油气;2001 年,在喀什凹

陷北部下白垩统克孜勒苏群发现了阿克莫木气田^[5];2010 年,在柯克亚东部柯东构造带白垩系发现了柯东 1 凝析气藏^[6];2021 年,在甫沙构造带发现甫沙 8 油藏;2023 年,在乌恰构造带恰探 1 井二叠系碳酸盐岩层段钻遇高产工业气流(图 1),日产气量达 7.91×10⁴ m³,首次取得了塔西南山前拗陷二叠系天然气勘探的重大突破^[7],为塔西南山前

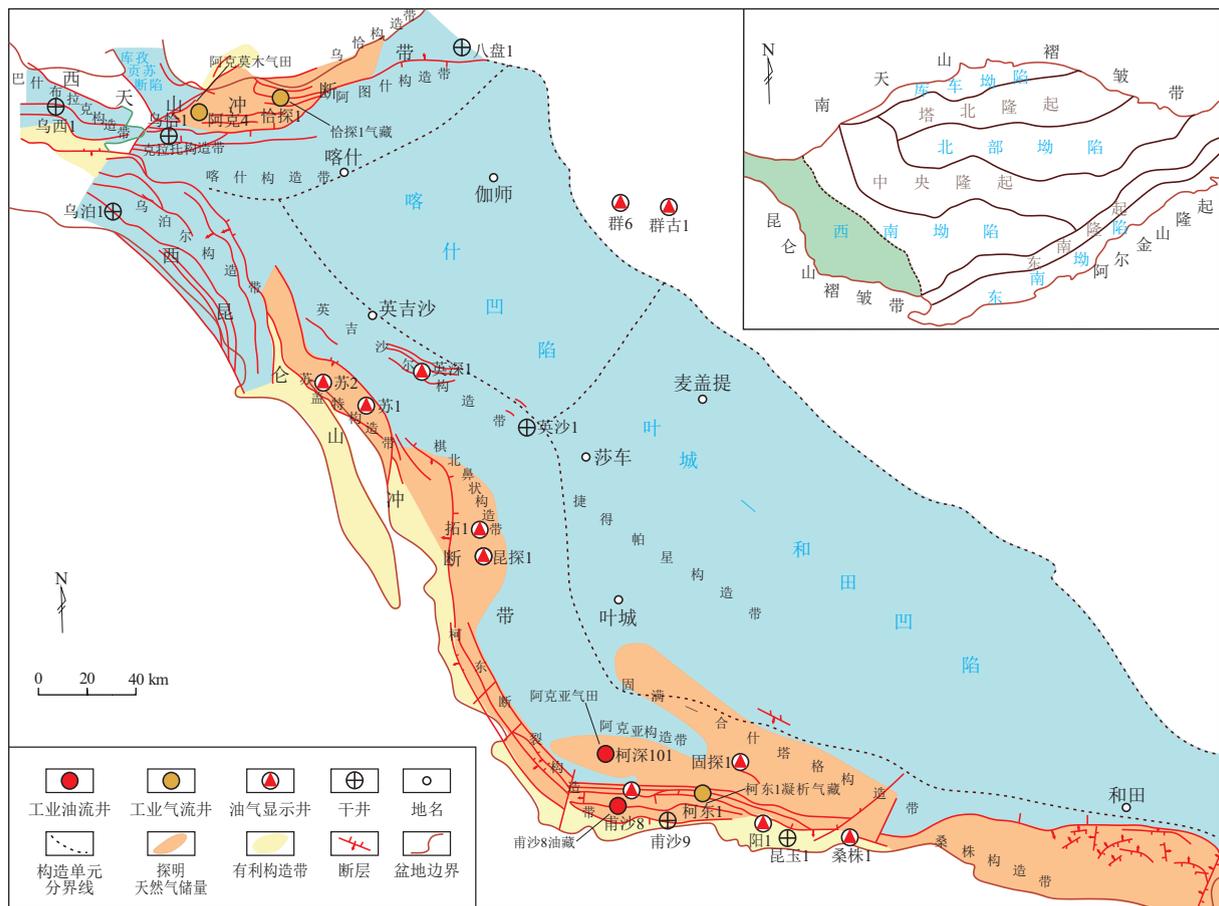


图1 塔里木盆地西南山前拗陷恰探1井气藏构造位置
据参考文献[7]修改。

Fig.1 Structural location of gas reservoir in well Qiatan-1 of piedmont depression, southwestern Tarim Basin

地区发现一个全新的勘探层系。

塔西南地区主要存在 3 套潜在烃源岩,从下到上依次为石炭系、二叠系和侏罗系。前人对塔西南地区的油气来源问题进行了深入研究,针对柯克亚油气藏和阿克莫木气藏的成因及来源提出了多种观点,目前尚未达成统一认识。初步来看,恰探 1 井天然气的地球化学特征似乎与阿克莫木气田比较接近,气体干燥系数高且碳同位素组成非常重^[7]。前人对阿克莫木天然气的来源提出了几种截然不同的观点,赵孟军等^[8-9]认为其主要来源于石炭系烃源岩,而王东良等^[10]认为其主要来源于二叠系,WU 等^[11-12]认为其主要来源于侏罗系,刘伟等^[13]认为其为二叠系和侏罗系混合来源。

前人对柯克亚气藏的来源也提出了多种观点,主要分为 3 类:一类认为其以侏罗系来源为主,其他来源为辅^[8,11,14-16];第二种观点认为其以石炭系—二叠系来源为主,侏罗系为辅^[6,17-19];还有一种观点认为是 3 套源岩中的 2 套或 3 套混源^[10,12]。由此可见,前人对阿克莫木气藏和柯克亚气藏的来源问题争议很大,原因在于研究区属于山前地带,具有异常复杂的沉积和构造特征,且存在多套烃源岩,其分布、深度、厚度、成熟度等变化剧烈,客观上增加了气源判识的难度。

王清华等^[7]初步研究认为恰探 1 井天然气来源于二叠系棋盘组,其有机质类型为 I—II 型,但天然气地球化学特征又表明其气源母质偏腐殖型,两者存在矛盾。因此,为了探究恰探 1 井天然气的成因和来源,指导该区下一步天然气勘探部署,结合前人的研究成果,综合分析研究区烃源岩的地质、地球化学特征,结合天然气组分和碳氢同位素组成、稀有气体 He 同位素组成等系统分析了恰探 1 井天然气成因和来源,以期为该区天然气勘探部署提供科学依据。

1 地质背景

塔里木盆地西南山前拗陷西北侧为西天山冲断带,西南侧为西昆仑山冲断带,两大冲断带又可进一步划分为多个次一级构造带(图 1)。区内构造特征复杂,主要发育倾向盆地的单斜构造、高角度逆冲断裂、叠瓦冲断构造等。总面积约为 $14 \times 10^4 \text{ km}^2$,是塔里木盆地油气勘探战略接替区之一^[7]。其中,恰探 1 井位于西天山冲断带的乌恰构造带(图 1)。

塔西南山前拗陷具有叠合型前陆盆地特征^[20-23],区域内沉积地层主要包括石炭系至新近

系。石炭纪—二叠纪,区内经历了一个较为完整的“海侵—海退”旋回^[24-25]。早石炭世开始出现海侵,为浅海陆棚环境;早二叠世初期,海侵达到最大,发育大规模碳酸盐台地沉积,期间发育多套碳酸盐岩地层,岩性主要为泥晶灰岩和亮晶灰岩。中二叠世开始海退,海相沉积逐渐演变为海陆过渡相沉积,发育灰色泥岩和粉砂质泥岩为主的碎屑岩。晚二叠世,海水全面退出塔西南地区,区域内完全进入了陆相沉积阶段。从石炭纪到侏罗纪总体沉积环境发生由海相—过渡相—陆相的演化,水体具有西深东浅、北深南浅的特征^[7]。

2 样品与分析

在恰探 1 井共采集了 7 个气样,分别在二叠系棋盘组(P_1q)不同深度(约 5 200~5 300 m)采集了 3 个气样,主要为随钻产出气,气量较小,达不到工业开采标准。在二叠系塔哈奇组(P_1t , 5 702~5 760 m)钻遇高产工业气流,在酸压测试期间采集 4 个气样(表 1)。为了更好地对比恰探 1 井天然气与塔西南拗陷其他气藏天然气的异同,此次也采集了阿克莫木气田、柯克亚气田以及新钻探的甫沙 8 井、康苏 6 井、昆探 1 井等天然气样,共获得天然气样 26 个。气体样品采集使用双阀门高压钢瓶,并用所采天然气反复冲洗,以避免大气污染,气体采集压力大于 2 MPa。此外,在塔西南拗陷 100 余个剖面/井采集了 1 000 余块烃源岩样品,开展了烃源岩地球化学分析,包括总有机碳(TOC)含量、镜质体反射率(R_o)等分析。在喀什凹陷及周缘地区选取了 23 个典型剖面/井的烃源岩样品共 144 块,开展了干酪根碳同位素组成分析。

2.1 气体地球化学分析

上述所有天然气样品均开展了气体组分和碳同位素组成分析,并对其中 20 个样品开展了氢同位素组成分析。天然气相关分析均在中国科学院西北生态环境资源研究院完成,气体组分测试采用 Agilent 6890N 气相色谱仪(GC),碳同位素组成测试采用 Agilent 6890 气相色谱—MAT 253 稳定同位素质谱联用仪,氢同位素组成测试采用 Ultra trace GC—MAT 253 同位素质谱联用仪,具体分析流程及实验条件可参考孟强等^[26]。恰探 1 井天然气作为重点研究对象,分析了其稀有气体氦同位素组成。氦同位素比值分析在中国科学院西北生态环境资源研究院完成,采用英国 Nu 公司的 Noblesse 稀有气体同位素质谱仪, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的分析标准偏差小于 3%。

表 1 塔里木盆地西南山前坳陷天然气地球化学特征

Table 1 Geochemical characteristics of natural gas in piedmont depression, southwestern Tarim Basin

区域	井号	深度/m	层位	气体组分/%								$\delta^{13}C_{VPDB}/\text{‰}$				$\delta D_{VSMOW}/\text{‰}$					
				CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	iC ₄ H ₁₀	nC ₄ H ₁₀	iC ₅ H ₁₂	nC ₅ H ₁₂	N ₂	CO ₂	CH ₄	CO ₂	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	iC ₄ H ₁₀	nC ₄ H ₁₀	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈
乌恰	恰探1 ¹	5 702~5 760	P ₁ f	79.76	0.57	0.07	0.02	0.02	0.01	0.01	8.26	11.17	-27.2	2.7	-19.8	-17.8	-16.7	-17.3	-145		
	恰探1 ²	5 702~5 760	P ₁ f	81.08	0.57	0.07	0.02	0.02	0.01	0.01	8.45	9.66	-28.2	1.9	-20.2	-18.5	-15.9	-18.0	-142		
	恰探1 ³	5 702~5 760	P ₁ f	85.87	0.61	0.07	0.02	0.02	0.01	0.01	8.52	4.74	-27.6	2.0	-20.2	-18.2	-16.4	-18.0	-142		
	恰探1 ⁴	5 702~5 760	P ₁ f	87.40	0.61	0.07	0.02	0.02	0.01	0.01	8.21	3.54	-28.1	0.2	-20.5	-19.2	-18.2	-19.0	-143		
	恰探1	5 237~5 241	P ₁ g	2.55	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	97.09	0.34	-31.6	-18.5	-24.0				-145		
	恰探1	5 252~5 257	P ₁ g	6.57	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	93.08	0.32	-31.5	-17.9	-22.5				-142		
	恰探1	5 301~5 309	P ₁ g	5.71	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	93.94	0.31	-32.4	-17.6	-22.4				-142	-85	
阿克莫木	阿克101		K ₂	74.54	0.30	0.03	0.03			7.96	17.01	-25.8	-3.2	-22.8				-137	-67		
	阿克401		K ₂	75.49	0.39	0.05	0.05			7.43	16.45	-26.0	-2.6	-22.4				-146	-190	-168	
康苏	康苏6	6 203.32		59.71	13.59	10.05	1.56	2.75	0.65	0.54	10.40	0.74	-47.9	-24.4	-31.7	-29.2	-30.4	-28.1	-225	-191	-168
	康苏6	6 212.32		59.32	14.86	10.05	1.49	2.72	0.65	0.53	10.36	0.01	-48.1		-31.8	-29.1	-30.2	-28.3	-225		
棋北	昆探1	7 046.5~7 054.5	C ₂ f	17.25	0.15	0.04	0.01	0.01	0.09	0.05	0.16	82.35	-29.5	0.9	-22.1	-19.9	-20.1	-19.3			
	昆探1	7 046.5~7 054.5	C ₂ f	11.50	0.01							88.23	-28.4	2.0							
甫沙	甫沙8	3 859.5~3 877.5	J ₅ f	63.95	16.26	7.39	0.78	2.16	0.25	0.53	8.60	0.08	-42.2		-31.3	-29.6	-30.0	-29.6			
	甫沙8	3 859.5~3 877.5	J ₅ f	63.38	15.29	6.56	0.65	1.70	0.18	0.35	11.85	0.04	-42.7		-31.1	-29.6	-29.3	-29.4			
柯克亚	柯300		N ₁ x	79.91	7.48	2.21	0.44	1.22	0.43	1.00	6.04	0.32	-38.8		-26.3	-24.7	-25.6	-25.7	-168	-137	-118
	柯516		N ₁ x	79.39	8.45	2.07	0.42	1.17	0.49	1.10	6.33	0.35	-38.8		-26.3	-24.9	-26.0	-25.9	-168	-140	-116
	柯7102		N ₁ x	83.59	7.15	2.30	0.40	0.91	0.19	0.38	4.36	0.42	-37.6		-25.9	-24.4	-26.3	-25.4	-166	-137	-121
	柯412		N ₁ x	82.95	7.47	2.27	0.35	0.72	0.13	0.28	5.13	0.30	-37.9		-26.1	-24.5	-26.3	-25.8	-166	-139	-119
	柯301		N ₁ x	87.20	7.32	1.04	0.04	0.09	0.02	0.06	3.89	0.21	-37.1		-26.0	-24.0		-26.4	-166	-138	-94
	柯7102		N ₁ x	83.36	7.05	2.47	0.48	1.13	0.24	0.52	3.61	0.62	-37.6		-25.9	-24.4	-26.3	-25.4	-166	-138	-118
	柯7010		N ₁ x	85.57	7.11	1.69	0.24	0.51	0.10	0.20	4.04	0.29	-37.4		-26.0	-24.2	-26.3	-25.4	-166	-138	-113
	柯233		N ₁ x	80.10	8.31	2.68	0.44	0.96	0.19	0.37	6.27	0.27	-38.8		-26.4	-24.6	-26.1	-26.3	-168	-155	-121
柯深	柯深101	6 354~6 363	E ₂ k	88.97	5.60	1.50	1.02			2.38	0.52	-35.6	-9.6	-24.2	-25.3						
	柯深102	6 277~6 328	E ₂ k	88.84	5.88	1.80	0.96			1.89	0.00	-35.0		-27.7	-24.7				-154	-125	-111
	柯深101	6 807~6 835	K ₂ kz	80.65	1.46	0.07	0.03			17.66	0.12	-38.4		-24.9							

注: ¹为 2023 年 2 月 26 日 08:30 时取样; ²为 2023 年 2 月 26 日 16:30 时取样; ³为 2023 年 3 月 1 日 08:30 时取样; ⁴为 2023 年 3 月 1 日 16:30 时取样。C₂t 为石炭系塔哈奇组; E₂k 为古近系卡拉塔尔组。

2.2 烃源岩地球化学分析

开展了烃源岩样品的 TOC 含量、R_o、干酪根碳同位素组成等分析。TOC 含量分析采用美国 LECO CS230PCHC 定碳定硫分析仪, R_o 分析采用德国卡尔蔡司数字显微煤岩分析系统。干酪根碳同位素组成分析时, 先将烃源岩样品粉碎至 100 目以上, 再取 100 g 左右制备干酪根。取制备好的干酪根样品 1~2 mg 放入流动氧有机质燃烧碳同位素制样装置的石英燃烧管中, 通入足量高纯氧气, 将干酪根充分燃烧转化为 CO₂, 除水、除杂后采用 MAT 253 稳定同位素质谱仪测试干酪根碳同位素组成, 碳同位素测定采用国标《地质样品有机地球化学分析方法: GB/T 18340.2—2010》。

3 天然气地球化学特征

塔西南山前坳陷各天然气藏(田)的气体地球化学特征差异极大(表 1)。除恰探 1 井随钻气(埋深约 5 200~5 300 m)和昆探 1 井外, 大多数天然气

以烃类气体为主, 甲烷平均含量为 78.62%, 乙烷平均含量为 6.49%; 非烃气体主要为 N₂ 和 CO₂, N₂ 平均含量为 7.22%; CO₂ 平均含量为 3.18%。恰探 1 井随钻气以 N₂ 为主, 含量为 93.08%~97.09%, 气体干燥系数(C₁/C₁₋₅) 为 0.994; 昆探 1 井以 CO₂ 为主, 2 个气样的 CO₂ 含量分别为 82.35% 和 88.23%, 气体干燥系数(C₁/C₁₋₅) 分别为 0.980 和 0.999。恰探 1 井天然气(5 702~5 760 m) 中甲烷平均含量为 83.53%, 乙烷平均含量为 0.59%; 非烃气体主要是 N₂ 和 CO₂, N₂ 平均含量为 8.36%; CO₂ 平均含量为 7.28%, 气体干燥系数(C₁/C₁₋₅) 为 0.992, 为干气。

塔西南山前坳陷天然气的碳同位素组成分布范围较广, $\delta^{13}C_1$ 平均为 -35.0‰, $\delta^{13}C_2$ 平均为 -25.1‰, $\delta^{13}C_3$ 平均为 -24.0‰。其中阿克莫木气藏的甲烷碳同位素组成最重, $\delta^{13}C_1$ 为 -26.0‰, $\delta^{13}C_2$ 为 -22.6‰。前人也对阿克莫木天然气进行了测试分析, 此次收集到了 7 个天然气数据, 前人测的 $\delta^{13}C_1$ 平均为 -24.0‰, $\delta^{13}C_2$ 平均为 -21.2‰^[9, 11, 13, 27]。康苏 6 井的甲烷

碳同位素组成最轻,其 $\delta^{13}\text{C}_1$ 为 $-48.1\text{‰} \sim -47.9\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C}_2$ 为 $-31.8\text{‰} \sim -31.7\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C}_3$ 为 $-29.2\text{‰} \sim -29.1\text{‰}$ 。恰探 1 井随钻气的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 为 $-32.4\text{‰} \sim -31.5\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C}_2$ 为 $-24.0\text{‰} \sim -22.4\text{‰}$, 丙烷含量低, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 为 $-18.5\text{‰} \sim -17.6\text{‰}$ 。恰探 1 井天然气 (5 702~5 760 m) 的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 为 $-28.2\text{‰} \sim -27.2\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C}_2$ 为 $-20.5\text{‰} \sim -19.8\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C}_3$ 为 $-19.2\text{‰} \sim -17.8\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 为 $0.2\text{‰} \sim 2.7\text{‰}$ 。

塔西南山前拗陷天然气的氢同位素组成可分为 3 类,一是以康苏 6 井为代表的具有较轻的氢同位素组成天然气,其甲烷、乙烷、丙烷的氢同位素组成分别为 -225‰ 、 -190‰ 、 -168‰ ;二是以柯克亚和柯深地区为代表的天然气,其甲烷、乙烷、丙烷的氢同位素组成平均分别为 -165‰ 、 -138‰ 、 -115‰ ;三是恰探 1 井和阿克莫木为代表的天然气,其甲烷氢同位素平均为 -143‰ ,乙烷、丙烷因含量低,难以测得可信的氢同位素数据。

恰探 1 井天然气 He 含量为 0.110% (表 2),达到富氦天然气 ($\text{He} \geq 0.100\%$) 标准^[29-30], $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 1.7×10^{-6} , R/Ra 比值为 1.214。

4 讨论

4.1 恰探 1 井天然气成因类型

天然气的成因来源复杂多样,通常采用气体组分、碳同位素组成、氢同位素组成并结合地质背景来综合区分天然气成因类型^[26,28]。通过表 1 的天然地球化学数据可以发现,恰探 1 井天然气有几个突出特点:(1) 气体干燥系数很高, $\text{C}_1/\text{C}_{1-5}$ 大于 0.99,干气一般来源于生物气或高一过成熟源岩;(2) 烷烃碳、氢同位素组成很重,表明其源岩热演化程度很高,可能有无机成因气混入,或经历了次生作用,如生物降解或热化学硫酸盐还原作用 (TSR) 等。从目前的资料来看,因其深度较大 ($>5\ 700\text{ m}$),

不具备生物降解的条件;天然气组分中也未检测到 H_2S 气体,说明未发生还原作用;(3) 非烃气体 N_2 和 CO_2 含量均较高,说明可能经历了次生作用或有深部来源气体的混合;(4) CO_2 碳同位素组成偏重, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 全部为正值,表明其 CO_2 为无机成因。阿克莫木天然气也具有上述类似特征,但二者并不完全一致。值得注意的是,恰探 1 井天然气中 CO_2 含量在酸压测试期间随采样时间推迟明显降低, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 也逐渐变小,高含量的 CO_2 与较重的碳同位素组成可能与酸和储层碳酸盐岩发生溶蚀作用有关。

广义来说,天然气分为有机成因气和无机成因气,碳同位素组成序列是区分二者的首要标志,有机成因气一般为正序,无机成因气一般为反序^[29-31]。塔西南山前拗陷天然气烷烃碳同位素组成分布范围广泛,但碳同位素序列全部为正序 (图 2),说明天然气主体为有机成因。另外,恰探 1 井天然气的碳同位素组成序列与其碳原子数的倒数 ($1/n$) 的连线非一条直线,表明其可能存在混源或次生作用^[32]。

有机成因天然气一般包括煤型气、油型气或二者的混合气^[29-30, 33]。有机成因天然气的甲、乙烷碳同位素组成之间一般具有正相关性,即甲烷碳同

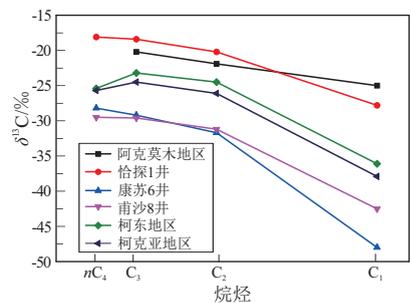


图 2 塔西南山前拗陷天然气烷烃碳同位素序列
Fig.2 Alkane carbon isotope sequence of natural gas in piedmont depression, southwestern Tarim Basin

表 2 塔里木盆地西南山前拗陷天然气中的稀有气体地球化学特征

Table 2 Geochemical characteristics of rare gases in natural gas from piedmont depression, southwestern Tarim Basin

井名/地区	层位	深度/m	He/%	Ar/%	$^3\text{He}/^4\text{He}/10^{-8}$	R/Ra	幔源 He/%
恰探 1 井	P_{1t}	5 702~2 760	0.110	0.036	170	1.214	14.60
阿克 1 井	K_2	3 225~3 341	0.134		83.4	0.596	6.80
柯深 101 井	E_2k	6 354~6 363			13.7	0.098	1.20
柯克亚地区	N_1		0.010		6.1~8.6	0.050~0.075	0.65
大北 2 井	K	5 658~5 670			5.32	0.038	0.43
迪那 2 井	N_1	4 598			2.48	0.018	0.15
DW105-25 井	N_1	367~396			5.67	0.041	0.45
YH23-1 井	N_1	4 946~4 988			3.46	0.025	0.25
YH1 井	E	5 451~5 466			3.81	0.027	0.28
却勒 1 井	K	5 761~5 764			5.36	0.038	0.44

位素组成较重则乙烷碳同位素组成也较重, 甲、乙烷碳同位素组成与源岩热演化程度 R_o 密切相关。前人根据 $\delta^{13}C_1$ 与 R_o 之间存在对应关系建立了油型气和煤型气的经验公式^[29, 34-38], 大体认为甲烷碳同位素组成随热演化程度增高而逐渐变重, 相同热演化程度时煤型气的甲烷碳同位素组成重于油型气。

将塔西南山前天然气的甲、乙烷碳同位素组成与盆地内其他区块(塔中、和田河、克拉 2、大北等)的天然气的进行对比, 以业界广泛使用的 $\delta^{13}C_2 = -28\text{‰}$ 为界划分煤型气和油型气可以发现, 恰探 1 井、阿克莫木、柯克亚、柯东 1 井均为煤型气, 而康苏 6 井和甫沙 8 井为油型气(图 3a)。前人通过统计分析认为, 油型气的乙烷碳同位素组成一般小于 -28‰ , 丙烷碳同位素组成一般小于 -25‰ , 煤型气则刚好相反^[28, 41]。从乙、丙烷的碳同位素组成特征来看, 康苏 6 井和甫沙 8 井也落在油型气区域, 阿克莫木、恰探 1 井、柯克亚、柯东 1 井落在煤型气区域(图 3b)。从碳同位素组成判识认为, 塔西南地区的康苏 6、甫沙 8 井落在油型气区域, 但与塔中、和田河的典型油型气有所区别, 介于油型气与煤型气之间, 结合其较轻的甲烷碳同位素组成判断其可能为油型气为主的混合气。柯克亚、柯东、阿克莫木气藏恰探 1 井等主体可能是煤型气, 其中阿克莫木气藏的源岩成熟度最高, 其次为恰探 1 井, 康苏 6 井和甫沙 8 井的源岩成熟度相对较低。从甲、乙烷碳同位素组成来看, 柯克亚、柯东和柯深地区应该来源于不同成熟度的同一套烃源岩, 相对来说, 柯东 1 井成熟度略高。

在判识天然气成因时, 常用 WHITICAR^[33, 42] 提出的利用 $\delta^{13}C_1$ 与 C_1/C_{2+3} 的关系图版来判识, 该图版将天然气的分子和同位素信息结合起来, 可以区分不同类型的热成因气、生物气及混合气。从 WHITICAR 的图版来看, 柯克亚气田与塔中油型气

具有相近的甲烷碳同位素组成, 但柯克亚气田具有更高的重烃气体含量(C_1/C_{2+3}), 更符合煤型气的特征, 康苏 6、甫沙 8 井在此处难以判断, 更接近混合气的特征; 恰探 1 井与阿克莫木天然气更接近煤型气的特征(图 4)。

天然气中最主要的成分是甲烷, 因此, 可以利用甲烷的碳/氢同位素组成来判识天然气的成因。一般认为, 与煤型气相比, 油型气具有较轻的碳同位素和较重的氢同位素。WANG 等^[43] 曾利用甲烷碳、氢同位素组成建立了油型气与煤型气的判识图版, 从甲烷碳/氢同位素组成来看, 恰探 1 井、阿克莫木均落入煤型气区域, 康苏 6 井为混合气(图 5a), 与前面的判识一致; 但柯克亚落入了油型气区域(图 5a), 与前面的判识结果出现了矛盾, 原因在于柯克亚具有较重的甲烷氢同位素组成, 影响氢同位素的除母质类型外, 还包括热演化程度和古水介质。从甲烷氢同位素和乙烷碳同位素组成来看,

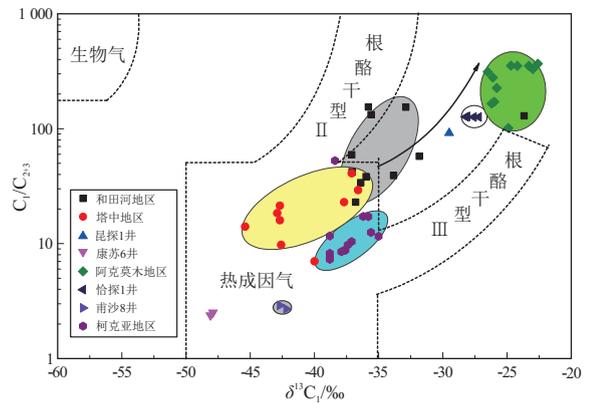


图 4 塔西南山前拗陷天然气甲烷碳同位素组成与 C_1/C_{2+3} 关系
据参考文献[33, 42]修改。

Fig.4 Relationship between methane carbon isotope composition and C_1/C_{2+3} in natural gas from piedmont depression, southwestern Tarim Basin

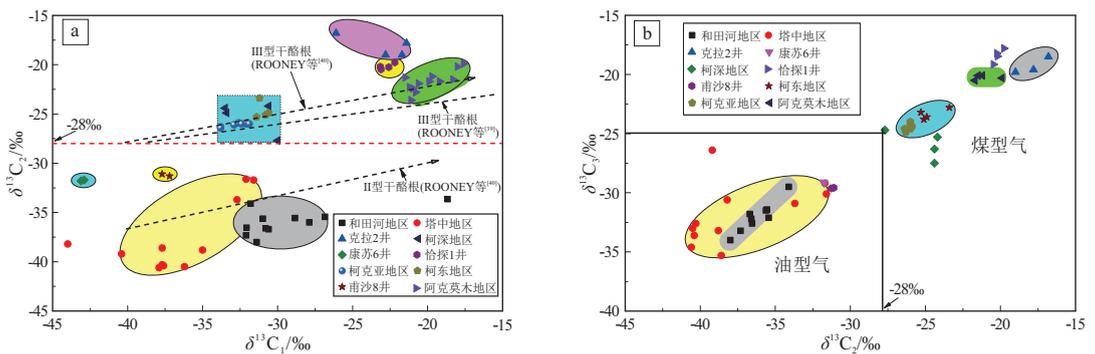


图 3 塔西南山前拗陷天然气的甲烷和乙烷、乙烷和丙烷碳同位素组成相关性

Fig.3 Correlation of carbon isotope compositions between methane and ethane, and between ethane and propane in natural gas from piedmont depression, southwestern Tarim Basin

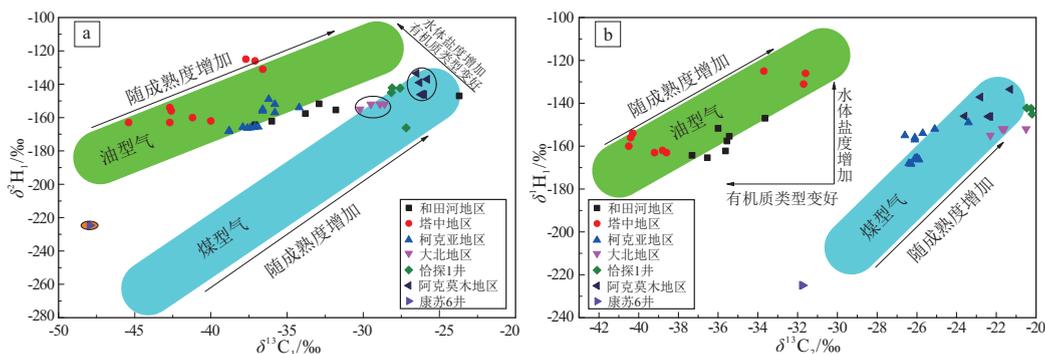


图 5 塔西南山前拗陷天然气甲烷碳、氢同位素 (a), 甲烷氢同位素和乙烷碳同位素 (b) 组成特征
图版参考自文献[43]。

Fig.5 Compositional characteristics of methane carbon and hydrogen isotopes (a), methane hydrogen and ethane carbon isotopes (b) in natural gas from piedmont depression, southwestern Tarim Basin

阿克莫木、柯克亚、恰探 1 井天然气均为煤型气, 康苏 6 井更偏向煤型气 (图 5b)。

正常热演化形成的天然气或同一气源形成的天然气其甲烷和乙烷含量一般具有很好的负相关性, 即甲烷含量越高, 乙烷含量则越低。不同源天然气或经过次生改造的天然气其甲烷和乙烷含量会有所偏离, 偏离程度与混合或次生改造程度有关。将塔里木盆地典型气藏的甲烷和乙烷含量投点发现, 康苏 6 井和甫沙 8 井与正常天然气相比有所偏离, 而阿克莫木和恰探 1 井则严重偏离 (图 6)。偏离的原因可能是二者的非烃气体含量相对较高, 使得甲烷、乙烷相对含量降低。例如, 恰探 1 井天然气中 N_2 含量为 8.21%~8.52%, 平均为 8.36%, CO_2 含量为 3.54%~11.17%, 平均为 7.28%; 阿克莫木天然气中 N_2 含量平均 7.70%, CO_2 含量平均为 16.73%; 康苏 6 井天然气中 N_2 含量平均为 10.38%, 甫沙 8 井天然气中 N_2 含量平均为 10.22% (表 1)。上述几口井偏离的原因均是非烃气体含量较高所

致, 因此, 笔者认为恰探 1 井和阿克莫木天然气中 高含量的非烃气体应具有次生改造或混源特征。

综上所述, 烷烃碳氢同位素组成、烃类气体组分综合判识认为恰探 1 井天然气为高一过成熟阶段的煤型气, 可能经历了混合或次生作用。

4.2 恰探 1 井天然气来源

4.2.1 区域烃源岩特征

塔西南地区主要存在 3 套潜在烃源岩, 从下到上依次为石炭系、二叠系和侏罗系。石炭系烃源岩主要分布在齐美干周缘地区, 烃源岩厚度主要集中在 100~500 m, 在昆探 1 井、拓 1 井及库山河剖面附近最大厚度分别超过 350 m 和 700 m (图 7a), 其 TOC 含量主要为 0.6%~1.2%, 在拓 1 井—棋北 3 井附近 TOC 含量超过 1.2%, 烃源岩 R_o 主要为 1.3%~2.8%, 处于成熟—过成熟阶段。

二叠系烃源岩包括棋盘组和普司格组, 棋盘组烃源岩分布在喀什地区及齐美干周缘地区, 烃源岩厚度主要集中在 50~650 m, 在昆探 1 井—拓 1 井及恰探 1 井—阿北 1 井区带附近最大厚度分别超过 300 m 和 650 m (图 7b)。棋盘组烃源岩 TOC 含量主要为 0.6%~1.2%, 在恰探 1、拓 1 井及和什拉甫—阿尔塔什剖面附近 TOC 含量最大值超过了 1.2%。烃源岩 R_o 主要分布在 1.2%~1.8% 之间, 处于成熟—高成熟阶段, 其中恰探 1 井棋盘组烃源岩 (埋深 5 526 m) 实测 R_o 为 1.34%~1.36%。普司格组烃源岩主要分布在柯克亚地区, 烃源岩厚度主要集中在 50~500 m 之间, 在甫沙 8 井—柯东 2 井区带附近最大厚度超过 550 m。普司格组烃源岩 TOC 含量主要为 0.5%~1.2%, 在甫沙 2 井附近 TOC 含量超过 1.2%, 其 R_o 主要分布在 1.2%~1.8% 之间, 处于成熟—高成熟阶段。

侏罗系烃源岩在喀什地区、齐美干周缘地区及

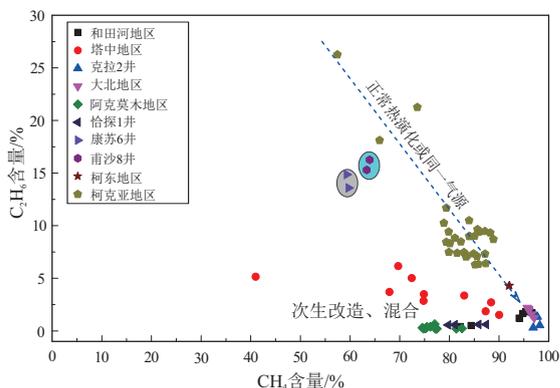


图 6 塔西南山前拗陷天然气甲烷和乙烷含量关系

Fig.6 Relationship between methane and ethane content in natural gas

from piedmont depression, southwestern Tarim Basin

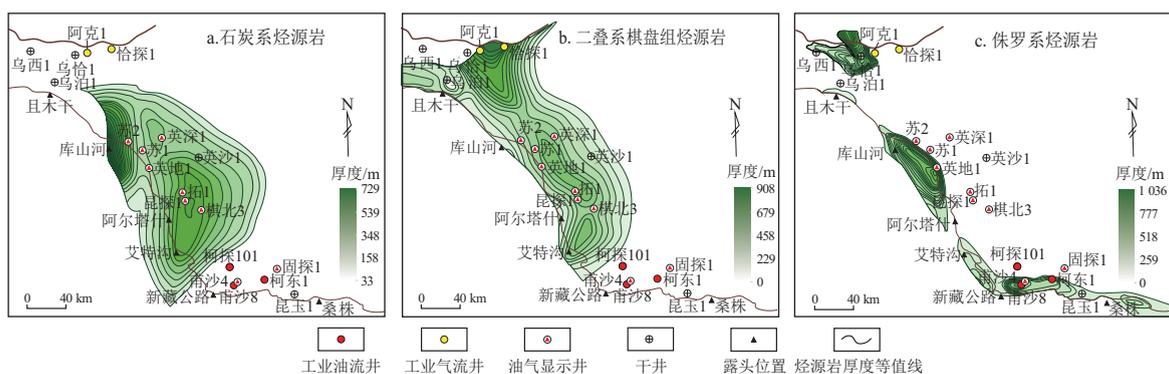


图7 塔西南山前坳陷烃源岩分布及其厚度等值线

Fig.7 Distribution and thickness isolines of source rocks in piedmont depression, southwestern Tarim Basin

柯克亚地区均有分布,烃源岩厚度主要集中在 100~600 m,在库孜贡苏剖面北部、依格孜牙剖面及甫沙8井区带附近最大厚度分别超过 800、550、450 m(图7c)。侏罗系烃源岩 R_o 主要分布在 0.6%~1.2%之间,处于成熟阶段。侏罗系烃源岩在喀什地区主要为湖泊相或三角洲相沉积为主的杨叶组碎屑岩,位于阿克1气藏西部,距离恰探1井较远,且分布范围较为局限。从目前的勘探资料来看,根据区域内烃源岩的分布及厚度,二叠系棋盘组烃源岩最有可能为恰探1井的气源,其次为侏罗系烃源岩,石炭系烃源岩在喀什构造带基本没有分布或分布范围较为局限,不太可能为其气源。

前人对区域内3套烃源岩的有机质类型尚有争议^[7,9,12]。如莫午零等^[6]认为二叠系烃源岩主要为II型,少量I型,但其研究区域位于柯克亚—柯东构造带,与喀什凹陷乌恰构造带二叠系烃源岩有机质类型可能有差异。王清华等^[7]认为二叠系烃源岩成烃生物以藻类体和无定形体为主,有机质类型为I—II型。笔者认为成烃生物是鉴定有机质类型最直观的方法,但受限于地层的非均质性,需要对大量样品的显微组分进行统计分析,计算干酪根类型指数(TI指数)才能得出较为客观的认识,工作量巨大且受人为因素影响大。笔者也观察了恰探1井二叠系烃源岩的成烃生物特征,有的样品中有机质以层状藻类体和无定形体为主,也有很多样品中的有机质以镜质组和惰质组为主,地层非均质性非常强。恰探1井二叠系棋盘组烃源岩厚度超过300 m,仅用几个样品的成烃生物特征难以全面反映该层段的有机质类型。因此,本次研究采用干酪根碳同位素数据判别有机质类型,该方法受样品非均质性、热成熟度、人为因素等影响较小。喀什凹陷及周缘地区144个烃源岩的干酪根碳同位素组成数据显示侏罗系杨叶组烃源岩以II₁—

II₂型有机质为主,康苏组烃源岩以II₂—III型为主;二叠系棋盘组烃源岩以III型有机质为主;石炭系烃源岩较为复杂,从I型到III型均有分布(图8)。

前已述及,恰探1井天然气为高一过成熟阶段的煤型气。从有机质类型来看,只有二叠系棋盘组和侏罗系康苏组烃源岩有机质类型以III型为主,但康苏组烃源岩处于成熟阶段,棋盘组烃源岩处于成熟—高成熟阶段。根据前人提出的煤型气的 $\delta^{13}C_{1-R_o}$ 的经验公式计算恰探1井天然气的源岩 R_o 为1.03%~3.79%(表3)。其中STAHL^[34]和SCHOELL^[35]通过欧洲和北美的煤型气研究提出了 $\delta^{13}C_{1-R_o}$ 经验公式,与中国学者提出的 $\delta^{13}C_{1-R_o}$ 经验公式计算结果差距甚大(表3),这可能与不同盆地的地质背景有关。中国学者提出的公式中,徐永昌等^[30]提出的可能更适用于累积聚集的天然气藏,刘文汇等^[37]根据中国东部盆地天然气总结的经验公式对中低成熟度煤型气更适用。相对来说,陈建平^[38]在前人基础上根据准噶尔盆地和吐哈盆地天然气提出的煤型气经验公式可能更适用于本研究区,其计算结果表明恰探1井天然气的源岩 R_o 为

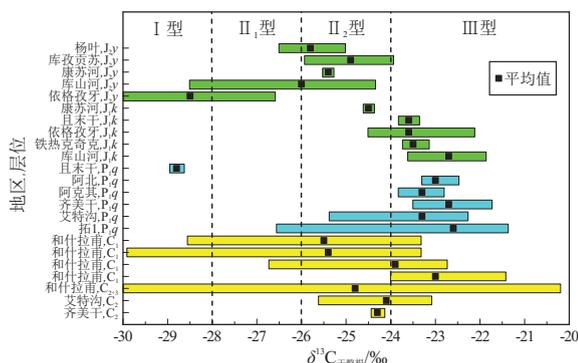


图8 塔里木盆地喀什凹陷及周缘地区烃源岩干酪根碳同位素组成

Fig.8 Carbon isotope composition of kerogen in source rocks from Kashi Sag and surrounding areas, Tarim Basin

表 3 塔里木盆地西南山前拗陷天然气的烷烃碳同位素组成(平均)及其烃源岩镜质体反射率

Table 3 Average alkane carbon isotope composition of natural gas and calculated vitrinite reflectance of source rocks in piedmont depression, southwestern Tarim Basin

地区/井号	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$			煤型气 $R_o/\%$						
	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	$R_o^{①}$	$R_o^{②}$	$R_o^{③}$	$R_o^{④}$	$R_o^{⑤}$	$R_o^{⑥}$	$R_o^{⑦}$
克拉 2	-27.0	-18.6	-19.7	1.18	1.31	3.34	4.69	1.49	2.23	2.63
大北	-29.6	-20.5	-20.6	0.77	0.65	2.18	2.35	1.28	1.71	2.07
阿克 1	-24.9	-21.7	-20.3	1.67	2.29	4.70	8.21	1.68	2.76	3.19
甫沙 8	-42.5	-31.2	-29.6	0.09	0.02	0.27	0.08	0.62	0.45	0.63
柯东 1	-36.0	-24.7	-23.4	0.27	0.12	0.77	0.43	0.89	0.88	1.15
柯克亚	-38.6	-26.0	-25.5	0.17	0.06	0.50	0.21	0.77	0.68	0.90
恰探 1	-27.8	-20.2	-18.4	1.03	1.06	2.93	3.79	1.42	2.05	2.44

注: $R_o^{①} \sim R_o^{⑦}$ 分别据 STAHL^[34]、SCHOELL^[35]、戴金星等^[29]、沈平等^[36]、徐永昌等^[30]、刘文汇等^[37]、陈建平^[38]。

2.44%(表 3),处于过成熟阶段。根据区域内烃源岩分布可知,恰探 1 井天然气的潜在烃源岩包括二叠系棋盘组和侏罗系康苏组、杨叶组。相对来说,其来源于成熟度更高的二叠系棋盘组烃源岩的可能性更大一些。但恰探 1 井棋盘组烃源岩(埋深 5 500 m)实测 R_o 为 1.34%~1.36%,与经验公式计算值差异较大。考虑到研究区叠瓦冲断构造发育,处于下盘的更深部的棋盘组烃源岩具有更高的热成熟度,单井盆地模拟结果显示下盘该层段烃源岩成熟度达到理论计算值($R_o = 2.44\%$)时,深度将超过 11 km。由此出现一个问题,若恰探 1 井天然气主要来源于下盘的棋盘组烃源岩,那大面积、厚层、广泛分布的离气藏更近的上盘烃源岩贡献在何处?因此,这种解释似乎并不合理,更可能是恰探 1 井天然气主要来源于更近的上盘棋盘组烃源岩,不排除下盘烃源岩的贡献,还有可能混入了少量碳同位素更重的无机成因烃类气,从而导致恰探 1 井天然气的甲烷碳同位素组成偏重。

4.2.2 非烃气体和稀有气体特征

非烃气体和稀有气体也是研究地质体形成、演化特征的良好示踪剂^[44]。塔西南拗陷部分天然气藏/井具有较高的非烃气体含量,如阿克莫木、恰探 1 井及柯深、柯克亚的部分气井具有较高的 N_2 含量,大体介于 5%~10%之间;阿克莫木和恰探 1 井也具有较高的 CO_2 含量,约为 4%~18%;但 N_2 含量与 CO_2 含量之间似乎无相关关系(图 9)。天然气藏中 N_2 的来源一般包括大气来源、源岩有机质的生物降解或热分解成因、沉积岩含氮矿物的高温热解成因、地壳深部和上地幔来源等^[45]。柯克亚气藏中的 N_2 主要是烃源岩热氨化作用与烃源岩裂解产生的氮气混合^[18]。阿克莫木气藏中的 N_2 主要是热氨化作用产生的 N_2 与上地幔氮气混合^[46]。恰探 1 井位于阿克莫木气田东侧约 20 km 处,且二

者的地球化学特征较为相似,因此,初步推测恰探 1 井天然气中的 N_2 主要是深部来源,混合少量有机质热解来源。

碳同位素组成是辨识天然气中 CO_2 成因的重要标志,一般认为有机成因 CO_2 具有较轻的碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} < -10\text{‰}$),而无机成因 CO_2 具有较重的碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} > -7\text{‰}$)^[29-30]。阿克莫木和恰探 1 井天然气均具有较高的 CO_2 含量和较重的碳同位素组成,相对来说,阿克莫木天然气的 CO_2 含量更高但碳同位素略轻,而恰探 1 井天然气的 CO_2 含量稍低但碳同位素更重。其中阿克莫木天然气的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 为 $-5\text{‰} \sim -1\text{‰}$,恰探 1 井天然气的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 为 $0.2\text{‰} \sim 2.7\text{‰}$ (图 10),两者均符合无机成因 CO_2 的特征,可能为碳酸盐矿物分解/溶解或地幔来源。相对来说,恰探 1 井天然气中无机 CO_2 比例可能高于阿克莫木天然气。前已述及,恰探 1 井天然气中高含量的 CO_2 与较重的碳同位素组成可能与人工酸和储层碳酸盐岩发生溶蚀作用有关,因此恰探 1 井天然气中的 CO_2 包括原生气和压裂改

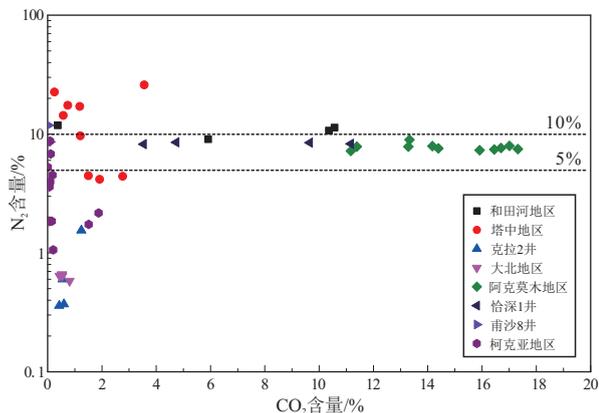


图 9 塔西南山前拗陷天然气中 N_2 含量和 CO_2 含量的关系
Fig.9 Relationship between N_2 and CO_2 contents in natural gas from piedmont depression, southwestern Tarim Basin

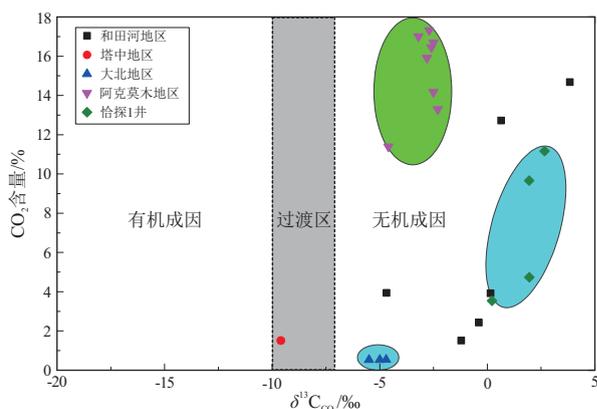


图10 塔西南山前坳陷天然气中CO₂含量和碳同位素特征成因划分依据参考文献[29-30]。

Fig.10 CO₂ content and carbon isotope composition of natural gas in piedmont depression, southwestern Tarim Basin

造气,但目前尚无法明确二者的贡献率。从表1可以看出,恰探1井的4个样品,CO₂含量随着采样时间推迟明显降低,CO₂的碳同位素值也逐渐降低,反映了酸压作用影响的逐渐消失。最后一次采样的CO₂含量为3.54%, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 为0.2‰,与阿克莫木天然气中CO₂的碳同位素值逐渐靠近,因此,认为恰探1井天然气中的CO₂可能为无机来源。

稀有气体也是天然气中的重要组成部分,应用氦及其他稀有气体同位素组成特征可以有效判别氦气成因、来源^[44]。大气来源氦的³He/⁴He值为 1.4×10^{-6} ,壳源氦的³He/⁴He值为 $n(10^{-8} \sim 10^{-9})$,幔源氦的³He/⁴He值为 1.1×10^{-5} 或更高^[47]。恰探1井天然气具有较高的氦气含量,达到0.11%,³He/⁴He值为 1.7×10^{-6} ;阿克莫木天然气也具有较高的氦气含量(0.134%)和较大的³He/⁴He比值(8.34×10^{-7})(表2)。上述特征表明恰探1井和阿克莫木天然气中的氦气具有壳—幔混合特征,幔源氦具有重要贡献。为了确定幔源氦的贡献比例,本文采用前人常用的估算方法,以壳源和幔源为两个端元,选取壳源氦的³He/⁴He值为 2×10^{-8} ,幔源氦的³He/⁴He值为 1.1×10^{-5} ^[44]。计算结果表明恰探1井天然气的幔源氦比例为14.6%,阿克1井的幔源氦比例为6.8%(表2)。

综上所述,N₂、CO₂等非烃气体和稀有气体He的组分和同位素证据均表明恰探1井天然气有一定比例的无机气混入,该结果印证了天然气成因类型综合判识的结果。因此,恰探1井天然气主要来源于二叠系棋盘组烃源岩,同时有一定比例的无机烃类气和非烃气体混入。

5 结论

(1) 基于区域地质背景、天然气烷烃组分、烷烃碳/氢同位素组成等综合判识认为塔西南山前坳陷恰探1井天然气为高一过成熟阶段的煤型气。

(2) 根据烃源岩分布及其有机质丰度、类型、热成熟度等综合分析表明,恰探1井天然气可能主要来源于二叠系棋盘组烃源岩,还有可能混入了少量碳同位素更重的无机成因烃类气。

(3) 结合烃源岩特征、非烃气体(N₂、CO₂)及稀有气体He的组分和同位素证据表明,恰探1井天然气有一定比例的无机气体混入,氦同位素组成反映了幔源氦比例约14.6%,其氦含量已达到富氦天然气(He $\geq 1\,000 \times 10^{-6}$)标准。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献/Authors' Contributions

黄礼、吕惠贤、谢小敏、孟强参与实验设计;赵颖、黎立、肖七林、王张虎、陈果完成实验操作;黄礼、孟强参与论文写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

The experiment was designed by HUANG Li, LÜ Huixian, XIE Xiaomin, and MENG Qiang. The experimental operation was completed by ZHAO Ying, LI Li, XIAO Qilin, WANG Zhanghu, and CHEN Guo. The manuscript was drafted and revised by HUANG Li and MENG Qiang. All authors have read the last version of the paper and consented to its submission.

参考文献:

- [1] 何登发,李洪辉.塔西南坳陷油气勘探历程与对策[J].勘探家,1998,3(1):37-42.
HE Dengfa, LI Honghui. History and counter measures of petroleum exploration in Tarim South-west Depression [J]. Petroleum Explorationist, 1998, 3(1): 37-42.
- [2] 金之钧,吕修祥.塔西南前陆盆地油气资源与勘探对策[J].石油与天然气地质,2000,21(2):110-113.
JIN Zhijun, LÜ Xiuxiang. Hydrocarbon resources and exploration strategy of foreland basins in southwest Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(2): 110-113.
- [3] 胡剑风,郑大明,胡轩,等.塔西南前陆盆地战略接替区天然气勘探的突破[J].中国石油勘探,2002,7(1):74-78.
HU Jianfeng, ZHENG Duoming, HU Xuan, et al. Breakthrough of gas exploration in Southwest Tarim Foreland Basin: the strategic replacement area of CNPC and TOC [J]. China Petroleum Exploration, 2002, 7(1): 74-78.
- [4] 何登发,李德生,何金有,等.塔里木盆地库车坳陷和西南坳陷油气地质特征类比及勘探启示[J].石油学报,2013,34(2):201-218.
HE Dengfa, LI Desheng, HE Jinyou, et al. Comparison in petroleum geology between Kuqa Depression and Southwest Depression in Tarim Basin and its exploration significance [J]. Acta Petrolei

- Sinica, 2013, 34(2): 201-218.
- [5] 王招明, 赵孟军, 张水昌, 等. 塔里木盆地西部阿克莫木气田形成初探[J]. 地质科学, 2005, 40(2): 237-247.
WANG Zhaoming, ZHAO Mengjun, ZHANG Shuichang, et al. A preliminary study on formation of Akemo Gas field in the Kashi Sag, Tarim Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2005, 40(2): 237-247.
- [6] 莫午零, 林潼, 张英, 等. 西昆仑山前柯东—柯克亚构造带油气来源及成藏模式[J]. 石油实验地质, 2013, 35(4): 364-371.
MO Wuling, LIN Tong, ZHANG Ying, et al. Hydrocarbon origin and accumulation model of Kedong-Kekeya tectonic belt in piedmont of West Kunlun Mountain[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(4): 364-371.
- [7] 王清华, 杨海军, 李勇, 等. 塔西南山前地区恰探1井石炭系—二叠系重大突破与勘探前景[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(4): 34-45.
WANG Qinghua, YANG Haijun, LI Yong, et al. Major breakthrough in the Carboniferous-Permian in well Qiatan 1 and exploration prospect in the piedmont southwestern Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(4): 34-45.
- [8] 赵孟军, 张水昌. 塔里木盆地天然气成因类型及成藏条件[J]. 中国石油勘探, 2001, 6(2): 27-31.
ZHAO Mengjun, ZHANG Shuichang. Genetic classification of natural gas and conditions of gas reservoir formation in Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2001, 6(2): 27-31.
- [9] 张秋茶, 王福焕, 肖中尧, 等. 阿克1井天然气气源探讨[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(6): 484-487.
ZHANG Qiucha, WANG Fuhuan, XIAO Zhongyao, et al. The discussion of natural gas source in well Ake 1[J]. Natural Gas Geoscience, 2003, 14(6): 484-487.
- [10] 王东良, 李勇, 敬兵, 等. 柯克亚原油、天然气差异与成因分析[C]//中国地球物理学会第22届年会论文集. 成都: 中国地球物理学会, 2006: 453.
WANG Dongliang, LI Yong, JING Bing, et al. Analysis of differences and causes of Kekeya crude oil and natural gas[C]//Proceedings of the 22nd Annual Meeting of the Chinese Geophysical Society. Chengdu: Chinese Geophysical Society, 2006: 453.
- [11] WU Xiaqi, TAO Xiaowan, HU Guoyi. Geochemical characteristics and source of natural gases from Southwest Depression of the Tarim Basin, NW China[J]. Organic Geochemistry, 2014, 74: 106-115.
- [12] 韩文学, 陶士振, 胡国艺, 等. 塔西南坳陷山前带天然气地球化学特征和成因[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(1): 121-130.
HAN Wenxue, TAO Shizhen, HU Guoyi, et al. Geochemical characteristics of natural gas and its genesis in piedmont zone of southwest Tarim Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(1): 121-130.
- [13] 刘伟, 杨飞, 吴金才, 等. 喀什凹陷北缘阿克莫木气田气源探讨[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(3): 486-494.
LIU Wei, YANG Fei, WU Jincan, et al. The discussion on natural gas source in Akmonu Gasfield, northern margin of Kashi Sag[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(3): 486-494.
- [14] 戴金星, 宋岩, 张厚福. 中国大中型气田形成的主要控制因素[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 1996, 26(6): 481-487.
DAI Jinxing, SONG Yan, ZHANG Houfu. Main factors controlling the foundation of medium-giant gas fields in China[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 1996, 26(6): 481-487.
- [15] 戴金星, 于聪, 黄士鹏, 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.
- [16] 龚德瑜, 房忧琛, 肖中尧. 柯克亚凝析气田油气来源再认识: 一个复杂地球化学过程下的油气源对比实例[C]//2015学术年会论文摘要汇编(中册). 西安: 中国地质学会, 2015: 369-370.
GONG Deyu, FANG Chenchen, XIAO Zhongyao. Restudy on the oil and gas origins in the Kekeya gas condensates field, Northwest China: a case study of hydrocarbon source correlation under sophisticated geochemical processes[C]//Abstract compilation of papers at the 2015 Annual Meeting of the Geological Society of China (Volume 2). Xi'an: Chinese Geological Society, 2015: 369-370.
- [17] 刘得光, 王绪龙. 塔里木盆地西南坳陷油气源研究[J]. 沉积学报, 1997, 15(2): 35-39.
LIU Deguang, WANG Xulong. Oil and gas source study in the southwest depression, Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(2): 35-39.
- [18] 侯读杰, 肖中尧, 唐友军, 等. 柯克亚油气田混合来源天然气的地球化学特征[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(6): 474-479.
HOU Dujie, XIAO Zhongyao, TANG Youjun, et al. Geochemical characterization of mixing natural gas in Kekeya Field, Tarim Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2003, 14(6): 474-479.
- [19] 唐友军, 侯读杰, 肖中尧, 等. 柯克亚地区天然气的成因[J]. 海洋石油, 2006, 26(2): 18-22.
TANG Youjun, HOU Dujie, XIAO Zhongyao, et al. Geochemical characteristics and origin of gas in Kekeya field[J]. Offshore Oil, 2006, 26(2): 18-22.
- [20] 程晓敢, 黄智斌, 陈汉林, 等. 西昆仑山前冲断带断裂特征及构造单元划分[J]. 岩石学报, 2012, 28(2): 2591-2601.
CHENG Xiaogan, HUANG Zhibin, CHEN Hanlin, et al. Fault characteristics and division of tectonic units of the thrust belt in the front of the West Kunlun mountains[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(2): 2591-2601.
- [21] 曲国胜, 李亦纲, 李岩峰, 等. 塔里木盆地西南前陆构造分段及其成因[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2005, 35(3): 193-202.
QU Guosheng, LI Yigang, LI Yanfeng, et al. Segmentations of foreland belts and their tectonic mechanism in the southwest Tarim Basin[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2005, 35(3): 193-202.
- [22] 贾承造. 中国中西部前陆冲断带构造特征与天然气富集规律[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(4): 9-15.
JIA Chengzao. Foreland thrust fold belt features and gas accumulation in Midwest China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(4): 9-15.
- [23] 赵文智, 张光亚. 被动大陆边缘演化与油气地质: 以塔里木盆地西南地区为例[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007: 1-155.
ZHAO Wenzhi, ZHANG Guangya. Petroleum geology and evolu-

- tion of passive continental margin; example of southwest Tarim Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007: 1-155.
- [24] 杨威,王清华,王媛,等.塔里木盆地玛扎塔格构造带石炭系层序地层和储集层特征[J].新疆石油地质,1999,20(3): 235-238.
YANG Wei, WANG Qinghua, WANG Yuan, et al. Sequence stratigraphy and reservoir characteristics of Carboniferous in Mazartag structural belt, Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1999, 20(3): 235-238.
- [25] 赵孟军,王招明,宋岩,等.塔里木盆地喀什凹陷油气来源及其成藏过程[J].石油勘探与开发,2005,32(2): 50-54.
ZHAO Mengjun, WANG Zhaoming, SONG Yan, et al. Source and accumulation of oil and gas in Kashi Sag, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(2): 50-54.
- [26] 孟强,史江龙,赵恒,等.鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组米探1井天然气成因与来源[J].天然气地球科学,2023, 34(10): 1696-1709.
MENG Qiang, SHI Jianglong, ZHAO Heng, et al. Genesis and source of natural gas in well Mitan-1 of Ordovician Majiagou Formation, middle-eastern Ordos Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(10): 1696-1709.
- [27] 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.
- [28] LIU Quanyou, WU Xiaoqi, WANG Xiaofeng, et al. Carbon and hydrogen isotopes of methane, ethane, and propane: a review of genetic identification of natural gas[J]. Earth-Science Reviews, 2019, 190: 247-272.
- [29] 戴金星,戚厚发,郝石生.天然气地质学概论[M].北京:石油工业出版社,1989.
DAI Jinxing, QI Houfa, HAO Shisheng. Introduction to natural gas geology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989.
- [30] 徐永昌.天然气成因理论及应用[M].北京:科学出版社,1994: 1-414.
XU Yongchang. Genetic theory of natural gases and its application[M]. Beijing: Science Press, 1994: 1-414.
- [31] 王先彬,李春园,陈践发,等.论非生物成因天然气[J].科学通报,1997,42(12): 1233-1241.
WANG Xianbin, LI Chunyuan, CHEN Jianfa, et al. Mantle-derived methane homologue and helium in natural gas from Songliao Basin, China[J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(1): 142.
- [32] CHUNG H M, GORMLY J R, SQUIRES R M. Origin of gaseous hydrocarbons in subsurface environments; theoretical considerations of carbon isotope distribution[J]. Chemical Geology, 1988, 71(1/3): 97-104.
- [33] WHITICAR M J. Stable isotope geochemistry of coals, humic kerogens and related natural gases[J]. International Journal of Coal geology, 1996, 32(1/4): 191-215.
- [34] STAHL W J. Carbon and nitrogen isotopes in hydrocarbon research and exploration[J]. Chemical Geology, 1977, 20: 121-149.
- [35] SCHOELL M. The hydrogen and carbon isotopic composition of methane from natural gases of various origins[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1980, 44(5): 649-661.
- [36] 沈平,申歧祥,王先彬,等.气态烃同位素组成特征及煤型气判识[J].中国科学(B辑),1987,17(6): 647-656.
SHEN Ping, SHEN Qixiang, WANG Xianbin, et al. Characteristics of isotope composition of gaseous hydrocarbons and identification of coal-type gas[J]. Science in China (Series B), 1988, 31(6): 734-747.
- [37] 刘文汇,徐永昌.煤型气碳同位素演化二阶段分馏模式及机理[J].地球化学,1999,28(4): 359-366.
LIU Wenhui, XU Yongchang. A two-stage model of carbon isotopic fractionation in coal-gas[J]. Geochimica, 1999, 28(4): 359-366.
- [38] 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.
- [39] JENDEN P D, DRAZAN D J, KAPLAN I R. Mixing of thermogenic natural gases in northern Appalachian Basin[J]. AAPG Bulletin, 1993, 77(6): 980-998.
- [40] ROONEY M A, CLAYPOOL G E, CHUNG H M. Modeling thermogenic gas generation using carbon isotope ratios of natural gas hydrocarbons[J]. Chemical Geology, 1995, 126(3/4): 219-232.
- [41] MENG Qiang, WANG Xiaofeng, SHI Baoguang, et al. The ¹³C-depleted methane in terrigenous shale gas: a case study in the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Marine and Petroleum Geology, 2022, 141: 105688.
- [42] WHITICAR M J. Correlation of natural gases with their sources[M]// MAGOON L B, DOW W G. The petroleum system: from source to trap. Tulsa: AAPG, 1994: 261-284.
- [43] WANG Xiaofeng, LIU Wenhui, SHI Baoguang, et al. Hydrogen isotope characteristics of thermogenic methane in Chinese sedimentary basins[J]. Organic Geochemistry, 2015, (83/84): 178-189.
- [44] 徐永昌,沈平,刘文汇,等.天然气中稀有气体地球化学[M].北京:科学出版社,1998: 1-227.
XU Yongchang, SHEN Ping, LIU Wenhui, et al. Geochemistry of rare gas in natural gas[M]. Beijing: Science Press, 1998: 1-227.
- [45] 陈践发,朱岳年.天然气中氮的来源及塔里木盆地东部天然气中氮地球化学特征[J].天然气地球科学,2003,14(3): 172-176.
CHEN Jianfa, ZHU Yuenian. The origin of molecular nitrogen in natural gas and geochemical characters of molecular nitrogen in natural gas from east part of Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2003, 14(3): 172-176.
- [46] 李谨,李志生,王东良,等.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(S1): 102-111.
LI Jin, LI Zhisheng, WANG Dongliang, et al. Geochemical characteristics and N₂ source of nitrogen riched natural gas in Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(S1): 102-111.
- [47] 陈践发,刘凯旋,董勃伟,等.天然气中氮资源研究现状及我国氮资源前景[J].天然气地球科学,2021,32(10): 1436-1449.
CHEN Jianfa, LIU Kaixuan, DONG Qingwei, et al. Research status of helium resources in natural gas and prospects of helium resources in China[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(10): 1436-1449.